

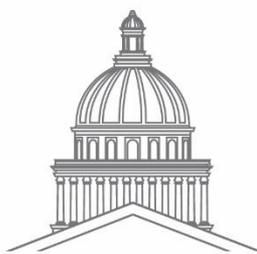
Université Paris II-Panthéon-Assas

École doctorale d'Économie, Gestion, Information Et
Communication

Université Mohammed VI Polytechnique (UM6P)
EMINES – School of Industrial Management

Thèse de doctorat en Sciences de gestion
Soutenue le 17/11/2021

Une approche de « Reverse Blending » pour la personnalisation de masse dans les industries chimiques : le cas de la chaîne logistique de I'OCP



UNIVERSITÉ PARIS II
PANTHÉON-ASSAS

Latifa BEHAMOU

Direction : Pr. Pierre FÉNIÈS, LARGEPA, Université Paris 2 Panthéon-Assas

Co-direction : Pr. Vincent Giard, Professeur émérite, Université Paris-Dauphine

Jury

Pr. Samir Lamouri, ENSAM, Rapporteur

Pr. Gilles Paché, Aix-Marseille Université, Rapporteur

Pr. Frank Straube, TU-Berlin, Suffragant

Pr. Nathalie Guibert, Université Paris 2, Suffragant

Pr. Nicolas Cheimanoff, Emines, Um6p, Suffragant

Thèse de Doctorat / Novembre 2021

Avertissement

La Faculté n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans cette thèse ; ces opinions doivent être considérées comme propres à leur auteur.

Principales abréviations¹

RI : Recherche Intervention

PM : Personnalisation de Masse

DR : Différenciation Retardée

RB : Reverse Blending

ERB : Extended Reverse Blending

BC : Base Canonique

CBC : Composite de la Base Canonique

RD : Réduction de la Diversité

UBC : Utilisation de la Base Canonique

PP : Problème de Pooling

PA : Pooling Adapté

SC : Supply Chain

PDP : Point de Différenciation du Produit

MTS : Make-To-Stock

MTO : Make-To-Order

TSP : Triple Super Phosphate

DAP : Di-Ammonium Phosphate (Engrais NP)

MAP : Mono-Ammonium Phosphate

UE : Union Européenne

¹ En l'absence d'une traduction officielle partagée par la communauté scientifique française de certains termes (par exemple, blending, pooling,...), l'utilisation de termes anglo-saxons a été privilégiée dans cette thèse.

Remerciements

En tout premier lieu, je tiens à remercier Dieu qui m'a accordé d'innombrables bénédictions, qui m'a donné la capacité de mener à bien cette thèse et qui a mis sur mon chemin des personnes extraordinaires ayant partagé avec moi leur temps, leur enthousiasme, leurs connaissances et leur amitié. Je remercie toutes ces personnes en souhaitant qu'elles se sentiront honorées par ce travail de recherche qui, je l'espère, sera utile pour le développement durable de l'agriculture africaine.

Mes plus sincères remerciements vont à mes chers directeurs de thèse, les professeurs Pierre FÉNIÈS et Vincent GIARD.

Professeur FÉNIÈS, je vous remercie de m'avoir accepté en tant que *PhD student*, pour tout le temps que vous m'avez consacré, pour les idées et discussions intéressantes que nous avons partagées lors de chacune de vos visites à l'EMINES, pour avoir financé et permis ma participation à plusieurs conférences internationales, pour votre bienveillance en vous souciant toujours de mon bien-être et pour avoir fait de moi une personne autonome tout au long de ce travail de recherche.

Professeur GIARD, je ne pourrai jamais exprimer à quel point je vous suis reconnaissante pour le grand soutien que vous m'avez apporté ces dernières années. Je tiens à vous exprimer ma profonde gratitude pour votre disponibilité sans faille, pour vos conseils avisés et pour toutes les contributions précieuses que vous avez apportées à cette thèse. L'approche du « Reverse Blending » n'aurait jamais vu le jour sans vous et c'est grâce à vous que ce travail de recherche a pu être mené à bien. Un grand merci à vous encore une fois, vous êtes pour moi un exemple à suivre.

Ces dernières années de thèse se sont déroulées dans un environnement stimulant et convivial, en grande partie grâce aux professeurs Nicolas CHEIMANOFF, directeur de l'EMINES, et Frédéric FONTANE, directeur des études supérieures et de la recherche de l'EMINES, que je tiens à remercier infiniment pour leur support, leur accompagnement continu et leurs encouragements. Malgré leurs agendas bien chargés, ils ont été à l'écoute, disponibles et de très bons conseils. Je remercie d'ailleurs l'EMINES de m'avoir sélectionnée pour la bourse doctorale UM6P/OCP qui m'a permis de réaliser mes travaux de recherche dans les meilleures conditions.

Des remerciements spéciaux sont adressés à Mehdi KHOULOU, responsable de l'entité engrais au sein du département R&D de Jorf Lasfar, pour sa collaboration durant cette recherche. Je lui suis très reconnaissante pour ses conseils, ses sources d'informations, sa gentillesse et pour avoir partagé ses connaissances chimiques.

Je tiens à remercier les professeurs Lamouri et Paché qui ont accepté d'être rapporteurs de ce présent manuscrit. Je remercie également tous les autres membres du jury qui m'ont fait l'honneur de juger de la pertinence de cette thèse : Pr. Straube, Pr. Guibert et Pr. Cheimanoff.

Un grand merci à mes deux prestigieuses universités : Université Mohammed VI Polytechnique et Université Panthéon Assas pour m'avoir accueillie pour mon doctorat et pour avoir financé ma participation à plusieurs conférences internationales. Je remercie tous leurs staffs, principalement ceux de l'EMINES et du LARGEPA, pour leur grande gentillesse et pour avoir toujours été là quand j'en avais besoin.

Je ne pouvais pas terminer ces remerciements sans dire merci à ce qui compte le plus pour moi dans cette vie, ma famille. Je tiens à remercier mes parents, Yamna et Mohamed, pour m'avoir soutenue tout au long de mon parcours académique, pour m'avoir élevée avec la passion de la science et pour m'avoir toujours encouragée à poursuivre mes objectifs. Je voudrais également remercier mes sœurs Hanane et Fedwa et mon frère Taieb et sa femme Hanane pour tout leur amour, leurs encouragements et leur compréhension lorsque je ne pouvais pas être là lors d'événements spéciaux. Je voudrais aussi remercier ma tante Rabiaa pour la personne merveilleuse qu'elle est et pour avoir toujours pris de mes nouvelles. Je la remercie, ainsi que sa petite famille, pour tout leur soutien durant mon séjour en France. Enfin, je tiens à exprimer ma gratitude à tous mes amis qui m'ont apporté leur soutien et avec qui j'ai eu des heures de conversation quand je traversais des moments difficiles. Un grand merci à toutes ces personnes.

Dédicaces

Je dédie cette thèse à tous ceux et celles qui se sentiront honorés par l'aboutissement de ce travail de recherche et à la mémoire de mon grand-père Hussein qui a toujours souhaité me voir docteur mais n'a malheureusement pas pu partager cette joie avec moi.

Résumé

Depuis quelques décennies, la production de masse de produits personnalisés (mass customization) est une réalité dans l'industrie manufacturière (production industrielle discrète). Elle a été rendue possible par la conjonction d'efforts portant sur la standardisation, la commonalité, la conception modulaire et celle de plateformes permettant d'assembler facilement des modules venant d'ensembles exclusifs de modules alternatifs (par exemple, moteurs, boîtes de vitesse...). Dans l'industrie manufacturière, la différenciation retardée, qui permet de fournir au client le produit qu'il souhaite (production à la commande), dans un ensemble pouvant comporter des centaines de milliers de produits possibles, est réalisée au niveau des lignes d'assemblage. Cette solution n'est pas envisageable dans la production de process (processus de flux) qui transforme des flux de matières premières pour obtenir des lots de produits homogènes se présentant sous forme de poudres, de granules ou de liquides. Une très forte diversité pour ce type de produits ne peut être obtenue en usine car elle implique la fabrication successive de lots de produits différents. Dans ce contexte, la diversité offerte est limitée en raison de l'inertie temporelle que cette production séquentielle implique. De plus, la diversité croissante des flux à produire et à transporter empêche toute économie d'échelle. Cette situation est celle que rencontre OCP, leader mondial dans le secteur des engrais, dont la mission est aujourd'hui de promouvoir une agriculture durable en offrant à ses clients des formules d'engrais adaptées aux besoins de leurs sols et de leurs cultures ; tout écart par rapport à la formule recommandée pour un couple « sol - culture », se traduit par une perte de productivité et/ou un appauvrissement des sols. Nous proposons une approche innovante à ce problème, qualifiée de Reverse Blending, qui repose sur une logique de personnalisation de masse à travers une différenciation retardée réalisée à proximité du client final (l'agriculteur) et non sur les lieux de production. C'est une extension du problème de blending (problème de mélange) dans laquelle les inputs ne sont pas préexistants et doivent être définis, en nombre et en composition, simultanément à leur utilisation pour produire les engrais désirés. Les inputs font ici référence à des produits semi-finis communs dont les combinaisons possibles de mélanges et doivent satisfaire une grande variété de fertilisants personnalisés. Le modèle d'optimisation de ce nouveau problème repose sur un programme quadratique visant à minimiser le nombre des inputs pour une massification maximale des flux.

Grâce à cette massification de flux, le Reverse blending pourrait être une méthode efficace pour fournir des engrais personnalisés qui répondent aux besoins d'une agriculture durable tout en réduisant les problèmes de production et de transport. Enfin, les gains de performance induits par le Reverse Blending ne jouent pas seulement sur la rentabilité de l'entreprise : ses conséquences sur une agriculture durable à coûts maîtrisés ont une dimension éthique qui relève de la responsabilité sociétale des entreprises (RSE) de ce secteur, en raison des enjeux de survie alimentaire de l'humanité dans les prochaines décennies.

Mots-clés : Personnalisation de masse, différenciation retardée, gestion de la diversité, chaîne logistique continue, Reverse Blending, conception de produits, restructuration de la chaîne logistique, optimisation, agriculture durable.

Abstract

Mass customization has been a reality in the manufacturing industry (production of objects) for a few decades, the automobile being the most emblematic example. It has been made possible by a combination of efforts focused on standardization, commonality, modular design and platforms enabling the easy assembly of different alternative modules (e.g. engines, gearboxes...). In the manufacturing industry, delayed differentiation, which makes it possible for the customer to choose the product he or she wants (make-to-order production), from a set that can include hundreds of thousands of possible products, is carried out on the assembly lines. This solution is not conceivable in process production (flow processes), which transforms raw material flows into batches of homogeneous products presented in the form of powders, granules or liquids. A very high diversity for this type of products cannot be obtained within the factory because it implies the successive manufacturing of different product batches, which limits the diversity offered because of the temporal inertia involved by this sequential production. In this context, the growing diversity of flows to be produced and transported prevents any economy of scale. This is the same situation faced by OCP Group, a world leader in the fertilizer industry, whose mission today is to promote sustainable agriculture by offering its customers fertilizer formulas that are adapted to the needs of their soils and their crops; any deviation from the recommended formula for a "soil-crop" pair, resulting in a loss of productivity and/or soil impoverishment. We propose an innovative approach to this problem, called Reverse Blending, based on a logic of mass customization through delayed differentiation carried out near the final customer (the farmer) and not at the production site. It is an extension of the blending problem in which the inputs are not pre-existing and must be

defined, in number and composition, simultaneously with their use to produce the desired fertilizers. The inputs here refer to common semi-finished products whose possible combinations of mixtures must satisfy a wide variety of customized fertilizers. The optimization model of this new problem is based on a quadratic program aiming at minimizing the number of inputs for a maximum massification of the flows.

Through this massification of flows, Reverse blending could be an effective method to provide customized fertilizers that meet the needs of sustainable agriculture while reducing production and transportation problems. Finally, the performance gains induced by Reverse Blending do not only concern the company's financial situation: its consequences on a sustainable agriculture under controlled costs have an ethical dimension which is part of the corporate social responsibility (CSR) of this sector, given the stakes involved in the survival of mankind in the coming decades.

Keywords : Mass customization, delayed differentiation, diversity management, continuous supply chain, reverse blending, product design, supply chain restructuring, optimization, sustainable agriculture.

Table des Matières

Introduction Générale	18
1 Contexte et objectif du travail de recherche	18
2 Méthodologie de recherche	19
2.1 Première étape. Formulation de la problématique de recherche	21
2.2 Deuxième étape. État de l'art et proposition d'une organisation industrielle basée sur la personnalisation de masse	25
2.3 Troisième étape. Présentation de la solution du Reverse Blending	27
2.4 Quatrième étape. Évaluation du Reverse Blending et Présentation des connaissances généralisables sur les chaînes logistiques de l'industrie chimique.	29
3 Structure de la thèse	30
4 Éléments de validation et de diffusion de notre travail de recherche	32
Chapitre 1. Étude du domaine : Secteur des engrais	35
Introduction	35
1 Généralités sur les engrais	35
1.1 Définition des engrais	36
1.2 Types des engrais	39
1.3 Engrais personnalisés	43
1.4 Méthodes de fabrication des engrais	44
2 Industrie des engrais	52
2.1 Caractéristiques du marché des engrais africain	53
2.2 Caractéristiques du marché des engrais marocain.....	58
Conclusion.....	69
Chapitre 2. État de l'art et Positionnement du travail de recherche	73
Introduction	73
Partie I : État de l'art et Proposition d'une nouvelle organisation basée sur la personnalisation de masse	
1 Revue de littérature	74
1.1 Diversité.....	74
1.2 Personnalisation de masse.....	77
1.3 Différenciation retardée	90
1.4 Synthèse	95
2 Proposition d'une nouvelle organisation industrielle basée sur la personnalisation de masse.....	96
Partie II : Positionnement de la personnalisation de masse impliquée par le Reverse Blending	

1	Positionnement théorique et scientifique.....	100
2	Originalité et positionnement industriel	106
2.1	Méthodologie de la recherche bibliographique.....	106
2.2	Revue de littérature	107
	Conclusion.....	122
	Chapitre 3. Standard Reverse Blending : Un nouveau problème de mélange mono-étage	126
	Introduction	126
1	Fondements du Reverse Blending Standard.....	127
1.1	Sur le plan « Recherche Opérationnelle ».....	127
1.2	Sur le plan industriel	129
1.3	Méthode de résolution : Programmation quadratique non-convexe	130
2	Revue de littérature	132
2.1	Problème du blending classique.....	132
2.2	Positionnement du Reverse Blending en tant que problème de blending mono-étage	145
3	Modélisation mathématique	146
3.1	Modèle de blending.....	147
3.2	Modèle de Reverse blending.....	148
3.3	Modèle d'Utilisation de la Base Canonique (UBC).....	151
3.4	Modèle de la Réduction de la Diversité (RD).....	153
4	Études de cas	156
4.1	Réduction de la diversité par le Reverse Blending	156
4.2	Analyse de la réduction potentielle des engrais produits par les principaux producteurs mondiaux	165
	Conclusion.....	175
	Chapitre 4. Extended Reverse Blending : une approche hybride.....	181
	Introduction	181
1	Fondements du Reverse Blending Étendu.....	181
2	Revue de littérature	184
2.1	Problème de Pooling classique	184
2.2	Analyse de la littérature	185
2.3	Positionnement de ERB en tant que problème de mélange à deux étages	206
3	Modélisation mathématique	208
3.1	Modèle de Pooling	208

3.2 Modèle du Pooling Adapté	210
4 Études de cas	214
4.1 Objectif	214
4.2 Jeu de données	215
4.3 Résultats et Commentaires.....	216
Conclusion.....	218
Chapitre 5. Étude de l'impact du Reverse Blending sur la chaîne logistique	223
Introduction	223
1 Organisation de la chaîne logistique et Reverse Blending	223
1.1 Configuration industrielle du groupe OCP avant implémentation du Reverse Blending	224
1.2 Configuration industrielle du groupe OCP après implémentation du Reverse Blending.....	230
2 Avantages potentiels du Reverse Blending	240
2.1 Avantages stratégiques.....	240
2.2 Avantages opérationnels	242
2.3 Impact du Reverse Blending sur la gestion de la diversité produite par OCP à Jorf	243
3 Limites potentielles du Reverse Blending.....	253
Conclusion.....	257
Conclusion Générale	261

Liste des Figures

Figure 1 : Évolution du rendement en fonction de la concentration du sol en nutriments (<i>source : (Incrocci et al., 2017)</i>).....	18
Figure 2: Méthodologie de recherche.....	21
Figure 3: Fenêtre des recommandations du conseiller agricole Fertimap.....	23
Figure 4 : Comparaison des recommandations de fertilisation de deux localités géographiques voisines.....	24
Figure 5 : Organisation actuelle de la chaîne logistique des engrais chez le Groupe OCP.....	25
Figure 6 : Proposition d'une nouvelle organisation industrielle basée sur la personnalisation de masse	27
Figure 7 : Principe de l'approche du Reverse Blending	28
Figure 8 : Comparaison entre la supply chain de l'OCP et celle basée sur le Reverse Blending	29
Figure 9 : Structure de la thèse.....	30
Figure 10 : Prévisions de la FAO : Évolution de la croissance démographique et de la superficie des terres arables entre 1998 et 2050 (<i>source : Fertilizers Europe</i>)	35
Figure 11 : Les différentes branches d'activité au service de l'agriculture.....	36
Figure 12 : Principes de fabrication des engrais (<i>source: UNIFA</i>).....	45
Figure 13 : a) Structure de la granule d'un engrais mélangé b) Structure de la granule d'un engrais complexe chimique (<i>source: site officiel de FEECO</i>).....	47
Figure 14 : Marché mondial des engrais en 2019 (<i>source : Mordor Intelligence</i>)	52
Figure 15 : Insécurité alimentaire en Afrique (<i>source : Jeune Afrique</i>)	54
Figure 16 : Part de certaines régions dans la consommation mondiale d'engrais en 2015 (<i>source : FAO, Gro Intelligence</i>)	55
Figure 17 : Évolution de la consommation des engrais au Maroc (<i>source : Banque mondiale</i>)	60
Figure 18 : Surface agricole par taille d'exploitation en 2007 (<i>source : rapport OCP</i>).....	61
Figure 19 : Réseau de distribution d'engrais au Maroc : a) Sites de production ; b) Points de vente (<i>source : Intranet de l'OCP</i>)	63
Figure 20 : Nouvelle configuration industrielle basée sur la personnalisation de masse.....	99
Figure 21 : Positionnement du Reverse Blending en tant qu'outil de la personnalisation de masse	105

Figure 22 : Méthodologie de la recherche bibliographique	107
Figure 23 : Schéma descriptif du modèle de RB.....	148
Figure 24 : Schéma descriptif du modèle de UBC.....	151
Figure 25 : Schéma descriptif du modèle de RD.....	154
Figure 26 : Schéma descriptif de l'approche de l'ERB	183
Figure 27 : Schéma simplifié de pooling	185
Figure 28 : Site chimique de Jorf Lasfar (<i>source : Bara et al., 2020</i>)	225
Figure 29 : Structure industrielle de la supply chain de l'OCP depuis la valorisation chimique jusqu'à l'utilisation des engrais.....	227
Figure 30 : Production journalière de l'OCP sur sept lignes de production en 2019 (<i>source : OCP - Axe Nord de Jorf</i>).....	228
Figure 31 : Quelques scénarios d'activités liées au changement de formule d'engrais (<i>source : adapté de Bara et al., 2020</i>).....	229
Figure 32 : État visuel d'un hangar de stockage à l'axe nord de Jorf à 7H00 du 06/06/2019 (<i>source : OCP - Axe Nord de Jorf</i>)	230
Figure 33 : Les cinq composantes principales d'une chaîne logistique basée sur le Reverse Blending	232
Figure 34 : Évolution du nombre d'engrais OCP depuis 2000.....	244
Figure 35 : Production actuelle de l'OCP vs. Production basée sur les CBC	249
Figure 36 : Part des engrais dans la production mensuelle globale de l'OCP	250
Figure 37 : Part des CBC dans la production mensuelle globale de l'OCP.....	251
Figure 38 : Proposition de l'affectation des CBC aux sept lignes de production de l'OCP ..	251
Figure 39 : Processus d'application du RB et les domaines d'expertise associés.....	253
Figure 40 : Démarche à suivre pour un conseil en fertilisation optimal	267

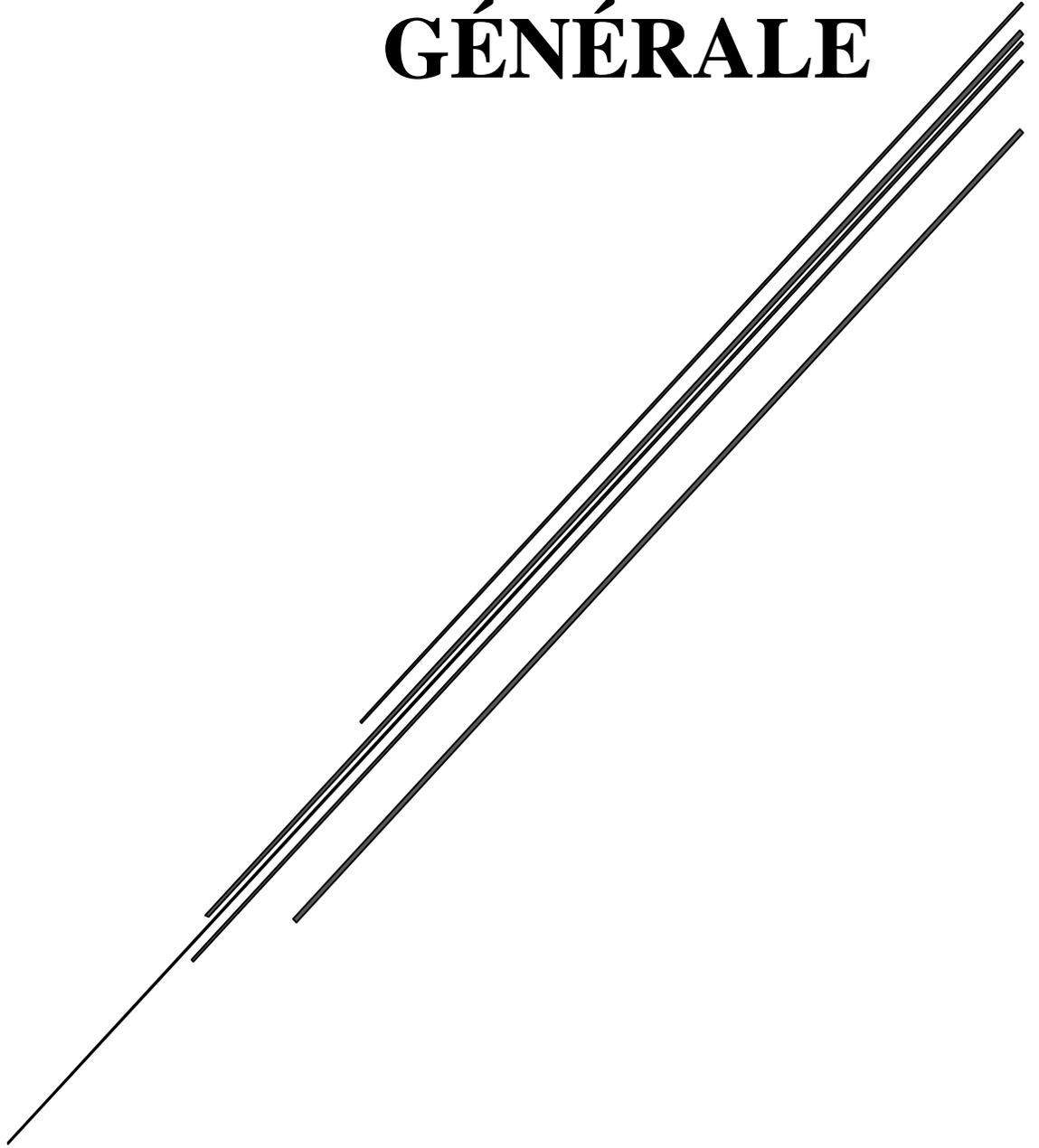
Liste des Tableaux

Tableau 1. Exemples d'incompatibilités chimiques (adapté de l'ONU-IDO, 1998).....	51
Tableau 2. Programme industriel 2008-2030 de l'OCP concernant la valorisation chimique (source : <i>Rapport OCP</i>)	62
Tableau 3. Grille d'analyse des articles sur la personnalisation.....	121
Tableau 4. Grille d'analyse des articles sur le blending mono-étage	141
Tableau 5. Grille d'analyse des articles sur le blending des engrais	143
Tableau 6. Extrait de l'échantillon des 700 NPK fourni par Fertimap	157
Tableau 7. La composition des formules d'engrais (β_{qj}) et les demandes (D_j)	159
Tableau 8. Composition optimale des CBC du RB (α_{ci})	160
Tableau 9. Les quantités optimales à prélever des CBC du RB (x_{ij})	161
Tableau 10. Les spécifications chimiques β_c des 50 engrais NPK	163
Tableau 11. Extrait des compositions optimales de CBC à utiliser pour répondre aux caractéristiques chimiques des 50 engrais (solution de UBC)	164
Tableau 12. Les engrais vendus par les dix plus grands producteurs d'engrais au monde	169
Tableau 13. Composition des 33 inputs utilisés pour produire tous les $J=142$ engrais.....	170
Tableau 14. Extrait des quantités optimales à prélever des 33 inputs utilisés pour satisfaire les 142 engrais ((solution de RD)	171
Tableau 15. Composition optimale des 16 CBC nécessaires pour répondre aux 142 engrais commercialisés (en %)	172
Tableau 16. Extrait des quantités optimales à prélever des CBC pour produire les 142 engrais (solution du RB).....	173
Tableau 17. Synthèse du positionnement du RB en tant que problème de blending mono-étage	176
Tableau 18. Tableau comparatif des modèles de quatre variantes du blending mono-étage .	177
Tableau 19. Grille d'analyse des articles sur les problèmes de pooling	205
Tableau 20. Composition des matières composites (γ_{ck}) et de leur matrice d'incompatibilités ($\zeta_{kk'}$).....	215
Tableau 21. Composition optimale des CBC de l'ERB (α_{ci})	216

Tableau 22. Les quantités optimales à prélever des CBC de l'ERB (x_{ij})	217
Tableau 23. Quantités optimales y_{ki} requises pour chaque composite k	218
Tableau 24. Tableau comparatif des modèles de deux variantes du blending double-étages	220
Tableau 25. Principaux composites utilisés dans le secteur des engrais	236
Tableau 26. Programme mensuel de production de l'OCP sur sept lignes de production pour l'année 2019.....	246
Tableau 27. La production annuelle de l'OCP sur sept lignes de production en 2019	247
Tableau 28. Composition optimale des CBC à utiliser pour reproduire la production de l'OCP sur 7 lignes de production en 2019.....	248
Tableau 29. Quantités optimales à prélever de chaque CBC i pour produire chaque engrais de l'OCP j	248

INTRODUCTION

GÉNÉRALE



Introduction Générale

1 Contexte et objectif du travail de recherche

Pour une population mondiale qui est en constante augmentation, nourrir l'humanité est un véritable défi qui doit être relevé dès à présent. Tout pays doit se montrer à la hauteur de ce défi à travers l'amélioration de sa productivité agricole. Les agriculteurs cherchent ainsi à adopter une agriculture raisonnée permettant à la fois d'augmenter la productivité agricole et de conserver, dans le cadre du développement durable, la biodiversité et la fertilité des sols. De tous les facteurs à court terme capables d'augmenter rapidement la production agricole, l'engrais chimique est le facteur qui permet d'atteindre les rendements les plus élevés et les retours sur investissement les plus substantiels (Sharma & Chetani, 2017). Pour une utilisation optimale des engrais, tant sur le plan économique qu'environnemental, il est nécessaire d'appliquer sur chaque parcelle de terre arable l'engrais spécifiquement adapté à ses caractéristiques pédologiques et aux exigences nutritives de la culture à y pratiquer. Cette pratique, connue dans le jargon agricole sous le nom de la "fertilisation raisonnée", vise à obtenir un rendement maximal en maintenant la concentration du sol en nutriments à un niveau optimal pour la plante (une concentration faible impliquerait une plante insuffisamment nourrie, tandis qu'une concentration élevée risquerait de "brûler" la plante et d'endommager la fertilité du sol à long terme (cf. Figure 1)).

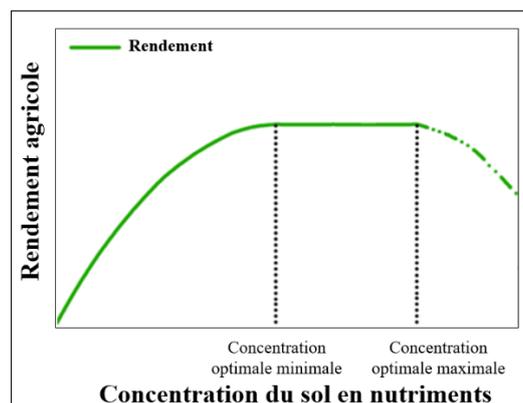


Figure 1 : Évolution du rendement en fonction de la concentration du sol en nutriments (*source* : (Incrocci et al., 2017))

Pleinement conscient des enjeux majeurs de la fertilisation raisonnée, le Groupe OCP, leader mondial dans le secteur des engrais, la place aujourd'hui au cœur de ses priorités pour réussir sa mission : "Nourrir les sols pour nourrir le monde". Aux côtés de l'innovation, de l'éducation

et de l'Afrique, la personnalisation est aujourd'hui l'un des piliers stratégiques clés du groupe. Son principal objectif stratégique est en effet de conquérir de nouveaux clients en leur offrant des solutions d'engrais personnalisées permettant de renforcer la fertilité des sols et de créer ainsi un avenir plus durable dans le monde entier, et notamment en Afrique. D'ailleurs, tout au long de ce mémoire, l'accent est principalement mis sur ce continent, et plus spécifiquement sur le Maroc, pays d'origine de OCP.

Cette thèse, réalisée entre l'université Paris II et l'UM6P, relève d'une recherche partenariale qui s'inscrit dans le cadre d'une « chaire OCP d'optimisation industrielle » rattachée à l'EMINES (School of Industrial Management) ; cette chaire vise à proposer à OCP des solutions innovantes pour l'atteinte de cet objectif. Ces solutions peuvent opérer dans différents domaines : *i)* Commercial, en identifiant la demande potentielle d'engrais personnalisés, *ii)* R&D, en concevant de nouvelles formules d'engrais et de nouveaux procédés chimiques, *iii)* Fabrication, en mettant en place de nouveaux systèmes de production, et *iv)* Management industriel, en proposant de nouvelles structures organisationnelles et en développant de nouvelles méthodes de gestion. Notre recherche doctorale étant en sciences de gestion, plus particulièrement en gestion industrielle, elle se concentre sur ce dernier domaine (i.e. management industriel). Notre recherche présente une transversalité interne aux Sciences de Gestion et une transversalité externe aux sciences de gestion.

Transversalité interne. Ce travail s'inscrit en Management des Opérations et Logistique, mais mobilise des concepts liés au Marketing (différenciation retardée).

Transversalité externe. Ce travail, par la dimension agronomique, chimique et ingénierique, dépasse le cadre traditionnel des Sciences de Gestion et cherche à construire des contenus qui relient des champs normalement éloignés des Sciences de Gestion.

À la différence de la plupart des thèses issues d'une recherche partenariale, celle-ci ne résulte pas d'une problématique ayant été spécifiée par OCP. Elle relève plutôt d'une recherche exploratoire, conduite avec l'accord de OCP, dans la perspective de lui proposer des solutions innovantes pour la concrétisation de sa stratégie qui peut se résumer à la promotion de la fertilisation raisonnée par l'offre de solutions d'engrais personnalisés.

2 Méthodologie de recherche

Ce travail de recherche a débuté avec l'objectif d'apporter une aide à OCP pour devenir leader mondial dans le secteur des engrais sur-mesure. Il convient dans un premier temps de mettre en

évidence les écarts entre la situation actuelle de OCP et la situation souhaitée. Il relève alors d'une épistémologie constructiviste traitant d'une recherche partenariale où la problématique n'est pas clairement exprimée par l'entreprise partenaire. En ce sens, la méthodologie de recherche la plus appropriée à notre travail de recherche est la Recherche Ingénierique (RI). En effet, selon (Chanal et al., 1997), cette dernière convient aux problèmes qui ne sont pas formulés ou mal structurés et qui concernent l'organisation stratégique de systèmes complexes. Plusieurs recherches (Claveau, 1993 ; Schuler, 1994 ; Chanal, 1995, Claveau & Tannery, 1996) associent la RI à des situations problématiques réellement existantes où les gestionnaires ont de la difficulté à exprimer spontanément leurs problèmes et donc à définir les outils de gestion dont ils auraient besoin. Afin de guider les chercheurs en sciences de gestion dans la structuration de leur recherche ingénierique, Chanal et al. (1997) proposent la démarche suivante : *i*) Co-construire le problème avec les acteurs du terrain, *ii*) Articuler les connaissances dans un modèle qui favorise la compréhension des processus complexes dans une perspective de changement organisationnel, *iii*) Concevoir un outil (logiciel, modèle,...) pour améliorer l'appropriation par les praticiens des connaissances et du modèle proposé en collaboration avec le chercheur et *iv*) Évaluer la pertinence des outils conçus et élaborer de nouvelles connaissances procédurales, qui confrontent et enrichissent les connaissances théoriques existantes.

En adaptant cette approche méthodologique au contexte et à l'objectif de notre travail de recherche, nous procédons à la résolution de notre projet de recherche en suivant quatre grandes étapes. Celles-ci sont indiquées dans la Figure 2.

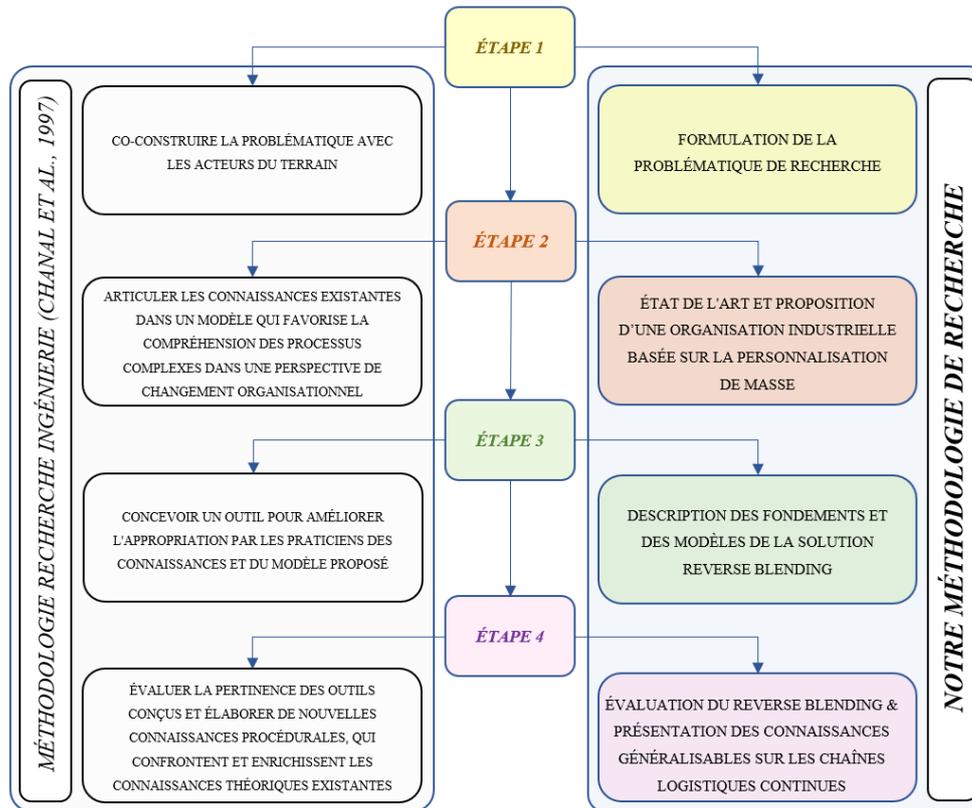


Figure 2: Méthodologie de recherche

La première étape de cette méthodologie, c'est-à-dire la formulation de la problématique de recherche, est abordée dans le cadre de l'introduction générale de ce manuscrit (§2.1). Les étapes 2, 3 et 4 sont traitées dans le corps de ce manuscrit mais nous en présentons une synthèse respectivement dans les sous-sections suivantes (§2.2), (§2.3) et (§2.4).

2.1 Première étape. Formulation de la problématique de recherche

Avec 65 % de terres arables non exploitées, l'Afrique jouit d'un grand potentiel agricole, ce qui en fait une destination attrayante pour les investisseurs. À travers sa filiale « OCP Africa », OCP est en pole position de ces investisseurs et ce, grâce à plusieurs projets visant à accroître la sécurité alimentaire et à y développer des pratiques agricoles durables, dont principalement la fertilisation raisonnée. Cependant, la situation agricole en Afrique reste précaire, avec une productivité agricole bien inférieure à celle du reste du monde. Cela est dû en grande partie à la faible utilisation des intrants agricoles (engrais, semences, produits phytosanitaires...), qui sont les principaux moteurs de la productivité agricole. La situation agricole est globalement moins préoccupante au Maroc grâce aux efforts déployés par le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime (MAPM) et OCP en faveur d'une agriculture performante et durable, mais

il n'en demeure pas moins que les pratiques de l'agriculture durable sont encore très peu répandues au Maroc comme en témoigne la consommation d'engrais qui est nettement en dessous de la moyenne mondiale.

Pour arriver à la véritable cause sous-jacente de cette situation, qui est éventuellement celle à traiter pour que OCP atteigne son objectif en matière de fertilisation raisonnée (notre problématique de recherche), nous abordons d'abord la dimension agronomique (§2.1.1) avant de la décliner en termes de management industriel (§2.1.2).

2.1.1 La dimension agronomique des besoins des clients de l'OCP

Malgré les efforts de l'OCP pour instaurer des pratiques de fertilisation raisonnée sur le marché national, le non-recours aux engrais, et encore moins aux engrais sur-mesure, demeure un frein important au développement de l'agriculture marocaine. En effet, avec l'offre actuelle d'engrais, il n'est pas possible de couvrir les besoins en engrais de tous les agriculteurs. En utilisant l'outil Fertimap, une application de conseil en fertilisation développée par des experts agronomes sous tutelle du ministère marocain de l'agriculture (cf. (Annexe1/section1)), nous illustrons ce constat dans ce qui suit :

Sur la base du choix de l'utilisateur en matière de zone géographique, de culture et de rendement visé, l'outil Fertimap calcule les besoins exacts en azote N, phosphore P et potassium K, qui sont les trois nutriments essentiels à la croissance de toute plante, avant de recommander, en fonction des engrais disponibles sur le marché local, la solution de fertilisation à appliquer pour s'approcher au maximum des besoins calculés. La Figure 3 présente la fenêtre des recommandations de Fertimap pour un point géographique de la province d'Essaouira qui a été choisi aléatoirement sur la carte du Maroc. Avec un choix arbitraire de la culture de blé et d'un rendement cible de 40 q/ha, les besoins calculés en N, P et K sont respectivement de 106,33, 83,06 et 155,85 kg/ha. Pour répondre à ces besoins, Fertimap propose ce qui est considéré comme la meilleure solution opérationnelle possible à obtenir en mélangeant les engrais disponibles sur le marché. Une ou deux solutions sont données selon qu'une formule d'engrais régionale et une formule d'engrais générique sont disponibles ou non. Les formules régionales étant censées être plus adaptées, vérifions si elles peuvent répondre aux besoins calculés par Fertimap. La solution préconisée étant : 7,79 q/ha de la formule (10-20-20) et 0,86 q/ha d'Ammonitrates (33,5-0-0), nous obtenons par calcul :

$(7,79 \times 100 \times 10 \%) + (0,86 \times 100 \times 33,5 \%) = 106,71$ pour N, $7,79 \times 100 \times 20 \% = 155,8$ pour P et $7,79 \times 100 \times 20 \% = 155,8$ pour K. Nous constatons donc un écart par rapport aux besoins exacts

de (+0,38), (+72,74) et (-0,05) kg/ha pour N, P et K respectivement (pour certaines parcelles de terre, ces écarts peuvent correspondre à un surplus/insuffisance de plusieurs centaines de kilogrammes par hectare). Il convient de noter que de tels écarts dépassent largement la tolérance fixée par le règlement européen des matières fertilisantes. Ces écarts témoignent alors de notre premier constat : *l'offre du marché marocain ne répond pas aux besoins de son agriculture en matière d'engrais.*

Données géographiques		Données de fertilité									
Longitude	(9° 24' 5" W) -9.4016 <input type="button" value="Go"/>	Type de sol									
Latitude	(31° 51' 53" N) 31.8649	Texture globale									
Région : Marrakech-Safi		pH	8.22								
Préfecture / Province : Essaouira		Matière organique(%)	1.94								
Commune : Sidi Ishaq		Phosphore assimilable (mg/kg P ₂ O ₅)	14.4								
		Potassium (mg/kg K ₂ O)	96.7								
		Choisir la culture	Blé dur								
		Rendement visé :	40 qx/ha								
Recommandations <input type="button" value="Valider"/>											
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Élément</th> <th>Besoin</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>N (kg N/ha)</td> <td>106.33</td> </tr> <tr> <td>P (kg P/ha)</td> <td>83.06</td> </tr> <tr> <td>K (kg K/ha)</td> <td>155.85</td> </tr> </tbody> </table>		Élément	Besoin	N (kg N/ha)	106.33	P (kg P/ha)	83.06	K (kg K/ha)	155.85	<p>Recommandations basées sur la formule régionale :</p> <p>3qx/ha du NPK(10.20.20) comme engrais de fond pour un rendement optimale de la région sélectionnée</p> <p>Les recommandations pour le rendement sélectionné:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 7.79qx/ha du NPK(10.20.20) comme engrais de fond • 0.86qx/ha d'Ammonitrates comme engrais de couverture 	
Élément	Besoin										
N (kg N/ha)	106.33										
P (kg P/ha)	83.06										
K (kg K/ha)	155.85										
		<p>Recommandations basées sur les formules générique</p> <ul style="list-style-type: none"> • 7.79qx/ha du NPK(16.11.20) comme engrais de f (*) <p>pour un cout de 2516.95 dh/ha</p>									

Figure 3: Fenêtre des recommandations du conseiller agricole Fertimap

La question se pose alors de savoir pourquoi ce problème subsiste, en dépit des engagements de OCP envers l'agriculture durable et la rationalisation de la fertilisation. Plus concrètement, pourquoi OCP ne produit-il pas des engrais adaptés aux besoins nutritifs des sols agricoles marocains ?

La réponse à cette question est en fait assez évidente : Les engrais sur-mesure, qui sont extrêmement coûteux par rapport aux engrais standards, sont trop chers pour les agriculteurs marocains, dont le pouvoir d'achat est généralement faible. Pour faire face à ce problème, il existe deux options : soit l'amélioration globale des conditions de vie des agriculteurs afin d'augmenter leur pouvoir d'achat, soit la fourniture d'engrais sur-mesure à des prix relativement abordables pour les agriculteurs. Dans cette thèse, notre objectif est de parvenir à la deuxième option.

En revanche, en considérant deux points géographiques différents de la même commune (distants de moins de 1 000 mètres) (cf. Figure 4), Fertimap révèle que bien qu'ils soient proches l'un de l'autre, ces deux points n'ont pas les mêmes données de fertilité, ce qui signifie qu'ils

n'auront pas les mêmes besoins et par conséquent pas les mêmes recommandations en engrais. Cela donne une indication de la très grande variation des indicateurs de fertilité des sols.

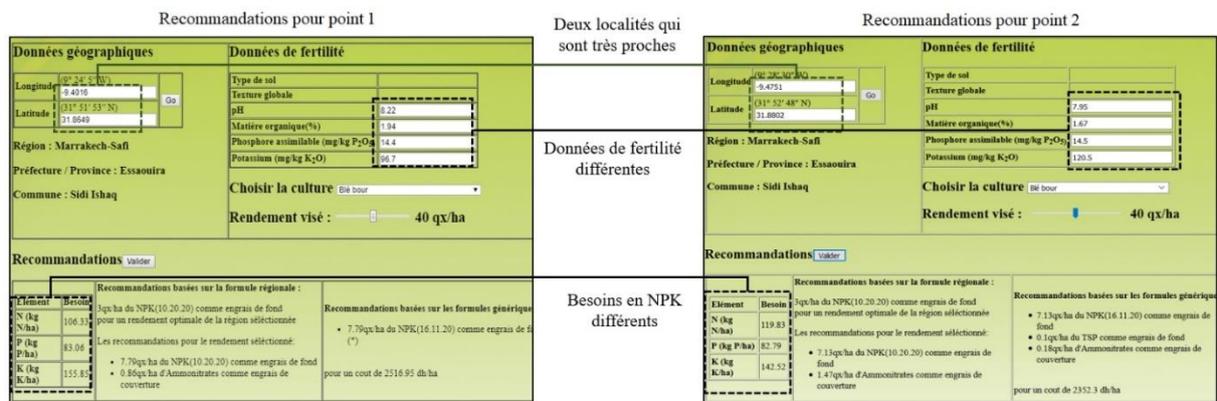


Figure 4 : Comparaison des recommandations de fertilisation de deux localités géographiques voisines Sachant que la surface agricole du Maroc s'élève à 9 millions d'hectares, même en admettant une formule d'engrais personnalisée pour chaque 1 000 ha de terres arables (l'idéal étant une formule d'engrais pour chaque 10 ha (Roebroek, 2009)), il faudra 9 000 formules d'engrais différentes. Nous en venons à notre deuxième constat : *Pour que l'offre puisse répondre aux besoins nutritifs de l'agriculture marocaine, une énorme diversité de fertilisants doit être produite.*

Les implications industrielles et logistiques de ce dernier constat pour OCP, unique producteur d'engrais au Maroc, sont examinées dans la sous-section suivante.

2.1.2 Problématique industrielle et scientifique

En 2005, OCP produisait une diversité de 8 engrais avec une chaîne logistique qui était composée de 4 lignes de production, 5 zones de hangars de stockage et 4 quais d'embarquement. À l'époque, les arrêts dus aux temps de changement de séries étaient minimes, ce qui permettait de produire de grands volumes d'engrais. Aujourd'hui, OCP produit environ 50 qualités d'engrais différentes avec une chaîne logistique qui est composée de 13 lignes de production, 9 zones de hangars de stockage et 4 quais d'embarquement. Ce passage de 8 à environ 50 engrais contre un passage de 4 à seulement 13 lignes de production a énormément compliqué la gestion des flux au niveau de la production, du stockage et des expéditions. En effet, avec la configuration actuelle, cela fait 13×9×4 chemins théoriques à traverser par une variété d'environ 50 engrais. Au niveau des lignes de production, cela se traduit par de très grandes difficultés quant à la planification et l'ordonnancement des ordres de

fabrication. Au niveau des hangars de stockage, plusieurs problèmes sont posés à cause de la diversité des engrais notamment les engrais contaminés en raison d'une mauvaise séparation des différents produits, les arrêts de la production en raison de la saturation de certains hangars de stockage tandis que des espaces vacants sont dans d'autres hangars de stockage en raison de petits lots de production, etc. Les problèmes se sont également multipliés depuis 2005 quant à l'acheminement des produits vers les navires, à la segmentation des flux à distribuer et au chargement des engrais sur les navires. Outre ces problèmes de gestion, les coûts de production se sont également augmentés car plus de diversité implique, entre autres, une consommation supplémentaire d'eau, d'énergie et de produits chimiques de nettoyage.

Compte tenu de son mode de production Make-To-Order (MTO) (cf. Figure 5), le groupe OCP commence déjà à atteindre ses limites en raison de tous ces problèmes. En adhérant à une stratégie de personnalisation d'engrais, le groupe serait amené à augmenter fortement la diversité de ses produits, ce qui lui serait extrêmement difficile, voire impossible, au vu de son organisation industrielle actuelle.

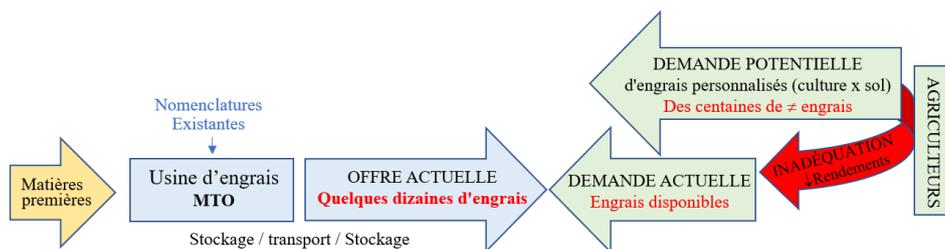


Figure 5 : Organisation actuelle de la chaîne logistique des engrais chez OCP

C'est sur ce point que réside la véritable problématique de cette recherche, nous la formulons dès lors par la question suivante :

Quelle est l'organisation industrielle à adopter par OCP pour accompagner la croissance de la diversité ?

2.2 Deuxième étape. État de l'art et proposition d'une organisation industrielle basée sur la personnalisation de masse

L'objectif de cette étape est d'abord d'étudier les connaissances existantes sur les organisations industrielles ayant réussi à relever le défi de la forte diversité avant de proposer une structure organisationnelle répondant à notre problématique de recherche. En effet, dans l'industrie manufacturière, la gestion efficace des grandes variétés de produits est assurée par la

personnalisation de masse (*mass customization*), l'industrie automobile en étant l'exemple le plus emblématique. Elle a été rendue possible par la conjonction d'efforts portant sur la standardisation, la commonalité, la conception modulaire et celle de plateformes permettant d'assembler facilement des modules venant d'ensembles exclusifs de modules alternatifs (par exemple, moteurs, boîtes de vitesses...). Dans ce contexte, la différenciation retardée, qui permet de fournir au client le produit qu'il souhaite (production à la commande), dans un ensemble possible pouvant comporter des centaines de milliers de produits possibles, est réalisée au niveau des lignes d'assemblage. Cette solution n'est pas envisageable dans l'industrie de process, qui transforme des flux de matières premières pour obtenir des lots de produits homogènes se présentant sous forme de poudres, de granules ou de liquides. La variété ne peut être obtenue en usine que par une succession de productions de lots de produits différents, conduisant soit à une production à la commande d'un nombre limité de produits différents au cours d'une année (production d'engrais, par exemple), soit à une production pour stock d'un ensemble réduit de produits différents (production de yaourts, par exemple). Quant à la différenciation de ce type de produits à l'extérieur de l'usine, la littérature indique qu'elle n'est généralement possible qu'au niveau du conditionnement du produit destiné à un marché, notamment pour des raisons linguistiques ou réglementaires et ce, sans modification du produit. La seule exception notable d'une personnalisation retardée efficace sur le produit se trouve dans la distribution de peinture dans des magasins spécialisés, où le client choisit une référence de couleur parmi plusieurs centaines possibles, le produit étant assemblé sur place à partir d'une base de peinture et d'un jeu réduit de colorants, en respectant scrupuleusement les proportions de la nomenclature associée à la référence choisie. Dans ce cas, la différenciation du produit se fait en magasin et non en usine et permet une standardisation performante en satisfaisant une grande variété de teintes (des milliers) à partir d'un nombre très limité de colorants de base. C'est exactement cette même massification des flux que nous voulons transposer à la chaîne logistique de OCP, à la différence principale que les engrais sur-mesure dépendent des besoins individuels des agriculteurs, ce qui donnerait lieu à de nouvelles nomenclatures. La structure organisationnelle basée sur la personnalisation de masse, inspirée du secteur de la peinture, que nous proposons à OCP pour faire face à une grande variété de produits personnalisés, est illustrée à la Figure 6 .

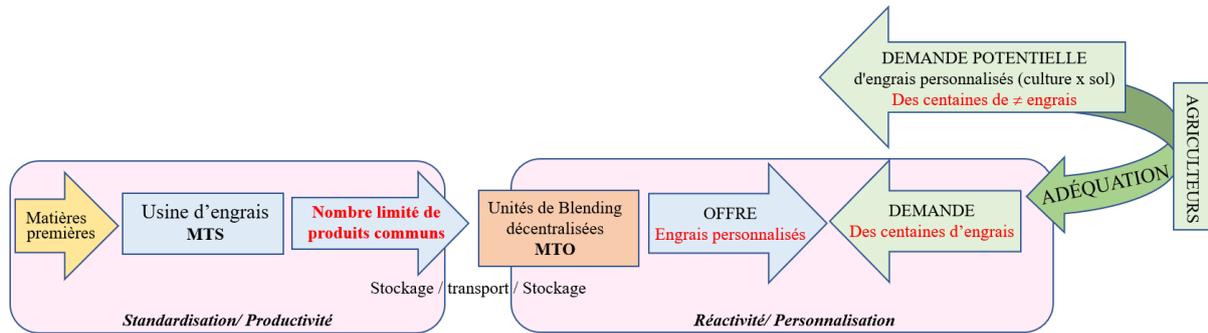


Figure 6 : Proposition d'une nouvelle organisation industrielle basée sur la personnalisation de masse

L'organisation présentée ci-dessus favorise : *i*) à l'intérieur de l'usine, la standardisation et la productivité, car l'objectif est de produire pour stock de grands volumes d'un nombre réduit de produits communs, et *ii*) à l'extérieur de l'usine, la réactivité et la personnalisation, car avec ces quelques produits communs, tout besoin individualisé peut être suffisamment satisfait en très peu de temps, le processus de différenciation étant un simple mélange. Le principal défi pour cette organisation réside désormais dans l'identification des produits communs qui sont l'équivalent des colorants de base dans l'industrie de la peinture :

Quels sont ces produits communs ? Quelles sont leurs compositions optimales ? À quel point pouvons-nous réduire leur nombre ?

2.3 Troisième étape. Présentation de la solution du Reverse Blending

Pour répondre aux questions susmentionnées, ce travail de recherche propose une nouvelle approche qui consiste à produire un nombre limité de produits communs (nouveaux composites) au sein de l'usine chimique avant de les expédier vers des unités de mélange qui doivent être situées à proximité des agriculteurs et où une grande variété d'engrais sur-mesure pourrait être obtenue par le mélange de ces quelques nouveaux composites. Cette approche, que nous qualifions de Reverse Blending, vise, à travers un programme quadratique, à définir simultanément : *i*) les spécifications de composition des nouveaux composites appartenant à un ensemble de taille la plus réduite possible, considérée comme une **Base Canonique (BC)**, pour reprendre une terminologie classique en mathématique (ces composites de la BC étant repérés par le sigle **CBC**) ; *ii*) la nomenclature de production de la grande variété d'engrais considérée, en utilisant les composites de cette base canonique. Il s'agit donc d'une approche d'optimisation traitant d'un nouveau problème de mélange où les inputs (CBC) sont des composites à créer et leurs caractéristiques constituent ainsi des variables de décision, par opposition au blending classique où les spécifications des inputs sont des paramètres d'entrée. Ces composites n'étant

pas préexistants, notre travail de recherche propose deux versions de Reverse Blending, une version standard qui traite le cas où les CBC doivent être créés de toutes pièces et une version étendue qui consiste à produire les CBC en mélangeant les composites disponibles sur le marché. Dans les deux versions, quel que soit le mode de création des CBC, le Reverse Blending permet une concentration massive des flux, réduisant de ce fait les problèmes de diversité au niveau de la production, du stockage et du transport. La figure ci-dessous reprend le principe de cette approche.

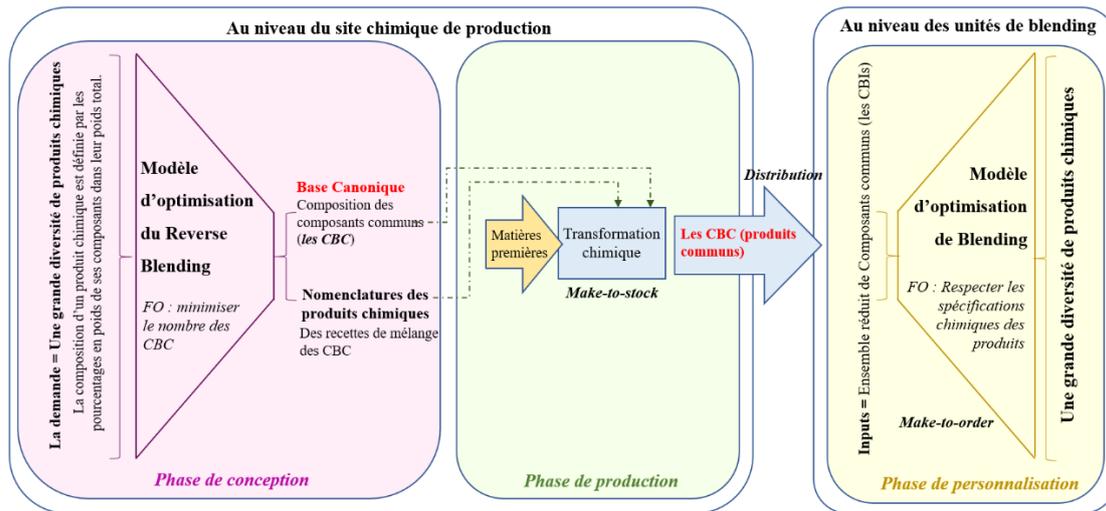


Figure 7 : Principe de l'approche du Reverse Blending

Tel que décrit dans le schéma ci-dessus, au niveau de l'usine chimique, le Reverse Blending permet des économies d'échelle importantes grâce à une standardisation obtenue par la minimisation du nombre de CBC (Fonction Objectif du modèle de Reverse Blending). Au niveau des unités de blending, les formules d'engrais sur-mesure sont à produire à partir des CBC au moyen d'un problème de blending linéaire classique visant à minimiser les déviations par rapport aux spécifications exactes de ces formules. Une base canonique peut en effet générer toute la variété d'engrais ayant été considérée dans la définition de cette base (une conséquence directe du Reverse Blending) mais elle peut également répondre à plusieurs autres besoins en engrais, en acceptant toutefois une très faible déviation.

Au final, le Reverse blending, principale contribution de cette thèse, est un projet de recherche à vocation stratégique reposant sur le développement de nouveaux produits et dont la mise en œuvre nécessiterait des changements majeurs dans les processus de production et de distribution :

Quels sont les principaux changements logistiques à opérer pour implémenter le Reverse Blending ? Quel serait l'impact du Reverse Blending sur la chaîne logistique de l'OCP ?

2.4 Quatrième étape. Évaluation du Reverse Blending et Présentation des connaissances généralisables sur les chaînes logistiques de l'industrie chimique.

Si l'OCP devait opter pour le Reverse Blending, cela reviendrait à passer d'une production majoritairement à la commande à une production pour stock d'un nombre réduit de CBC (cf. Figure 8).

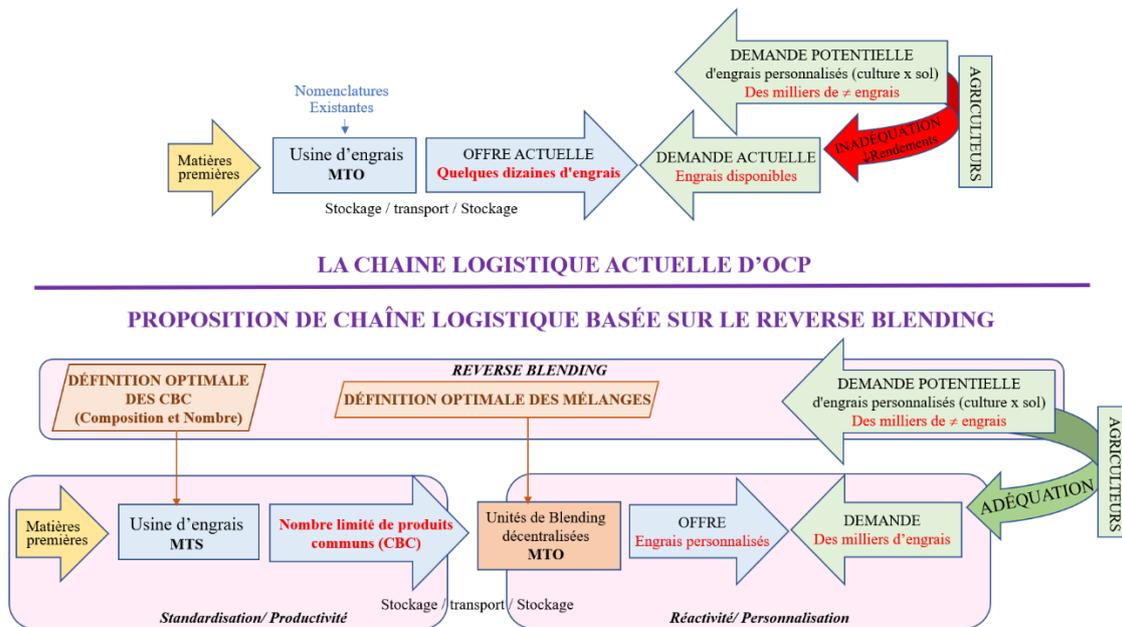


Figure 8 : Comparaison entre la chaîne logistique de l'OCP et celle basée sur le Reverse Blending

Pour pouvoir étudier l'impact réel de la production des CBC sur la chaîne logistique de l'OCP, ces CBC et leur procédé de fabrication doivent d'abord être validés. Par ailleurs, toutes les informations relatives aux charges fixes et variables de production ainsi qu'aux méthodes de calcul des coûts doivent être à disposition pour être en mesure de mener une étude économique comparative entre le mode de production actuel d'OCP et celui basé sur le Reverse Blending. À ce stade de notre recherche, ces deux conditions ne sont pas encore réunies. Ainsi et pour une première évaluation du Reverse Blending, nous nous contentons dans cette dernière étape de procéder à une évaluation qualitative en explorant les avantages potentiels et les limites du Reverse Blending.

Enfin, le dernier volet de cette méthodologie vise à enrichir les connaissances théoriques existantes en valorisant les apports scientifiques de cette thèse et en soulignant les connaissances généralisables aux chaînes logistiques de l'industrie chimique.

3 Structure de la thèse

La méthodologie présentée ci-dessus nous a amenés à organiser notre manuscrit en cinq chapitres (cf. Figure 9) :

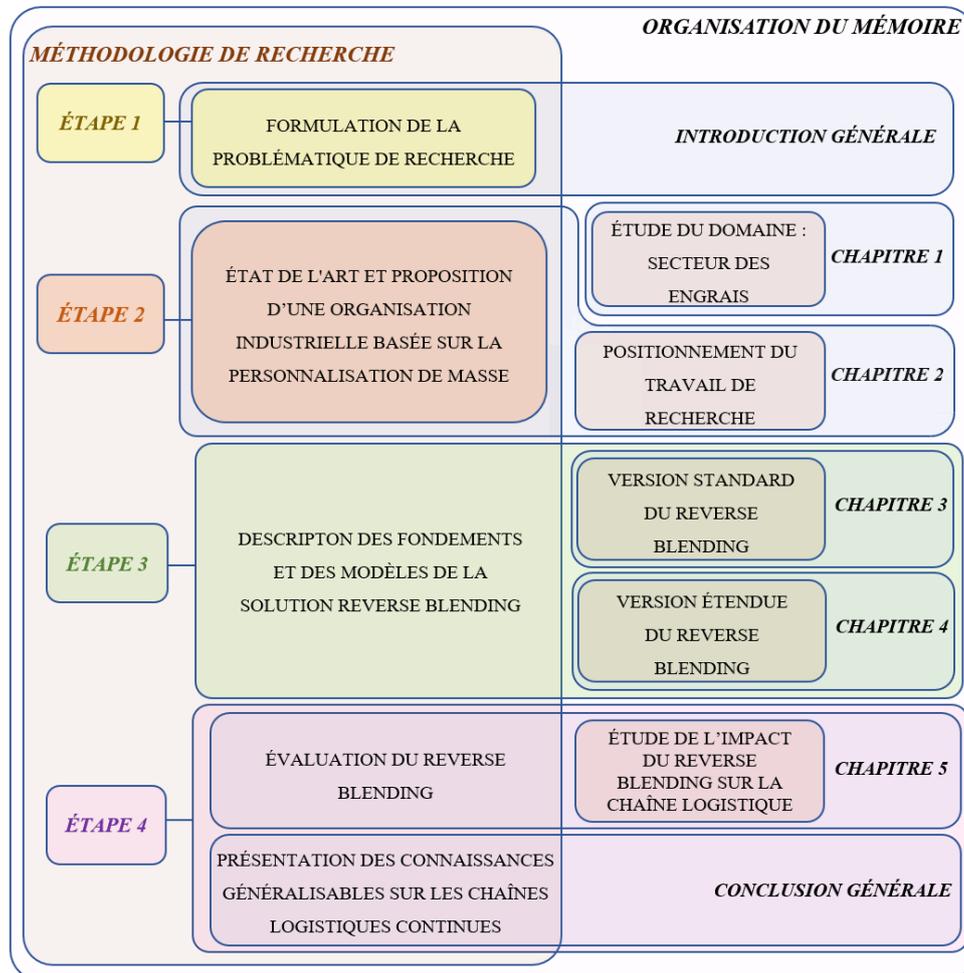


Figure 9 : Structure de la thèse

- Dans le premier chapitre, nous proposons tout d'abord une analyse générale du secteur des engrais, notre domaine d'étude, en nous concentrant sur les principaux thèmes indispensables à la compréhension de la partie agronomique de cette thèse, notamment ceux de la fertilisation raisonnée et des engrais sur-mesure. Par la suite, nous mettons en évidence la situation actuelle de l'industrie des engrais en Afrique puis au Maroc avant de présenter l'OCP, son engagement envers la fertilisation raisonnée et les principaux projets qu'il a mis en place pour la promouvoir. Nous estimons que la présentation de ces éléments est importante pour pouvoir cerner la problématique de recherche mentionnée dans l'introduction générale de ce manuscrit.

- Dans le deuxième chapitre, afin de déterminer l'organisation industrielle la plus pertinente pour une variété de produits aussi importante que celle des engrais sur-mesure, nous procédons en deux parties. Dans la première partie, nous effectuons une revue de la littérature générale sur le thème de la gestion de la diversité. Cette partie comprend les principaux modes de production stratégiques préconisés dans la littérature pour faire face à une forte diversité, à savoir la personnalisation de masse et la différenciation retardée. Ensuite, nous utilisons cette revue pour proposer, en réponse à notre problématique de recherche, une organisation industrielle basée sur la personnalisation de masse et plus particulièrement sur une standardisation permise par une nouvelle approche de commonalité (i.e. Reverse Blending). La deuxième partie est consacrée au positionnement original de cette approche par rapport aux outils existants de personnalisation de masse.
- Dans le troisième chapitre, nous introduisons la version standard du Reverse Blending qui se rapporte à un nouveau problème de blending à un seul étage. Nous commençons par présenter les principes fondamentaux du Reverse Blending Standard puis nous réalisons une revue de la littérature où nous examinons les principaux travaux associés aux problèmes classiques de blending mono-étage. Nous positionnons ensuite le Reverse Blending Standard par rapport à ce type de problèmes avant de poursuivre avec la formulation mathématique de son modèle d'optimisation. La dernière section de ce chapitre fait l'objet de deux études de cas, l'une visant à appliquer le Reverse Blending en illustrant comment une base canonique peut être définie ; et une seconde par laquelle nous comparons la capacité du Reverse Blending à réduire la diversité à l'approche actuelle consistant à mélanger les engrais existants dans le marché.
- Dans le quatrième chapitre, un aspect supplémentaire est ajouté à la version standard du Reverse Blending concernant la faisabilité des produits semi-finis communs (c'est-à-dire les CBC). Cet ajout nous a conduit à une version étendue du Reverse Blending dont l'objectif est de proposer de nouveaux CBC capables d'être obtenus en mélangeant les composites déjà existants. À l'inverse de la version standard où ces CBC doivent être produits chimiquement de toutes pièces, ici, ils doivent d'un côté permettre, par un processus de mélange, de répondre à toute la variété d'engrais souhaitée et de l'autre côté, être fabricables par le mélange des composites qui sont disponibles sur le marché des engrais et qui ne posent pas d'incompatibilité chimique. Cette version fait alors intervenir un problème de pooling adapté, soit un problème de mélange à deux étages. Une revue de la littérature est présentée pour révéler les différences et les similitudes entre notre approche et le problème classique de pooling. Ensuite, le modèle d'optimisation de cette

nouvelle version est présentée suivi d'une étude de cas illustrant son application sur des engrais personnalisés.

- Dans le cinquième chapitre, nous étudions l'impact du Reverse Blending sur l'organisation de la chaîne logistique d'OCP. Comme le plus grand changement auquel ce dernier devrait se soumettre s'il souhaite appliquer le Reverse Blending est le passage d'un système MTO à un système MTS, nous présentons dans ce chapitre une brève revue de la littérature sur ces deux modes de production et sur les systèmes hybrides MTS/MTO, puisque le Reverse Blending est basé sur un système de production hybride MTS/MTO si l'on considère l'ensemble de la chaîne logistique (de l'approvisionnement en matières premières au dernier maillon de la chaîne logistique : l'agriculteur). Dans ce chapitre, nous revenons sur l'organisation industrielle impliquée par le Reverse Blending (initialement introduite au chapitre 2), en présentant cette fois plus en détail les différentes composantes qui la caractérisent. Par la suite, afin de réaliser une évaluation qualitative de notre approche, nous présentons d'abord ses bénéfices potentiels et abordons dans ce contexte une étude de cas qui, à partir du programme de production 2019 de l'OCP, consiste à déterminer comment ce programme aurait été réalisé si le Reverse Blending avait été utilisé. Enfin, nous concluons ce chapitre par les limites du Reverse Blending et les défis auxquels seraient confrontés les producteurs souhaitant mettre en œuvre le Reverse Blending.
- Dans la conclusion générale de ce manuscrit, nous récapitulons les principales contributions de ce travail de recherche en soulignant les connaissances généralisables sur les chaînes logistiques de l'industrie chimique, l'exemple de l'industrie cosmétique est évoqué. Nous terminons enfin ce manuscrit par les perspectives envisageables pour la suite de ce projet.

4 Éléments de validation et de diffusion de notre travail de recherche

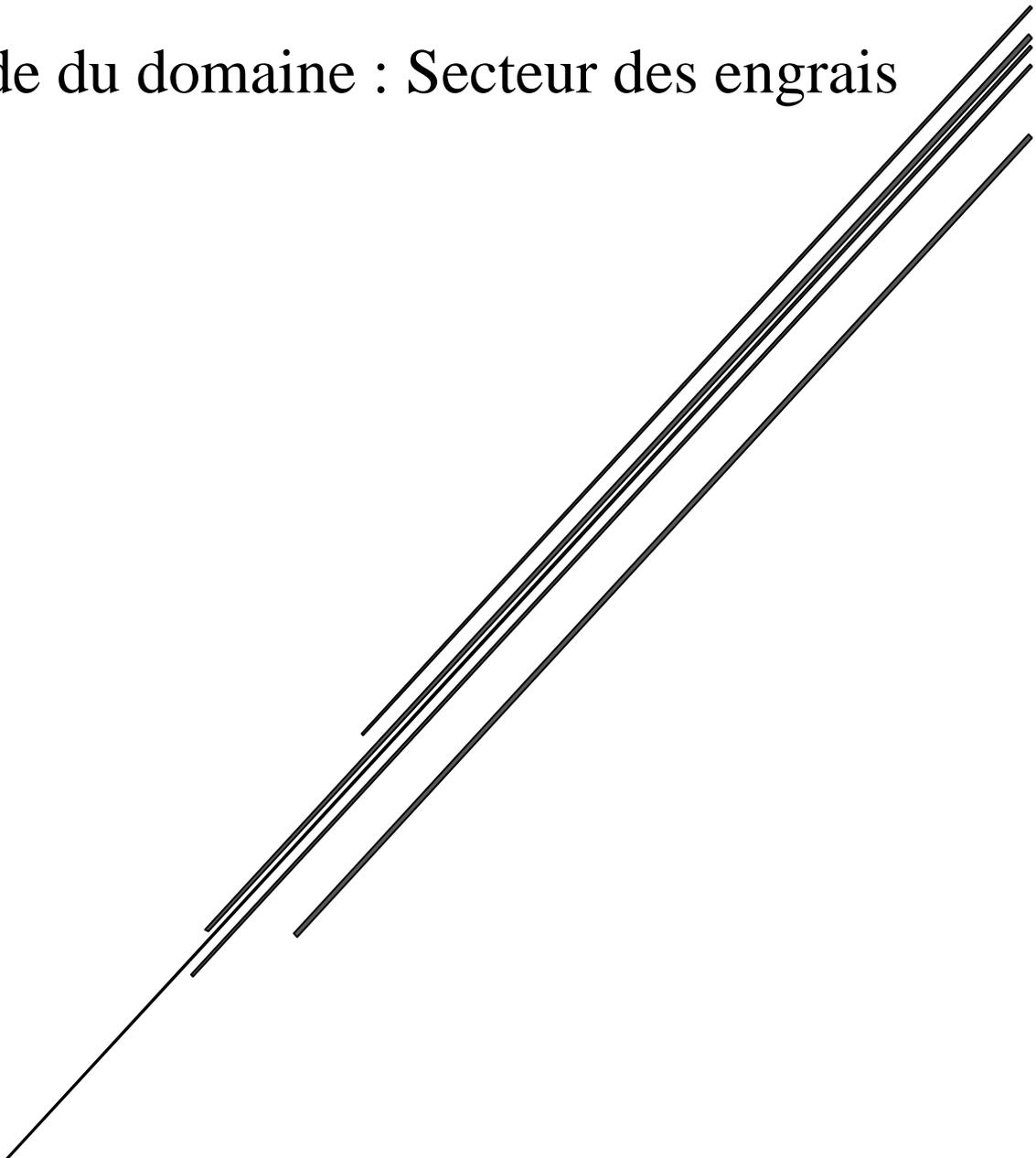
Les présentations et publications scientifiques réalisées dans le cadre de cette thèse sont récapitulées dans ce qui suit :

- ***Publications dans des revues internationales à comité de lecture :***
 - Benhamou, L., Giard, V., Khouloud, M., Fenies, P., Fontane, F., (2020). Reverse Blending: An economically efficient approach to the challenge of fertilizer mass customization, International Journal of Production Economics (IJPE, 2020)
- ***Publication en cours de révision dans des revues internationales à comité de lecture :***

- Benhamou, L., Fenies, P., Giard, V., (2021). Le Reverse Blending, approche originale de conception et de production permettant une production de masse de produits personnalisés en production continue. Revue Française de Gestion Industrielle (RFGI, 2021) (accepté avec des remarques mineures)
- ***Communications avec actes accessibles en ligne dans des congrès internationaux :***
 - Benhamou, L., Giard, V., Fontane, F., Grabot, B., (2018). Reverse Blending: an efficient answer to the challenge of obtaining required fertilizer variety. Information System, Logistics and Supply (ILS 2018 & Cahier de recherche 385 du LAMSADE)
 - Benhamou, L., Giard, V., Fenies, P., Fontane, F., Khoulood, M., (2019). Reverse Blending: une réponse efficace au défi de la personnalisation de masse dans la production de granulés. 13th International Conference of CIGI QUALITA (CIGI QUALITA 2019)
 - Benhamou, L., Fenies, P., Fontane, F., Giard, V., (2019). Reverse Blending as a strategy for purely customizing fertilizers while considerably reducing the diversity to be produced: a case study. 5th International Symposium on Innovation and Technology in the Phosphate Industry (SYMPHOS, 2019)
 - Benhamou, L., Fenies, P., Giard, V., (2020). The potential benefits of Reverse Blending in the fertilizer industry (APMS, 2020)
 - Benhamou, L., Fenies, P., Giard, V., (2020). Avantages potentiels du reverse blending sur la chaîne logistique de l'industrie des engrais. 13ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation (MOSIM20)
- ***Communications dans des congrès internationaux avec évaluation en double aveugle et sans actes disponibles en ligne:***
 - Benhamou, L., Giard, V., Fenies, P., Fontane, F., (2018). Reverse Blending: an efficient answer to the challenge of obtaining required fertilizer variety. International Conference for Research on Phosphates and Derivatives (Phoresnet 2018)
 - Benhamou, L., Fenies, P., Giard, V., (2019). Reverse blending: a solution to the challenge of mass customization in continuous production (case of the fertilizer industry). International Conference of Production and Operations Management Society (POMS 2019)
 - Benhamou, L., Fenies, P., Giard, V., (2021). Standardisation d'une grande diversité de produits cosmétiques : une approche de Reverse Blending. The international Conference PROLOG (PROLOG 2021)

CHAPITRE 1

Étude du domaine : Secteur des engrais



Chapitre 1. Étude du domaine : Secteur des engrais

Introduction

Ce premier chapitre analyse le secteur des engrais, notre domaine d'étude, en mettant l'accent sur certaines thématiques jugées primordiales à la compréhension du volet agronomique de cette thèse, à savoir l'agriculture durable, la fertilisation raisonnée et les engrais personnalisés (section 1). Une discussion sur le marché actuel des engrais en Afrique, et plus particulièrement au Maroc, est également réalisée. Les engagements de l'OCP en matière de la fertilisation raisonnée et les principaux projets qu'il a mis en œuvre pour la promouvoir en Afrique et au Maroc sont également mis en reliefs dans cette section 2. Ces éléments sont essentiels pour une meilleure compréhension de notre problématique de recherche décrite dans l'introduction générale de ce manuscrit.

1 Généralités sur les engrais

Alors que la population mondiale et la consommation alimentaire ne cessent de croître, notons qu'à l'inverse, les terres arables sont très limitées et leur superficie de plus en plus restreinte. Selon les prévisions de la FAO, entre 1998 et 2050, la superficie des terres arables par personne passera de 0,27 à 0,20 hectare par personne, alors que la population mondiale passera de 5,9 à plus de 9 milliards habitants (cf. Figure 10).

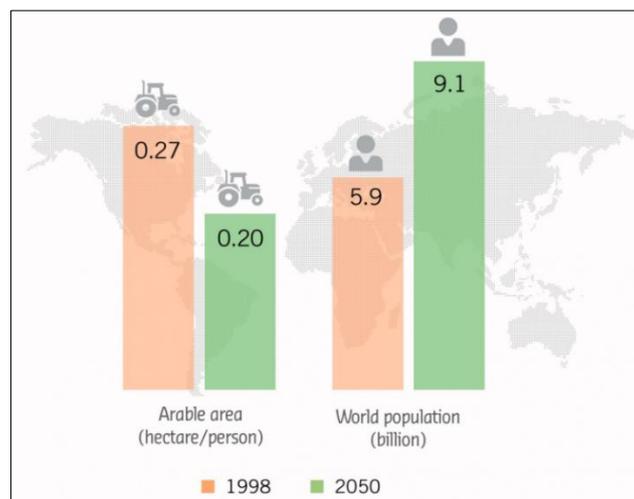


Figure 10 : Prévisions de la FAO : Évolution de la croissance démographique et de la superficie des terres arables entre 1998 et 2050 (source : *Fertilizers Europe*)

Pour faire face à ces deux problèmes (croissance démographique et pénurie de terres arables), plusieurs industries ont émergé, certaines commercialisant des produits consommables destinés à la fertilisation des sols (par exemple, les engrais, les semences, les pesticides), tandis que d'autres sont spécialisées dans la fabrication d'équipements et de nouvelles technologies agricoles (machinisme agricole). La Figure 11 présente les différentes branches d'activité pouvant intervenir dans l'agriculture en amont de la production agricole (la récolte).

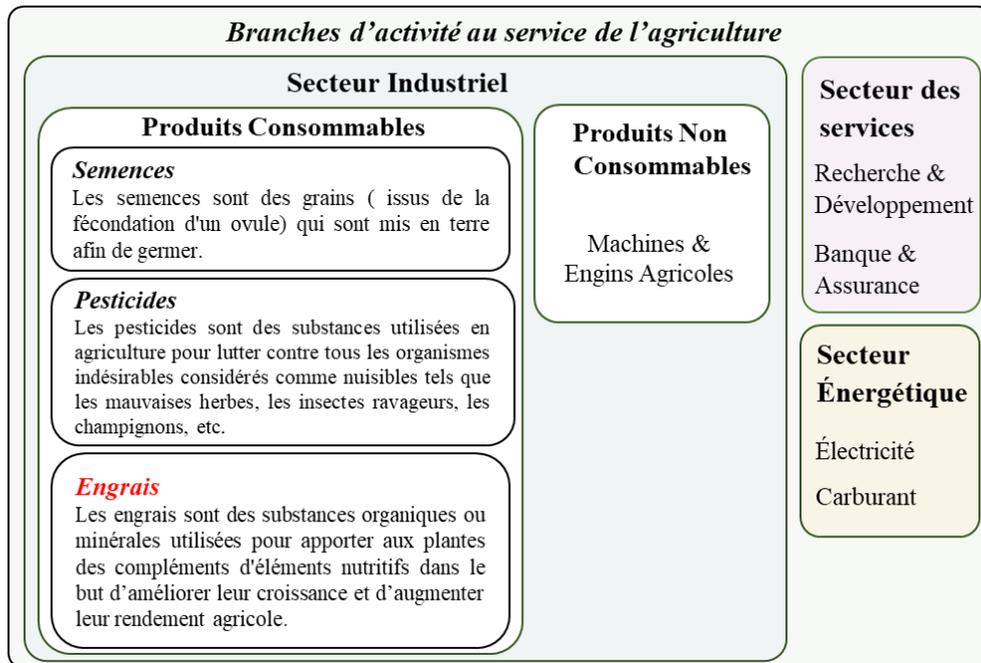


Figure 11 : Les différentes branches d'activité au service de l'agriculture

En nous penchant sur les produits agricoles consommables (par les plantes et les sols), nous examinons de plus près l'industrie des engrais, qui remplit l'une des fonctions les plus importantes dans le domaine de l'agriculture à savoir la fertilisation des sols.

1.1 Définition des engrais

Il est reconnu que pour survivre et croître, les plantes ont besoin de la lumière, de l'air, de l'eau, des nutriments et de l'espace pour grandir. La recherche scientifique a rassemblé ces éléments en 17 nutriments essentiels (Jones & Jacobsen, 2005). Trois de ces éléments, le carbone (C), l'hydrogène (H) et l'oxygène (O), sont considérés comme des nutriments non minéraux car ils proviennent de l'air et de l'eau, plutôt que du sol. Pour absorber ces éléments, les plantes utilisent la lumière comme source d'énergie pour extraire le dioxyde de carbone de l'air (photosynthèse) qu'elles combinent chimiquement avec l'eau, créant ainsi du glucose (source d'énergie) et de l'oxygène. L'oxygène de l'air est également absorbé par les plantes. La respiration cellulaire est

le processus par lequel les molécules sont décomposées en énergie. L'énergie lumineuse est en effet indispensable à la croissance des plantes mais l'excès de lumière peut les faire sécher et aussi assécher le sol où elles vivent. Ces trois éléments (C, H et O) représentent environ 95 % de la biomasse végétale mais très peu d'attention leur est accordée dans le domaine de la gestion nutritionnelle car leur disponibilité est normalement suffisamment assurée (Jones & Jacobsen, 2005).

Les 14 autres éléments sont des nutriments minéraux classés en macronutriments ou en micronutriments en fonction de leurs exigences pour les plantes. Il existe six macronutriments : trois macronutriments primaires, aussi connus par les nutriments majeurs qui sont l'azote (N), le phosphore (P), et le potassium (K) ; et trois macronutriments secondaires qui sont le calcium (Ca), le magnésium (Mg) et soufre (S). Les carences en N, P et K sont beaucoup plus fréquentes que celles en Ca, Mg et S. Les micronutriments comprennent le bore (B), le chlore (Cl), le cuivre (Cu), le fer (Fe), le manganèse (Mn), le molybdène (Mo), le nickel (Ni) et le zinc (Zn). La plupart des macronutriments représentent 0,1 à 5 % des tissus végétaux secs, tandis que les micronutriments en représentent généralement moins de 0,025 %. Chacun de ces nutriments exerce une ou plusieurs fonctions spécifiques au sein de la plante, et la quantité dont la plante a besoin pour chacun d'entre eux dépend largement de sa ou ses fonctions. En plus de ces éléments nutritifs, un engrais contient également le *filler*, une matière de remplissage neutre (sable, terre, charbon broyé, cendres...) qui est ajoutée à des fins de stabilisation chimique et n'a généralement aucun impact sur la structure nutritionnelle de l'engrais. En ce qui concerne les nutriments majeurs :

L'azote N joue un rôle essentiel dans la croissance des plantes et le rendement des cultures (Hirel et al., 2011 ; Krapp et al., 2014 ; Ruffel et al., 2014 ; Vidal et al., 2014 ; Wang et al., 2012). Sa disponibilité et sa concentration interne affectent la répartition de la biomasse entre les racines et les pousses (Bown et al., 2010) ainsi que le métabolisme, la physiologie et le développement des plantes (O'Brien et al., 2016).

Le phosphore P est un nutriment indispensable et pour le développement des racines et pour la disponibilité des nutriments (Jin et al., 2005). Il est essentiel pour la division cellulaire, la reproduction et le métabolisme des plantes et permet de stocker l'énergie et gérer son utilisation (Epstein & Bloom, 2004).

Le potassium K est extrêmement important pour la productivité de la plante. Il joue un rôle majeur dans l'activation des enzymes impliquées dans la croissance des plantes et la

régularisation de l'ouverture et la fermeture des stomates dont le bon fonctionnement est essentiel pour la photosynthèse, le transport de l'eau et des nutriments et le refroidissement des plantes (Prajapati, 2012).

Une bonne compréhension du rôle de chaque nutriment et de la manière dont sa carence peut affecter la croissance et l'apparence de la plante est très importante pour identifier les besoins nutritifs et écologiques de chaque culture agricole. Des référentiels standards spécifiant les exigences en matière de nutriments, de température, de climat et de pédologie des sols sont aujourd'hui disponibles pour une très grande variété de cultures. Pour les nutriments, ils s'absorbent de manière sélective sous forme d'ions minéraux par les racines des plantes. Cependant, conséquence directe des taux élevés d'extraction des nutriments, les sols sont souvent incapables de fournir sans apport complémentaire les ingrédients nécessaires à la production des biens alimentaires (Fixen et al., 2015). Pour cette raison, en vue de satisfaire suffisamment aux exigences des plantes, le recours à la fertilisation des sols par l'utilisation des engrais est indispensable.

Justus von Liebig (1803-1873) a été le premier à réaliser que la nature doit être guidée par la science afin de créer un nouveau système rationnel d'agriculture (Paull, 2009). Sept décennies plus tard, en 1909, le scientifique allemand Fritz Haber a concrétisé la vision de Liebig sur l'agriculture chimique en découvrant que la réaction chimique de l'azote et de l'hydrogène produisait de l'ammoniac, le principal composant des engrais.

Les engrais sont des substances chimiques fournies aux cultures pour accélérer leur croissance et augmenter leur productivité. Ils contiennent les nutriments essentiels dont les plantes ont besoin, les trois plus importants étant l'azote, le potassium et le phosphore. Ils améliorent la capacité de rétention d'eau du sol et augmentent également sa fertilité. Ils peuvent se présenter sous forme solide (granulés ou poudre), liquide ou gazeuse. Il convient de ne pas confondre les engrais avec les amendements. En effet, contrairement aux engrais qui ont un effet temporaire et qui doivent être apportés régulièrement aux plantes (car ils s'épuisent en étant absorbés par les plantes), les amendements, eux, ont une action globale et durable et ne visent pas la plante en particulier, mais plutôt l'équilibre et la fertilité du sol. Leur rôle principal est d'améliorer la structure physique du sol (par exemple, en régulant le PH du sol, en améliorant la rétention d'eau, en permettant la circulation de l'air). Les engrais, qui sont des matières fertilisantes destinées à nourrir la plante, ne doivent pas non plus être confondus avec les pesticides qui sont des produits phytosanitaires destinés à lutter contre les maladies, les parasites et les mauvaises herbes. Les engrais sont aujourd'hui utilisés quotidiennement par de nombreux agriculteurs

pour augmenter le rendement des cultures. Les engrais commerciaux sont strictement réglementés par les États afin de garantir leur innocuité pour les personnes qui les utilisent, les personnes à proximité et l'environnement.

1.2 Types des engrais

D'une manière générale, il existe deux grands types d'engrais : les engrais organiques (§1.2.1) et les engrais minéraux (§1.2.2). Une comparaison entre les deux types d'engrais est donnée dans (§1.2.3).

1.2.1 Engrais organiques

Les engrais organiques peuvent être d'origine animale (par exemple, les farines de sabot et d'os, les effluents d'élevage, le sang séché), végétale (par exemple, les déchets végétaux, les résidus et les épluchures végétaux) ou humaine (par exemple, les boues d'épuration). Ils sont destinés à favoriser la multiplication rapide de la microflore du sol et se décomposent lentement en raison de leur structure à grosses molécules. Les engrais organiques agissent plus lentement que les engrais minéraux car ils doivent d'abord être transformés en ions minéraux par les bactéries présentes dans le sol. Ils peuvent provenir de sources naturelles, comme les fumiers d'animaux (par exemple, fumier) et les déchets compostés, ou de produits industriels tels que les poudres de cuir et de corne, le marc de raisin, les algues, etc. Les engrais organiques contiennent du carbone et des nutriments d'origine exclusivement organique, mais le pourcentage de ces nutriments reste relativement faible. Certains de ces matières fertilisantes sont considérés à la fois comme des amendements et des engrais organiques. C'est notamment le cas du fumier, du compost et du terreau.

1.2.2 Engrais minéraux

Les engrais minéraux sont constitués de substances d'origine minérale. Ces substances peuvent soit être naturelles, issues de l'exploitation de gisements naturels (phosphate, potasse...) tels que les roches sédimentaires, salines ou éruptives (qui sont aujourd'hui rarement utilisées) ; soit être obtenues par transformation et synthèse industrielles et chimiques.

À présent, la majorité des engrais minéraux sont produits par l'industrie chimique. Les engrais minéraux sont ainsi souvent assimilés à des engrais chimiques, que l'on appelle aussi parfois engrais artificiels ou engrais inorganiques. L'industrie des engrais transforme des millions de tonnes de matières premières naturelles, telles que l'air, le gaz naturel et les minéraux, en

produits nutritifs pour les plantes. Ils agissent très rapidement en fournissant aux plantes les éléments nutritifs essentiels dont elles ont besoin pour se développer correctement, en ciblant leurs besoins spécifiques. En fonction de leur composition, ces engrais peuvent être classés en :

Engrais simples. Ils ne contiennent qu'un seul élément nutritif majeur : l'azote N, nous parlons alors d'engrais azotés tels que l'urée (46 % de N), l'Ammonitrates (33,5 % de N), Solutions Azotées, etc. ; le phosphore P, il s'agit donc d'engrais phosphatés tels que les Superphosphates (16 % à 24 % de P_2O_5 pour le SSP et 45 % à 48 % pour le TSP) ; et le potassium K, nous parlons ici d'engrais potassés tels que le Chlorure de potassium KCl (61 % de K_2O) et Sulfate de potassium (50 % de K_2O).

Engrais binaires. Ce sont des engrais minéraux composés qui contiennent deux des trois nutriments majeurs. Selon les éléments nutritifs dont ils sont composés, il peut s'agir soit de NP, les plus courants pour ce type d'engrais étant le phosphate monoammonique (MAP) (11 % de N et 55 % de P_2O_5) et le phosphate diammonique (DAP) (18 % de N et 46 % de P_2O_5), soit de NK, dont les plus utilisés sont les nitrates de potassium (13 % de N et 46 % de K_2O) ou de PK, ce qui est le cas par exemple du superpotassium (20 % de P_2O_5 et 20 % de K_2O).

Engrais ternaires. Ce sont des engrais minéraux complexes qui fournissent les trois principaux éléments nutritifs, ils sont notés NPK. Il existe une multitude d'engrais NPK qui sont actuellement commercialisés dans le monde entier, les plus connus étant ceux ayant les formules 15-15-15, 20-10-10 et 10-5-5. Il convient de préciser que la formule NPK 10-5-5, par exemple, signifie que l'engrais contient 10 % d'azote (N), 5 % de phosphore (P_2O_5) et 5 % de potassium (K_2O). Ces engrais peuvent être complétés par les nutriments secondaires tels que le soufre, le magnésium, ou le calcium. Des oligo-éléments (bore, fer, manganèse, cuivre, zinc...) peuvent également être ajoutés pour éventuellement compenser certaines carences. Par ailleurs, bien qu'une formule soit définie par les pourcentages respectifs de N, P et K, l'azote est en fait fourni sous forme de nitrate NO_3^- , d'ammonium NH_4^+ ou d'urée $CO(NH_2)_2$. Le phosphore, indiqué dans la formule de l'engrais par P, mais conventionnellement exprimé en l'oxyde P_2O_5 , peut être assimilé sous forme de phosphate de calcium ou d'ammonium. Le potassium, indiqué dans la formule de l'engrais par K, mais conventionnellement exprimé en l'oxyde K_2O , peut être apporté principalement sous forme de chlorure, nitrate ou sulfate de potassium.

1.2.3 Engrais organiques vs. Engrais inorganiques (chimiques)

Les agriculteurs doivent-ils utiliser des engrais organiques ou chimiques, une question qui suscite de nombreux débats depuis plusieurs années. Pourtant, aucun consensus n'a été atteint à

ce jour sur ce sujet, car selon plusieurs chercheurs, il s'agit d'un faux débat opposant deux approches qui devraient normalement être complémentaires. Il n'existe pas de preuves scientifiques généralement acceptées pour étayer la supériorité des sources de nutriments organiques ou inorganiques pour les plantes. Les expériences menées dans ce sens indiquent que pour obtenir des rendements élevés et une productivité durable des sols, il faut utiliser à la fois des engrais organiques et minéraux (Feinerman & Komen, 2005, Vanlauwe, 2015).

D'une part, les engrais organiques améliorent la structure du sol et stimulent l'activité des micro-organismes du sol, mais d'autre part, ils renferment de faibles concentrations de nutriments que les bactéries et les champignons du sol doivent d'abord transformer en formes inorganiques avant que les plantes puissent les consommer. Ils sont donc généralement libérés plus lentement, en particulier par temps froid lorsque les micro-organismes du sol ne sont pas aussi actifs. Si seuls des engrais organiques sont utilisés, les sols n'auront pas assez de matière organique. À ce jour, la quantité de nutriments fournis par ces engrais (par exemple, le fumier) n'a jamais pu être mesurée avec précision. C'est l'un des grands inconvénients de ce type d'engrais, car il entraîne une mauvaise gestion des éléments nutritifs des plantes. En termes de productivité, il est en fait reconnu que les engrais organiques sont moins efficaces que les engrais minéraux en raison de leur perte d'azote relativement élevée et de la faible disponibilité et de la non-uniformité de l'azote disponible pour les plantes dans les engrais organiques (Feinerman & Komen, 2005). De plus, bien que cela puisse paraître paradoxal, ces types d'engrais peuvent être plus chers que les engrais chimiques ou inorganiques car ils sont moins concentrés, fournissent moins de nutriments et doivent par conséquent être utilisés en grands volumes.

À l'inverse, les engrais minéraux sont traités chimiquement afin de répondre aux besoins des cultures en assurant des apports nutritifs précis, scientifiquement formulés de manière à être rapidement assimilés par les plantes. La précision des engrais minéraux manufacturés permet de surmonter les limites des engrais organiques, mais lorsqu'ils sont utilisés avec des engrais organiques, leur consommation est encore plus optimisée et les cultures ont un rendement plus élevé du fait que les engrais organiques améliorent la structure du sol et sa capacité de rétention d'eau. L'utilisation d'engrais minéraux permet en outre à l'agriculteur de produire davantage de résidus de culture et de biomasse, lesquels peuvent être utilisés comme engrais organique.

Sur le plan de la santé, nous nous appuyons sur l'étude de (Mennessier, 2017) qui stipule clairement que la supériorité nutritionnelle du biologique (sans utilisation des produits agricoles chimiques) sur le non biologique n'a jamais été scientifiquement démontrée. En effet, tous les

travaux scientifiques menés au cours des 15 dernières années démontrent sans la moindre ambiguïté que les aliments biologiques n'ont pas une valeur nutritionnelle significativement plus élevée que les mêmes produits issus de l'agriculture conventionnelle (agriculture non biologique). Mennessier (2017) a examiné des centaines d'études sur les produits biologiques réalisées en France, au Danemark, aux États-Unis et en Grande-Bretagne et en a déduit qu'il n'y a pratiquement pas de différences entre les produits biologiques et les produits conventionnels. Il ajoute que même s'il y a une légère différence, celle-ci ne présente aucun avantage significatif pour la santé publique. Mennessier a également démenti une conception très répandue qui prétend à tort que consommer des produits biologiques permet de se protéger contre les maladies. Il en conclut en revanche que l'épandage de matière organique fraîche ou mal compostée, sans respecter un délai suffisant avant la récolte, est très souvent à l'origine de plusieurs accidents sanitaires. La consommation de produits biologiques ne réduit pas non plus le risque de contracter un cancer. Selon (Mennessier, 2017), ceci ne constitue qu'une affirmation non fondée pouvant fausser la prévention vis-à-vis des causes réelles du cancer. Enfin, le recours à une agriculture biologique basée uniquement sur une fertilisation organique, préconisée par certains mouvements écologiques, contraindrait à défricher de nouvelles terres, empiétant ainsi sur les espaces naturels.

Sur le plan environnemental, (Vanlauwe, 2015) considère que la tendance à penser que les engrais organiques sont plus respectueux de l'environnement ne tient que pour quelques exceptions puisque, si les engrais minéraux sont utilisés efficacement (sans excès ni pénurie), ils s'avéreront beaucoup plus écologiquement durables. De nombreux exemples mettent en doute le caractère "organique" de la fertilisation organique. Par exemple, le fumier qui est considéré comme un engrais purement organique peut provenir de vaches auxquelles des antibiotiques ont été largement administrés, ce qui en fait un engrais moins naturel qu'il n'y paraît. La vinasse de betterave, un sous-produit de la production d'alcool à partir de la betterave sucrière, n'est pas non plus véritablement naturelle en ce sens qu'elle provient de la culture de la betterave, qui consomme beaucoup d'engrais et de pesticides chimiques. Les biologistes montrent que, contrairement aux engrais chimiques - qui sont plus susceptibles d'être surappliqués et d'endommager la plante en raison de leur concentration et de leur grande solubilité - l'engrais organique ne heurtera pas la plante et ne la brûlera jamais en raison de son action progressive dans le sol. Néanmoins, nous soulignons que les engrais chimiques ne présenteront aucun risque s'ils sont appliqués selon une fertilisation raisonnée dans laquelle les éléments nutritifs et leurs quantités sont bien gérés en fonction des besoins spécifiques de

chaque plante. Ce constat a été affirmé par plusieurs expériences agricoles (Cakmak, 2002 ; Goulding et al., 2008 ; Petrovets et al., 2010, White & Brown, 2010 ; Mikula et al., 2020) ce qui a conduit de nombreux chercheurs (Rakshit et al., 2012 ; Majumdar & Prakash, 2018 ; Kumar, 2019 ; Choudhary et al., 2020) à insister sur la nécessité de recourir aux engrais personnalisés.

1.3 Engrais personnalisés

Atteindre une production végétale durable sans compromettre la rentabilité économique et l'environnement n'est concevable que lorsque les nutriments sont apportés aux plantes dans des proportions très précises pour répondre à leurs besoins spécifiques. Pour ce faire, les agriculteurs doivent contrôler et réguler leur consommation d'engrais. En d'autres termes, la formulation des engrais doit leur être complètement personnalisée.

Les engrais personnalisés se rapportent aux matières fertilisantes appliquées par les agriculteurs lorsque leurs parcelles de terre sont fertilisées de manière raisonnée. Il s'agit d'une nouvelle catégorie d'engrais spécifiques à un sol et une culture. Rakshit et al. (2012) les définissent comme des porteurs de multiples nutriments (nutriments primaires/secondaires et micronutriments) dont les proportions nutritives sont fixées en fonction des besoins spécifiques d'une culture pendant toutes ses phases de croissance. Pour définir ces besoins, il est nécessaire de connaître les propriétés pédologiques et les exigences de la culture agricole que l'agriculteur souhaite cultiver. En effet, les recommandations d'engrais exigent une bonne connaissance de tous les aspects de la fertilisation et de la nutrition des cultures considérées dont les plus importants sont le rendement objectif, le besoin nutritif de la culture et l'apport de ce nutriment par le sol (Cottenie, 1980). Pour qu'il quantifie cet apport, l'agriculteur doit passer par les analyses de sol qui jouent un rôle important dans la gestion des éléments nutritifs et la prévention des problèmes nutritionnels et sanitaires à long terme (Watson et al., 2002). Ces analyses sont à effectuer régulièrement (Warncke et al., 2000) pour permettre de déceler les changements dans la composition du sol avant que les rendements ou l'efficacité du programme de fertilisation ne soient gravement compromis. Le développement des engrais personnalisés doit ainsi être basé sur les résultats de l'analyse des sols et sur les exigences des cultures et ce, grâce à l'aide d'une équipe d'agronomes et de spécialistes capables de faire ressortir le meilleur d'une plante en termes de potentiel de croissance et de productivité.

Le processus de développement d'engrais personnalisés se révèle très complexe mais, en fin de compte, très prometteur car il permet d'optimiser l'utilisation des éléments nutritifs pour obtenir

des produits de haute qualité, une productivité élevée et une rentabilité maximale des exploitations agricoles. En dehors des considérations de coûts d'acquisition, tous les agriculteurs envisageraient d'utiliser ces engrais. En effet, ils sont spécifiquement adaptés à leurs besoins et ils ont l'avantage d'être prêts à l'emploi (Goulding et al., 2008 ; Rakshit et al., 2012). Ils maximisent l'efficacité de l'utilisation des éléments nutritifs et donc améliorent la fertilité des sols tout en étant plus respectueux de l'environnement que les engrais traditionnels.

Toutefois, en dépit de tous ces aspects positifs, la commercialisation des engrais personnalisés se heurte aujourd'hui à plusieurs problèmes. Selon (Goulding et al., 2008), la plupart des engrais actuels ont été développés il y a plus de quarante ans. Il attribue cette situation à plusieurs causes : *i*) le coût élevé des engrais personnalisés, *ii*) les subventions accordées par le gouvernement en faveur de l'utilisation d'engrais standard, *iii*) la nécessité d'investir lourdement dans des installations de fabrication avancées pour les engrais personnalisés, *iv*) la sensibilisation limitée des agriculteurs aux avantages des engrais personnalisés, *v*) les longs et coûteux processus de fabrication, et *vi*) l'énorme diversité générée par la personnalisation des engrais. En effet, le sol est un milieu dont les propriétés peuvent varier au fil des mois et des années en réponse aux changements des pratiques de gestion des terres et des propriétés inhérentes du sol (Jenny, 1941) qui varient sous l'influence de plusieurs processus biologiques, physiques et chimiques. Pas un seul hectare de terre de culture n'est donc complètement homogène du point de vue pédologique. Dans le cadre de l'utilisation raisonnée des engrais, cette hétérogénéité peut se traduire par une très grande variété de besoins en engrais.

1.4 Méthodes de fabrication des engrais

Les engrais peuvent être fabriqués selon trois méthodes : par voie chimique (réaction chimique) (§1.4.1), par agglomération ou compactage (§1.4.2) ou par mélange en vrac (*bulk blending*) (§1.4.3)

1.4.1 Réaction chimique

En adoptant ce mode de production, les granulés des engrais sont obtenus par granulation après une réaction entre les matières premières et les produits intermédiaires (phosphates naturels, ammoniac, acides nitriques, sulfurique et phosphorique, chlorure et sulfate de potassium). Comme le montre la Figure 12, la plupart des engrais NP, tels que le DAP et le MAP, sont obtenus par la neutralisation de l'acide phosphorique (H_3PO_4) par l'ammoniac (NH_3). Pour les superphosphates (engrais P), ils sont obtenus par l'attaque du phosphate naturel par l'acide

phosphorique. Ces deux engrais (NP/ P) peuvent être utilisés comme source de N et de P_2O_5 pour la fabrication des engrais NPK. Ceux-ci peuvent également obtenir de l'azote à partir du sulfate d'ammonium fabriqué par neutralisation de l'acide sulfurique (H_2SO_4) par l'ammoniac (NH_3). Quant à la source de K_2O , le chlorure de potassium (KCl) est la matière la plus utilisée.

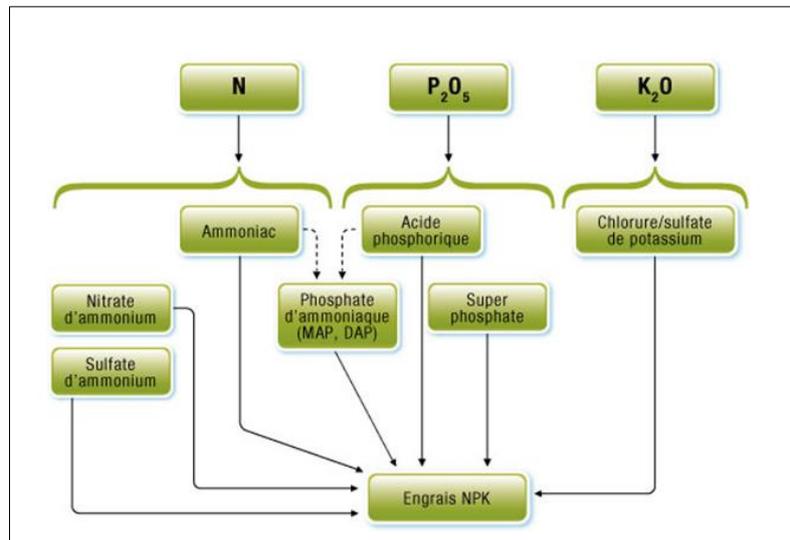


Figure 12 : Principes de fabrication des engrais (source: UNIFA)

Suite à ces réactions, une bouillie est formée et envoyée vers un granulateur avant que les granulés formulés ne soient séchés par la chaleur des gaz provenant d'une chambre de combustion. Une fois séché, le produit obtenu est soumis à une sélection par criblage, puis à un refroidissement et enfin à un enrobage de fuel permettant entre autres d'éviter le problème de la prise de masse des engrais dans les hangars de stockage.

Le processus de la granulation doit tenir compte, selon la formule d'engrais à produire, du pH final, de l'équilibre eau/vapeur, du bilan thermique de l'opération et de la capacité des produits à se granuler ou non. Pour produire des engrais personnalisés, cette méthode de fabrication présente de grandes limites, l'une d'entre elles étant la nécessité d'investir dans la construction d'une grande usine avec des capacités énormes et une infrastructure pouvant accueillir une très grande variété de produits. Cette option n'est pas envisageable pour la production des engrais personnalisés (Goulding et al., 2008 ; Rakshit et al., 2012 ; Majumdar & Parakash, 2018)

1.4.2 Agglomération ou compactage

Dans ce processus de fabrication, également appelé "granulation composée" ou "granulation à la vapeur" ou encore " granulation physique ", toutes les matières premières sont sous leur forme

solide. Celles-ci sont intimement mélangées par pressurisation, puis le mélange obtenu est granulé soit par agglomération, soit par compactage. Chaque particule renferme tous les éléments nutritifs de la formule. Cette option de production d'engrais se situe quelque part entre l'option de la voie chimique et le « *bulk blending* ». Bien qu'elle ne soit pas aussi flexible que le *bulk blending*, elle offre une flexibilité plus grande que la granulation chimique. Ses coûts d'investissement sont plus élevés que ceux requis pour le *bulk blending*, mais sont beaucoup plus faibles que ceux que doivent supporter les usines chimiques.

1.4.3 Bulk blending

1.4.3.1 Définition

Le *bulk blending* est défini comme le mélange mécanique de deux ou plusieurs engrais granulés pour produire des mélanges contenant principalement l'azote, le phosphore et le potassium et parfois d'autres éléments nutritifs tels que le soufre et le calcium (Beaton, 1997). Cette technique de fabrication est apparue au début des années 1950 en Amérique, dans l'État de l'Illinois, afin de contourner les freins industriels imposés par la fabrication chimique des engrais (infrastructures très onéreuses inhérentes à ce mode de production ; variété très restreinte d'engrais). En effet, le mélange des engrais est un processus très simple, facile à réaliser et le coût d'investissement pour la construction d'une unité de blending est relativement faible (Beaton, 1997). L'objectif du *bulk blending* est d'obtenir de nouveaux engrais mieux adaptés aux besoins de plantes avec deux ou plusieurs matières premières contenant différentes substances nutritives (Miserque & Pirard, 2004). Ces auteurs considèrent que le *bulk blending* est le processus de fabrication d'engrais le plus économique et le plus flexible.

Contrairement aux engrais complexes qui sont fabriqués de manière à ce que chaque granule corresponde à la formule souhaitée, les engrais mélangés sont constitués de différents composants nutritifs souvent fabriqués séparément, pouvant entraîner des variations dans la taille et la densité des particules (cf. Figure 13). Il peut en résulter une ségrégation de ces particules pendant le transport ou le stockage, ou même au moment de l'épandage, ce qui peut entraîner une concentration des nutriments dans certaines zones. Pour éviter cette ségrégation et maintenir l'homogénéité du mélange tel qu'il était initialement, les inputs à mélanger doivent être bien granulés, secs et de taille similaire. Un engrais mélangé de haute qualité doit être granuleux, facile à épandre, non poussiéreux et non hygroscopique. Plus le mélange est retardé, plus il est susceptible de correspondre à ces critères. En outre, en retardant le mélange des

engrais juste avant leur utilisation, la combinaison de certains engrais normalement considérés comme chimiquement incompatibles peut être tolérée.

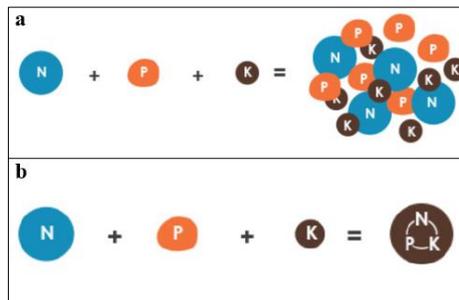


Figure 13 : a) Structure du granule d'un engrais mélangé b) Structure du granule d'un engrais complexe chimique (source: site officiel de FEECO)

Les ingrédients (engrais) utilisés dans la formulation des mélanges, dont les plus souvent utilisés sont l'urée, les superphosphates (TSP & SSP), le DAP, le MAP et le KCl, peuvent présenter plusieurs incompatibilités (cf. §1.4.3.4).

1.4.3.2 Avantages du bulk blending

Pour énumérer les différents avantages du *bulk blending*, il a été principalement fait référence à (Formisani, 2005). Ce dernier évoque plusieurs bénéfices du *bulk blending* les rendant plus avantageux que la fabrication par voie chimique ; nous les résumons dans 4 grands points :

Flexibilité : la flexibilité désigne la capacité du processus de mélange à s'adapter aux spécifications de la formule d'engrais à produire. Contrairement à la granulation chimique, pour laquelle plusieurs restrictions sont associées, le *bulk blending* offre un grand nombre de ratios nutritifs en utilisant quelques matières premières granulaires, telles que l'urée, le DAP et le KCl. Par ailleurs, en plus des nutriments majeurs, les engrais mélangés sont bien adaptés à l'incorporation des micronutriments. Alors que dans une usine chimique, seulement quatre à dix qualités d'engrais peuvent être économiquement fabriquées à partir d'une seule installation (Formisani, 2005), le nombre de formules d'engrais pouvant être offertes par une unité de *blending* est presque illimité. Le *bulk blending* est une méthode économiquement intéressante pour pratiquer une fertilisation équilibrée (Rajani, 2019).

Coût : le *bulk blending* présente un grand avantage par rapport à la granulation chimique en termes d'investissement en capital requis. D'après (Formisani, 2005), le coût des investissements d'un complexe de granulation chimique de 100 000 tonnes par an conçu pour produire des engrais composés NPK à partir d'ammoniac, d'acide phosphorique, d'acide

sulfurique, de sulfate d'ammonium et de potasse importés serait 3 à 4 fois plus élevés que le coût d'une unité de mélange conçue pour la même capacité. Les coûts de production et de stockage dans l'usine chimique seraient également bien supérieurs à ceux des unités de mélange. Les coûts de main-d'œuvre pour l'application des engrais seraient moins élevés pour les engrais mélangés, car ceux-ci sont plus faciles à appliquer (application unique) contrairement aux engrais chimiques qui sont appliqués séparément (applications multiples).

Simplicité : À la différence des usines chimiques qui comportent des installations complexes et des équipements précis conçus pour gérer les réactions chimiques impliquant des composants potentiellement dangereux, les unités de mélange sont très simples, disposent de beaucoup moins d'équipements et nécessitent moins d'expertise pour fonctionner et moins de maintenance pour les maintenir en activité. Elles nécessitent simplement un système de pesage précis et un dispositif de mélange efficace pour assurer la production d'un bon produit.

Localisation : Comme les unités de blending sont relativement peu coûteuses à installer et simples à utiliser, plusieurs petites unités peuvent être situées à des endroits stratégiques près des zones de consommation, offrant ainsi un approvisionnement plus fiable en engrais aux régions qui peuvent être éloignées d'un grand complexe de granulation. Cet avantage permet de minimiser, entre autres, les coûts de transport et offre une très grande réactivité vis-à-vis des agriculteurs.

1.4.3.3 Limites du bulk blending

Bien que le bulk blending ait plusieurs avantages qui en font l'alternative de production la plus rentable pour les engrais composés (Formisani, 2005), il présente un certain nombre de limites.

Ségrégation des particules : quand les engrais fabriqués en bulk blending sont exposés à des secousses, ils subissent parfois une ségrégation entraînant la poussée des plus grosses particules vers le haut. Cela peut entraîner une dispersion non uniforme des nutriments lors de l'épandage, certains nutriments pouvant parcourir de plus longues distances que d'autres lorsqu'ils sont expulsés de l'épandeur. Cette distribution déséquilibrée des nutriments peut se traduire par des résultats imprévisibles, un potentiel accru de ruissellement et un gaspillage de nutriments. Cette limite du bulk blending est la plus mise en avant par les producteurs chimiques pour promouvoir leurs produits (engrais complexes). En effet, l'uniformité des produits est le facteur clé du succès des engrais complexes car tous leurs granulés sont fabriqués dans le même contexte. Les granulés sont donc beaucoup plus uniformes en termes de taille, de forme et de densité, ce qui élimine la possibilité de ségrégation pendant la manipulation.

Incompatibilités des inputs du mélange : tous les mélanges ne sont pas possibles. Les matières à mélanger doivent être physiquement et chimiquement compatibles et leurs granulométries doivent être proches et suffisamment resserrées. D'un point de vue chimique, ces matières doivent être sélectionnées de telle sorte à ne pas générer une perte de gaz, une diminution de la disponibilité des éléments nutritifs, une prise en masse due à une mauvaise réaction chimique (par exemple, le mélange d'urée avec les phosphates d'ammonium engendre la formation d'une substance gluante générant ainsi une perte d'efficacité du produit obtenu). D'un point de vue physique, les calibres (taille et densité des particules) des engrais à mélanger doivent être similaires afin d'éviter l'effet de ségrégation des granules durant le transport et l'épandage (par exemple, le mélange de l'urée avec certaines matières peut causer des problèmes d'hétérogénéité vu le faible poids de ses particules comparées aux autres matières). Par ailleurs, plusieurs contraintes peuvent limiter les possibilités de mélange d'un point de vue réglementaire ou sécuritaire (par exemple, le soufre élémentaire est combustible et peut réagir avec les nitrates d'ammonium). Des exemples plus détaillés de ces incompatibilités sont donnés dans §1.4.3.4.

Compositions de mélanges inadaptées : l'un des arguments le plus souvent invoqués contre l'utilisation du *bulk blending* est la production de mélanges inappropriés ne convenant pas à tous les sols et à toutes les plantes. La majorité des formules d'engrais générées par le *bulk blending* sont fixes, commercialement populaires et couramment utilisées par de nombreux agriculteurs, quels que soient leurs sols et leurs cultures (Rajani, 2019). Ce dernier justifie cela par le manque de connaissances des agriculteurs, généralement dû à une mauvaise coordination entre les agriculteurs et les spécialistes de la recherche. Effectivement, l'application de la composition appropriée des mélanges d'engrais exige une connaissance approfondie du type de sol et de culture qu'un agriculteur analphabète ne pourrait pas posséder sans assistance extérieure.

Par ailleurs, dans le contexte de l'application de la fertilisation raisonnée (un contexte qui concerne principalement aujourd'hui les grands exploitants agricoles), le *bulk blending* apporte certes une flexibilité largement plus grande que les engrais fabriqués chimiquement, mais sa capacité à faire face à la très forte variabilité des besoins des sols et des cultures est contrainte par le nombre et les types des inputs de mélange disponibles. En général, le nombre de ces derniers est très limité, il s'agit essentiellement d'urée, DAP, TSP et KCl. Ainsi, outre leur faible variété, en raison de leurs compositions chimiques et de leurs incompatibilités potentielles, ces inputs de mélange ne permettent pas de répondre suffisamment bien à la plupart des besoins spécifiques des couples « sol, culture ». La production d'engrais par *bulk blending* en utilisant

comme inputs un nombre limité d'engrais existants conduit souvent à une présence insuffisante ou excessive d'un ou plusieurs éléments nutritifs. La solution consistant à augmenter le nombre d'engrais pouvant être utilisés par bulk blending devient par ailleurs rapidement très onéreuse. Plus les besoins agronomiques à satisfaire seront nombreux et variés, plus les distributeurs auront à importer un grand nombre de matières premières (inputs de mélange). Cela augmenterait considérablement les coûts de stockage, de transport et de production (le coût d'achat des matières premières représentant environ 60 à 70 % du coût total de production (Formisani, 2005)). Pour résumer, le bulk blending permet d'augmenter la variété des engrais par rapport aux engrais issus de la granulation chimique, mais ses performances restent contestables d'un point de vue agronomique lorsque l'objectif est de répondre à un besoin spécifiquement adapté aux exigences d'une culture et aux propriétés pédologiques d'une parcelle de terre. Cette dernière limite est l'une des problématiques que nous voulons résoudre à travers ce travail de recherche.

1.4.3.4 Incompatibilités dans le bulk blending

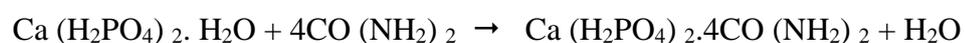
Comme déjà mentionné, les intrants à mélanger lors de la production d'engrais mélangés doivent impérativement tenir compte des contraintes d'incompatibilité chimique. Cette incompatibilité chimique doit être vérifiée non seulement pour les composants d'un granulé (qui peuvent être créés par des réactions chimiques se produisant in situ pendant la fabrication ou ajoutés pendant la granulation), mais aussi pour les composants contenus dans les différents granulés éventuellement adjacents dans les mélanges physiques. Le Tableau 1 montre les incompatibilités chimiques de certains composants :

	Ammonium nitrate	Urea	Ammonium sulfate	Triple superphosphate	Simple superphosphate	Diammonium phosphate	Monoammonium phosphate	Potassium chloride	Potassium sulfate
Ammonium nitrate	-								
Urea	X	-							
Ammonium sulfate	C	C	-						
Triple superphosphate	C	L	C	-					
Simple superphosphate	C	L	C	C	-				
Diammonium phosphate	C	C	C	L	L	-			
Monoammonium phosphate	C	C	C	C	C	C	-		
Potassium chloride	C	C	C	C	C	C	C	-	
Potassium sulfate	C	C	C	C	C	C	C	C	-

Tableau 1. Exemples d'incompatibilités chimiques (adapté de l'ONU-IDO, 1998)

La combinaison de l'urée avec le nitrate d'ammonium, par exemple, donne un produit très hygroscopique qui a une humidité relative critique (*CRH : Critical Relative Humidity*) de 18 % à 30°C, c'est-à-dire que, au-delà de 18 % de l'humidité relative ambiante, les granulés commencent à absorber l'humidité de l'air (ONU-IDO, 1998). Cette combinaison très hygroscopique est également utilisée pour préparer des engrais liquides des nitrates d'urée et d'ammonium) qui, pour certaines solutions concentrées, ne contiennent que 20 % d'eau (IPNI, 2016).

Un autre exemple intéressant est l'incompatibilité du TSP avec l'urée, due à la réaction du phosphate monocalcique monohydraté du TSP avec l'urée pour former un produit d'addition ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) et libérer de l'eau hydratée selon l'équation (Fan & Mackenzie, 1993 ; Fan et al., 1995) :



L'eau libérée par la réaction forme une solution saturée qui rend le mélange urée-TSP humide et collant. Outre les critères de compatibilité chimique, d'autres propriétés physiques des engrais mélangés doivent être vérifiées, en particulier la répartition de la taille des granulés (Hoffmeister et al., 1964). Le mélange d'engrais avec des granulés de différentes tailles peut entraîner une ségrégation lors de la manipulation et de l'épandage, ce qui affecte l'uniformité de l'apport en éléments nutritifs.

2 Industrie des engrais

Le secteur des engrais est l'un des secteurs qui connaît la croissance la plus rapide au monde. Le marché mondial des engrais est passé de 116,7 à 196,9 milliards de dollars américains entre 2014 et 2019 (Pulidindi & Prakash, 2020). Selon les estimations de *Global Market Insights*, la part du marché mondial des engrais devrait atteindre 200 milliards de dollars d'ici 2026, enregistrant entre 2020 et 2026 un TCAC (Taux de Croissance Annuel Composé) de 3,2 %. Une analyse complète du marché des engrais (la taille et les estimations du marché, les moteurs et les opportunités, les principaux domaines d'investissement, la situation concurrentielle, les tendances fluctuantes du marché et les principales stratégies d'expansion) est disponible dans le rapport rédigé par (Pulidindi & Prakash, 2020) accessible en ligne sur le site web de Global Market Insights. Bien que l'utilisation des engrais ait augmenté dans le monde entier au cours du dernier siècle, les parts de marché restent extrêmement déséquilibrées entre les différentes régions du monde. En 2019, la région Asie Pacifique représente environ 60 % du marché mondial des engrais, suivie de l'Amérique du Nord (10 %). Comme indiqué dans la Figure 14, ces deux continents constituent les plus grands marchés du monde, tandis que l'Afrique conserve toujours sa position du plus petit marché du monde.

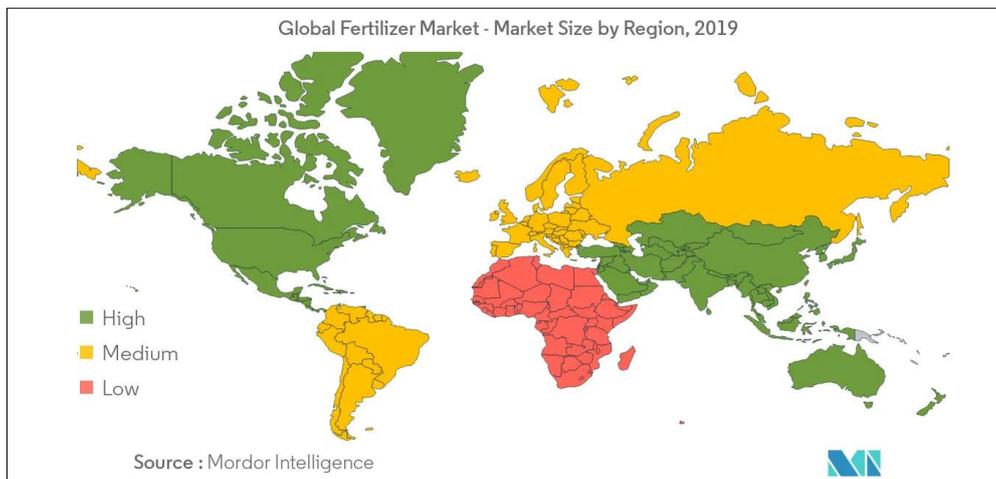


Figure 14 : Marché mondial des engrais en 2019 (source : Mordor Intelligence)

En effet, malgré les nombreux efforts actuellement déployés par l'Afrique pour inciter ses agriculteurs au recours aux engrais, l'utilisation des engrais a très peu progressé depuis 2010, se situant entre 10 et 17 kg par hectare, soit moins de 10 % de la moyenne mondiale (Wagner, 2019). Nous abordons brièvement les causes de cette situation dans §2.1 où nous essayons de résumer la situation agricole en Afrique et les principaux projets menés pour la promouvoir. Dans §2.2, l'accent est mis sur l'un des pays d'Afrique du Nord : le Maroc.

2.1 Caractéristiques du marché des engrais africain

"Le nouvel Eldorado", "Le nouveau marché émergent", "Un immense potentiel de croissance", "Le continent le plus prometteur", "Un pôle de croissance mondial", "Un grand réservoir de croissance", "Un grand potentiel pour les investisseurs" sont quelques-uns des titres aujourd'hui repris par des centaines d'articles au sujet de l'Afrique. Tous ces articles qui se sont principalement appuyés sur les bases de données de la FAO, la Banque mondiale et la Banque Africaine de Développement (BDA), tels que (Kobri, 2018) portant sur le classement des pays africains selon l'IE (Indice d'Émergence) et (Panara, 2019) explorant les résultats de l'étude de la banque britannique *Standard Chartered* sur le classement des économies au plus fort potentiel, se rejoignent sur le fait que l'Afrique constitue pour les investisseurs une opportunité majeure. Cette conviction est principalement justifiée par la richesse de l'Afrique en ressources naturelles, dont une grande partie est inexploitée, en particulier le pétrole, le gaz et une large superficie de terres agricoles riches et fertiles. Akinwumi Adesina (2019), président de la BAD, souligne que 65 % des terres arables non utilisées sont situées en Afrique, que plus de 60 % de sa main-d'œuvre est engagée dans l'agriculture et que le continent dispose d'une abondance d'eau douce et d'environ 300 jours d'ensoleillement par an. Pourtant, malgré ce fort potentiel agricole, l'Afrique est confrontée à une grave insécurité alimentaire (cf. Figure 15). Aucune de ses régions ne peut atteindre la sécurité alimentaire sans recourir aux importations alimentaires ou à l'aide alimentaire étrangère (Mrabet, 2016). En effet, au lieu de mobiliser ses abondantes ressources, l'Afrique dépend plutôt du renforcement de ses importations, qui se sont élevées à 64,5 milliards de dollars en 2017 et qui devraient augmenter encore plus d'ici 2025 (Adesina, 2019). Selon les perspectives agricoles 2020-2029 de l'OCDE (Organisation de Coopération et de Développement Économiques) et de la FAO, bien que l'Afrique subsaharienne et l'Afrique du Nord devraient enregistrer une forte croissance de leur production agricole au cours des neuf prochaines années (21 % et 16 %, respectivement), la dépendance du continent à l'égard des importations alimentaires augmenterait considérablement d'ici 2029. Compte tenu du faible taux de productivité agricole de l'Afrique, le recours au commerce international est le seul moyen d'atténuer les problèmes de sécurité alimentaire. Les chiffres clés publiés en 2019 dans le rapport de l'ONU (L'état de la sécurité alimentaire et de la nutrition dans le monde) révèlent que l'Afrique abrite 31,17 % du déficit énergétique alimentaire mondial, soit 256,1 millions de personnes affamées.

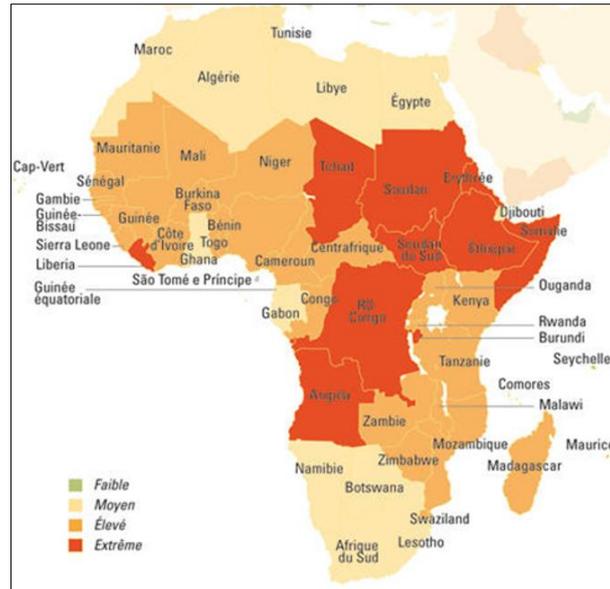


Figure 15 : Insécurité alimentaire en Afrique (source : Jeune Afrique)

Cette situation, que le président de la BDA qualifie de “insoutenable, irresponsable, inabordable et surtout complètement inutile”, est due à plusieurs facteurs, les plus principaux sont les suivants :

Surexploitation des terres cultivées plutôt que de se servir des terres arables non encore cultivées. Même avec la plus grande superficie de terres arables inexploitées au monde, l'Afrique continue à cultiver les mêmes terres depuis des décennies sans pour autant recourir à des intrants agricoles. Cette surproductivité des terres provoque l'épuisement de la matière organique du sol, causant ainsi son érosion et sa salinité. En 2004, environ 30 % des terres agricoles africaines avaient déjà été dégradées (ECA, 2004), une dégradation qui s'est accrue à un rythme alarmant atteignant 40 % en 2016 (Ater, 2017). La situation est plus critique dans certains pays, comme le Burundi et le Rwanda, où environ 70 % des terres avaient déjà été gravement détériorées en 2005 (UNEP, 2006). Les répercussions de cette dégradation pèsent principalement sur les petites exploitations agricoles, qui sont plus vulnérables à l'appauvrissement de la fertilité des sols, en particulier du fait que les petits exploitants agricoles, qui représentent 70 % de la population pour l'Afrique subsaharienne, ne font pratiquement pas usage d'intrants agricoles. Selon (Harsch, 2016), l'épuisement des éléments nutritifs des sols provoque des pertes de récoltes annuelles estimées à un à trois milliards de dollars.

Consommation très limitée des engrais et utilisation inefficace des engrais. Les intrants agricoles tels que les engrais sont les principaux moteurs de la productivité (Gatune, 2011).

Sachs et al. (2004) attribue les faibles rendements africains en partie à la non-utilisation des engrais. L'Afrique est bien en dessous de la moyenne mondiale en ce qui concerne la quantité d'engrais utilisée par hectare, l'Afrique subsaharienne étant la région ayant le plus faible taux d'utilisation d'engrais. La Figure 16 indique la part de certaines régions dans la consommation mondiale d'engrais en 2015.

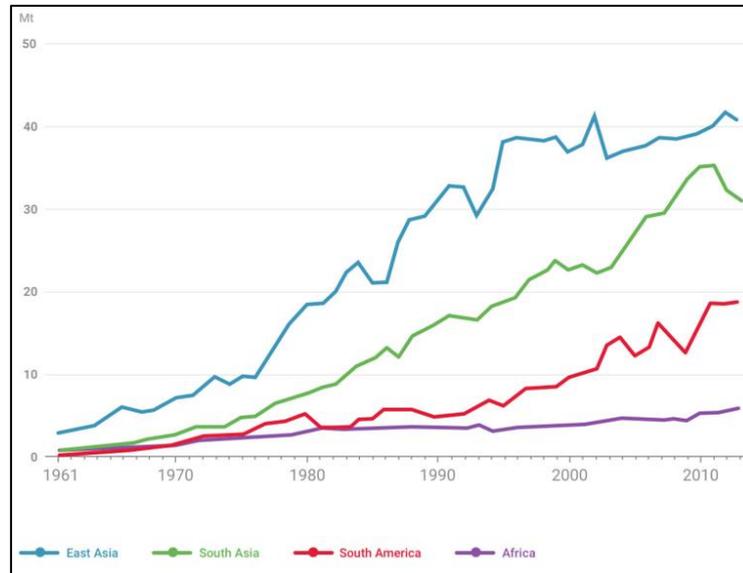


Figure 16 : Part de certaines régions dans la consommation mondiale d'engrais en 2015 (source : FAO, Gro Intelligence)

Bien que la consommation d'engrais ait connu une augmentation ces dernières années, elle est aujourd'hui encore très limitée, en raison notamment des prix élevés des engrais, des coûts logistiques importants et d'une production intérieure limitée dont une grande partie est destinée à l'exportation, les engrais étant trop chers à utiliser pour les paysans africains. Une étude réalisée en 2011² a révélé que le coût des engrais en Afrique subsaharienne était au moins quatre fois plus élevé qu'en Europe. En Afrique du Nord, la situation est moins dramatique. En effet, selon les données de la Banque mondiale³, le taux de consommation d'engrais de l'Afrique du Nord en 2016 est de 85,3 Kg/ha. Les problèmes logistiques en Afrique du Nord sont également moins alarmants que dans le reste de l'Afrique (sauf en Afrique du Sud) mais les récoltes y restent peu abondantes, l'une des principales raisons étant l'utilisation non appropriée des engrais. Ce point sera plus développé dans (§2.2.1) pour le cas du Maroc.

² Étude explorée par Gro Intelligence sur : <https://gro-intelligence.com/insights/articles/fertilizers-in-sub-saharan-africa>

³ <https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/AG.CON.FERT.ZS?view=chart>

Sous-développement de l'infrastructure et de la technologie. Les problèmes logistiques en Afrique sont extrêmement préoccupants et sont dus à un manque flagrant d'infrastructures de qualité tant dans le transport maritime, aérien que terrestre. La mauvaise qualité des infrastructures est un frein majeur à l'activité agricole pouvant entraîner une perte de productivité d'environ 40 % (Jannah & Ping, 2012). À titre indicatif, les données de la Banque mondiale⁴ pour 2018 indiquent que seulement 47,7 % de la population d'Afrique subsaharienne a accès à l'électricité, tandis que seulement 24 % de la population a accès à une source d'eau potable (ONU, 2019). Le sous-développement des infrastructures et de la technologie en Afrique, en particulier en Afrique subsaharienne, est l'un des plus grands problèmes affectant la productivité agricole du continent africain. Le niveau peu développé des infrastructures rend difficile l'accès des produits agricoles au dernier kilomètre, tandis que le manque de technologie compromet toute mise en œuvre de solutions innovantes en matière d'irrigation, de fertilisation et d'utilisation de meilleures semences.

Recours très limité à l'irrigation des terres. L'irrigation améliore les rendements de la plupart des cultures de 100 à 400 % (Bruinsma, 2002), ce qui pourrait offrir à l'Afrique un grand potentiel supplémentaire d'augmentation de ses rendements agricoles. En 2018, Malabo Montpellier Panel, un groupe d'experts agricoles internationaux qui oriente les choix politiques pour accélérer les progrès vers la sécurité alimentaire et l'amélioration de la nutrition en Afrique, a publié un rapport détaillé décrivant le potentiel d'expansion de l'irrigation en Afrique et les défis à relever pour exploiter ce potentiel. Les statistiques contenues dans ce rapport reflètent la situation préoccupante de l'Afrique, notamment en Afrique subsaharienne, où les infrastructures mises en place ne favorisent pas l'irrigation des cultures. L'Afrique compte à peine 6 % de la surface cultivée irriguée, contre 14 % en Amérique latine et 37 % en Asie.

Recherche scientifique négligée et capacités institutionnelles et scientifiques très limitées. La recherche scientifique agricole pâtit d'un manque important de considération et d'intérêt de la part des responsables politiques (Meunier, 2002). La recherche scientifique s'est institutionnalisée et professionnalisée dans plusieurs pays africains au cours des trente dernières années, mais les efforts déployés ne suffisent pas à créer un système agronomique indépendant et durable. Selon (Gatune, 2011), la faiblesse de la recherche interne agronomique a fait perdre à l'Afrique des parts de marché en matière de produits tropicaux, pour lesquels elle dispose d'un

⁴ <https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/EG.ELC.ACCS.ZS>

avantage naturel. Cette négligence a permis à des pays d'Asie du Sud-Est, comme la Malaisie et l'Indonésie, de s'emparer d'une grande partie du marché mondial.

Manque d'investissements agricoles. Le manque d'investissements substantiels, un des problèmes majeurs de l'agriculture africaine, est un facteur aggravant de la stagnation des rendements agricoles en Afrique. Malgré la prédominance de l'agriculture et son rôle directeur dans l'économie africaine, au cours de la dernière décennie, les acteurs publics nationaux et les investisseurs internationaux ont accordé très peu de financements à l'activité agricole. Moins de 15 % des prêteurs en Afrique accordent des financements aux exploitations agricoles (Fox, 2018). Selon (Beucher & Bazin, 2012), ce manque de capitaux se reflète dans la faible part du budget que les États ont allouée à l'agriculture, laquelle atteint à peine 5 % pour le continent tout entier. Fox (2018) impute la piètre productivité africaine au manque d'accès au financement agricole, en particulier pour les petits exploitants, qui n'ont eu droit qu'à 3 % du budget national pour satisfaire leurs demandes. Certes, l'Afrique a consenti des efforts d'investissement dans de nouveaux projets de développement (dont certains sont abordés dans le paragraphe suivant) ; néanmoins, bien que ces projets permettent à certains pays africains de se démarquer, dans l'ensemble, l'Afrique souffre toujours d'un grand manque d'investissements.

Conscients de l'ampleur de ces problèmes, les gouvernements africains, les institutions financières et les banques de développement privées et publiques se sont unis pour former une alliance intra-africaine contre les différents défis à relever d'urgence afin d'éradiquer la famine d'ici 2030, de réduire la pauvreté et de répondre aux besoins alimentaires de tous les Africains et éliminer ainsi les importations de produits qui peuvent être fabriqués en Afrique. À ce propos, le président de la BAD déclare : « Nous perdons de précieuses devises étrangères en continuant à payer autant pour les aliments importés. Nous devons donc rapidement éliminer le solde négatif et commencer à semer, à cultiver, à transformer, à consommer et, finalement, à exporter les aliments nous-mêmes ». Depuis 2010, plusieurs programmes de développement ont été établis dans les différentes phases de production agricole et tout au long des chaînes de valeurs agricoles présentes dans les pays africains. Dans le cadre de sa stratégie *Feed Africa*, la BAD intègre dans son programme plusieurs engagements qui ont été souscrits dans le cadre du Programme Détaillé pour le Développement de l'Agriculture Africaine (PDDAA) et de l'Agenda 2063 de l'Union Africaine, deux cadres politiques panafricains pour la transformation agricole, la création de richesses, la sécurité alimentaire et la nutrition, et la croissance économique. La BAD s'engage alors avec toutes les parties prenantes (les gouvernements nationaux, les communautés économiques régionales, le secteur privé, les agriculteurs, les

partenaires de développement, les institutions de recherche et les organisations de la société civile) pour, entre autres, exploiter plus de terres arables, augmenter la superficie des terres irriguées, inciter les agriculteurs à l'utilisation des engrais, améliorer l'infrastructure logistique et augmenter le niveau technologique de l'agriculture africaine. En 2014, pour soutenir l'agriculture africaine, la banque africaine de développement a dépensé environ 635 millions de dollars, les gouvernements environ 12 milliards de dollars et les investissements directs étrangers 10 milliards de dollars (Adesina, 2019). Entre 2006 et 2014, Le *Green Zones Development Support Project* (projet de soutien au développement des zones vertes), qui a reçu un financement de 38,8 millions de dollars de la BAD, a contribué à la régénération de 309 000 ha de terres forestières et a permis de former les agriculteurs locaux aux techniques agricoles modernes (BAD, 2021). Par ailleurs, l'un des principaux défis de l'Afrique étant la promotion de nouvelles technologies et de techniques agricoles modernes, le programme TAAT (Technologies pour la Transformation de l'Agriculture Africaine), financé par la BAD et visant à étendre les technologies éprouvées à toute l'Afrique, poursuit actuellement l'objectif d'offrir à 40 millions d'agriculteurs des technologies agricoles améliorées d'ici 2025 (Adesina, 2019). Cela contribuerait également à augmenter le taux de consommation d'engrais, une problématique de grand intérêt pour les dirigeants africains compte tenu du rôle extrêmement important que jouent les engrais dans l'augmentation des rendements agricoles. Les prix élevés des engrais étant la cause principale de leur piètre consommation, l'idée est d'accélérer l'accès des agriculteurs à des engrais abordables en soutenant la production d'engrais en gros volume, car cela permettra de réaliser des économies d'échelle et donc de rendre les engrais plus accessibles au sein des pays ainsi qu'au niveau régional. Dans ce contexte, pour renforcer la capacité de l'Afrique à produire des engrais simples et mélangés, la BAD a prêté en 2008 100 millions de dollars à l'entreprise nigériane *Indorama Eleme Fertilizer & Chemicals Limited* pour la production de 1,4 million de tonnes d'urée. Plus tard en 2018, la BAD a accordé un prêt de 200 millions de dollars à OCP pour l'expansion de ses activités. Le groupe OCP, dont nous détaillons l'action, est l'un des seuls industriels d'engrais à avoir consenti de gros investissements au profit du continent.

2.2 Caractéristiques du marché des engrais marocain

Nous présentons le groupe OCP ainsi que les principaux projets qu'il a réalisés pour l'Afrique et plus particulièrement pour le Maroc dans cette section. Nous évoquons aussi brièvement la situation agricole au Maroc tout en nous concentrant plus particulièrement sur la filière des

engrais. Nous rappelons que cette thèse relève d'une recherche exploratoire dans le cadre d'une chaire financée par OCP. Il nous était donc important de s'intéresser d'abord au marché local des engrais (celui du Maroc) avant d'explorer d'autres pays africains.

2.2.1 Consommation et utilisation des engrais

Comme dans la majorité des pays africains, le secteur agricole du Maroc reste le principal moteur de la croissance économique comme en témoignent les chiffres du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime⁵ (MAPM) en 2019 (contribution de 13 % au PIB et offre d'emplois à environ 38 % de la population active). Par rapport à 2008, ces chiffres ont plus que doublé, et le secteur agricole marocain a depuis connu une mutation profonde marquée par une forte augmentation des productions et des exportations agricoles avec un taux de croissance annuel moyen de 8,2 % (MAPM, 2019). Cette évolution positive est notamment attribuable aux réalisations du projet du Plan Maroc Vert (PMV) qui a été lancé par le MAPM en 2008, année ayant marqué un tournant majeur dans l'histoire de l'agriculture marocaine. Le PMV est une stratégie de développement agricole portant sur la période 2008-2019 ayant pour objectif la modernisation de l'agriculture et le renforcement de sa part de dans le PIB du Maroc, l'augmentation de la productivité agricole et la dynamisation des exportations agricoles, la création d'emplois et la lutte contre la pauvreté ainsi que la promotion des investissements agricoles, tout en veillant à la sécurité alimentaire durable de la population. Pour ce faire, un effort d'investissement substantiel a été consenti dans des centaines de projets pour un budget de 115 milliards de dirhams (Ismaili, 2019). L'Agence marocaine pour le Développement Agricole (ADA, 2008) classifie ces projets selon leurs objectifs en sept grands axes, le septième étant lié à la préservation des ressources naturelles pour une agriculture durable. Dans ce cadre, le PMV a mis en place différents programmes, tels que le programme national des cartes d'utilisation des terres agricoles et des cartes de fertilité des sols cultivés, afin de renforcer et rationaliser l'utilisation des intrants agricoles, notamment les engrais. En effet, en 2008, le volume total des engrais consommés était de 900 000 tonnes, soit un taux de consommation de 53,8 kg/ha lequel a atteint 71,1 kg/ha en 2016 (cf. Figure 17). Cette progression n'est cependant pas suffisante. Force est de constater que cette évolution modérée - bien loin de l'objectif fixé par le PMV en 2008 qui est d'augmenter le volume d'engrais consommé de 0,9 à 1,6 million de tonnes/an (+78 %) - se situe en dessous de la moyenne mondiale de 140,55 kg/ha en 2016, selon les données de la Banque mondiale.

⁵ <https://www.finances.gov.ma/Publication/depf/2019/Le%20secteur%20agricole%20marocain.pdf>

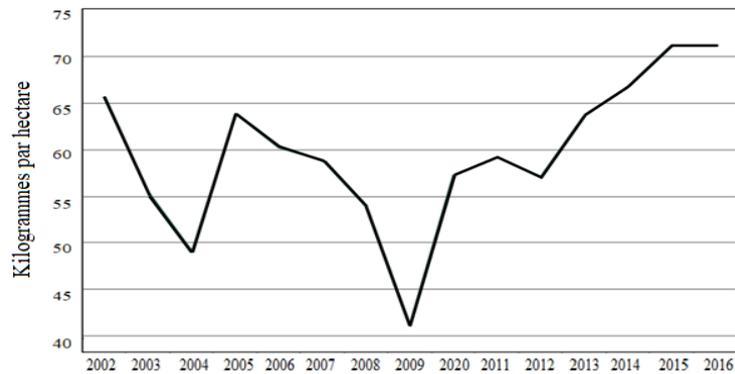


Figure 17 : Évolution de la consommation des engrais au Maroc (source : Banque mondiale)

Outre cette utilisation limitée d'engrais, les rendements visés par les exploitants qui recourent aux engrais sont rarement atteints. Cette situation est due à un usage inapproprié des engrais, provoqué notamment par le recours à des techniques de gestion agricole traditionnelles et par des structures d'encadrement inadaptées. Naamane et al. (2020) ont récemment réalisé une enquête sur les modes d'utilisation des engrais chez les agriculteurs de la région de Casablanca-Settat. L'enquête a été menée au début de 2019 auprès de 100 agriculteurs. Il en ressort que les mêmes formules sont appliquées chaque année, qu'elles sont appliquées une fois par an et que leurs proportions d'application sont figées : en moyenne, 98 % des agriculteurs utilisent 130,9 kg/ha de la formule 33,5-0-0, 95 % des agriculteurs utilisent 175 kg/ha de la formule 10-30-10, 66 % des agriculteurs utilisent 121,9 kg/ha de la formule 21-0-0-24S et 46 % des agriculteurs utilisent 67,9 kg/ha de la formule 46-0-0. Selon (Naamane et al., 2020), ces quantités dépendent uniquement de l'expérience des agriculteurs ; sans analyse de sols, ces pratiques ne tiennent compte ni des besoins des cultures ni des caractéristiques des sols. À court terme, cela limite les rendements agricoles potentiellement réalisables ; à long terme, cela peut nuire à la fertilité des sols et donc à la durabilité de l'agriculture marocaine.

Ce problème d'utilisation non raisonnée des engrais se pose dans la plupart des régions du Maroc, en particulier dans les petites et moyennes exploitations (<20 ha) qui représentent 70 % de la surface agricole (cf. Figure 18). En général, les agriculteurs utilisent deux types d'engrais : les engrais de fond, qui sont appliqués principalement de septembre jusqu'à mi-janvier et qui comprennent souvent des formules NPK standard (par exemple, 10-30-10) ; et les engrais de couverture, qui sont utilisés principalement de janvier à mars et qui comprennent des produits azotés comme l'urée, des produits potassiques comme le KCl, et des produits phosphatés

comme le TSP. Les engrais phosphatés sont fournis par OCP tandis que les engrais azotés et potassiques sont importés du marché international.

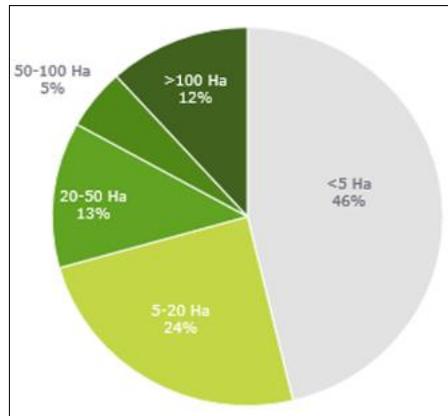


Figure 18 : Surface agricole par taille d'exploitation en 2007 (source : rapport OCP)

En ce qui concerne la production nationale d'engrais, OCP est le seul producteur d'engrais chimiques au Maroc. Il est l'un des principaux producteurs de phosphate au monde et le principal fournisseur d'engrais phosphatés à l'ensemble des distributeurs d'engrais présents sur le marché marocain. La section suivante présente plus en détail l'organisation de l'industrie des engrais au Maroc.

2.2.2 Organisation de la profession des engrais au Maroc

2.2.2.1 Le groupe OCP : L'unique producteur africain des engrais phosphatés

Par l'intermédiaire de l'OCP, le Maroc est un producteur et exportateur net d'engrais phosphatés et un importateur net d'azote et de potasse. Depuis sa création en 1920, OCP constitue un acteur clé sur le marché national et international des phosphates et de ses produits dérivés. Intervenant sur l'ensemble de la chaîne de valeur, OCP extrait, valorise et commercialise du phosphate brut, de l'acide phosphorique (produit intermédiaire) et des engrais. En 2019, avec un chiffre d'affaires de 54,1 milliards de DH, dont 55 % proviennent de l'exportation d'engrais phosphatés, OCP détient une part de 24 % du marché international, selon le rapport annuel de l'OCP pour 2019. En ce qui concerne le marché local, OCP a fourni aux distributeurs locaux 10 % de sa production, soit 1 million de tonnes d'engrais.

OCP possède principalement deux usines de production d'engrais chimiques situées à Safi et à Jorf Lasfar. Le complexe chimique de Safi, premier site chimique d'OCP, a commencé ses activités en 1965 et est aujourd'hui spécialisé dans la production de triple superphosphate

(200 000 tonnes par an) ; quant à Jorf Lasfar, le plus grand complexe d'engrais au monde, sa construction a commencé en 1982 et est aujourd'hui reconnu pour la diversification de ses produits et sa grande capacité de production (plus de 9 millions de tonnes d'engrais ont été produites en 2019). Les trois principaux engrais produits à Jorf Lasfar sont le DAP, le MAP et certaines formules NPK, bien que des formules d'engrais spécifiques et personnalisées puissent également être produites sur commande. Le Tableau 2 présente un résumé du programme industriel 2008-2030 de l'OCP pour la transformation chimique.

Site de production	Kouribga - Jorf Lasfar	<p>4 nouvelles unités intégrées de production d'engrais (1 Mt* d'engrais Chacune)</p> <p>2 nouvelles unités de granulation (0,85 Mt d'engrais chacune)</p> <p>3 nouvelles lignes d'acide sulfurique</p> <p>2 nouvelles lignes d'acide phosphorique</p> <p>3 nouvelles unités de granulation (1 Mt d'engrais chacune)</p> <p>Nouvelles unités de diversification et nouveaux produits</p>
	Gantour - Safi	<p>Nouvelle plateforme de valorisation chimique constituée, à l'horizon 2026, de :</p> <p>3 lignes de production d'acide phosphorique d'une capacité unitaire de 500 000 tonnes</p> <p>3 unités de production d'acide sulfurique d'une capacité unitaire de 1,5 Mt par an</p> <p>3 centrales électriques d'une capacité unitaire de 65 MW</p> <p>Construction de nouvelles lignes de granulation (4 Mt d'engrais) et de nouvelles unités phosphorique</p>
	Boucraâ - Laâyoune	<p>Nouvelle plateforme de transformation :</p> <p>Nouvelle usine d'engrais (1 Mt équivalent DAP)</p>

*Mt : Millions de tonnes

Tableau 2. Programme industriel 2008-2030 de l'OCP concernant la valorisation chimique (*source : Rapport OCP*)

Comme l'indique le tableau ci-dessus, le groupe prévoit de construire un troisième complexe industriel intégré pour la production d'engrais sur le site de Phosboucraâ, dans la ville de Laâyoune (ville marocaine située au Sahara occidental). Ce projet a déjà été lancé en 2016 et vise à la création d'une plateforme de production dédiée à la fabrication du DAP avec une capacité annuelle de 1 million de tonnes d'engrais.

2.2.2.2 Le marché de distribution des engrais

Le Maroc est l'un des rares pays africains à disposer d'un réseau étendu de distribution d'engrais avec une infrastructure suffisante pour répondre aux besoins des agriculteurs consommateurs de fertilisants. Globalement, il y a 16 distributeurs, chacun pouvant compter plusieurs points de

vente (cf. Figure 19-b). La carte « a » de la Figure 19 affiche les localisations des sites de production de ces 16 distributeurs. En effet, si pour certains distributeurs, l'activité principale se limite à la distribution d'engrais OCP et/ou d'autres engrais importés, pour la majorité de ces distributeurs, les activités de fabrication (c'est-à-dire le mélange des engrais), de conditionnement et de commercialisation sont également exercées. D'autres produits tels que les semences et les aliments pour animaux sont également mis en vente.

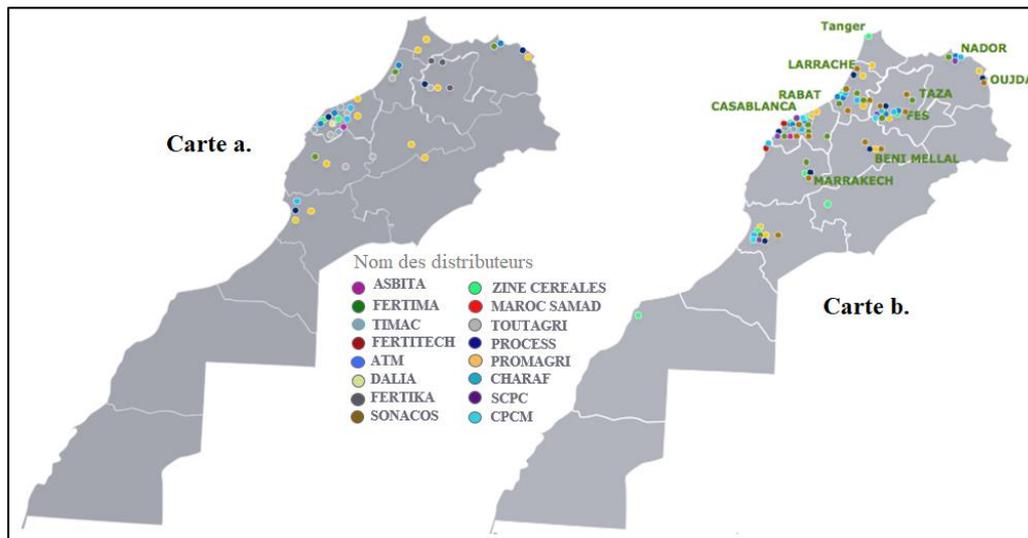


Figure 19 : Réseau de distribution d'engrais au Maroc : a) Sites de production ; b) Points de vente
(source : Intranet de l'OCP)

Les distributeurs ayant les plus grandes capacités de blending (entre 50 et 80 tonnes par heure) sont Fertima, Timac, Charaf, Zine cereals et Asbita. Sur les 71 points de vente répartis sur le territoire national, ces derniers comptent ensemble 35 points de vente. En général, ces distributeurs vendent des engrais conventionnels, sauf dans de rares cas, où ils produisent des engrais spécifiques en fonction des besoins du sol et de la culture cultivée par le client. Ce dernier fait généralement référence ici aux grands exploitants agricoles procédant aux analyses de leurs sols avant de faire parvenir le rapport de ces analyses à un distributeur local, lequel s'appuie sur celui-ci pour fabriquer la formule d'engrais requise. Pour les petits fermiers, qui sont au nombre de 900 000 et représentent 50 % de la surface agricole, le taux de consommation d'engrais n'est que de 10 % avec une consommation souvent inadéquate.

En effet, si les capacités logistiques des distributeurs sont suffisamment importantes pour satisfaire la demande potentielle d'engrais adaptés, plusieurs raisons rendent le marché de la distribution actuel inefficace en matière de la fertilisation raisonnée :

- Réticence à l'égard des engrais mélangés : les agriculteurs sont enclins à acheter l'engrais le plus populaire du marché, en particulier le DAP, dont le prix est fortement subventionné par l'État, ce qui rend les engrais NPK difficiles à concurrencer avec le DAP.
- Un marché de détail non structuré et non connu : il existe plusieurs détaillants informels qui sont méconnus par les distributeurs et qui risquent de vendre les produits à des prix plus élevés et de frauder sur les quantités et la qualité des produits.
- Prix de vente élevés : cela est dû, entre autres, aux achats fragmentés d'engrais azotés et potassiques (plusieurs fournisseurs) ce qui fait augmenter leurs prix en raison de l'absence d'économies d'échelle.

Les efforts limités déployés par les distributeurs (manque d'encouragement à l'utilisation de formules adaptées, programmes de vulgarisation limités pour les agriculteurs, prix de vente très élevés, etc.) ne permettant pas le développement du marché de la distribution, OCP s'engage depuis 2012 à réguler et redynamiser le secteur de la distribution en instaurant plusieurs mesures :

- Orienter des distributeurs vers la fertilisation raisonnée ;
- Développer un système innovant de distribution des engrais reposant sur des relations transparentes avec les distributeurs.
- Signer des contrats avec les distributeurs les engageant à entreprendre des actions pour le développement de l'agriculture nationale, en échange de quoi l'OCP leur fournira les volumes d'engrais phosphatés nécessaires pour répondre aux besoins du marché local.
- Fournir des subventions aux distributeurs menant des actions de développement agricole (par exemple, stabiliser les prix, mettre en place des programmes de vulgarisation agricole, créer un écosystème permettant aux petits agriculteurs de devenir des entrepreneurs agricoles, etc.)

L'objectif de l'OCP à travers toutes ces actions est de promouvoir une fertilisation rationnelle et raisonnée, en vue de permettre un développement durable de l'agriculture nationale. En ce sens, la Fondation OCP a mis à la disposition des agriculteurs des caravanes qui se déplacent dans différentes régions pour les former aux fondamentaux et aux enjeux de la fertilisation raisonnée (analyses de sol, caractéristiques de leurs sols, cultures adaptées à ces caractéristiques, engrais adaptés...) et les encourager à y avoir recours.

L'agriculture durable et plus particulièrement la fertilisation raisonnée est l'un des thèmes clés que l'OCP appuie, raison pour laquelle elle constitue l'un des principaux piliers de sa stratégie

globale, de sa stratégie commerciale et de sa stratégie environnementale. Nous abordons la stratégie de l'OCP quant à la fertilisation raisonnée dans la section suivante.

2.2.3 Le groupe OCP et la fertilisation raisonnée

En tant que détenteur de 70 % des réserves mondiales de phosphate, OCP se sent responsable pour aider les agriculteurs du monde entier à produire suffisamment de nourriture. C'est pourquoi il se donne aujourd'hui pour mission de « nourrir les sols pour nourrir le monde ». Pour OCP, cela doit se concrétiser en s'inscrivant dans une perspective de durabilité afin que chaque individu puisse accéder à une croissance durable. À cet effet, OCP accorde aujourd'hui la priorité à quatre domaines stratégiques : l'innovation, la personnalisation, l'éducation et l'Afrique. Ces quatre piliers sont indispensables pour que l'OCP puisse réaliser sa stratégie globale : créer un avenir plus durable en utilisant des solutions innovantes, qui amélioreront la fertilité des sols et développeront des pratiques agricoles plus durables dans le monde entier, et plus particulièrement en Afrique. C'est dans ce contexte que l'OCP confère une énorme importance à l'agriculture durable et plus précisément à la fertilisation raisonnée en la plaçant au cœur de bon nombre de ses projets de moyen/long terme :

Au niveau africain, OCP Africa, filiale d'OCP S.A., enchaîne depuis sa création en février 2016 une multitude de projets et de programmes visant à aider les agriculteurs africains à répondre à leurs besoins en fonction de leurs sols, de leurs cultures et des spécificités locales. En ces cinq dernières années, OCP a réalisé un nombre impressionnant de projets couvrant l'ensemble de la chaîne de valeur, tels que la construction d'usines d'engrais locales, le développement de capacités logistiques et de distribution, l'investissement dans la recherche pour le développement de formules adaptées aux besoins des sols et des cultures, etc. En se limitant à ces deux dernières années (depuis 2019), les principaux engagements/projets réalisés par OCP en faveur du continent africain sont :

- Développement Agricole intégré en Éthiopie à travers la mise en place de plateformes de démonstration des bonnes pratiques agricoles au niveau de plus de 4 200 parcelles et l'appui à plus de 16 000 agriculteurs éthiopiens à travers la distribution de plus de 4 200 semoirs spécialement conçus pour le teff (i.e. une plante cultivée comme céréale secondaire en Afrique). Cela a permis d'améliorer les rendements, qui ont augmenté de plus de 68 % par rapport à la production nationale moyenne de teff en Éthiopie.

- Mise en place de divers programmes visant la promotion de la fertilisation raisonnée au Rwanda, au Ghana et au Cameroun en collaboration avec le Rwanda Agriculture Board, le Ministère de l'Alimentation et de l'Agriculture du Ghana, et le Ministère camerounais de l'Agriculture et du Développement Rural.
- Développement de fermes expérimentales avec des laboratoires d'analyse des sols et des plateformes de recherche agricole dans 14 pays africains dont le Sénégal, la Côte d'Ivoire, le Ghana, et la Guinée Conakry.
- Signature d'un mémorandum avec la Commission Économique pour l'Afrique dans le but de promouvoir l'innovation et la science en matière d'agriculture africaine tout au long de la chaîne d'approvisionnement agricole.
- Création d'un laboratoire de classe mondiale dédié à l'Afrique dans le cadre d'une convention signée en mars 2019 avec l'institut allemand Fraunhofer IMWS.
- Mise en place d'un nouveau cadre de coopération avec le Ministère ghanéen de l'Alimentation et de l'Agriculture portant, entre autres, sur les initiatives en faveur des agriculteurs, la cartographie des sols, et l'innovation.
- Signature d'un mémorandum avec la Commission de l'Union Africaine et l'Agence de Développement de l'Union Africaine pour stimuler l'utilisation des engrais adaptés aux sols et aux cultures de chaque région.
- Collaboration avec la Société Internationale Islamique de Financement du Commerce pour financer une série de programmes visant à accroître les rendements de production et les revenus des agriculteurs africains (par exemple, la formation des agriculteurs aux bonnes pratiques agricoles, la fourniture de conseils sur l'analyse et la fertilisation des sols et la promotion de l'innovation et la digitalisation de l'agriculture).

Ce sont quelques-uns des projets de l'OCP pour l'Afrique, beaucoup d'autres ne sont pas mentionnés ci-dessus mais peuvent être trouvés dans les rapports annuels⁶ de l'OCP. Les projets prévus pour les années à venir n'ont pas été mentionnés non plus, mais parmi les plus marquants au regard de la fertilisation raisonnée, citons les projets de construction d'usines chimiques (principalement au Nigéria et en Éthiopie) et d'unités de blending pour la fabrication d'engrais sur-mesure (au Nigeria, au Rwanda, en Côte d'Ivoire et en Éthiopie) ainsi que les programmes de cartographie des sols prévus dans plusieurs pays africains afin de permettre aux pays

⁶ https://corpo.ocpgroup.ma/sites/default/files/2020-09/OCP%20RA%202019%20VF_0.pdf

concernés d'identifier les potentialités réelles de leurs sols et la carence de ces derniers en éléments nutritifs.

Au niveau national (Maroc), la nécessité de recourir à une fertilisation raisonnée est tout aussi pressante. OCP s'est résolument engagé dans la transformation de l'agriculture marocaine pour la dynamiser tout en assurant sa durabilité, une mission que OCP poursuit depuis 2007 à travers la promotion de la fertilisation raisonnée. OCP mobilise en effet plusieurs leviers pour amorcer cette dynamique en démarrant avec le projet des cartes de fertilité. Il s'agit d'un projet lancé en 2007 visant à analyser plus de 30 000 échantillons de sol pour déterminer leurs caractéristiques dans plusieurs régions du Maroc et ce, afin de pouvoir au final recommander des solutions d'engrais personnalisées aux agriculteurs. Ce projet a permis de mettre gratuitement à la disposition des agriculteurs une solution informatique, appelée "Fertimap" (cf. (Annexe1/section1)) leur permettant de calculer leurs besoins en N, P et K et de recommander le ou les engrais à appliquer pour répondre à ces besoins.

Afin de faire connaître cet outil auprès des agriculteurs et de leur transmettre les meilleures pratiques de la fertilisation raisonnée, OCP a lancé en septembre 2008, l'initiative "Al Moutmir" (le fructueux en arabe), une offre multiservice basée sur une approche scientifique cherchant à proposer des solutions innovantes et personnalisées. Les ingénieurs agronomes de l'OCP et ses partenaires scientifiques et industriels se sont réunis pour accompagner les agriculteurs à travers plusieurs programmes de fertilisation. Ces derniers incluent des formations, des plateformes de démonstration, des dispositifs itinérants ainsi que des analyses de sol et ce, en faisant appel à de nouvelles solutions numériques et technologiques. À ce jour, plus de 10 000 agriculteurs ont bénéficié de ces programmes sur plus de 200 localités, entraînant des augmentations significatives des rendements agricoles, en particulier pour les céréales et les légumineuses.

Pour consolider ce dispositif et favoriser l'utilisation de blends NPK personnalisés, plus récemment (2019), l'OCP a conçu le "Smart Blender", une unité de blending intelligente mise à la disposition des agriculteurs à travers le réseau marocain de distribution d'engrais. Il s'agit d'une nouvelle technologie développée par les équipes d'OCP permettant d'introduire les paramètres d'analyse du sol de l'agriculteur avant de générer la formule de mélange d'engrais adaptée au sol et à la culture concernés. L'outil affiche ensuite les quantités d'engrais disponibles à mélanger afin de se rapprocher le plus possible de la formule requise, laquelle est ainsi mieux adaptée aux caractéristiques du sol et aux exigences de la culture pratiquée. Ces mélangeurs intelligents ont une capacité moyenne de 5 000 tonnes par an, ce qui permet de couvrir jusqu'à 10 000 hectares de terres arables. Ils permettent également de générer automatiquement les

informations détaillées de fabrication avant de les imprimer sur des étiquettes assurant ainsi une traçabilité totale de la production. Jusqu'en 2019, l'OCP a pu créer, en partenariat avec les distributeurs d'engrais, 30 unités de "Smart Blender" qui ont été installées dans les principales zones régionales du Maroc.

Dans le cadre d'un partenariat avec Cosumar, un opérateur sucrier marocain spécialisé dans l'extraction, le raffinage et le conditionnement du sucre, OCP a mis à la disposition des agriculteurs de la région de Tadla une unité de production intelligente grâce à laquelle 60 formules NPK personnalisées ont été fabriquées. Ces formules sont spécifiquement adaptées aux besoins de la culture de la betterave sucrière en fonction des caractéristiques des sols des agriculteurs (ce qui les amène à se tourner vers la betterave), et en contrepartie, Cosumar leur garantit la mise à disposition de ces formules ainsi que la récupération de leurs récoltes (Cosumar étant le monopole du sucre au Maroc).

Ces initiatives ont certainement permis de sensibiliser les agriculteurs bénéficiaires aux enjeux et à l'importance de la fertilisation raisonnée. Cependant, comme le montrent les résultats de l'enquête de Naamane et al. (2020) sur les modes d'utilisation des engrais chez les agriculteurs de la région de Casablanca-Settat (l'une des régions agricoles les plus dynamiques), les pratiques de fertilisation raisonnée sont globalement encore loin d'être déployées, et l'utilisation des engrais fait toujours appel à des fertilisants conventionnels en se basant uniquement sur l'expérience des agriculteurs. Il est à préciser que même le nombre de ces engrais conventionnels est très limité comparé à la variété des sols et des cultures pratiquées au Maroc. Bien que le projet Fertimap ait abouti à 11 nouvelles formules NPK régionales (4 formules pour l'olive, 3 pour les céréales et 4 pour les légumineuses), celles-ci ne peuvent en aucun cas couvrir la totalité des besoins nutritifs, étant donné la grande diversité des variétés agricoles et des caractéristiques des sols, qui peuvent varier d'un hectare à l'autre. D'ailleurs, nous rappelons que pour une seule culture (la betterave sucrière) et une seule région (la région de Tadla), le partenariat OCP-Cosumar a donné lieu à 60 formules NPK. La majorité, voire la totalité, des agriculteurs de cette région ont préféré se consacrer à la culture de la betterave sucrière suite à ce partenariat. Or, ce choix risque de s'avérer inapproprié, car en principe la culture à choisir doit être compatible avec le type de sol afin de maximiser les rendements, mais ceci est une autre problématique (i.e. personnalisation des semences). La problématique qui nous préoccupe dans ce travail de recherche est plutôt relative au besoin d'approvisionner le marché marocain en engrais personnalisés puisque l'utilisation des engrais dans ce pays - pays africain que nous

avons choisi en raison de la disponibilité de ses données de fertilité et du fait qu'il est le pays d'origine de l'OCP - n'est pas optimisée.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné la place des engrais dans l'agriculture et plus particulièrement dans l'agriculture africaine et marocaine. Nous avons d'abord approfondi la notion d'engrais avant de nous concentrer sur leur utilisation en Afrique puis au Maroc. Le choix du Maroc a été fait notamment en raison de la disponibilité des données de fertilité qui nous ont été nécessaires pour cette étude. Les principales conclusions à retenir de ce chapitre sont les suivantes :

- Afin de nourrir une population mondiale de 9,1 milliards de personnes d'ici 2050, la production alimentaire devra augmenter d'environ 70 % par rapport à son niveau de 2005 (Conforti & Sarris, 2012). Toutefois, en raison des faibles taux d'utilisation des engrais et des taux élevés d'extraction des nutriments, les sols sont souvent incapables de fournir sans apport complémentaire les ingrédients nécessaires à la production des biens alimentaires (Fixen et al., 2015). Ces ingrédients doivent contenir les proportions optimales d'un certain nombre d'éléments nutritifs, les plus importants étant l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K). L'augmentation de la production alimentaire nécessite alors le recours à une fertilisation raisonnée en utilisant des engrais personnalisés capables d'augmenter les rendements agricoles tout en préservant la fertilité des sols pour une agriculture à la fois performante et durable. Le type d'engrais considéré dans ce travail de recherche est l'engrais chimique (engrais inorganique). Sa nature chimique fait qu'il semble incompatible avec les enjeux de l'agriculture durable mais, comme nous l'avons expliqué au (§1.2.3) et d'après de nombreuses expériences agricoles, il n'y a aucun risque à utiliser des fertilisants chimiques s'ils sont appliqués selon une fertilisation raisonnée où les nutriments et leurs quantités sont en adéquation avec les besoins spécifiques de chaque plante.

- Conscient de l'importance capitale de la fertilisation raisonnée, OCP lui accorde une attention particulière et vise à offrir à ses clients des solutions d'engrais personnalisées tout en plaçant l'Afrique au sommet de ses priorités. Depuis la création de sa filiale OCP Africa en 2016, le groupe vise à accroître sa présence sur le marché africain des engrais et s'engage à répondre aux besoins spécifiques de l'agriculture africaine en mettant en œuvre une multitude de projets favorisant les pratiques de la fertilisation raisonnée. Au niveau national (Maroc), le groupe s'engage encore plus à dynamiser l'agriculture durable en investissant dans plusieurs projets et

programmes pour accompagner et sensibiliser les agriculteurs marocains aux avantages de la fertilisation raisonnée. Les principaux projets mis en œuvre par OCP pour l'Afrique et plus particulièrement pour le Maroc sont détaillés dans (§2.2.3).

- Néanmoins, comparée aux autres régions du monde, l'Afrique reste loin derrière en matière de consommation d'engrais et de fertilisation raisonnée malgré son fort potentiel agricole et malgré tous les efforts de l'OCP et des autres investisseurs. Des études scientifiques et des données statistiques ont été citées dans ce chapitre pour appuyer ce constat, notamment pour le Maroc pour lequel (Naamane et al., 2020) ont conduit une enquête attestant du fait que le recours aux engrais personnalisés est encore loin d'être pratiqué au Maroc.

- En effet, un engrais personnalisé correspond à une formule chimique spécifiquement adaptée dont les éléments nutritifs et leurs proportions diffèrent en fonction des caractéristiques pédologiques et des exigences écologiques de la culture agricole considérée. Sa détermination nécessite une connaissance approfondie des différents aspects de la fertilisation, notamment le rendement visé, les besoins nutritifs des cultures et la concentration du sol en éléments nutritifs (Cottenie, 1980). Pour connaître cette concentration et optimiser la gestion nutritive des plantes, les agriculteurs doivent analyser régulièrement leurs sols car les propriétés pédologiques varient en fonction des pratiques de gestion des terres et des caractéristiques inhérentes du sol (Jenny, 1941). Cette hétérogénéité peut se traduire par une grande variété de besoins nutritifs auxquels il faudra alors répondre par une forte diversité de formules d'engrais personnalisés.

- Pour produire des engrais chimiques, deux principaux modes de production sont aujourd'hui proposés : *i*) la production par réaction chimique (§1.4.1) qui permet à ce que chaque granule corresponde à la formule souhaitée (mode de production adopté par OCP) mais qui implique des infrastructures très onéreuses et une variété restreinte d'engrais et *ii*) la production par mélange (*bulk blending*) qui apporte une flexibilité largement plus grande que les engrais fabriqués chimiquement et qui a plusieurs avantages par rapport à la production chimique, mais qui présente également certaines limites dont celle de produire des compositions de mélange inadaptées (§1.4.3.3). En effet, le *blending* d'engrais est souvent utilisé pour produire des formules standards qui sont commercialement populaires et couramment utilisées par les agriculteurs. Les inputs utilisés aujourd'hui dans le *blending* des engrais ne permettent pas de répondre suffisamment bien à la plupart des besoins spécifiques des couples « sol, culture » rendant ainsi sa performance contestable d'un point de vue agronomique. Cela a été démontré pour le cas du Maroc, pour lequel nous avons constaté, en utilisant l'outil Fertimap, des écarts significatifs entre les besoins en nutriments de la culture du blé dans certaines provinces

marocaines et les solutions d'engrais que Fertimap a recommandé sur la base des engrais disponibles sur le marché marocain (voir les colonnes 18 à 20 de (§Annexes - Tableau 1)).

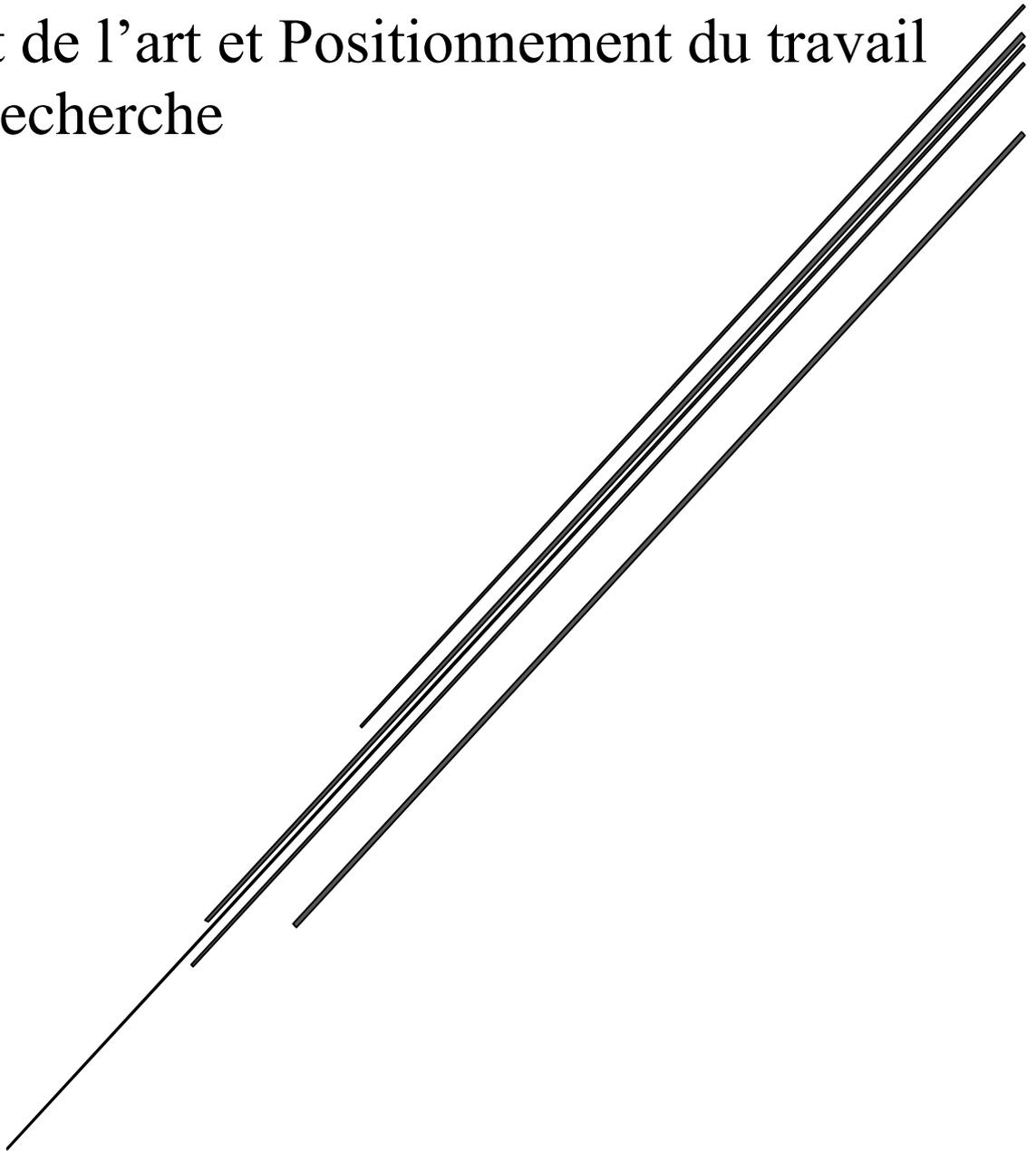
- Une très grande variété d'engrais personnalisés ne peut ainsi pas être obtenue avec les modes de production actuels, car d'une part la production par réaction chimique, comme le fait l'OCP, conduit à des prix de vente très élevés tout en limitant la diversité des engrais (ceci explique pourquoi les agriculteurs africains, à faible pouvoir d'achat, ne se tournent pas vers ce type d'engrais). D'autre part, le bulk blending, bien que plus flexible, ne répond pas suffisamment aux besoins de l'agriculture durable car il utilise un nombre limité d'inputs existants conduisant souvent à une présence insuffisante ou excessive d'un ou plusieurs nutriments. La solution consistant à augmenter le nombre d'engrais utilisables en tant qu'inputs par le bulk blending devient par ailleurs rapidement très onéreuse.

C'est en tenant compte de tous ces constats que nous pouvons nous poser la question du mode de production à adopter pour pouvoir fabriquer une grande variété de fertilisants personnalisés à des prix abordables pour les agriculteurs africains. Cela nous conforte dans notre décision de rattacher l'objectif de l'OCP de promouvoir une agriculture durable en Afrique à notre problématique de recherche (§2.1.2) : Quelle est l'organisation industrielle à adopter par le Groupe OCP pour accompagner la croissance de la diversité ?

Comme nous l'avons énoncé de manière très synthétique dans la section (§2.2) de notre introduction générale, l'organisation que nous proposons pour répondre au défi de la forte diversité est basée sur la personnalisation de masse. Le chapitre suivant, qui constitue la deuxième étape de notre méthodologie de recherche, explique plus en détail les raisons pour lesquelles nous proposons une telle organisation en nous appuyant sur une revue de la littérature concernant les méthodes de gestion de la diversité, notamment la personnalisation de masse.

CHAPITRE 2

État de l'art et Positionnement du travail
de recherche



Chapitre 2. État de l'art et Positionnement du travail de recherche

Introduction

Après avoir énoncé notre problématique de recherche, qui relève le défi de déterminer l'organisation industrielle que doit adopter l'OCP pour faciliter la gestion de la grande variété, en suivant la méthodologie de recherche présentée dans la section 2 de l'introduction générale, nous allons maintenant procéder à la deuxième étape, à laquelle nous consacrons la première partie de ce chapitre. La première section de cette partie fournit un état général de l'art afin d'analyser les connaissances théoriques sur les méthodes utilisées pour faire face à une grande diversité. Dans ce contexte, les principales contributions sur les concepts de la diversité, de la personnalisation de masse, et de la différenciation retardée sont respectivement présentées dans les sous-sections (§1.1), (§1.2), et (§1.3). Ces concepts étant très largement explorés, nous ne reprenons dans ce chapitre que les principaux points qui sont indispensables à la compréhension du positionnement de notre approche. Pour orienter les lecteurs vers des revues de littérature plus détaillées et plus exhaustives, des références bibliographiques sont proposées. Dans la deuxième section, nous utilisons ces connaissances et les articulons dans une nouvelle organisation stratégique qui est celle d'une nouvelle personnalisation de masse basée sur l'approche du Reverse Blending. La deuxième partie de ce chapitre vise à positionner la nouvelle organisation proposée par rapport aux outils existants de la personnalisation de masse avant de construire une grille d'analyse par laquelle nous démontrons son originalité. Cette dernière est abordée dans la conclusion de ce chapitre.

Partie I : État de l'art et Proposition d'une nouvelle organisation basée sur la personnalisation de masse

Avant de positionner notre recherche par rapport à la littérature existante (cf. Chap.2/Partie II), cette première partie analyse la littérature existante sur les principales techniques de personnalisation de masse (section 1). Nous utilisons les résultats de cette synthèse de la littérature pour proposer une nouvelle organisation basée sur la personnalisation de masse est proposée pour relever le défi de la forte diversité dans la chaîne logistique des engrais (section 2).

1 Revue de littérature

1.1 Diversité

Pour se démarquer dans un environnement de plus en plus concurrentiel, les industriels adaptent leur portefeuille de produits aux préférences des consommateurs à travers l'offre d'une grande diversité de produits (Chatras, 2016). Nous définissons cette diversité dans le paragraphe (§1.1.1) puis présentons ses différentes classifications avant de résumer les principales conclusions sur la gestion de la diversité.

1.1.1 Définition de la diversité

La diversité ou la variété des produits fait référence aux variations des attributs et/ou des caractéristiques des produits menant à différentes configurations (Balakrishnan & Chakravarty, 2008 ; Murthy et al., 2009 ; Zhang & Huang, 2010). Elle est due à diverses raisons, notamment la demande des clients pour des produits ayant de nouvelles fonctions et caractéristiques, des exigences régionales différentes, un grand nombre de segments de marché avec des besoins différents et des spécifications de certification différentes (ElMaraghy et al., 2013). La variété des produits n'est pas seulement liée à l'augmentation de la diversité des produits finis mais cette variété intervient tout au long du cycle de vie du produit, et est liée à l'ensemble des aspects de la chaîne logistique (ElMaraghy et al., 2013). Ces derniers affirment que les variantes de produits peuvent être obtenues par l'innovation de nouveaux produits ou l'adaptation de produits existants à de nouvelles exigences, la mise à l'échelle de produits existants ou la modification de leurs modules et composants.

La variété des produits influence la performance des installations de production dans une chaîne logistique en termes de coût, de réactivité et de qualité. À mesure que cette variété augmente, des pénalités sont encourues dans toutes les entités de l'usine de fabrication (Cooper & Kaplan, 1991). En effet, plus la variété sera grande, plus les volumes du grand nombre de produits à fabriquer seront faibles. Cela va se traduire par des activités de montages, d'assemblages et de changements de séries plus fréquents et donc par un temps de production et de mise en service plus long, ce qui va donc nuire à la productivité des équipements et de la main-d'œuvre.

1.1.2 Classifications de la diversité

1.1.2.1 Diversité externe et interne

La littérature sur la diversité des produits ((Fisher & Ittner, 1999) ; (Pil & Holweg, 2004)) fait référence à deux types de diversité différents : la diversité externe et la diversité interne.

Diversité externe. Fisher et Ittner (1999) définissent la variété externe comme étant l'ensemble des choix offerts au client. Cette variété peut être estimée en multipliant toutes les caractéristiques possibles offertes (par exemple, pour un véhicule, 4 styles de carrosserie x 12 combinaisons de groupes motopropulseurs x 10 couleurs extérieures x 3 couleurs intérieures x 15 options). Il s'agit alors d'une diversité mesurée par le nombre de produits finis.

Diversité interne. Fisher & Ittner (1999) définissent la variété interne comme étant l'ensemble des systèmes/sous-systèmes et composants/sous-composants utilisés dans la création des produits finis. En effet, en traduisant la variété externe offerte au client en exigences du processus de fabrication, une variété interne est systématiquement générée. MacDuffie et al. (1996) ont mesuré la variété interne en fonction de la complexité de la structure du produit : *i*) la variété interne fondamentale (ex. les modèles et les styles de carrosserie proposés pour un véhicule) ; *ii*) la variété interne intermédiaire qui permet une différenciation supplémentaire pour le client (ex. le nombre de faisceaux de câbles reliant tous les éléments électriques du véhicule, les couleurs du véhicule...) et *iii*) la variété interne périphérique, soit le nombre total de composants installés par produit, ainsi que la variété de ces composants.

1.1.2.2 Diversité commerciale et écologique/sanitaire

Quand la diversité est conçue pour répondre aux attentes individuelles des clients (diversité qui nous préoccupe dans cette thèse), et non pas aux attentes de groupes de clients (famille de produits), celle-ci devient encore plus forte et peut conduire à une très grande variété de produits personnalisés. Dans ce contexte, deux types de diversité peuvent être distingués : une diversité d'origine commerciale et une diversité qui trouve sa justification dans des considérations écologiques et/ou sanitaires.

Diversité commerciale. Cette diversité résulte d'une stratégie commerciale que les services marketing adoptent pour mieux répondre aux attentes des clients. Accroître sa diversité est désormais indispensable pour obtenir un avantage compétitif sur la concurrence. Dans ce contexte, en production continue, l'une des rares industries qui de nos jours veille à offrir des

produits individuellement personnalisés pour ses clients est l'industrie cosmétique (par exemple, l'Oréal (Caussanel, 2018)).

Diversité écologique et/ou sanitaire. Cette diversité est indispensable car elle touche à la santé et donc à la qualité de vie (industrie pharmaceutique) ou à la survie de l'humanité (agriculture raisonnée).

1.1.3 Gestion de la diversité

La diversité, qui d'après Lancaster (1979) s'oppose aux économies d'échelle et donc à l'efficacité, peut compromettre le processus de production en termes de qualité, de délai et de coûts (Child et al., 1991). Dans la production continue plus particulièrement, sa gestion s'avère un véritable problème en raison des difficultés liées, entre autres, à la complexité de planification et d'ordonnement, l'augmentation des arrêts de production due aux temps de lancement, la séparation des produits au niveau des espaces de stockage, la segmentation des flux à distribuer, etc. D'un autre côté, offrir une grande variété de produits est devenu indispensable pour augmenter sa part de marché (Nepal et al., 2005) ; plus le produit est individuellement personnalisé, plus le client est susceptible d'être pleinement satisfait. La variété des produits crée à la fois des défis et des opportunités pour les entreprises. En effet, elle peut offrir la possibilité d'élargir les marchés et d'augmenter les revenus et le volume des ventes (ElMaraghy et al., 2013) ; mais cela n'est pas garanti si la variété n'est pas bien gérée à tous les stades de la conception, de la planification, de la fabrication et de la distribution. Cela rejoint l'idée de Da Cunha Reis et al. (2013) qui ont constaté, sur la base des résultats de leur étude bibliographique, que le coût est le facteur le plus important provoquant des diminutions de la variété des produits, alors que la satisfaction client et la fidélité ont la plus grande influence positive sur la variété des produits. L'objectif est donc de trouver une solution permettant d'atténuer les effets négatifs d'une forte diversité afin de pouvoir offrir une grande variété de produits tout en gardant la production de ces produits gérable du point de vue de l'entreprise. ElMaraghy et al. (2013) ont effectué une revue de littérature portant sur plusieurs thématiques en relation avec la variété des produits et sa gestion. Ils ont évoqué les outils facilitant la gestion des grandes variétés en les classifiant selon trois phases principales : la conception, la planification et la fabrication. Parmi les méthodes évoquées dans cette revue de littérature pour faire face aux grandes variétés de produits : la commonalité et la standardisation des composants, la personnalisation, la flexibilité, la reconfigurabilité, la conception de processus robuste, la différenciation retardée... Tous ces outils étant des techniques de la personnalisation

de masse, les auteurs considèrent que la personnalisation de masse est la meilleure solution économiquement efficace pour faire face aux fortes diversités et donnent quelques lignes directrices pour mettre en œuvre certains de ses outils qui permettent de réaliser d'importantes économies d'échelle. Nous consacrons ainsi une partie importante de ce chapitre au thème de la personnalisation de masse, ses principaux objectifs, classifications et techniques.

1.2 Personnalisation de masse

1.2.1 Contexte d'émergence de la personnalisation de masse

La production de masse est un modèle de production organisationnel qui consiste à produire de grandes séries de produits standards, avec une qualité constante et des prix abordables. Elle s'appuie sur les préceptes du taylorisme qui insiste fortement sur l'efficacité opérationnelle, la standardisation et la productivité et se fonde principalement sur les économies d'échelle, la division du travail et l'organisation hiérarchique. Pendant plusieurs années, la production de masse a été acceptée et adoptée avec succès par de nombreuses industries manufacturières car, contrairement à la situation d'aujourd'hui, les marchés privilégiaient les fournisseurs au détriment des clients puisque la demande des clients dépassait toujours l'offre. Dans ce contexte, ce sont les fournisseurs qui « dictaient » à leurs clients ce qu'ils devaient acheter. Néanmoins, cette pratique n'a connu le succès que jusqu'aux années soixante-dix, lorsque la demande de produits standard a considérablement diminué. La production de masse commençait en effet à être critiquée par plusieurs détracteurs en raison de ses limites qui devenaient de plus en plus exposées (Blecker et al., 2005) ; suscitant ainsi la nécessité de changer et d'adopter un nouveau mode de production. Pour Pine (1993), cette brusque décadence de la production de masse s'explique par la disparition des principales conditions indispensables à son succès, à savoir la stabilité et l'homogénéité de la demande. L'évolution de l'environnement économique (changements démographiques, évolution des besoins, marchés saturés, incertitudes de la demande, innovations, etc.) ayant modifié radicalement les conditions du marché, la production de masse, en tant que paradigme de gestion réussie, ne peut fonctionner que dans des circonstances spécifiques.

Le vrai problème ne réside ni dans la tarification des produits ni dans leur qualité (longtemps considérés comme les deux piliers de toute industrie), mais plutôt dans l'incapacité de répondre à d'autres critères de concurrence qui sont devenus indispensables pour augmenter la satisfaction et la fidélité des clients. Non seulement ces derniers attendent un bien et/ou un service correspondant à leurs besoins fonctionnels, mais ils réclament également de tenir

compte de plusieurs autres critères additionnels (ex. esthétisme) (Zhang et al., 2013). Les entreprises, sous la pression de leurs clients, ont donc commencé à les faire passer en premier lieu en s'efforçant de prendre en compte un ensemble de priorités concurrentielles (prix, qualité, personnalisation, livraison, service). Pour cela, il ne suffit pas d'accroître simplement la variété. Depuis plus d'un demi-siècle, les entreprises font appel à des techniques de segmentation du marché (stratégie de similarité des préférences) (Smith, 1956) pour accroître la probabilité qu'un client trouve plus facilement son produit préféré. Pourtant, face à des consommateurs très exigeants, cette variété ne semble pas pouvoir couvrir les besoins spécifiques de toutes les clientèles. Pine et Gilmore (1999) estiment que " les clients ne veulent pas avoir le choix, ils veulent juste exactement ce qu'ils veulent ". C'est dans ce contexte que les industriels ont sérieusement commencé à envisager la possibilité d'adopter de nouveaux modèles stratégiques basés sur le concept de "la personnalisation".

La personnalisation est le processus de production en réponse aux désirs et aux attentes d'un client particulier (Pine & Gilmore, 1999). Elle vise à améliorer la valeur perçue par le client pour un produit, étant donné qu'un produit sur-mesure, comparé à un produit fabriqué en série, offre une meilleure adaptation aux exigences du client. La capacité à développer des produits personnalisés constitue alors une source d'avantage concurrentiel importante dans le sens où elle représente un atout distinct et distinctif permettant à ces produits de se démarquer de ceux des concurrents. Dans cette perspective, ce sont les clients qui décident de ce que les entreprises doivent produire en fonction de leurs propres besoins, ces dernières risquant ainsi de devoir commercialiser une grande variété de produits. Or, si la personnalisation peut accroître la fidélité des clients et donc la part de marché, elle peut se révéler très coûteuse, contrairement à la production de masse, qui permet de réaliser des économies d'échelle accrues. De plus, la diversité des flux qui résulterait de la personnalisation entraînerait des coûts logistiques plus élevés et une gestion plus difficile de ces flux tant au niveau des systèmes de production que des stocks et des expéditions. En production continue, la gestion de cette diversité est encore plus difficile, car pour répondre à une demande spécifique, certainement plus coûteuse, les processus de différenciation doivent généralement être apportés dès la conception dans les premières phases de production. Les ressources nécessaires sont alors utilisées différemment dans une large mesure pour chaque produit spécifique, ce qui, en fin de compte, limitera sans doute la diversité offerte, à moins que beaucoup de ressources ne soient mobilisées.

Par conséquent, pour bénéficier à la fois des avantages de la production de masse et de la personnalisation, un nouveau concept a été proposé par Stanley Davis en 1987 sous le nom de

« Personnalisation de Masse (PM) » généralisant ainsi la personnalisation, initialement réservée à la seule production unitaire par une conception à la commande, en production de masse. La PM a été anticipée en tant que capacité technologique par Toffler en 1970 dans son ouvrage « Future Shock » mais ce concept a été introduit pour la première fois par Stanley Davis dans une étude sur le paradoxe entre la production de masse et les produits personnalisés, où il a souligné que l'entreprise devrait fournir des produits et des services plus personnalisés pour répondre à la demande individuelle de chaque client.

1.2.2 Définition de la personnalisation de masse

Le concept de personnalisation de masse (PM) a été défini pour la première fois dans « Future Perfect » de Stanley Davis (1987), où il est défini comme un mode de production permettant de fabriquer des produits uniques à grande échelle. Pour Davis (1989), la PM est envisageable lorsque le même grand nombre de clients dans les marchés de masse de l'économie industrielle peut être atteint, tout en étant traités individuellement comme dans les marchés personnalisés des économies préindustrielles. La popularité de ce concept a augmenté de façon spectaculaire après que Pine (1993) l'ait évoqué dans son livre "Mass Customization" : The New Frontier in Business Competition" où il a présenté les fondements pragmatiques pour une mise en œuvre réussie de la PM en proposant une feuille de route générale en vue de passer d'une stratégie de production de masse basée sur les coûts en une stratégie de PM basée sur les coûts et la personnalisation. Pine définit la PM comme étant la production d'une énorme variété et d'une personnalisation individuelle, à des prix comparables à ceux des biens et des services standards, afin de permettre la production de produits et de services suffisamment variés et personnalisés pour que chaque consommateur puisse trouver exactement ce qu'il recherche. Par la suite, plusieurs autres chercheurs ont donné leur propre définition de la PM. Pour Kotha (1995), la PM est une stratégie commerciale consistant à offrir des produits conçus selon les spécifications uniques des clients, tout en utilisant des techniques de production de masse pour obtenir une fabrication et une distribution à faible coût. Selon Tseng et al. (1996), la PM entraîne pour les entreprises un changement de paradigme leur permettant d'offrir des produits et des services répondant aux besoins de chaque client tout en conservant une efficacité de production proche de celle du marché de masse. Piller (2000) décrit la PM comme la production de biens et de services pour un marché relativement vaste, dans lequel les besoins de chaque client individuel peuvent être satisfaits à un niveau de coût comparable à celui des producteurs de masse. Plus tard en 2001, Tseng & Jiao ont apporté une définition plus précise en désignant par la PM l'ensemble des technologies et des systèmes servant à fournir des biens et/ou services qui

répondent aux besoins des clients individuels avec une efficacité presque égale à celle de la production de masse. Anderson-Connell et al. (2002) considèrent la PM comme la capacité à concevoir et à fabriquer des produits personnalisés avec une efficacité et une rapidité de production de masse. Toutes ces définitions de la PM semblent être similaires car, qu'elles se rapportent à la capacité de produire en masse une grande variété de produits personnalisés ou aux technologies permettant une telle PM, elles partagent toutes un objectif commun : produire une grande variété de produits et/ou services personnalisés qui soient aussi abordables que les produits standards. Cela nécessite toutefois un contexte industriel idéal où les marchés, la concurrence et les employés sont parfaits et où la capacité au changement est instantanée. Hart (1995) considère d'ailleurs que ces définitions sont plutôt platoniques et visionnaires car elles interprètent largement la PM comme "la capacité de fournir aux clients tout ce qu'ils veulent de manière rentable, quand ils le veulent, où ils le veulent, et comme ils le veulent". Ces définitions reflétant une situation utopique, Hart a proposé une deuxième définition qui est plus pratique : "la PM est l'utilisation de processus et de structures organisationnelles flexibles pour produire des produits et des services variés au faible coût d'un système de production de masse standardisé". Ahlstrom & Westbrook (1999) et Westbrook & Williamson (1993) associent également la PM aux systèmes fournissant des produits et/ou services traduisant le mieux les choix réels des clients à travers des systèmes flexibles conventionnels grâce auxquels les choix des clients sont anticipés en leur offrant de grandes variétés de produits. Dans le même ordre d'idées, Da Silveira et al. (2001) affirment de leur côté que la PM peut être définie de deux manières différentes, soit de manière très large : « capacité à offrir des produits et/ou services individuellement personnalisés grâce à des processus agiles et flexibles », soit de manière étroite : « système faisant appel des structures organisées qui comportent différentes technologies de l'information ainsi que des processus flexibles permettant l'offre d'une large gamme de produits et de services ».

Par ailleurs, de notre part, en analysant les deux concepts de la PM (visionnaire/large et pratique/étroit), nous remarquons que ce qui rend une définition de la PM plus pratique, c'est la référence au terme "capacité" dans "capacité à fabriquer des produits individuellement personnalisés" (définition visionnaire) par "l'ensemble des technologies, des processus flexibles et des structures organisationnelles" (définition pratique) dont la disposition déterminerait justement si une entreprise a ou non cette "capacité" de mettre en œuvre la PM. Nous pensons qu'il serait plus approprié de décrire cette définition comme étant plus détaillée plutôt que plus pratique. Sans préciser quelles technologies utiliser, comment les implémenter,

comment rendre les processus de production flexibles et quelles solutions adopter en vue d'adapter les structures organisationnelles à la PM, toutes ces définitions restent, pour nous, visionnaires. Sans connaître et prendre en compte toutes les caractéristiques organisationnelles et logistiques d'un contexte réel, proposer une définition pratique pour la personnalisation de masse nous semble inenvisageable. Par contre, si l'une des définitions de Hart (1995) et de Da Silveira et al. (2001) peut être considérée comme plus "pratique" que l'autre, ce serait en raison de la prise en compte du degré de personnalisation. Alors que la première définition représente plutôt un objectif ou un idéal qui peut rarement être atteint (Blecker et al., 2005), la seconde est plus pragmatique car elle peut être comprise comme une personnalisation axée sur l'augmentation de la variété des produits et/ou services et non sur leur individualisation. En ce sens, il est vrai que la seconde définition semble plus "réaliste" bien que nous rejoignons plusieurs auteurs (par exemple, (Moujahid et al., 2017)) pour dire qu'augmenter la variété des produits n'est pas de la personnalisation. Cette dernière conduit certainement à une grande variété de produits, mais inversement, l'augmentation de la variété n'implique pas toujours la personnalisation. En effet, selon la définition de LAROUSSE, la personnalisation, qui est dérivée du mot "personne", est l'adaptation d'un objet (produit, service, logement...) à la personnalité de celui à qui il est destiné. Un produit personnalisé suppose alors que sa conception est adaptée aux besoins individuels du consommateur visé. Cela nous amène à ne pas partager le point de vue de Hart (1995) et Da Silveira et al. (2001), dans la mesure où il nous semble que la PM ne devrait pas être définie par la production en masse d'une grande variété de produits, mais plutôt comme la production en masse de produits individuellement personnalisés. Nous considérons alors inutile de donner deux définitions pour la PM lorsque celles-ci se différencient par leur caractère pratique, ce qui nous ramène aux premières définitions de la PM : « fabriquer des produits et/ou services répondant aux besoins individuels de chaque client à des prix abordables ». Nous reconnaissons cependant que cette définition est assez utopique et que tous les constructeurs ne peuvent pas toujours fabriquer des produits personnalisés répondant exactement à toutes les exigences individuelles de tous les clients. Zhang & Tseng (2007) affirment que la personnalisation de l'offre est limitée non seulement par les lois naturelles et les limites technologiques, mais aussi par le coût du produit, ou le prix du point de vue du client. C'est ainsi que nous proposons une définition de la PM où l'on est plus réaliste en remplaçant la notion de "variété" par celle de "degré de personnalisation". Celle-ci peut être ainsi décrite comme "la production en masse de biens individuellement personnalisés dont le degré de personnalisation peut varier en fonction des contraintes

techniques et logistiques du contexte industriel ainsi que du prix que le client est disposé à payer".

Cette définition pourrait être rendue encore plus détaillée en précisant la manière dont la PM peut être appliquée, mais nous préférons laisser cette discussion à la sous-section (§1.2.7) où nous présenterons les différentes techniques pour une mise en œuvre réussie de la PM.

1.2.3 Objectif de la personnalisation de masse

L'objectif principal des systèmes de la PM est de fournir des produits et des services qui traduisent au mieux les choix réels des clients individuels (Da Silveira et al., 2001). Davis (1987) et Pine (1993) affirment en outre que la PM vise à créer des produits individuellement personnalisés, mais avec un volume de production, un coût et une efficacité de masse. Une entreprise qui se fixe cet objectif doit différencier les produits par la personnalisation et aussi profiter des économies d'échelle. Outre l'individualisation des produits, la perspective des coûts joue un rôle important (Pine, 1993). Ce qui détermine alors la PM est la capacité des systèmes à répondre aux besoins exacts de chaque client sans augmentation significative des coûts de production ou de distribution (MacCarthy et al., 2003). Rautenstrauch et al. (2002) assument d'ailleurs que nous ne pouvons parler de la PM que lorsque le prix du produit ne dépasse pas environ 10 % à 15 % du produit standard ce qui est le cas actuel de l'industrie textile où les capacités technologiques permettent des variations infinies du produit sans compromettre son caractère abordable. Piller (2004) quant à lui estime que l'objectif de la PM est de fabriquer des produits personnalisés à des coûts permettant un niveau de prix n'impliquant pas un basculement vers un segment de marché supérieur.

1.2.4 Conditions nécessaires à la mise en œuvre de la personnalisation de masse

Plusieurs auteurs ont examiné les conditions qui doivent être remplies pour parvenir à une PM. Pine (1993), Hart (1995) et Kotha (1996) ont respectivement décrit ces conditions comme "les facteurs de la demande et la structure", "les facteurs clés de décision" et "les conditions nécessaires à la réussite de la PM". Zipkin (2001) et Berman (2002) les ont qualifiées de "capacités clés", Mchunu et al. (2003) de "compétences clés"; tandis que Da Silveira et al. (2001) ont préféré utiliser le terme "facteurs de succès". Après avoir passé en revue les différentes contributions ayant abordé les conditions de passage à un mode de production de PM, ces derniers ont identifié les six facteurs qui sont le plus souvent mis en avant dans la littérature.

- Ce sur quoi plusieurs chercheurs s'accordent (Pine et al., 1993 ; Lau, 1995 ; Hart, 1995 ; Kotha, 1996), c'est que la justification fondamentale de la PM est de devoir faire face à une demande croissante des clients recherchant des produits innovants et personnalisés. Cette condition doit toutefois être accompagnée d'un équilibre entre, d'une part, la capacité de l'entreprise à produire et à livrer des produits individualisés dans des délais et des coûts acceptables et, d'autre part, le sacrifice potentiel des clients en termes de prix et de délais de livraison qu'ils sont prêts à payer et à attendre respectivement (Hart, 1995 et Kotha, 1996).
- La capacité de l'entreprise à transformer la PM en un avantage concurrentiel réel dépend largement des conditions du marché au moment du passage à cette PM. Par exemple, être le premier à développer un système de PM peut offrir un avantage substantiel sur la concurrence (Kotha, 1995).
- Les parties impliquées dans la chaîne logistique (fournisseurs, fabricants, distributeurs et détaillants) doivent toutes être prêtes à coopérer dans un système de PM afin de former un réseau d'information relié (Haglund & Helander, 1999 ; Magretta, 1998).
- Une autre condition préalable à la mise en œuvre de la PM, que beaucoup de chercheurs ont évoquée (Pine et al. ; 1993, Lau, 1995 ; Kotha, 1996, Hirsch et al., 1998 ; Berman, 2002), est la nécessité de faire appel à la technologie. L'utilisation de technologies de fabrication avancées est en effet indispensable à tout système de PM.
- Pour que la PM puisse être envisagée, les produits doivent être personnalisables. Feitzinger & Lee (1997) considère que ces derniers doivent constituer des produits modulaires composés qui peuvent être obtenus par l'assemblage de différentes unités indépendantes. Même si cette modularité ne conduit pas à une véritable PM où les produits sont individuellement fabriqués, Da Silveira et al. (2001) considèrent que la modularité est un moyen efficace de fabriquer des produits plus simples et moins coûteux avec une efficacité comparable à celle d'une pure personnalisation. Nous ajouterions cependant que cette technique est particulièrement efficace lorsqu'il s'agit de production discrète. Dans la production continue, les produits ne peuvent pas être décomposés en des sous-modules pouvant être assemblés à la commande.
- Le dernier facteur de succès, qui rejoint le troisième, est la nécessité de partager l'information afin de pouvoir traduire les nouvelles demandes des clients en nouveaux produits et/ou services. Pour ce faire, les entreprises doivent s'appuyer sur la création et

la distribution des informations tout au long de la chaîne de valeur en développant des réseaux dynamiques (Pine et al., 1993).

Ces facteurs montrent que la PM peut ne pas représenter la meilleure stratégie de toute entreprise, car elle doit se conformer à des types de marchés et de clients bien spécifiques. L'implémentation de la PM peut en effet s'avérer très complexe et peut nécessiter des transformations majeures telles que le développement d'une structure organisationnelle basée sur le partage de l'information, le recours à de nouvelles technologies et processus de production flexibles et la conception de nouveaux produits.

Da Silveira et al. (2001) ont classé ces facteurs en ceux qui sont principalement liés au marché (facteurs externes : les trois premiers) et ceux plutôt liés à l'organisation de la chaîne logistique (facteurs internes : les trois derniers). À partir de cette classification, Blecker et al. ont développé en 2005 un cadre général englobant les principales conditions à respecter pour pouvoir parvenir à une PM. Pour son élaboration, les auteurs se sont principalement concentrés sur les conditions nécessaires à la réalisation de la PM et à sa poursuite. En effet, avant de passer à la PM, les deux principales conditions à remplir sont celles liées au contexte du marché (ex. la demande de personnalisation du client) et à la capacité de personnalisation (ex. la flexibilité des processus). Après son implémentation, plusieurs capacités internes du système de PM doivent être maintenues et développées (ex. l'agilité de la chaîne logistique).

1.2.5 Caractéristiques de la personnalisation de masse

Selon Li et al. (2010), la PM présente cinq caractéristiques principales : *i*) différente du système "push" de la production de masse traditionnelle, il s'agit plutôt d'un système "pull" (Heizer & Render, 2006) où la production est dictée par les demandes des clients, *ii*) la PM s'appuie sur les technologies de l'information et des systèmes de fabrication flexibles, *iii*) la PM est basée sur des technologies modulaires et des composants standardisés, *iv*) la réactivité et le juste-à-temps (Heizer & Render, 2006) sont les objectifs de la PM et *v*) le principal levier de la PM est le Supply Chain Management (SCM).

Pour Da Silveira et al. (2001), les systèmes de la PM peuvent être identifiés à travers trois principales caractéristiques : *i*) le recours à des nouvelles technologies de fabrication et d'information flexibles permettant aux systèmes de production d'offrir une plus grande variété à un coût moindre, *ii*) une demande croissante de la variété et de la personnalisation des produits (même les marchés segmentés sont devenus trop larges car ils ne permettent plus de développer des stratégies de niche Kotler (1989)) et *iii*) le raccourcissement des cycles de vie des produits

et la concurrence industrielle accrue ayant provoqué l'effondrement de nombreuses industries de masse.

1.2.6 Classifications de la personnalisation de masse

En utilisant différents critères de catégorisation, notamment le point d'implication du client dans la chaîne logistique, la stratégie impliquée et la méthode de personnalisation utilisée, plusieurs modèles de classification ont été proposés dans la littérature de la PM :

Lampel & Mintzberg (1996) ont distingué quatre types de PM selon qu'elle intervient au niveau de la conception (la personnalisation intervient avant même de commencer la construction), de la fabrication (la personnalisation intervient au niveau des processus de fabrication, ce qui généralement le cas des produits à flux continu), de l'assemblage (la personnalisation est réalisée sur des lignes de montage par l'assemblage de composants alternatifs ou de la distribution (les produits ne sont différenciés qu'après réception des commandes des clients juste avant la livraison). Suite à cette distinction qui repose sur le point d'implication du client dans le cycle de production, Lampel & Mintzberg (1996) ont défini cinq niveaux de la PM : *i*) la standardisation pure (c.-à-d., aucune personnalisation n'est effectuée et le client n'a aucune influence directe sur la production qui est alors pour stock), *ii*) la standardisation segmentée (c.-à-d., la conception, la fabrication et l'assemblage sont standardisés tandis que la personnalisation n'est apportée qu'au niveau de la distribution en ciblant un groupe de clients), *iii*) la standardisation personnalisée (c.-à-d., la personnalisation est assurée par un processus d'assemblage), *iv*) la personnalisation ajustée (c.-à-d., la personnalisation constitue une étape du processus de fabrication, comme cela se fait généralement dans l'industrie de transformation) et *v*) la personnalisation pure (c.-à-d., le produit est 100 % personnalisé et la personnalisation intervient ainsi dès les premières phases de conception).

Ross (1996) distingue 5 classes de la PM selon le degré de personnalisation adopté : la première classe est la PM du fond, une approche qui permet au client de modifier les composants basiques du produit. Pour cette classe, Ross a donné l'exemple de Panasonic Bicycle où le cadre de la bicyclette est découpé et soudé de manière robotisée dans l'usine en fonction de la taille du client. La deuxième est la personnalisation post-produit, où un service de personnalisation convertit un produit standard en un produit personnalisé (ex. les logiciels commerciaux dont les modules sont personnalisables en fonction des besoins des entreprises). La troisième est la personnalisation ayant lieu chez les détaillants comme c'est le cas par exemple des montures de lunettes. La quatrième concerne les produits dont les caractéristiques peuvent être

personnalisées par le client lui-même (ex. les téléphones portables) et, enfin, la personnalisation des produits à travers l'offre de grandes variétés. L'exemple que Ross a donné pour cette dernière classe est les montres-bracelets. Dans le même article, Ross a également abordé les 3 principaux types de personnalisation à savoir : *i*) la personnalisation de la forme ou la personnalisation cosmétique qu'il considère comme la plus facile et qui consiste à proposer un certain nombre de couleurs, différentes finitions de surface ou matériaux ; *ii*) la personnalisation avec des options fonctionnelles sélectionnables et *iii*) la personnalisation du fond.

Alford et al. (2000) ont abordé trois grandes catégories de personnalisation qui sont similaires à ces dernières mais dans un contexte particulier, celui de l'automobile. Ils ont en effet distingué entre la personnalisation de base, dans laquelle le client est impliqué dans le processus de conception du véhicule, comme c'est le cas pour les véhicules spécialisés fabriqués en petites quantités ; la personnalisation optionnelle, dans laquelle le client peut choisir son véhicule parmi un très grand nombre d'options ; et la personnalisation de la forme, dans laquelle le client peut apporter au véhicule des modifications ou des améliorations limitées pouvant être réalisées par le concessionnaire ou le détaillant.

Pine et Gilmore (1997) ont introduit une classification où deux dimensions principales sont prises en compte, à savoir le produit et sa représentation qui se rapporte à tout autre élément extérieur au produit lui-même, tel que la description du produit, le nom du produit, le packaging, etc. En fonction de ce qui est personnalisé (le produit et/ou sa représentation), quatre types de personnalisation sont distingués :

- *Personnalisation collaborative*, qui consiste à modifier à la fois le produit et sa représentation en fonction des besoins du client. Pour ce faire, les entreprises adoptant ce type de personnalisation doivent collaborer par la recherche et le dialogue avec leurs clients – souvent incapables d'exprimer facilement ce qu'ils veulent, surtout lorsque plusieurs choix s'offrent à eux (par exemple, lunettes) – pour identifier l'offre exacte qui répondra à leurs besoins.
- *Personnalisation adaptive*, qui est appliquée lorsque les produits proposés sont standards et ont une utilisation unique, mais qu'ils peuvent s'adapter aux exigences de plusieurs clients. Le produit ainsi que sa représentation restent alors inchangés. Ce type de personnalisation offre aux clients des produits personnalisables qui peuvent être utilisés de différentes manières selon leurs spécifiques besoins. Plusieurs entreprises de beauté proposent aujourd'hui des produits cosmétiques qui s'ajustent automatiquement selon la couleur de la peau de la cliente (par exemple, les fonds de teint « Rebelle » et

« TLM »). Bien entendu, cette possibilité de rendre les produits personnalisables n'est pas toujours réalisable, mais le développement de produits polyvalents dans lesquels plusieurs exigences alternatives des clients peuvent être intégrées reste une stratégie de PM intéressante.

- *Personnalisation cosmétique*, qui convient aux cas où seule la représentation du produit change. Il s'agit de présenter différemment le même produit standard de différentes manières pour attirer différents clients. Dans l'industrie alimentaire par exemple, un même produit est conditionné différemment (emballage plus coloré) lorsqu'il est destiné aux enfants. Cette personnalisation ne se contente pas de changer d'emballage. Il peut s'agir du volume, du prix, du marketing ou de toute autre variable superficielle attachée au produit.
- *Personnalisation transparente*, qui suppose que la représentation du produit ne change pas, alors que les fonctionnalités du produit sont adaptées à des exigences particulières. Contrairement à la personnalisation collaborative, elle est appropriée lorsque les besoins spécifiques des clients sont prévisibles ou peuvent être facilement déduits, en particulier lorsque les clients ne veulent pas être dérangés par une collaboration directe comme ils ne souhaitent pas répéter la même tâche de spécification de leurs exigences à chaque fois. La personnalisation transparente consiste donc à fournir des produits personnalisés à des clients individuels sans leur dire que les produits sont fabriqués exclusivement pour eux. Pine & Gilmore (1999) ont donné l'exemple de « Chemstation », un fabricant et distributeur de produits de nettoyage industriel qui fournit à ses clients des produits personnalisés qui conviennent à leurs installations particulières sans leur faire savoir explicitement que le produit est personnalisé.

1.2.7 Stratégies et outils de la personnalisation de masse

Dans une revue de littérature plus approfondie sur la PM, Da Silveira et al. (2001) ont examiné plusieurs outils méthodologiques et technologiques permettant la mise en œuvre de la personnalisation de masse. Parmi ces outils, nous trouvons :

- La fabrication agile (*Agile Manufacturing*) définie comme la capacité de prospérer dans un environnement concurrentiel en constante évolution et de répondre rapidement aux changements imprévus du marché. DeVor et al. (1997) identifient les principales dimensions stratégiques de la fabrication agile consistant à *i*) enrichir les clients, *ii*) coopérer pour améliorer la compétitivité, *iii*) s'organiser pour maîtriser le changement et l'incertitude et *iv*)

optimiser l'impact des personnes et des informations. Une recherche plus détaillée sur les réalisations et les opportunités de la fabrication agile peut être trouvée dans (DeVor et al., 1997).

- La gestion de la chaîne logistique (*Supply Chain Management*) qui est un concept largement exploré depuis de nombreuses années et qui continue à susciter beaucoup de travaux de recherche. Une gestion efficace de la chaîne logistique est l'un des facteurs clés de succès de tous les systèmes de production et pas seulement de la PM. Elle fait référence à la coordination des ressources et à l'optimisation des activités tout au long de la chaîne de valeur pour obtenir des avantages concurrentiels (Boynton et al., 1993). Ceci implique essentiellement : *i*) le développement d'un réseau d'information interconnecté impliquant un groupe sélectionné de fournisseurs formés ; *ii*) un équilibre réussi entre des stocks faibles et un service de livraison élevé ; *iii*) la conception de produits innovants avec la collaboration active des fournisseurs ; et *iv*) la livraison rentable du bon produit au bon client au bon moment.
- La conception et la fabrication axées sur le client (*Customer-driven design and manufacture*) considérées comme le cœur des systèmes de PM. Selon Jagdev & Browne (1998), il s'agit d'une stratégie commerciale qui prend en compte les tendances du marché en général et les besoins individuels des clients en particulier et ce, durant toutes les phases de production à savoir la conception, la fabrication et la livraison des produits. Cette stratégie consiste fondamentalement à assurer les conditions permettant au client d'initier le processus de conception d'un produit et à construire une infrastructure pour développer de nouveaux produits répondant aux besoins du marché.
- Le *Lean Manufacturing*, un concept très bien documenté, qui a été examiné par un grand nombre de chercheurs tels que (Gupta & Jain, 2013) ; (Bhamu & Sangwan, 2014) et (Sundar et al., 2014). Il est considéré comme un moyen efficace de satisfaire les besoins des clients tout en donnant aux producteurs un avantage concurrentiel. Selon Warnecke & Hüser (1995), pour une mise en œuvre réussie de la PM, quatre éléments du *lean manufacturing* doivent être considérés : le développement de produits, la chaîne d'approvisionnement, la gestion de l'atelier et les services après-vente. En effet, un système de PM doit être capable de *i*) définir la valeur en fonction du client, *ii*) se concentrer sur les activités créatrices de valeur et éliminer tous les déchets, à toutes les étapes de production et *iii*) réorganiser les activités créatrices de valeur en processus efficaces, sans interruption et en incorporant des variantes de production à des niveaux élevés.

- L'utilisation des technologies de l'information (IT) dont les principales sont les technologies de fabrication avancée (*Advanced Manufacturing Technologies*) (ex. la commande numérique par ordinateur et les systèmes de fabrication flexibles) et les technologies de communication et de réseau (ex. la conception assistée par ordinateur (*Computer-Aided Design*), la fabrication assistée par ordinateur (*Computer-Aided Manufacturing*), la fabrication intégrée par ordinateur (*Computer Integrated Manufacturing*) et l'échange de données électroniques (*Electronic Data Interchange*)). Pour des recherches plus détaillées sur le rôle fondamental de ces technologies dans la facilitation de la mise en œuvre de la PM, se référer à (Pine et al., 1993) et (Kotha, 1995).

Pour résumer, Da Silveira et al. (2001) estiment que pour implémenter la PM, il est nécessaire de : *i*) intégrer le client dans toutes les phases de la production, *ii*) utiliser le *lean manufacturing* pour développer des produits personnalisables grâce à des processus agiles qui peuvent répondre rapidement aux changements imprévus du marché, *iii*) optimiser la gestion de toutes les opérations de la chaîne logistique pour garantir la livraison rentable du bon produit au bon client au bon moment et *iv*) utiliser l'IT et les technologies intelligentes avancées pour rendre les processus flexibles et reconfigurables et pour faire en sorte que tous les acteurs de la chaîne logistique soient interconnectés et travaillent ensemble en collaboration.

Par ailleurs, sur la base d'une analyse documentaire de 60 articles, Da Cunha Reis et al. (2013) rejoignent Da Silveira et al. (2001) et constatent qu'en plus du *lean manufacturing* et de l'*agile manufacturing*, l'utilisation de produits et de processus communs (commonalité), l'option de regroupement (*option bundling*), la fabrication cellulaire, la modularité et la différenciation retardée sont des techniques qui peuvent être utilisées dans le cadre d'une PM pour augmenter la variété des produits tout en maintenant les coûts de production à un faible niveau. Da Cunha Reis et al. (2013) ont conclu de leur analyse bibliographique que la technique de la PM la plus souvent adoptée et la plus citée est « l'utilisation de composants communs » qui selon Johnson & Kirchain (2009) est celle qui permet le mieux de réduire les coûts. Cela ne contredit pas Van Hoek (2001), Gupta & Benjaafar (2004), Jewkes & Alfa (2009) et Sharda & Akiya (2012) qui considèrent la Différenciation Retardée (DR) – une des techniques clés de la PM (McIntosh et al., 2010) – comme la meilleure solution puisque l'utilisation des composants communs constitue une étape incontournable de la différenciation retardée. De ce fait, nous abordons dans la section suivante les principaux aspects qui nous sont pertinents quant au concept de la différenciation retardée.

1.3 Différenciation retardée

Dans cette sous-section, nous passons en revue les recherches sur la différenciation retardée que nous jugeons particulièrement pertinentes à considérer dans le cadre de la gestion de la forte diversité. Nous n'avons donc pas la prétention de fournir une revue exhaustive sur la différenciation retardée. Pour une revue plus détaillée, nous renvoyons les lecteurs à (Van Hoek, 2001).

1.3.1 Définition de la différenciation retardée

Le concept de la Différenciation Retardée (DR), aussi désigné par "Report - *postponement*" et "Personnalisation tardive - *late customization*", a été introduit pour la première fois par Alderson (1950) qui y voit une stratégie visant à retarder la différenciation des produits le plus tard possible. Bucklin (1965) a ensuite étendu ce concept en le considérant comme une opportunité de déplacer le risque de posséder des stocks de marchandises d'une position à une autre dans une chaîne logistique. Plus tard en 2001, dans une revue de la littérature publiée avant 1999 sur la différenciation retardée, Van Hoek présente la DR comme étant une organisation selon laquelle certaines activités de la chaîne logistique n'ont lieu qu'après la réception des commandes des clients en vue de finaliser la production en fonction de leurs préférences. Il s'agit de combiner certains processus communs et de retarder d'autres processus de différenciation aussi tard que possible jusqu'à ce que la chaîne logistique atteigne un rapport coût-efficacité optimal (Boone et al., 2007). En effet, plus les produits seront différenciés en aval de la chaîne logistique, plus les risques associés à l'incertitude de la demande seraient réduits. Cela permettrait aux entreprises d'éviter de constituer des stocks de produits finis en prévision de commandes futures (Van Hoek, 2001).

1.3.2 Types de la différenciation retardée

Zinn & Bowersox (1988) ont distingué trois types de DR pour améliorer les systèmes de distribution :

Différenciation retardée temporelle (time postponement). Elle consiste à retarder la livraison des produits jusqu'à l'arrivée des commandes des clients ((Zinn & Bowersox, 1988) ; (Van Hoek, 1997 ; 2001) ; (Shao & Ji, 2008)). Zinn (1990) estime que la différenciation retardée basée sur le temps est en quelque sorte équivalente à la production à la commande.

Différenciation retardée géographique (place postponement). Une stratégie qui consiste à stocker les marchandises à des endroits centraux de la chaîne logistique jusqu'à ce que les

commandes des clients soient reçues (Bowersox & Closs, 1996 ; Van Hoek, 1997 ; 2001). Généralement, ces stocks sont placés dans l'usine de fabrication, les centres de distribution ou les sites des clients. Dans ce cas, le premier niveau de DR se réfère au cas où les tâches de différenciation sont effectuées dans l'usine de fabrication, tandis que le dernier niveau de DR se réfère au cas où les tâches de différenciation sont exécutées dans les sites des clients.

Ces deux formes de différenciation retardée peuvent être résumées dans un seul terme « *logistic postponement* » pour faire référence aux structures logistiques dans lesquelles les marchandises sont stockées dans un nombre limité de lieux centralisés et les produits finis sont expédiés après réception des commandes des clients.

Différenciation retardée de la forme (form postponement). Outre le report de l'expédition des marchandises (différenciation temporelle) et le maintien des marchandises dans des stocks centraux (différenciation géographique), certaines activités de fabrication peuvent également être reportées. Zinn & Bowersox (1988) ont résumé ces activités en termes d'étiquetage, d'emballage et d'assemblage/fabrication. L'ajournement de ces activités implique que les produits sont finalisés en réponse aux commandes des clients avant de leur être expédiés. Cela vise principalement à standardiser au maximum les étapes en amont de la chaîne de logistique.

En 1998, Van Hoek et al. ont introduit un quatrième type « la différenciation retardée de la fabrication – *manufacturing postponement* » qui est une stratégie de différenciation combinant les trois types de base dans un seul système de production :

Différenciation retardée de la fabrication (manufacturing postponement). La notion de la DR de la fabrication ne se limite pas à un report dans le temps ou dans l'espace, elle inclut également la personnalisation de la forme et/ou de l'utilité fonctionnelle d'un produit. Ceci dit, la finalisation de la fabrication des produits et leur expédition sont retardées jusqu'à ce que les commandes des clients soient reçues et sont gérées à partir d'un point central de la chaîne. En d'autres termes, les activités de transformation et de fabrication finales sont reportées jusqu'à ce que les commandes des clients soient arrivées (DR temporelle) et sont effectuées à partir d'opérations centrales dans la chaîne logistique (DR géographique), afin de prendre en compte les préférences spécifiques des clients (DR de la forme) (Van Hoek et al., 1998).

1.3.3 Méthodes de mise en œuvre de la différenciation retardée

La mise en œuvre d'une différenciation retardée sous-entend la prise d'une décision stratégique et structurelle qui peut nécessiter des investissements importants. Cela peut impliquer des

changements dans les produits, les processus et/ou la structure de la chaîne logistique. Trois méthodes liées sont souvent évoquées dans la littérature pour désigner les approches permettant une mise en œuvre retardée de la différenciation : la conception des produits (*product design*), la commonalité des composants et la restructuration des processus (*process redesign*) (Lee & Tang, 1997). Il convient de noter que bien que, selon Lee & Tang, l'utilisation de composants communs soit considérée comme une importante stratégie de DR au même titre que le *product design* et le *process redesign*, nous estimons que la "commonalité" est plutôt un outil clé du *product design* ; c'est donc ainsi que nous la présentons, au côté de la "modularité".

1.3.3.1 Conception des produits (*Product design*)

Le recours à la différenciation retardée est fortement lié à la conception/développement de produits (Lee & Tang, 1997). Van Hoek (2001) affirme que les ingénieurs concepteurs doivent adopter une perspective plus large, allant au-delà des fonctionnalités et des performances des produits, en concevant de nouveaux produits facilement différenciables. Pour ce faire, il propose d'utiliser la modularité et la commonalité entre les produits finis qui représentent deux approches essentielles ayant fait l'objet de nombreuses recherches lorsqu'il s'agit de gérer les problèmes de standardisation dans le contexte de la différenciation retardée.

1.3.3.1.1 Commonalité

La commonalité ou la standardisation des composants, une stratégie largement explorée (Whitelock, 1987 ; Perera et al., 1999 ; Agard & Kusiak, 2004 ; Salehi et al. 2013), est considérée comme une solution pertinente pour améliorer les performances des systèmes productifs tout en maintenant le niveau requis de la variété de produits pour satisfaire les besoins des clients. D'après plusieurs chercheurs tels que (Zinn, 1990) et (Feitzinger & Lee, 1997), une entreprise engagée dans des stratégies de DR doit impérativement considérer des familles de produits et explorer autant que possible la commonalité entre les produits et/ou les processus. Il s'agit d'une approche se référant généralement à un mode de production dans lequel plusieurs composants de différents produits finis sont remplacés par un seul composant commun pouvant remplir les fonctions de ceux qu'il remplace (Perera et al., 1999). Hsu & Wang (2004) ont proposé un modèle sur la manière dont un concepteur peut différencier des produits spécifiques en recherchant les parties communes dans chaque étape de la conception tout en faisant face à l'augmentation des coûts de conception et de composants. Selon (Perera et al., 1999), trois situations possibles peuvent être envisagées pour les composants standardisés:

- a. Plusieurs composants uniques d'un produit sont remplacés par un composant commun.
- b. Plusieurs composants dans différents produits sont remplacés par un composant commun.
- c. Plusieurs composants communs sont conçus pour plusieurs différents produits.

Le degré de partage des composants est un facteur déterminant dans l'influence de la variété des produits sur les performances de la chaîne logistique (Meixell & Wu, 2004). Dans la littérature, plusieurs avantages ont été signalés pour le concept de la standardisation des composants (Benton & Krajewski, 1990 ; Fisher & Ittner, 1999 ; Nagarur & Azeem, 1999 ; Ernst & Kamrad, 2000 ; Cvas & Gilbert, 2002 ; Ma et al., 2002 ; Yang et al., 2004 ; Fong et al., 2004 ; Hsu & Wang, 2004). En effet, la commonalité entraîne des effets de mutualisation des risques et permet de réduire l'incertitude des délais (Ma et al., 2002 ; Yang et al., 2004). Benton & Krajewski (1990) ont mené une étude sur l'impact de cette approche sur les performances des fournisseurs et ont conclu que l'incertitude des délais peut être réduite avec des niveaux de commonalité plus élevés. Cela a été confirmé par (Nagarur et Azeem, 1999) qui ont utilisé la simulation pour étudier l'impact de la commonalité sur les performances de fabrication. L'exploitation de la commonalité des composants peut en outre permettre de réduire le niveau du stock de sécurité nécessaire pour atteindre le niveau de service requis (Baker 1985, Hillier 2002). Aussi, l'utilisation des composants communs permet de réaliser des économies d'échelle dans la production tout en maintenant un niveau de variété de produits rentable (Fisher & Ittner, 1999). En 2004, ces avantages ont été résumés par Fong et al. (2004) en quatre points : *i*) réduction des coûts de développement et de recherche et accélération de l'introduction de nouveaux produits sur les marchés en simplifiant le processus de conception technique, *ii*) minimisation des coûts administratifs grâce à la réduction du nombre de composants à gérer, *iii*) réduction des coûts de production grâce aux économies d'échelle et *iv*) réduction des coûts des stocks de sécurité en utilisant les incertitudes de la demande des produits finis pour atteindre le même niveau de service mais à des niveaux de stock inférieurs.

1.3.3.1.2 Modularité

La modularité ou la conception modulaire est un attribut d'un système complexe qui préconise de concevoir des structures basées sur la minimisation de l'interdépendance entre des sous-modules pouvant être assemblés afin d'obtenir de nouvelles configurations sans perte de fonctionnalité ou de performance du système (Baldwin & Clark, 1997). Elle consiste à diviser un produit en composants indépendants, ce qui permet de standardiser les composants des

produits et de créer une variété importante de produits finis. En adoptant cette technique, le produit est décomposé en plusieurs sous-modules qui sont assemblés ultérieurement en fonction des spécifications demandées par le client. Plusieurs chercheurs (Pine, 1993 ; Duray, 2002 ; Tu et al., 2004) estiment que la modularité dans la conception des produits doit faire partie intégrante d'une stratégie de PM. Kumar (2004) montre comment la modularité fonctionne pour créer un produit personnalisé et donne les étapes élémentaires à suivre pour diviser un produit en sous-modules indépendants. Les applications industrielles de la modularité sont nombreuses dans la littérature, les industries automobile et informatique étant le plus souvent citées. En effet, la conception modulaire des produits ne semble pas être envisageable dans l'industrie de process où les processus ne peuvent être découplés à un stade intermédiaire (Van Hoek, 2001), comme c'est le cas dans l'industrie discrète où le système de production peut être décomposé en plusieurs sous-modules qui sont assemblés à la demande des clients.

1.3.3.2 Restructuration des processus (*process redesign*)

La restructuration des processus consiste à modifier la séquence des opérations dans un processus afin de retarder le moment de la personnalisation du produit (Caux et al., 2006). En 1999, Van Hoek et al. ont étudié l'impact de la DR sur la structure de la chaîne logistique. En se concentrant plus particulièrement sur les chaînes logistiques européennes, ils ont étudié comment les changements de processus devraient être organisés et comment ces changements évoluent différemment selon le point de départ concurrentiel de l'entreprise et son héritage administratif. Su et al. (2005) ont également évalué les structures logistiques à adopter pour pouvoir mettre en œuvre la DR. Ils ont donné des conseils sur la manière d'allouer les ressources pour l'amélioration des performances. Handfield & Nichols (2002) ont aussi fourni une série de conseils pratiques sur tous les aspects de la restructuration de la chaîne logistique (par exemple, cartographie des chaînes logistiques existantes, identification des changements qui promettent le meilleur retour sur investissement, cartographie des chaînes logistiques cibles, miniaturisation des systèmes de production pour la réalisation des essais, etc.)

Dans le contexte de la différenciation retardée, la restructuration et/ou la conception des processus de production et de distribution doivent être effectuées de manière à retarder le point de différenciation (Aviv & Federgruen, 2001). Ce point de différenciation, connu sous les termes de Point de Différenciation du Produit (PDP) et Point de Découplage (*Decoupling point/ Customer Order Decoupling Point*), doit être retardé au maximum dans la chaîne logistique afin d'accroître la flexibilité et la réactivité à la demande du client. Ce concept, qui a intéressé

de nombreux chercheurs (Skipworth & Harrison, 2004 ; Shao & Ji, 2008 ; AlGeddawy & ElMaraghy, 2010 ; Wong et al., 2011 ; Daaboul & Da Cunha, 2014 ; et autres), est défini comme étant une opération qui transforme deux ou plusieurs produits communs en produits personnalisés en fonction des besoins des clients. Son emplacement dans la chaîne logistique est une décision cruciale dans la PM et a suscité plusieurs débats dans la littérature. Il est généralement admis qu'en retardant le PDP, nous réduisons l'investissement quant aux stocks de composants à valeur ajoutée et nous permettons de répondre rapidement aux commandes des clients (Shao & Ji, 2008). Plusieurs modèles d'optimisation, impliquant tous une production discrète, ont été élaborés afin de pouvoir le localiser de manière optimale (par exemple, AlGeddawy & ElMaraghy, 2010 ; Hanafy & ElMaraghy, 2015).

Il est également admis que la localisation optimale du PDP dépend de la stratégie de production adoptée. Pour les entreprises fonctionnant selon le mode « Assemble-To-Order » (ATO) (ex. automobile), le PDP se trouve généralement dans les ateliers de montage au sein des sites de production. Pour les entreprises adoptant le mode « Make-To-Stock » (MTS), le PDP peut être soit situé dans les sites de production soit dans les centres de distribution, quoiqu'ici la personnalisation concerne généralement l'étiquetage et/ou l'emballage (ex. Nestlé).

1.4 Synthèse

En conclusion de cette première section (Chap2/Partie1/Section1), nous pouvons dire, après avoir analysé les connaissances théoriques existantes sur les méthodes de gestion de la forte diversité, que la PM se révèle être la seule solution économiquement efficace pour gérer une grande variété de produits (Pine II, 1993 ; Anderson & Pine II, 1997). Elle a été appliquée avec succès dans de nombreuses industries grâce à l'utilisation d'outils de standardisation, la conception modulaire étant l'outil le plus souvent utilisé avec efficacité. Cette technique consiste à décomposer le produit en sous-composants qui peuvent être réassemblés sur commande, permettant ainsi de pouvoir retarder la différenciation du produit jusqu'aux phases aval de la chaîne logistique. La différenciation retardée est, selon plusieurs chercheurs (Van Hoek, 2001), (Gupta & Benjaafar, 2004), (Jewkes & Alfa, 2009) et (Sharda & Akiya, 2012), la meilleure méthode pour bénéficier à la fois des avantages de la production de masse et de la personnalisation. Elle fait appel à deux approches principales : la conception du produit et la restructuration des processus qui, selon (Shao & Ji, 2008 ; Baud-Lavigne et al., 2012), doivent être mises en œuvre de manière simultanée. Une première décision pour ce faire consiste à déterminer l'emplacement optimal du point de différenciation du produit. Plusieurs articles

parmi ceux que nous avons consultés proposent des modèles d'optimisation visant à localiser ce point, mais ils traitent tous de chaînes logistiques discrètes, même si les mots-clés utilisés dans notre recherche sont généraux et ne se rapportent pas à des contextes industriels spécifiques (par exemple, gestion de la variété des produits, personnalisation des produits). En effet, les modes de gestion qui ont réussi à implémenter la différenciation retardée dans des chaînes logistiques continues ou hybrides sont très rares. La différenciation retardée est généralement associée à la production discrète où elle est réalisée par l'assemblage d'une multitude de composants alternatifs, le point de différenciation étant dans ce cas souvent situé à la dernière étape de fabrication au sein de l'usine de production. Sachant qu'une telle solution ne peut être envisagée pour les produits à flux continu, la question se pose de savoir comment adapter la différenciation retardée aux chaînes logistiques continues et plus particulièrement à la chaîne logistique des engrais (notre problématique de recherche). Nous apportons la réponse dans la section suivante.

2 Proposition d'une nouvelle organisation industrielle basée sur la personnalisation de masse

Avant de répondre à la question ci-dessus, nous allons d'abord examiner les schémas de production bien connus de leur système performant de PM. Pour cela nous nous limitons à l'une des industries les plus connues, celle de l'automobile.

Depuis quelques années, les constructeurs automobiles ont été mis au défi de diversifier leurs produits et de répondre aux préférences de leurs clients. Ces préférences peuvent inclure plusieurs composants automobiles (le moteur, les phares, le tableau de bord, la couleur du châssis, les pneus, les systèmes-audio, les caméras de recul, le système de climatisation, le système GPS, les amortisseurs, les jantes, les sièges...), dont les différentes combinaisons peuvent donner lieu à des millions, de modèles de véhicules possibles. Grâce à une différenciation retardée mise en œuvre par une conception modulaire, il est possible de produire n'importe quel modèle choisi par le client, même ceux qui n'ont jamais été fabriqués auparavant et qui ne figurent donc pas nécessairement dans le catalogue de produits. En effet, durant toutes les premières étapes de fabrication (emboutissage, tôlerie, mécanique...), la production est prévisionnelle et des châssis standards sont ainsi fabriqués pour stock. Ce n'est qu'après réception de la commande du client que ces préférences sont effectivement prises en compte lors de la dernière étape de la production où tous les composants sélectionnés par le client sont montés sur le châssis standard. Dans ce cas, le point de différenciation, point où la production

bascule d'un Make-to-Stock (production en flux poussé) à un Make-to-Order (production en flux tiré), est situé à l'intérieur du site de production juste avant l'entrée de la chaîne de montage. Cette configuration a permis aux constructeurs automobiles de notamment répondre aux attentes des clients tout en réduisant les délais de production, un nouveau produit pouvant sortir de la ligne d'assemblage toutes les minutes. La réduction des temps de fabrication et donc l'optimisation des capacités de production sont obtenues en grande partie grâce à la flexibilité apportée par le processus d'assemblage. En outre, la personnalisation permise dans ce contexte est une pure personnalisation, et ne se réfère pas seulement à une variété de produits parmi lesquels le client choisit celui qui correspond le mieux à ses goûts. Elle consiste en fait à répondre aux préférences individuelles des clients, même si cela peut entraîner la création de nouveaux produits qui n'ont pas été fabriqués auparavant et dont les nomenclatures de fabrication ne sont pas prédéterminées. Cette capacité à concilier personnalisation, grande réactivité, flexibilité, et production de masse est ce qui fait de la différenciation retardée de l'industrie automobile l'un des systèmes de production les plus performants. Pour résumer, ce système de différenciation retardée basé sur le concept de modularité présente les caractéristiques suivantes : *i*) une productivité élevée et une standardisation dans les premières phases de la production, *ii*) une personnalisation qui n'implique pas nécessairement des nomenclatures prédéterminées et qui a lieu dans la dernière phase de la fabrication au sein du site de production, et *iii*) une réactivité et une flexibilité accrues grâce à une ligne de montage assurant l'assemblage facile de modules venant d'ensembles exclusifs de modules alternatifs.

Dans l'industrie automobile ou toute autre industrie où la modularité est utilisée, les produits peuvent être fabriqués par l'assemblage de sous-modules qui conservent leur intégrité physique en cas de désassemblage. Ce n'est pas le cas en production continue où les produits sont homogènes (poudres, granulés ou liquides) et pour lesquels la décomposition en sous-composants est impossible. Par conséquent, nous ne pouvons pas projeter l'organisation industrielle du secteur automobile telle qu'elle est sur la chaîne logistique de la production continue d'engrais, mais nous devons l'adapter aux caractéristiques de celle-ci.

Pour l'industrie des engrais, la diversité des produits est assurée par la fabrication successive de lots de produits différents, soit par une production pour stock d'un ensemble réduit de produits différents, soit par une production à la commande d'un nombre plus important, mais encore limité, de produits différents au cours d'une année. Dans les deux cas, la diversité offerte est limitée en raison de l'inertie temporelle qu'implique cette production séquentielle, à moins de mobiliser des stocks importants. Pour le groupe OCP, la production est réalisée à la commande,

ce qui entraîne un lancement irrégulier de petits lots différents et ne permet donc pas de bénéficier d'économies d'échelle. La variété produite par OCP comprend soit des engrais populaires (par exemple, DAP, MAP, TSP...) qui peuvent être utilisés comme produits finis ou comme produits semi-finis par les distributeurs d'engrais, soit des engrais adaptés qui sont destinés à des besoins spécifiques et utilisés directement comme produits finis. Dans les deux cas, OCP prend en compte les commandes de ses clients (160 clients sur 5 continents) dès les premières phases de la chaîne de production. Cependant, pour une différenciation retardée efficace, le point de différenciation doit être positionné le plus loin possible au niveau des phases aval de la chaîne logistique. Pour ce faire, deux questions essentielles doivent être abordées : le processus de différenciation (assemblage dans la production discrète) et l'emplacement optimal du point de différenciation du produit (ligne de montage dans la production discrète).

En ce qui concerne le processus de différenciation, le seul processus à flux continu qui pourrait éventuellement refléter le processus d'assemblage dans les chaînes logistiques discrètes est celui du blending. Il s'agit d'une opération de mélange simple offrant un niveau de flexibilité et de réactivité comparable à celui du processus d'assemblage.

Pour le point de différenciation, si dans l'industrie automobile l'assemblage se fait à l'intérieur de l'usine, pour l'industrie des engrais, le processus de blending ne peut pas être placé à l'intérieur du site de production car sinon, les granulés d'engrais mélangés perdraient leur homogénéité et risqueraient de se ségréguer à cause des vibrations qu'ils peuvent subir pendant leur manutention et leur transport. De plus, pour préserver leur qualité, ces engrais ne doivent pas dépasser une durée maximale de stockage et doivent être stockés à l'abri de l'humidité pour éviter la prise en masse. Par ailleurs, en reportant le processus de mélange des engrais jusqu'au moment de leur utilisation, il devient possible de tolérer certains mélanges qui n'auraient pas été autorisés en raison d'incompatibilités chimiques si le mélange avait été effectué plusieurs jours avant l'application des engrais. De manière générale, les produits à flux continu sont des biens périssables pour lesquels le processus de différenciation doit avoir lieu le plus tard possible. C'est pour toutes ces raisons que la nouvelle organisation industrielle que nous proposons pour répondre à notre problématique de recherche repose sur une différenciation retardée dont le point de découplage se trouve à l'extérieur de l'usine chimique auprès du distributeur final. Cela permettrait de réaliser davantage d'économies d'échelle et d'avoir une meilleure réactivité.

Il est à préciser que le processus de différenciation, qui dans notre contexte est le blending, intervient sur l'identité de l'engrais, à savoir sa composition chimique. Cette situation est très inhabituelle dans les chaînes logistiques continues où la différenciation agit souvent sur la forme et/ou l'emballage sans modifier les fonctionnalités du produit lorsqu'elle est réalisée en dehors du site de fabrication ; l'industrie de la peinture étant la seule à avoir pu le faire avec une grande efficacité. En effet, la différenciation dans cette industrie, assurée par le mélange d'une base de peinture avec un nombre très limité de colorants de base, a lieu dans des magasins spécialisés situés à proximité du client final et affecte non seulement l'emballage du produit mais aussi sa couleur (principale fonctionnalité d'un pot de peinture). En gros, le détaillant dispose d'un catalogue de produits contenant des centaines de références de couleurs, chacune ayant une nomenclature de fabrication spécifique. Le client choisit la référence qu'il souhaite avant qu'elle ne soit fabriquée sur place à partir d'une base de peinture et d'un ensemble réduit de colorants, en respectant soigneusement les proportions de la nomenclature associée à la référence choisie. Ainsi, grâce au mélange de quelques colorants de base, une grande variété de nuances (des milliers) peut être obtenue, ce qui permet une standardisation performante en usine ainsi qu'une différenciation efficace dans les points de vente. Dans le but d'obtenir cette même efficacité, nous nous sommes inspirés de l'industrie de la peinture pour proposer à l'OCP une nouvelle configuration industrielle que nous illustrons dans la Figure 20. Les composantes de cette configuration sont examinées plus en détail dans le dernier chapitre, à la sous-section (Chap.5/§1.2.2).

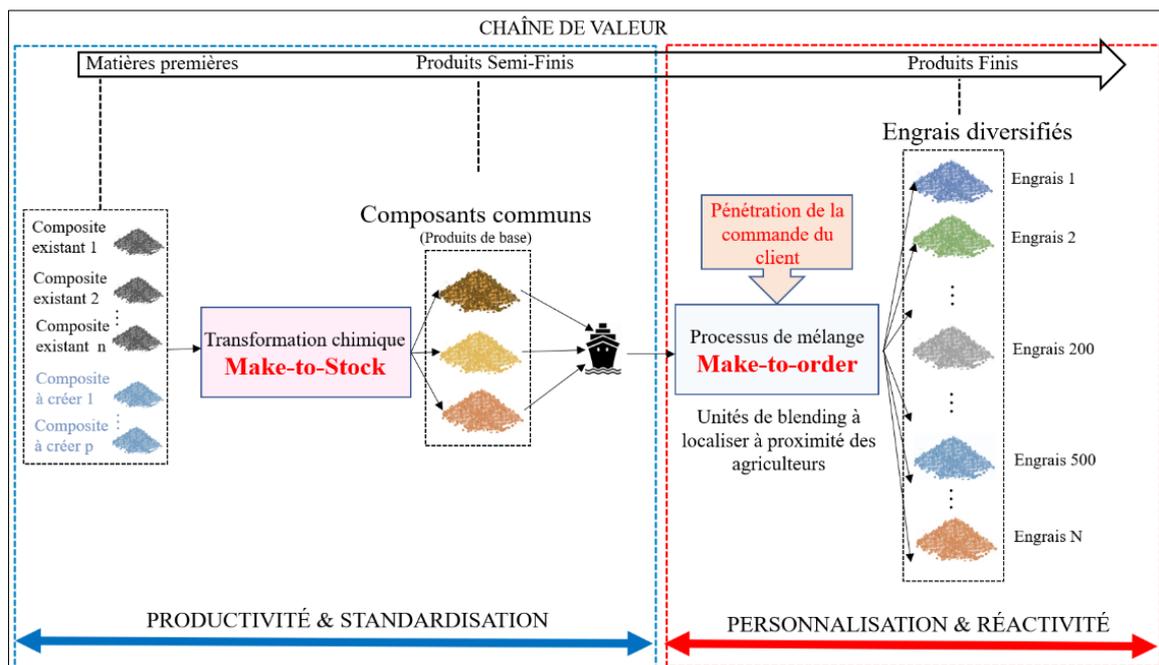


Figure 20 : Nouvelle configuration industrielle basée sur la personnalisation de masse

L'organisation présentée ci-dessus ressemble à celle de l'industrie de la peinture mais lui apporte une *première particularité*, celle de faire appel à des nomenclatures non prédéterminées. Cela est principalement dû au fait qu'il faut répondre à des besoins nutritifs propres à chaque agriculteur, tels que spécifiés dans les rapports d'analyse du sol. Par ailleurs, à l'instar des magasins de distribution dans l'industrie de la peinture, l'adaptation des engrais à ces besoins aurait lieu dans de petites unités de mélange pour les agriculteurs du voisinage, au même coût.

En revanche, si dans l'industrie de la peinture, les produits communs, faisant référence aux colorants de base, sont déjà connus ; dans l'industrie des engrais, ces produits de base ne sont pas préexistants, nous ne connaissons ni leur nombre ni leurs compositions chimiques ; notre objectif est de les déterminer ; c'est une *seconde particularité*. Pour ce faire, nous proposons de recourir à une solution innovante appelée le Reverse Blending (dont nous expliquons en détail le mode de fonctionnement dans le chapitre 3). Il s'agit d'un nouvel outil qui concerne les chaînes logistiques continues et qui permettrait une PM efficace en se basant sur la différenciation retardée.

Dans la suite de ce chapitre, nous nous attarderons sur le positionnement du Reverse Blending dans la littérature en tant qu'outil de PM visant à déterminer un nombre réduit de produits de base (équivalent des colorants de base dans la peinture) pouvant satisfaire une grande variété d'engrais.

Partie II : Positionnement de la personnalisation de masse impliquée par le Reverse Blending

En premier lieu (section 1), cette partie commence par le positionnement du Reverse Blending par rapport aux principaux travaux réalisés sur la PM et ses différentes techniques, en nous concentrant plus particulièrement sur les éléments cités dans les sous-sections (§1.1), (§1.2) et (§1.3) de la première partie. En deuxième lieu (section 2), une analyse bibliographique est menée pour démontrer l'originalité du Reverse Blending comme nouvelle technique de PM dans les productions continues.

1 Positionnement théorique et scientifique

Dans la sous-section (§1.1), nous avons rappelé les deux types de diversité déjà abordés dans la littérature, à savoir la diversité interne et la diversité externe, avant de proposer une nouvelle typologie de la diversité distinguant la diversité commerciale et la diversité sanitaire et/ou

écologique (diversité impliquée dans le contexte des engrais) afin de refléter les différentes diversités pour lesquelles la solution du Reverse Blending pourrait être appliquée. Celle-ci tient en effet compte aussi bien de la diversité interne qu'externe car, d'une part, elle vise à satisfaire une très grande variété de produits personnalisés (diversité externe) et d'autre part, elle vise à réduire la diversité interne en cherchant à réduire au maximum les produits semi-finis communs auxquels les producteurs d'engrais devraient se confronter au niveau de la production, du stockage et de la distribution. Par ailleurs, il était important pour nous d'introduire les deux autres types car, comme nous l'avons expliqué en (§1.1), il faut différencier entre la diversité commerciale habituelle que les services de marketing considèrent comme une stratégie commerciale permettant d'attirer les clients et donc de réaliser davantage de ventes, et la diversité sanitaire et/ou écologique qui, selon nous, est plus urgente car elle a un enjeu plus important qui porte sur de plus grandes causes telles que la santé humaine, la sécurité alimentaire et le développement durable. Avec ce type de diversité, les produits sont certes personnalisés pour répondre aux besoins spécifiques des clients, mais il s'agit en fait d'une situation gagnant-gagnant pour tout le monde, car elle est bénéfique pour les clients et les entreprises, mais aussi pour l'environnement et le bien-être de notre planète. C'est pourquoi, et du fait que tout le monde ne peut pas assumer les coûts de la définition de ses besoins spécifiques (en particulier les petits fermiers), les autorités responsables doivent fournir des aides et des subventions qui permettraient à ces fermiers de trouver exactement ce dont ils ont besoin. Ceci étant dit, le Reverse Blending peut être appliqué aux deux types de diversité. Un exemple d'application du Reverse Blending sur l'industrie cosmétique est donné en Annexe9, pour illustrer sa faisabilité sur une diversité commerciale.

Pour gérer cette diversité, un système productif basé sur la PM est proposé. Pour que ce système soit efficace et efficient, Blecker et al. (2005) ont examiné les principales conditions qui doivent être remplies avant que la personnalisation de masse puisse être adoptée. Ils ont traité à la fois des conditions préalables pour les entreprises souhaitant la mettre en œuvre et des conditions à remplir pour assurer la continuité de ce mode de production. En nous concentrant plutôt sur les conditions préalables, à savoir la demande croissante de produits personnalisés et l'utilisation de processus flexibles, nous confirmons que ces deux conditions sont réunies pour le secteur des engrais car :

- Même si la demande d'engrais personnalisés est encore très faible aujourd'hui, surtout en Afrique, elle est aujourd'hui plus élevée que jamais, et nous nous attendons à ce qu'elle croisse beaucoup plus dans les années à venir. En effet, la prise de conscience des enjeux

importants de l'agriculture de précision commence à se faire de plus en plus sentir. En témoigne le portefeuille d'OCP, qui est passé de 5 qualités d'engrais depuis 2005 à une cinquantaine d'engrais aujourd'hui. De plus, si le système de PM que nous proposons vient à être adopté, nous sommes convaincus que la demande d'engrais personnalisés connaîtra une augmentation considérable, car c'est l'offre qui créera la demande. Ceci sera expliqué dans (Chap.5/§2.1).

- L'utilisation d'un processus de différenciation flexible est également une condition remplie par la personnalisation de masse du Reverse Blending puisqu'elle consiste à personnaliser les produits par le biais d'une opération de mélange, un processus suffisamment simple et rapide pour garantir une grande réactivité aux commandes des clients.

Par ailleurs, en reprenant les classifications de la PM de (Lampel & Mintzberg, 1996), (Ross, 1996) et (Pine & Gilmore, 1997) présentées en (§1.2.6), la personnalisation impliquée par le Reverse Blending peut être considérée comme :

- Une standardisation personnalisée intervenant au niveau des phases de distribution.
- Une personnalisation qui touche principalement au fond et aux fonctionnalités principales du produit mais qui peut être facilement appliquée à la forme et au conditionnement du produit.
- Une personnalisation adaptative qui, selon Pine & Gilmore (1997), consiste à adapter des produits standards aux exigences du client, ce qui est le cas de notre approche par laquelle un nombre réduit de produits de base peut être adapté aux exigences des clients en les mélangeant différemment en fonction des produits souhaités. La personnalisation impliquée par le Reverse Blending peut aussi relever de la personnalisation cosmétique, les engrais pouvant être conditionnés selon les préférences des agriculteurs au niveau des unités de blending.

Concernant la technique de PM utilisée par notre approche pour pouvoir produire en masse de grandes variétés de produits, il s'agit bien entendu de la différenciation retardée. Dans la littérature, nous avons trouvé quatre types de différenciation retardée : temporelle, géographique, formelle et celle liée à la fabrication (§1.3.2). Parmi celles-ci, la différenciation retardée que nous proposons relève du dernier type (c'est-à-dire la DR de la fabrication qui englobe les trois premiers types) car il implique à la fois une DR temporelle : la différenciation est retardée jusqu'au moment de la réception de la commande du client ; une DR géographique :

la différenciation doit être effectuée dans des unités de mélange situées auprès du client final ; et une DR formelle qui, selon Zinn & Bowersox (1988), peut concerner l'étiquetage et l'emballage mais aussi la composition du produit : la différenciation dans le contexte du Reverse Blending porte principalement sur la composition chimique du produit mais peut aussi intervenir sur son conditionnement.

Pour les méthodes de mise en œuvre de la DR (mentionnées dans §1.3.3), la solution que nous proposons fait intervenir les deux stratégies de différenciation retardée les plus importantes, à savoir la "conception du produit - *product design*" et la "restructuration des processus - *process redesign*". Comme l'ont souligné plusieurs chercheurs (Shao & Ji, 2008 ; Baud-Lavigne et al., 2012), ces deux stratégies doivent être menées à bien de manière simultanée car elles sont très complémentaires et l'une ne va généralement pas sans l'autre. Notre travail de recherche se concentre davantage sur la conception de produits étant donné que notre principale contribution réside dans la proposition du Reverse Blending, une nouvelle approche consistant à optimiser la composition des produits de base à concevoir. Pour la restructuration des processus, nous l'avons évoquée dans cette thèse de manière macroscopique à travers la nouvelle structure industrielle que nous avons proposée dans la Partie I/Section 2. Certains aspects des changements qu'implique le développement des nouveaux produits de base sur la structure de la chaîne logistique sont également traités dans le chapitre 5.

Par ailleurs, pour la plupart des chercheurs qui se sont penchés sur les outils du *product design* dans le cadre de la DR (ex. Shao & Ji, 2008 ; Lee & Tang, 1997), la commonalité et la modularité sont considérées comme les outils les plus pertinents pour atteindre une standardisation performante. De nombreux chercheurs sont unanimement d'avis que la modularité n'est pas envisageable dans la production continue. Certains de ces chercheurs (par exemple (Caux et al. 2006)) expliquent cette situation par la "simplicité et l'homogénéité" des produits à flux continu, d'autres (par exemple (Van Hoek, 2001)) l'attribuent au fait que les processus de transformation ne peuvent être découplés à un stade intermédiaire. La modularité étant spécifique aux chaînes logistiques discrètes, la PM à travers le Reverse Blending est plutôt basée sur une logique de commonalité. En se référant à la classification de (Perera et al., 1999) (§1.3.3.1.1), il existe trois types de commonalité selon qu'elle concerne un seul ou plusieurs produits finis et selon qu'elle porte sur un seul ou plusieurs composants communs. L'objectif du Reverse Blending étant de concevoir un ensemble de produits semi-finis communs (bien que très limités) pour plusieurs produits finis, la technique sur laquelle il se base pour permettre une standardisation optimale dans les phases amont de la chaîne logistique est celle d'une

commonalité dont plusieurs composants communs sont à partager par plusieurs produits finis. Ici, la différenciation ne s'effectue pas à partir d'une seule plateforme standard (un ou plusieurs composants communs peuvent ne pas intervenir dans la composition d'un ou plusieurs produits finis). À notre connaissance, une telle commonalité n'a jamais été adoptée dans l'industrie de process. Toutes les industries à production continue qui ont réussi à mettre en œuvre une PM agissant sur le fond du produit se sont appuyées sur l'utilisation d'une recette de base commune et standardisée (un seul composant commun pour plusieurs produits) à laquelle plusieurs ingrédients peuvent être ajoutés pour la différenciation (§2.2.2).

En résumé, la PM induite par le Reverse Blending repose sur une approche de différenciation retardée pouvant agir sur la forme et le fond des engrais, portée dans de petites unités de blending situées à l'extérieur du site de production à proximité des agriculteurs et capable de procurer une grande standardisation en exploitant au maximum les commonalités que peut présenter une grande variété d'engrais personnalisés. Ce positionnement est récapitulé dans le schéma présenté dans la figure ci-dessous. Après avoir positionné notre travail de recherche par rapport aux principaux résultats théoriques sur la PM, nous consacrons la section suivante à une analyse documentaire à travers laquelle nous soulignons l'originalité de la PM associée au Reverse Blending d'un point de vue industriel et scientifique.

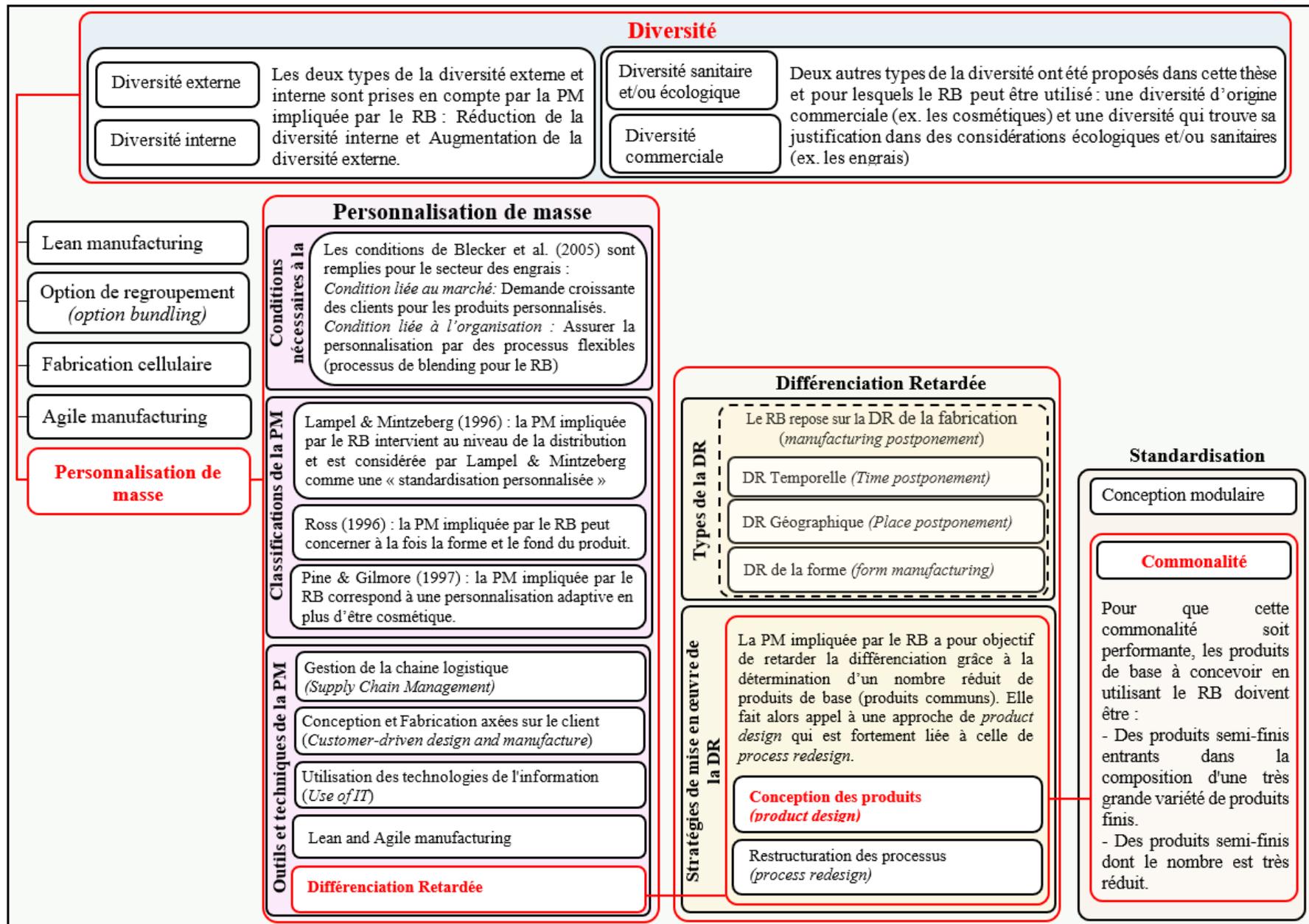


Figure 21 : Positionnement du Reverse Blending en tant qu'outil de la personnalisation de masse

2 Originalité et positionnement industriel

Nous qualifions l'organisation de personnalisation de masse que nous proposons dans cette recherche de nouvelle car, en plus de l'être pour l'OCP, elle regroupe différentes caractéristiques qui, croyons-nous, n'ont jamais été combinées auparavant dans un système de PM, surtout dans le cadre d'une production continue. En effet, les lectures que nous avons pu entreprendre pour évaluer les connaissances théoriques disponibles sur la PM nous ont permis de constater qu'il n'y a pas d'organisation industrielle dans la littérature qui combine les caractéristiques du Reverse Blending, à savoir : *i*) une PM où la personnalisation peut être purement individualisée, *ii*) une PM faisant intervenir de nouvelles nomenclatures qui sont non prédéterminées, *iii*) une PM dont la différenciation a lieu à proximité du consommateur final et *iv*) une PM qui peut agir sur la composition du produit et pas seulement sur sa forme. Afin d'étayer ce constat en explorant des contextes industriels réels, nous avons effectué une analyse documentaire dont la méthodologie de recherche suivie et l'analyse bibliographique sont respectivement présentées dans (§2.1) et (§2.2).

2.1 Méthodologie de la recherche bibliographique

En suivant les étapes basiques de Cronin et al. (2008), nous articulons l'analyse bibliographique autour de trois axes : la sélection des articles, la lecture des articles et l'analyse de la littérature. Pour la sélection des articles (cf. Figure 22), nous avons eu recours aux moteurs de recherche universitaires et aux bases de données bibliographiques suivants : Science Direct, EBSCO et Google scholar, qui selon l'étude comparative de (Gusenbauer, 2019), est le moteur de recherche universitaire le plus exhaustif. Dans notre processus de sélection, nous avons commencé par lister les mots-clés liés la PM à savoir : *Mass customization*, *Delayed differentiation*, *Postponement* et *Combined Make-to-stock and Make-to-order*. Une recherche par mot-clé nous a permis de construire une première base d'articles (soit 5 351 000 articles).

<p>Articles trouvés en fonction des mots-clés recherchés</p> <p>Science Direct & Google scholar & EBSCO : 5 351 000 articles</p> <p>Mass customization (233000 articles) Delayed differentiation (1400000 articles) Postponement (163 000 articles) Combined Make-to-stock and Make-to-order (3 555 000 articles)</p>	<p>Articles trouvés selon les filtres sélectionnés</p> <p>Mass customization (18 800 articles) Delayed differentiation (17 800 articles) Postponement (20 400 articles) Combined Make-to-stock and Make-to-order (17 800articles)</p>		
<p>Mots-clés</p> <p>Mass customization OR Delayed differentiation OR Postponement OR Combined Make-to-stock and Make-to-order</p>	<p>Filtres</p> <p>Domaine: Gestion de la supply chain, Gestion & Économie, Ingénierie industrielle Période: 1990 - 2020 Langue: Français & Anglais</p>	<p>Articles trouvés selon le contenu recherché</p> <p>88 Articles retenus après la lecture des titres et des résumés</p>	<p>Liste finale</p> <p>42 articles retenus après la lecture des texte intégraux</p>
		<p>Contenus</p> <p>Articles traitant les concepts de: - Degré de personnalisation - Point de différenciation des produits/ Point de découplage des commandes des clients (CODP)</p>	<p>Contenus empiriques</p> <p>Sélection d'articles empiriques traitant d'études de cas industriels réels</p>

Figure 22 : Méthodologie de la recherche bibliographique

Par la suite, en fonction des filtres de recherche indiqués dans la figure ci-dessus, et compte tenu de l'objectif de cette analyse documentaire, nous nous sommes limités aux articles traitant les concepts de « *Customization Degree* » et « *Product differentiation point/ Customer order decoupling point* », un ensemble de 88 articles a été retenu. En fin de compte, après la lecture de ces 88 articles, nous avons écarté de notre analyse les articles théoriques qui ne comportaient pas d'études de cas industriels réels. Cela nous a conduits à une liste finale de 42 articles, dont la grille d'analyse est présentée dans le Tableau 3.

2.2 Revue de littérature

Compte tenu des caractéristiques de notre solution de Reverse Blending, nous articulons notre analyse bibliographique autour de sept axes (§2.2.1). Les résultats de cette analyse sont détaillés dans (§2.2.2).

2.2.1 Axes d'analyse

Axe 1 : Secteur d'activité

Comme les articles sélectionnés comportent tous des études de cas industriels, cet axe permet d'identifier les domaines d'application de ces études de cas. Pour les 42 articles étudiés, ces domaines sont assez variés : secteur informatique (ex. Eastwood, 1996 ; Feitzinger & Lee, 1997 ; Peters & Saidin, 2000 ; Chiou et al., 2002), secteur mobilier (ex. Alfnes & Strandhagen, 2000 ; Yao & Carlson, 2003), secteur de l'électronique (ex. Cheng et al., 2002 ; Salvador et al.,

2002), secteur automobile (ex. Alford et al., 2000 ; Salvador et al., 2002) , secteur alimentaire (ex. Van Donk, 2001 ; Wong et al., 2011 ; Van Kampen & Van Donk, 2014), secteur pharmaceutique (ex. Dubey, R. & Dubey, J., 2009 ; Ben-Jebara & Modi, 2020), secteur du bâtiment (Jensen et al., 2015 ; Larsen et al., 2019), secteur textile/chaussures (ex. Istook, 2002 ; Graziosi & Germani, 2008), secteur médical (Erens & Hegge, 1994 ; Thompson & Nussbaum, 2000), secteur des machines industrielles (Myung & Han, 2001 ; Drejer & Gudmundsson, 2002), etc.

Axe 2 : Service ou Produit

Sur les 42 articles que nous avons choisis, 6 % contiennent des études de cas relatives au secteur des services (ex. le secteur bancaire (Ahmed, 2015) et le secteur touristique (Migas et al., 2008)) et 94 % de ces articles concernent des produits manufacturés. Cela montre que la PM et les concepts qui s'y rapportent sont souvent liés au secteur industriel plutôt qu'au secteur des services. D'ailleurs, la pénurie d'études traitant de la PM dans le domaine de services est sans doute l'une des principales lacunes de la littérature actuelle sur la PM (Chen & Hao, 2007).

Axe 3 : Type de la chaîne logistique

Cet axe classe les chaînes logistiques traitées dans les différents articles selon la nature de leurs processus de transformation en deux types :

- Les chaînes logistiques discrètes, qui sont constituées d'un ensemble de processus de transformation en flux discrets, organisant de manière intégrée les processus de transformation du fournisseur au client final, avec des logiques de production par lots ou à l'unité (Degoun et al., 2015). C'est le cas pour 57 % des articles analysés.
- Les chaînes logistiques non discrètes qui peuvent soit correspondre à des chaînes logistiques continues : chaînes logistiques constituées d'une succession de processus de transformation en flux continu, soit à des chaînes logistiques hybrides : chaînes logistiques combinant des processus continus et discrets en passant, au niveau des points de discrétisation, de flux continus à des lots discrets (Degoun et al., 2015). Cela est généralement le cas pour les industries chimiques (ex. industrie des engrais). 37 % des études de cas évoquées dans les articles analysés portent sur ce type de chaînes logistiques.

Axe 4 : Degré de personnalisation

Dans la PM, le Degré de Personnalisation (DP) est un paramètre très important qui indique le niveau de personnalisation d'une ou plusieurs caractéristiques du produit. Le DP le plus élevé

correspond aux produits et/ou services 100 % personnalisés tandis qu'à mesure que ce degré baisse, le produit tend à devenir plus standardisé. Le degré de personnalisation du produit qu'une entreprise offre à ses clients est l'un des critères le plus souvent cités dans la littérature de la PM (Sandrin, 2016). Il repose sur l'implication des clients dans les différentes composantes de la chaîne logistique. Selon (Liu et al., 2014), l'amélioration du DP peut accroître la satisfaction du client et donc augmenter sa demande mais en même temps il peut entraîner une augmentation des prix de vente ; ce qui peut alors se traduire par des pertes de marché. Pour cette raison, les industriels préfèrent opter pour des marchés de niche plutôt que de commercialiser des produits individualisés. Pour notre analyse documentaire, deux classes de personnalisation sont maintenues selon qu'il s'agit d'un degré élevé de personnalisation : personnalisation individualisée (comme c'est le cas par exemple dans (Jensen et al., 2015)) ou degré moyen de personnalisation : personnalisation par segment (comme c'est le cas pour la plupart des articles étudiés (Myung & Han, 2001), (Andel, 2002), (Van Donk, 2001)...).

Comme nous le verrons dans l'analyse de notre grille décrite ci-dessous, les concepts d'individualisation et de segmentation ont tendance à être confondus. Une clarification sur ce point est opportune afin de pouvoir bien différencier les deux concepts. En effet, dans l'individualisation, l'apport du client est un élément important qui a une influence directe sur le processus de production. En revanche, la personnalisation segmentée, assurée par l'augmentation de la diversité, n'offre qu'un choix, elle ne permet pas aux clients de spécifier le produit (Duray et al., 2000). Par conséquent, même si le *make-to-order* sous-entend de répondre aux commandes des clients, si ces commandes couvrent des produits déjà commercialisés, il s'agit alors d'une personnalisation segmentée et non individualisée. La personnalisation individuelle se produirait si la commande du client avait entraîné de nouveaux produits ne figurant pas dans le catalogue de produits. Cela est particulièrement vrai pour les industries qui différencient leurs produits par le processus d'assemblage.

Axe 5 : Nomenclature de fabrication

La création de la nomenclature (*Bill Of Materials* (BOM)) d'un produit est la première étape à effectuer avant de lancer la production. Elle se définit comme une liste exhaustive des matières premières, pièces, sous-composants et composants entrant dans la composition du produit. Une nomenclature de produit doit également indiquer les instructions nécessaires à sa fabrication ou à sa réparation, en précisant les quantités à utiliser pour chacun de ses composants. Il existe différents types de nomenclatures selon le domaine d'activité de l'entreprise. Dans les industries

manufacturières, la nomenclature est souvent présentée sous forme hiérarchique (le niveau le plus élevé représentant le produit fini et le niveau le plus bas correspondant aux pièces individuelles) afin de clairement faire apparaître les assemblages à réaliser pour construire le produit. Dans les industries de process, la nomenclature prend la forme d'une formule chimique, d'une recette ou d'une liste d'ingrédients. La nomenclature d'un produit à flux continu (poudres, crèmes, granulés ou liquides) correspond à une formule chimique indiquant le pourcentage de chaque composant dans le poids total du produit, tandis que la nomenclature d'un produit mélangé correspond à une recette de mélange indiquant la quantité de chaque ingrédient dans la quantité totale du mélange.

Pour notre analyse, l'objectif est d'évaluer si la personnalisation est effectuée en utilisant des nomenclatures déjà existantes (nomenclatures prédéterminées) ou si elle entraîne la création de nouveaux produits dont les nomenclatures restent à définir (nomenclatures à déterminer).

Axe 6 : Lieu de personnalisation

Le lieu de personnalisation ou de différenciation se rapporte simplement au point de découplage dont nous avons déjà donné la définition au paragraphe (§1.3.3.2). Une revue plus détaillée de la littérature sur ce concept peut être trouvée dans (Van Donk, 2001). Cet axe d'analyse consiste à préciser si le point de différenciation a lieu :

- Au niveau de la conception du produit,
- Au niveau de l'une des étapes de la production, nous considérons que la différenciation par assemblage est prise en compte à ce niveau,
- Au niveau de la distribution, dans des centres de distribution et des points de vente situés en dehors de l'usine de production,
- Dans le local du client, lorsque la différenciation est apportée par le client lui-même au moment de l'utilisation du produit ou juste avant.

Axe 7 : Objet de personnalisation

Nous désignons par objet de la personnalisation la substance du produit qui subit cette personnalisation. Sur ce point, il faut préciser si la personnalisation agit sur:

- La forme du produit: la personnalisation se limite à l'emballage (ex. emballage du café soluble (Wong et al., 2011)), au conditionnement (ex. conditionnement de la pulpe de tomate dans des fûts ou des sachets (Ferreira & Alcântara, 2016)), à l'étiquetage (ex.

- personnalisation de l'étiquetage des bouteilles de vin en fonction de la qualité du vin (Van Hoek, 1997)), aux dimensions (ex. la découpe des tôles d'aluminium (Caux et al., 2006)).
- Le fond du produit: la personnalisation agit sur la composition et la fonctionnalité du produit (ex. l'assemblage des sous-composants alternatifs dans l'automobile (Alford et al., 2000))
 - Ou éventuellement les deux en même temps, c'est-à-dire la personnalisation peut porter à la fois sur la forme et le fond du produit (ex. les produits informatiques (Eastwood, 1996))

2.2.2 Analyse de la littérature

En suivant la méthodologie de recherche décrite à la Figure 22, nous avons relevé 6 articles dont les études de cas portent sur la PM des services. Peters & Saidin (2000) ont examiné la PM dans le cas d'IBM Malaisie qui propose des services informatiques aux entreprises dans les domaines des services de réseau, des services de redressement d'entreprises et des services d'externalisation ou de développement d'applications. Ces services peuvent être personnalisés en fonction d'un besoin spécifique de l'entreprise cliente et, dans ce cas, les solutions informatiques sont personnalisées dès les phases de conception, ou peuvent être adaptées à partir de services standards, auquel cas la différenciation intervient lors des phases de finalisation. Thompson & Nussbaum (2000) ont abordé le problème de la PM dans le secteur des services médicaux. Ils ont mené une enquête téléphonique auprès de 1 000 femmes membres de Kaiser Permanente (un consortium de soins géré par les États-Unis) afin d'examiner les préférences en matière de prestation de soins et de distinguer les services standards (ex. la spécialité médicale) des services plus personnalisés (ex. prise de rendez-vous le samedi). Ahmed (2015) a présenté une étude de cas sur la PM dans le secteur bancaire dont l'objectif est d'examiner dans quelle mesure la différenciation des produits renforce l'avantage concurrentiel durable des banques commerciales au Kenya. La personnalisation bancaire est l'adaptation de services standard (ex. des formules standard avec des fonctionnalités basiques telles que la possession d'un compte bancaire) à des formules plus spécialisées (par exemple, choix de cartes de paiement). Chen & Hao (2007) ont révélé les aspects clés de l'externalisation dans la PM des services en se basant sur une étude de cas dans l'industrie chinoise des services de restauration. La personnalisation est ici obtenue en combinant des ingrédients préalablement préparés en fonction du repas choisi par le client. Migas et al. (2008) se sont focalisés sur la PM dans le secteur du tourisme et ont abordé une étude de cas proposant un cadre pour la personnalisation cross-média des brochures touristiques pour les agences de Tourism British

Columbia. Dans ce contexte, les brochures touristiques contiennent un certain nombre de zones statiques, où le contenu reste le même dans l'ensemble des répliques. Celles-ci peuvent ensuite être complétées par des informations plus personnalisées, qui varient en fonction des préférences des touristes, des informations sur les voyages et de divers critères spécifiques aux touristes. Il peut s'agir d'images d'hébergement, d'informations météorologiques, de cartes, d'offres promotionnelles, etc. Contrairement à la personnalisation des objets, impliquant l'assemblage de composants physiques, la personnalisation en masse des services est en effet plus simple : au lieu de transporter des pièces, il faut mobiliser des personnes, des connaissances et des compétences, ce qui est facilité par les nouvelles technologies informatiques de communication (Peters & Saidin, 2000). En général, les services sont différenciés au moment de leur prestation (par exemple, la personnalisation des formules bancaires est effectuée juste après la signature du contrat) ce qui, compte tenu des axes de recherche considérés, équivaut à une personnalisation apportée au niveau de la distribution. Une exception est constatée dans le secteur de la restauration où la personnalisation des repas a lieu pendant leur cuisson, ce qui constitue une étape de fabrication pour se référer aux axes de recherche utilisés dans la grille.

Concernant les articles ayant abordé des études de cas industriels avec des chaînes logistiques discrètes, nous distinguons d'abord ceux qui portent sur des produits individuellement adaptés dont la fabrication nécessite de déterminer au préalable la nomenclature de fabrication. La personnalisation individualisée ici peut concerner toutes les fonctionnalités du produit (individualisation pure) ou seulement quelques-unes (individualisation partielle). Eastwood (1996) propose une étude de cas sur l'implantation de la PM par Motorola Company pour certains de ses produits (ex. les téléphones portables et les semi-conducteurs). Cette personnalisation est considérée par l'auteur comme du « sur-mesure » car elle prend en compte les préférences individuelles des clients pouvant désirer, entre autres, que leurs pagers soient livrés dans leurs couleurs préférées ou que leurs téléphones portables soient assortis à l'intérieur de leur voiture. Dans ce cas, la différenciation représente l'une des dernières étapes de production et se répercute sur le fond du produit. Kotha (1996) examine la dynamique de la PM dans National Industrial Bicycle Company du Japon, une entreprise qui poursuit à la fois la production de masse et la PM dans deux usines différentes. Pour les produits personnalisés en masse, cette entreprise conçoit et fabrique les cadres et les fourches avant des vélos et assemble les autres composants (ex. les pédales, les roues et les pneus) en fonction des choix de chaque client. Dans ce cas également, la personnalisation est apportée par une opération d'assemblage, c'est-à-dire au niveau de la production, et intervient sur la composition des vélos. Drejer &

Gudmundsson (2002) introduisent un nouveau concept appelé « Développement de produits multiples – *Multiple Product Development* » qui permet de faciliter la personnalisation en masse des produits et des services. Le cas étudié est celui de Crisplant, une entreprise danoise leader dans le secteur des équipements industriels de tri. Son avantage concurrentiel repose sur sa capacité à aider à concevoir et à fournir des solutions industrielles pour les besoins spécifiques de chaque client. Pour les équipements industriels purement personnalisés, la personnalisation entre en jeu dès les phases de conception (*Engineer-to-order*), tandis que pour ceux dont la personnalisation individuelle ne concerne que quelques fonctionnalités, elle survient au niveau de la production. Istook (2002) décrit les activités liées à la mise en œuvre de systèmes de conception assistée par ordinateur pour personnaliser automatiquement les vêtements de manière à répondre aux besoins des personnes ayant des exigences de mesures particulières. La personnalisation de ces mesures est effectuée sur des modèles de vêtements préalablement créés. Elle a lieu au niveau des ateliers textiles (au niveau de la fabrication) et opère sur le fond du produit car même si la personnalisation n'est ici qu'une question de mesures, elle peut impliquer plusieurs sous-composants (ex. fils et boutons de couture). Jensen et al. (2015) ont étudié comment l'industrie de la construction danoise peut bénéficier des avantages inhérents à l'utilisation de la PM. L'industrie de la construction fait de plus en plus appel à des éléments de personnalisation de masse, par exemple par le biais de la construction modulaire, où des éléments préfabriqués assemblés selon les préférences des clients sont installés sur des fondations standards. Là encore, les adaptations apparaissent au cours du processus de construction, qui, au regard des éléments de notre grille d'analyse, constitue une étape de production. Pour l'objet de la personnalisation, il s'agit de personnaliser le fond du produit, soit, dans ce contexte, l'architecture et l'aménagement du bâtiment. L'article de Alford et al. (2000) vise à promouvoir la PM et à prévenir l'augmentation des coûts et de la complexité des processus de fabrication dans l'industrie automobile. Ils distinguent trois stratégies de personnalisation applicables en particulier à l'industrie automobile : la personnalisation de la forme, la personnalisation optionnelle et la personnalisation de base. Ces stratégies reflètent l'intégration progressive PM du client dans les processus de conception, de fabrication et de distribution respectivement. Quant aux véhicules personnalisés individuellement, Alford et al. (2000) considèrent qu'il s'agit d'une personnalisation de base pratiquée sur les véhicules spécialisés à faible volume. Nous pouvons citer comme exemple les voitures de luxe dont la conception est modifiée pour répondre aux préférences individuelles à des coûts beaucoup plus élevés que ceux des véhicules classiques.

Pour ce qui est des chaînes logistiques discrètes avec des systèmes de PM ciblant des groupes de clients (personnalisation par segment) par des produits ayant des nomenclatures prédéterminées, Erens & Hegge (1994) ont réalisé une étude de cas sur Medicom, l'une des plus grandes entreprises mondiales de fabrication d'appareils médicaux à rayons X, dans le but de montrer en quoi le développement de familles de produits est un moyen d'optimiser la complexité interne et la variété externe. Chaque famille de produits est destinée à un segment de clientèle spécifique (ex. médecins privés, hôpitaux) et porte sur des équipements médicaux dont la différenciation est réalisée par l'assemblage de divers composants (par exemple, intensificateur d'image, manipulateur d'image) qui se montent sur un socle standard. Cet assemblage peut avoir lieu à l'usine avant l'expédition du produit au client, comme il peut également être réalisé chez le client. Dans ce cas, un catalogue présentant une liste de composants, ainsi qu'une indication des composants qui pourraient ensemble donner un système fonctionnel, est expédié avec le produit. Les stratégies de personnalisation optionnelle et formelle examinées par Alford et al. (2000) font l'objet d'une personnalisation segmentée. En effet, la personnalisation optionnelle permet au client de choisir son véhicule parmi une pléthore d'options. Il ne s'agit donc pas d'une personnalisation individualisée mais plutôt d'une personnalisation segmentée où le client choisit le produit qui l'intéresse en fonction, par exemple, du modèle de véhicule, du moteur, du type de carburant, de la couleur de la carrosserie, etc. Bien entendu, ce processus de personnalisation est réalisé par l'assemblage de divers composants alternatifs et est exécuté sur les lignes d'assemblage de l'usine de production. En plus de cette personnalisation, Alford et al. considèrent que certaines caractéristiques demandées par le client peuvent être incorporées chez le distributeur, soit en ajoutant de nouvelles pièces au véhicule, soit en modifiant des pièces standards. C'est un aspect de la personnalisation de la forme qui peut, outre les améliorations limitées qui peuvent être apportées au véhicule, inclure la personnalisation des conditions de vente au client. Les distributeurs disposent d'une gamme de services qui contribuent à différencier le véhicule de leurs concurrents et à adapter la vente aux besoins du client (par exemple, les options de financement, les options de garantie et de service et l'assurance). Feitzinger & Lee (1997) ont élaboré une étude de cas illustrant les avantages que Hewlett-Packard Company a tirés de la standardisation du processus de fabrication de ses imprimantes. Grâce à la conception modulaire des produits, HP a réussi à rendre ces imprimantes personnalisables (par un processus d'assemblage) et a choisi de les personnaliser dans ses centres de distribution locaux plutôt que dans ses usines. Par exemple, au lieu de personnaliser ses imprimantes DeskJet dans son usine de Singapour avant de les expédier en Europe, HP sous-traite cette mission à son centre de

distribution européen situé près de Stuttgart, en Allemagne, où plusieurs éléments (blocs d'alimentation, emballages et manuels) sont différenciés en fonction du segment de clientèle visé. Cette approche entraîne des coûts de fabrication légèrement plus élevée que lorsque l'assemblage est effectué à l'usine, mais le coût total de fabrication, d'expédition et de stockage a diminué de 25 %. Twede et al. (2000) ont également évoqué les imprimantes HP, en explorant plus particulièrement les facteurs favorisant la différenciation retardée du packaging. Cette forme de différenciation augmente la flexibilité d'une entreprise pour répondre aux demandes des différents segments du marché (personnalisation par segments). Elle peut améliorer la réactivité aux clients et réduire les risques et les investissements liés aux stocks ; ce qui peut ainsi minimiser considérablement les coûts de transport, en fonction de la taille ou du poids des matériaux d'emballage. Cette différenciation d'emballage est portée au niveau des centres de distribution régionaux. Seth & Panigrahi (2015) se sont également penchés sur la personnalisation du packaging et ont démontré, à travers l'étude de cas d'un fabricant indien de biens de consommation à rotation rapide, comment cette personnalisation peut être efficacement exploitée dans un marché de détail diversifié et en pleine évolution. La catégorie de produits étudiée est celle des produits d'hygiène (serviettes hygiéniques) qui sont fabriqués et emballés dans l'usine de l'entreprise (car la fabrication et l'emballage des serviettes font partie intégrante du système productif) et sont envoyés aux différents centres de distribution en Inde. L'emballage de ces produits diffère selon les segments de clientèle visés dont les spécifications en termes d'absorbants et de taille sont variées. Alfnes & Strandhagen (2000) ont donné un exemple illustratif de l'applicabilité de la PM dans la chaîne logistique de HÅG, un fabricant norvégien de sièges pivotants. Réalisant que ses concurrents européens le devançaient du fait que ses chaises étaient assemblées dans son usine de Røros, à plus de mille kilomètres de ses principaux marchés, HÅG a décidé de reconcevoir ses processus en déplaçant le processus d'assemblage vers l'Europe. Le résultat de cette restructuration logistique a permis de doubler le volume des ventes avec des investissements mineurs en ressources, de réduire le délai de livraison et de parvenir à une précision de livraison dépassant 98 %. Salvador et al. (2002) ont utilisé une analyse qualitative impliquant une étude de cas multiple pour examiner six familles de produits appartenant à six entreprises européennes. Parmi celles-ci, trois études de cas se concentrent sur la personnalisation segmentée : une entreprise produisant des cyclomoteurs à la mode, une autre produisant des téléphones sur-mesure, et enfin une produisant des micro-ondes (les auteurs n'ont pas indiqué les noms des entreprises). Pour les trois, la PM est assurée par la modularité, réalisée sur des lignes d'assemblage au sein de l'usine, et intervenue sur la configuration interne du produit. Pour les cyclomoteurs à la mode, plusieurs variantes de

carrosserie extérieure sont combinées avec le même moteur, châssis, et système de freinage. Pour les téléphones sur-mesure, plusieurs variantes de coque (différents matériaux, couleurs) sont combinées avec la même batterie et le même circuit imprimé, tandis que pour les micro-ondes, plusieurs variantes de portes et de panneaux de commande (différents styles, couleurs, interfaces utilisateur) sont combinées avec le même châssis, cavité, magnétron, plateau tournant, etc. Chiou et al. (2002) ont évalué l'utilisation des quatre stratégies de différenciation retardée (différenciation de l'étiquetage, de l'emballage, de l'assemblage et de la fabrication) dans l'industrie taïwanaise des technologies de l'information. Pour ce faire, les auteurs ont ciblé six cents entreprises taïwanaises, dont seulement 102 ont répondu sans ambiguïté à toutes les questions posées dans les questionnaires distribués. Les résultats de cette enquête ont montré que les produits, qui sont de conception modulaire et qui sont caractérisés par une forte demande de personnalisation de la part des clients, semblent bénéficier du report de l'assemblage qui a lieu dans le pays cible selon le modèle de couleur, le matériau et le design spécifiés. Les produits dont les composants principaux sont coûteux semblent bénéficier d'un report de l'étiquetage (personnalisation de l'étiquette de la marque, des instructions d'utilisation et de l'étiquette de publicité/promotion) et de l'emballage (personnalisation des couleurs, du matériau, des dimensions et du poids de l'emballage).

En se tournant vers les chaînes logistiques continues ou hybrides, et plus particulièrement vers celles basées sur des systèmes de personnalisation segmentée, qui correspond plutôt à une diversification de produits ayant des nomenclatures connues et existantes, nous avons pu constater que la différenciation des produits est généralement apportée lors du processus de fabrication au sein de l'usine. En effet, Van Donk (2001) développe un cadre, basé sur le concept du point de découplage, dont l'objectif est de faciliter la prise de décision des gestionnaires quant aux produits à fabriquer sur commande et aux produits à produire pour stock. Pour ce faire, le cas étudié est celui d'une industrie alimentaire où les produits personnalisés sont séparés en plusieurs fractions qui sont fabriquées à partir de la même recette standard mais qui diffèrent en termes de taille des granulés et d'emballage (grands ou petits sacs de 5 à 25 kg)) selon les marchés visés. Cette différenciation segmentée n'agit donc que sur la forme des produits - la différenciation de la taille des granulés n'affectant que la présentation externe des granulés et non pas leur composition - et se réalise lors des étapes finales de production. Wong et al. (2011) évalue la capacité de la différenciation retardée à améliorer les performances de la chaîne logistique à travers une étude de cas d'un producteur de café soluble. Cette étude montre que des économies importantes peuvent être réalisées en retardant le processus d'étiquetage et

d'emballage jusqu'à ce que les commandes réelles des détaillants soient connues. Ces économies comprennent la réduction des stocks de sécurité et des stocks obsolètes invendus lors d'événements promotionnels. Dans ce cas, la différenciation agissant sur le fond du produit est assurée à l'intérieur de l'usine en mélangeant différentes variétés de grains de café et celle agissant sur son conditionnement (pots, bouchons, étiquettes) est assurée à l'extérieur de l'usine au niveau des centres de distribution. Van Kampen et Van Donk (2014) indiquent dans leur article comment les caractéristiques de l'industrie alimentaire affectent la performance opérationnelle de la mise en œuvre de la DR en se basant sur une étude de cas d'une entreprise laitière. Cette dernière possède une usine de transformation laitière qui fournit des produits à plus de 20 pays sur quatre continents. Pour répondre à la demande de chaque pays, un certain nombre de composants de base (principalement du lait entier et du lait écrémé) sont mélangés et transformés en plus de 100 recettes, qui sont transformées sur 18 lignes d'emballage en 700 produits finis dans différents formats de conditionnement (boîtes métalliques, bouteilles, cartons, gobelets). Dans ce contexte, la personnalisation, qui porte à la fois sur la forme et le fond du produit, est effectuée à l'usine avant d'être expédiée aux différents clients. Ferreira & Alcântara (2016) explorent l'application de la DR dans les entreprises qui fabriquent des produits dérivés de la tomate afin d'identifier le type de DR adopté, son processus de mise en œuvre et les principaux changements survenus après son adoption. Pour ces produits, le composant standard (pulpe de tomate) subit une série de manipulations, en fonction du mode de conditionnement qui dépend à son tour de la clientèle visée (différenciation par segments). Dans le cas d'un conditionnement en fûts (un récipient métallique qui permet d'emballer le produit pendant de longues périodes sans le refroidir), la pulpe est emballée, refroidie puis stockée. Dans le cas d'un conditionnement en sachets, la pulpe est refroidie et stockée pendant 12 à 30 mois. La DR adoptée implique alors une personnalisation cosmétique qui n'affecte que la forme du produit et qui représente une étape du système productif au sein de l'usine de transformation. Escobar-Saldívar et al. (2008) ont présenté une étude de cas d'un grand fabricant de produits en tôle peinte situé dans le nord du Mexique pour laquelle plusieurs méthodes ont été proposées afin d'optimiser la variété de couleurs offertes par ce fabricant. La personnalisation n'est ici qu'une question de colorisation de la tôle galvanisée qui a lieu à l'intérieur de l'usine métallurgique et qui est segmentée puisqu'une même couleur peut être destinée à plusieurs clients. Lu et al. (2015) ont également publié une étude de cas de l'industrie métallurgique où ils ont testé un modèle d'optimisation de la planification de la production intégrée sur une aciérie proposant une personnalisation flexible. Cette dernière peut se rapporter aux propriétés mécaniques (par exemple la teneur en carbone) et survient alors en cours du

processus primaire de fonte (i.e. personnalisation du fond) et/ou aux dimensions physiques (épaisseur, largeur et longueur) et survient en l'occurrence lors du processus final où les plaques d'acier sont coupées à la largeur et à la longueur spécifiées (i.e. personnalisation de la forme). Dans les deux cas, la personnalisation constitue l'une des étapes de production.

Néanmoins, tout en poursuivant notre analyse concernant la personnalisation segmentée portant sur des nomenclatures de fabrication prédéterminées, dans certains secteurs de la chaîne logistique continue ou hybride, tels que les industries pharmaceutiques, alimentaire et viticole, la personnalisation peut parfois être effectuée en dehors du site de production initial et être retardée jusqu'aux sites de distribution. C'est notamment le cas de (Van Hoek, 1997) démontrant, à travers les résultats d'une étude de cas de WN, un producteur de vin européen, que les applications de la DR peuvent contribuer à l'amélioration intégrale de la chaîne logistique. Ce producteur approvisionne des vins de base qui sont conservés dans un état semi-fini avant d'être mélangés et aromatisés, embouteillés et emballés selon les spécifications des marchés ciblés se trouvant principalement en Europe du Nord-Ouest, en Europe de l'Est et au Royaume-Uni. Bien que Van Hoek considère WN comme un producteur de vin assurant la différenciation au sein de son site, en examinant l'ensemble de la chaîne logistique viticole depuis la récolte jusqu'au consommateur final, nous estimons plutôt que WN joue le rôle d'un distributeur pouvant assurer la personnalisation en termes de composition (mélange des variétés de vin) et de forme (bouteilles et emballages différents). Il en va de même pour (Cholette, 2009) qui a examiné comment différentes configurations de produits peuvent affecter le degré de la différenciation retardée de l'étiquetage et l'emballage dans l'industrie viticole américaine. (Ferreira et al., 2012) et (Ferreira & Alcântara, 2015) ont traité des études de cas de trois entreprises industrielles brésiliennes de jus d'orange en vue de déterminer le type de stratégie de DR mise en œuvre dans ces entreprises. Comme dans l'industrie du vin, ces trois entreprises produisent différents types de jus d'orange qui sont expédiés vers le pays de destination où ils peuvent être personnalisés par un distributeur, qui personnalise le fond du produit (en mélangeant, diluant, ajoutant des arômes et des saveurs) et son conditionnement (embouteillage, emballage et étiquetage). Cela n'est pas forcément toujours le cas, Bandaly & Hassan (2020) ont également réalisé une étude de cas d'un petit producteur de jus (jus de pomme) mais la personnalisation invoquée dans cette étude intervient au sein du site de production et n'agit que sur la forme du produit (son emballage et son étiquetage) selon qu'il s'agit d'un jus premium (jus ayant le meilleur rendement d'extraction et la meilleure qualité gustative) ou d'un jus ordinaire (jus de pommes de moindre qualité). Quant à l'industrie

pharmaceutique, pour certains médicaments composés, les entreprises peuvent recourir à la PM via une différenciation retardée (Ben-Jebara & Modi, 2020). La différenciation retardée est observée lorsqu'une entité en aval (par exemple une pharmacie de composition) effectue un traitement supplémentaire pour mélanger plusieurs médicaments afin d'augmenter leur variété et ainsi mieux segmenter la clientèle en fonction, par exemple, de l'âge du patient.

D'autre part, en se limitant aux cas où les commandes de produits personnalisés par les clients provoquent la nécessité de d'abord déterminer leurs nomenclatures dans le cadre des chaînes logistiques continues ou hybrides, seuls deux articles ont pu être repérés. Un premier article de (Caux et al., 2006) qui ont abordé un problème de standardisation dans le cas d'une industrie de conversion de l'aluminium où ce sont les dimensions des plaques d'aluminium qui se personnalisent au niveau du processus de sciage (personnalisation de la forme). L'entreprise étudiée offre une variété de 100 plaques de différentes dimensions, chacune ayant été produite sur demande spécifique. Il s'agit alors d'une personnalisation individualisée car le client peut toujours demander une nouvelle dimension bien qu'elle ne figure pas dans le catalogue des 100 variétés proposées. Concernant le lieu et l'objet de la personnalisation, celle-ci est effectuée à l'usine métallurgique et n'agit que sur la forme des plaques (ses dimensions), la composition interne étant invariante. Dans ce cas, la nomenclature à déterminer n'est qu'une question de dimensionnement (largeur, longueur, épaisseur). Le second article est celui de (Ben-Jebara & Modi, 2020) qui traite, entre autres, des médicaments purement personnalisés dont les nomenclatures de fabrication sont à déterminer en fonction des génomes (caractéristiques de l'ADN) et de la réaction du patient. Les produits biologiques et biosimilaires sont également des médicaments 100 % individualisés où, outre leurs spécifications chimiques, leur production fait intervenir des matières provenant du patient (ex. les cellules sanguines du patient). Ce type de médicaments sont personnalisés dès la conception.

N° Article	Titre	Auteur	Année	Secteur	Produit/ service		Production		Nomenclature		Degré de personnalisation		Lieu/ Objet de la différenciation									
					Service	Produit	Continue/ Hybride	Discrète	A déterminer	Préterminée	Personnalisation individualisée	Par segment	Conception		Fabrication		Distribution		Client			
													Fond du produit	Forme du produit	Fond du produit	Forme du produit	Fond du produit	Forme du produit	Fond du produit	Forme du produit		
1	Manufacturing and sales co-ordination for product variety	Erens & Hegge	1994	Matériels médicaux		X		X		X		X							X			
2	Implementing mass customization	Eastwood	1996	Produits informatiques		X		X	X		X				X	P						
3	From Mass Production to Mass Customization: The Case of the National Industrial Bicycle Company of Japan	Kotha	1996	Industrie des vélos		X		X	X		X		X		X							
4	Mass customization at Hewlett-Packard: the power of postponement	Feitzinger & Lee	1997	Imprimantes		X		X		X		X			X	P						
5	Postponed manufacturing: a case study in the food supply chain	Van Hoek	1997	Industrie viticole		X	X			X		X						B, L, P				
6	IT and the mass customization of services: the challenge of implementation.	Peters & Saidin	2000	Industrie Informatique	X						X		X		X							
7	Packaging postponement: a global packaging strategy	Twede et al.	2000	Imprimantes		X		X		X		X							P, L			
8	Enterprise design for mass customisation: The control model methodology	Alfies & Strandhagen	2000	Chaises pivotantes		X		X		X		X			X							
9	Mass customisation—an automotive perspective	Alford et al.	2000	Industrie automobile		X		X	X		X		X		X		X					
10	An HMO survey on mass customization of healthcare delivery for women	Thompson & Nussbaum	2000	Secteur de la santé	X					X		X					X					
11	Knowledge-based parametric design of mechanical products based on configuration design methods	Myung & Han	2001	Produits mécaniques		X		X		X		X			X							
12	Make to stock or make to order: The decoupling point in the food processing industries	Van Donk	2001	Industrie alimentaire		X	X			X		X				G, P, L						
13	From common to custom: The case for make-to-order	Andel	2002	Produits de bureau		X		X		X		X							P			
14	Inventory-service optimization in configure-to-order systems	Cheng et al.	2002	Produits électroniques		X		X		X		X			X							
15	The adoption of form postponement strategy in a global logistics system: the case of Taiwanese information technology industry	Chiou et al.	2002	Produits informatiques		X		X		X		X					X	P, L				
16	Towards multiple product development	Drejer & Gudmundsson	2002	Machines industrielles		X		X	X		X		X									
17	Modularity, product variety, production volume, and component sourcing: theorizing beyond generic prescriptions	Salvador et al.	2002	Industrie des motos		X		X		X		X			X							
				Téléphonie sur mesure		X		X		X		X		X								
				Micro-ondes		X		X		X		X		X								
				Camions lourds		X		X	X		X		X		X	X						
				Multiplexeurs		X		X	X		X			X								
18	Enabling mass customization: computer-driven alteration methods.	Istook	2002	Textile		X		X	X		X			X								
19	Defining the Internet-based supply chain system for mass customized markets	Ghiassi & Spera	2003	Industrie des vélos		X		X		X		X			X							
20	Common generic block: mass customization for shipbuilding	Storch & Sukapanpothara	2003	Construction navale		X		X		X		X			X	X						

N° Article	Titre	Auteur	Année	Secteur	Produit/ service		Production		Nomenclature		Degré de personnalisation		Lieu/ Objet de la différenciation							
					Service	Produit	Continue/ Hybride	Discrete	A déterminer	Préétablie	Personnalisation individualisée	Par segment	Conception		Fabrication		Distribution		Client	
													Fond du produit	Forme du produit	Fond du produit	Forme du produit	Fond du produit	Forme du produit	Fond du produit	Forme du produit
21	Agility and mixed-model furniture production	Yao & Carlson	2003	Meubles rembourrés		X		X		X					X					
22	Differentiation and Ecological Modernization in Water and Electricity	Van Vliet	2003	Distribution de l'eau et de l'électricité		X	X			X		X	X				X			
23	Implementation of delayed differentiation in batch process industries: a standardization problem	Caux et al.	2006	Conversion de l'aluminium		X	X		X						C/S					
24	Mass customisation implementation models and customer value in mobile phones services	Sigala & Christou	2006	Téléphone mobile	X					X							X		X	
25	Outsourcing for Achieving Mass Customization in Service Operations: Lessons from the "Smaller Kitchen" Strategy in Chinese Catering Services	Chen & Hao	2007	Restauration	X					X				X	X					
26	Sustainable Production in the Age of Mass Customization: An Example in the Footwear Industry	Graziosi & Germani	2008	Secteur des chaussures		X		X		X				X						
27	Individualized tourism brochures as a novel approach to mass customization	Migas et al.	2008	Tourisme	X					X							X			
28	An approach to product variety management in the painted sheet metal industry	Escobar-Saldívar et al.	2008	Tôle peinte		X	X			X		X		X						
29	Pharmaceutical product differentiation: a strategy for strengthening product pipeline and life cycle management	Dubey, R. & Dubey, J.	2009	Industrie pharmaceutique		X	X			X		X		X	P/L					
30	Mitigating demand uncertainty across a winery's sales channels through postponement	Cholette	2009	Industrie viticole		X	X			X		X						B, L		
31	Evaluation of postponement in the soluble coffee supply chain: A case study	Wong et al.	2011	Café soluble		X	X			X		X		X				P, L		
32	Mesures d'évaluation de la performance de la différenciation retardée: études de cas dans les industries alimentaires	Ferreira et al.	2012	secteur des jus et conserves		X	X			X		X				X		B, P, L		
33	Coping with product variety in the food processing industry: the effect of form postponement	Van Kampen & Van Donk	2014	Industrie laitière		X	X			X		X		X	P, L					
34	Modeling and optimization methods of integrated production planning for steel plate mill with flexible customization	Lu et al.	2015	Industrie sidérurgique		X	X			X		X		X	C/S					
35	Application of mass customization in the construction industry	Jensen et al.	2015	Industrie du bâtiment et de la construction		X		X	X		X			X						
36	Postponement application in orange juice companies: case studies	Ferreira & Alcántara	2015	Industrie du jus		X	X			X		X				X		B, P, L		
37	Application and evaluation of packaging postponement strategy to boost supply chain responsiveness: a case study	Seth & Panigrahi	2015	Industrie des serviettes hygiéniques		X		X		X		X			P					
38	Realization of sustainable competitive advantage through product differentiation in commercial banks in Kenya: a case study of first community	Ahmed	2015	Secteur bancaire	X					X							X			
39	Postponement adoption in manufacturers of tomato-derived products	Ferreira & Alcántara	2016	Produits dérivés de la tomate		X	X			X		X			P, B, L					
40	Mass Customization in the House Building Industry: Literature Review and Research Directions.	Larsen et al.	2019	Industrie du bâtiment et de la construction		X		X		X		X		X						
41	Postponement implementation in integrated production and inventory plan under deterioration effects: a case study of a juice producer with limited	Bandaly & Hassan	2020	Industrie du jus		X	X			X		X			B, L					
42	Product personalization and firm performance: An empirical analysis of the pharmaceutical industry	Ben-Jebara & Modi	2020	Industrie Pharmaceutique	Médicaments composés		X	X			X		X			X	P			
					Pharmacogénomique, Produits biologiques et biosimilaires.		X	X		X		X		X						
Us	Personnalisation de masse impliquée le Reverse Blending	Benhamou et al.	2020	Industrie des engrais		X	X		X		X					X	X			

B : Bottling (mise en bouteille)/ P : Packaging (Emballage)/ L : Labeling (Étiquetage)/ C/S : Cutting/ Sizing (Découpage/ Dimensionnement)/ G : Granulating (Granulation)

Tableau 3. Grille d'analyse des articles sur la personnalisation

Notre analyse nous permet donc de conclure que lorsque la personnalisation est purement sur-mesure, tant pour les chaînes logistiques discrètes que pour les chaînes logistiques continues, elle s'effectue dès la phase de conception, où elle vient après par la création de la nomenclature de fabrication (par exemple, les vélos en production discrète (Kotha, 1996) et les médicaments biologiques en production continue (Ben-Jebara & Modi, 2020)). Dans le cas où la personnalisation répond aux besoins individuels des clients qui affectent le fond du produit mais qui ne portent que sur une partie des fonctionnalités du produit (un scénario qui ne concerne que la production discrète dans notre étude), elle peut être retardée jusqu'à la dernière étape de la production au sein de l'usine tout en exigeant de créer de nouvelles nomenclatures (par exemple, les téléphones portables dans (Eastwood, 1996)). Pour la chaîne logistique continue, un seul article a été trouvé sur la personnalisation individualisée réalisée à la dernière étape de production, celui de (Caux et al., 2006), mais ici la personnalisation agit sur la forme (dimensions des plaques d'aluminium) et non sur le fond. Tous les autres articles qui ont traité de la personnalisation dans le contexte de chaînes logistiques continues ou hybrides impliquent une personnalisation segmentée avec des nomenclatures de fabrication prédéterminées. Dans la plupart de ces articles, la personnalisation est l'une des étapes de la fabrication qui a lieu à l'intérieur de l'usine de production. Pour les autres articles, la différenciation intervient dans les centres de distribution, mais elle se limite à personnaliser le conditionnement du produit sans en modifier la composition interne.

Enfin, cette analyse conforte notre constat de départ : les cas industriels réels dans lesquels la personnalisation intervient en dehors des usines de production, à proximité du consommateur final, tout en agissant, en plus de la forme, sur le fond du produit, en tenant compte des besoins individuels de chaque client, ne sont, à notre connaissance, jamais abordés dans la littérature des chaînes logistiques continues ou hybrides.

Conclusion

Ce chapitre est structuré en deux parties. La première (la deuxième étape de notre méthodologie de recherche) commence par une revue de littérature générale en vue d'étudier les meilleures stratégies à adopter pour faciliter la gestion d'une grande variété de produits. Cette revue nous a permis de conclure que les systèmes de production qui réussissent le mieux à répondre à la demande croissante de produits personnalisés sont ceux qui ont recours à la PM moyennant des

outils de standardisation et de différenciation retardée. L'évaluation des connaissances théoriques existantes sur ces concepts nous a conduit à proposer pour OCP une organisation industrielle fondée sur une nouvelle PM assurée par l'approche du Reverse Blending, une solution innovante visant à déterminer les produits de base à partir desquels une grande variété de fertilisants peut être satisfaite.

Dans la deuxième partie, nous avons d'abord positionné la PM impliquée par le Reverse Blending par rapport aux travaux existants. Il s'agit un outil de PM basée sur une différenciation retardée de la fabrication (*manufacturing postponement*) qui utilise une logique de standardisation visant une grande massification des flux en maximisant les commonalités d'une grande variété de fertilisants personnalisés. Au cours de ce travail de positionnement, il a été observé que la gestion de la diversité à travers les outils de la différenciation retardée dans les chaînes logistiques continues ou hybrides est très peu abordée dans la littérature, un constat que plusieurs chercheurs ont pu souligner (Van Hoek, 1997 ; Van Donk, 2001 ; Caux et al., 2006).

Pour appuyer ce constat, une revue de la littérature a été réalisée sur une quarantaine d'études de cas issues de contextes industriels réels en les examinant en termes de la préexistence des nomenclatures de fabrication, du degré de la personnalisation apportée (individualisée ou par segments), de son lieu de survenance et de son incidence sur le produit (personnalisation de la forme et/ou du fond). En gros, les quelques industries de process qui ont pu mettre en œuvre la différenciation retardée dans leur chaîne logistique utilisent des nomenclatures prédéterminées pour la personnalisation de leurs produits (§2.2.2). De tous les articles étudiés, dans le cadre de la production continue, seuls deux traitent de la personnalisation individualisée où les nomenclatures de fabrication sont à déterminer. Si cette personnalisation ne porte que sur la forme du produit, la différenciation peut être retardée jusqu'aux dernières étapes de la production, sinon, si cette personnalisation individualisée est purement sur-mesure, elle intervient alors dès les phases de conception. Dans les deux cas, la différenciation est effectuée à l'intérieur de l'usine.

D'un autre côté, la personnalisation impliquée par le Reverse Blending est une personnalisation purement individualisée qui fait intervenir de nouvelles nomenclatures non préexistantes et qui vise, dans le contexte des engrais, à satisfaire la demande individuelle de chaque exploitant agricole en répondant aux besoins nutritifs figurant dans le rapport d'analyse de son sol. Cette individualisation concerne principalement la composition chimique des engrais (elle ne se limite pas à leur conditionnement) et représente l'étape finale de production, retardée jusqu'à proximité de l'agriculteur. En principe, une personnalisation purement individualisée intervient

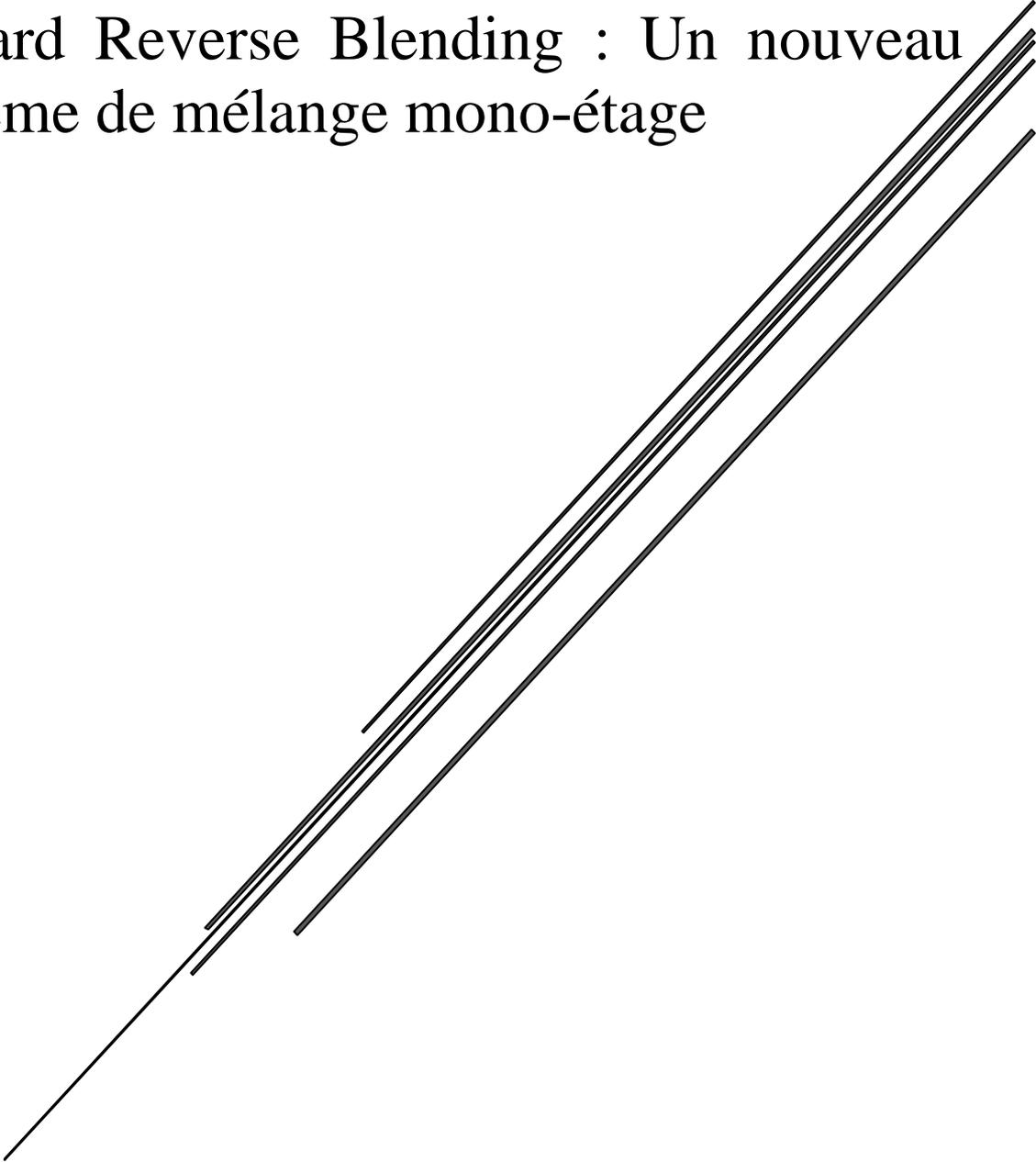
toujours dans la phase de conception du produit. Cela est en quelque sorte également vrai pour le Reverse Blending, car les besoins individualisés sont pris en compte dans la conception du produit, mais pas dans la conception du produit fini, plutôt dans celle des produits de base (l'équivalent des colorants de base dans la peinture). C'est là que réside l'originalité de notre approche et c'est ce qui permet à une PM basée sur le Reverse Blending de bénéficier d'une différenciation retardée purement individualisée pouvant être menée en dehors du site de production. Par conséquent, notre originalité tient à la proposition d'un outil de PM caractérisé par :

- Une personnalisation purement individualisée caractérisée par la non-prédétermination de nomenclatures des produits vendus, cette détermination étant individuelle, au cas par cas.
- Une PM spécifique aux systèmes de production à flux continu rendue possible par une technique de commonalité.
- Une personnalisation portée à l'extérieur de l'usine de production auprès de l'exploitant agricole
- Une personnalisation capable d'agir sur le fond et la forme du produit.

Après avoir positionné le Reverse Blending par rapport aux travaux existants dans la littérature, nous donnons les fondements de cette approche, sous ses versions standard et étendue, dans les chapitres 3 et 4 respectivement qui forment ensemble la troisième étape de notre méthodologie de recherche introduite dans la section 2 de l'introduction générale.

CHAPITRE 3

Standard Reverse Blending : Un nouveau
problème de mélange mono-étage



Chapitre 3. Standard Reverse Blending : Un nouveau problème de mélange mono-étage

Introduction

Ce chapitre aborde la description de la version standard du Reverse Blending, solution que nous proposons pour répondre au défi de la forte diversité dans l'industrie des engrais. Dans la section 1, nous décrivons en détail l'approche du Reverse Blending, ses fondements et sa méthode de résolution. La section 2 est consacrée à la revue de littérature où nous analysons les principaux travaux liés aux problèmes de blending classiques à un seul étage avant de positionner notre approche par rapport à ce type de problèmes. La section 3 est dédiée à la modélisation mathématique où nous proposons, en plus du modèle du Reverse Blending, les modèles de deux variantes du problème du blending à un seul étage. La première, dont le modèle d'optimisation est nommé UBC (Utilisation de la Base Canonique), est proposée pour montrer qu'une base canonique (trouvée par Reverse Blending) peut se révéler suffisante pour produire d'autres engrais non inclus dans l'échantillon initialement utilisé pour sa définition ; et la seconde, dont le modèle d'optimisation est appelé RD (Réduction de la Diversité), est conçue pour voir à quel point la diversité des engrais produits actuellement par les plus grands producteurs d'engrais au monde peut être réduite en utilisant le blending des engrais existants sans limiter la diversité d'usage potentielle. Dans la dernière section (section 4), nous présentons deux études de cas dont la première a pour objectif d'appliquer le Reverse Blending en illustrant comment une base canonique peut être définie (§4.1) tandis que la deuxième permet de comparer la performance du blending classique avec celle du Reverse Blending en ce qui concerne leur capacité à réduire la diversité à produire (§4.2).

Comme les deux études se concentrent sur l'industrie des engrais, la diversité considérée ici est liée à un impératif écologique (l'agriculture durable). Une application du Reverse Blending à la diversité commerciale (la diversité cosmétique) est présentée en (Annexe9). Il convient de noter que, puisque le Reverse Blending est destiné à couvrir un large éventail de produits, ces études de cas traitent de problèmes à grandes instances, et afin de ne pas occuper inutilement l'espace du

texte, les tableaux de données et de résultats, dont les versions complètes se trouvent dans les annexes, n'en présentent que des extraits.

1 Fondements du Reverse Blending Standard

1.1 Sur le plan « Recherche Opérationnelle »

Le plus grand avantage dont bénéficie l'industrie de la peinture, lui procurant une gestion facile d'une très grande variété de produits, est le fait de disposer d'une plateforme commune, couvrant moins d'une dizaine de teintures de base, capable de créer n'importe quelle autre couleur par une simple opération de mélange. L'idée est de ramener cet avantage à l'industrie des engrais en essayant de trouver une base d'un nombre réduit de produits intermédiaires dont les combinaisons de mélange possibles peuvent se traduire par une énorme variété de formules d'engrais. La solution que nous proposons ici a donc pour principal objectif de trouver les produits de base qui constitueraient ensemble une plateforme standard pour une énorme variété d'engrais (produits finis). Tout comme ces derniers, qui sont principalement définis par leurs formules chimiques, les produits de base (produits semi-finis) sont également censés se distinguer par leur composition chimique et leur détermination implique ainsi de trouver la proportion de chaque composant chimique dans leurs poids totaux. Pour ce faire, nous proposons une nouvelle approche que nous appelons : *Reverse Blending (RB)* (Benhamou et al., 2018a, 2018b, 2020d).

Comme tout autre problème d'optimisation, en Recherche Opérationnelle (RO), la résolution d'un problème réel doit commencer par sa formulation mathématique (modèles), puis par la recherche de techniques de résolution (algorithmes) avant de développer des moteurs pour exécuter l'ensemble des étapes de ces algorithmes (logiciels). Cependant, comme nous sommes plus intéressés dans cette thèse par l'aspect "management industriel", et étant donné que beaucoup de travaux ont été réalisés sur les algorithmes de résolution des problèmes quadratiques, cette thèse ne traite pas de la méthode de résolution du RB, en revanche, elle recourt à l'un des solveurs commerciaux qui supportent la programmation non linéaire de manière très satisfaisante.

En pratique, le Reverse Blending (RB) n'est qu'un problème de blending puisqu'il entraîne le mélange d'un ensemble d'inputs pour obtenir un ensemble d'outputs pour lesquels des spécifications bien précises doivent être respectées. Ceci semble correspondre à un problème de

blending classique qui vise à répondre aux demandes, en quantités et en compositions, d'un ou plusieurs outputs en définissant les quantités optimales (variables de décision) à prélever d'un ensemble disponible d'inputs. En quoi le RB est-il donc différent ?

Deux particularités différencient le RB du blending classique : *i*) l'ensemble des inputs n'est ni préexistant ni connu, *ii*) l'ensemble des outputs porte sur une très grande variété de produits finis. Le RB consiste donc à partir d'un ensemble d'outputs très diversifiés pour tenter de trouver un ensemble d'inputs permettant, par blending, de répondre aux spécifications de tous ces outputs. Cela explique la nomination « *reverse blending* » que nous avons décidé de lui accorder. Ainsi, d'un point de vue théorique, nous ne partons pas des inputs pour aboutir aux outputs, comme c'est le cas habituel des problèmes de blending ; inversement, c'est sur la base des outputs et leurs compositions chimiques que l'ensemble des inputs doit être défini. Pour ce faire, non seulement le RB vise à répondre aux spécifications de n'importe quel produit fini, mais il veille à ce que cela soit possible avec le strict minimum d'inputs. Cela nous rappelle le concept de la base canonique, qui, en algèbre linéaire, se réfère au meilleur ensemble minimum de vecteurs — linéairement indépendants — à partir duquel on peut construire un espace vectoriel. Ces vecteurs forment alors une famille à la fois *i*) libre : aucun des vecteurs de cette famille n'est combinaison linéaire des autres et *ii*) génératrice : les combinaisons linéaires résultant de ces vecteurs permettent de construire tous les autres vecteurs de l'espace. C'est aussi le cas des colorants de base dont le mélange permet d'obtenir n'importe quelle autre couleur (caractère générateur) et dont le terme « primaire » est à rapprocher de l'adjectif « premier » qualifiant un nombre premier. Cela dit, de même que deux nombres sont premiers entre eux s'ils n'ont pas de diviseur entier commun supérieur à 1, des couleurs sont dites primaires entre elles si aucune d'elles ne peut être reproduite par un mélange des autres (caractère libre). Suivant le même principe, ces deux caractéristiques représentent les deux principales conditions que doit remplir l'ensemble des inputs à déterminer par le RB : 1) inputs linéairement indépendants ; 2) inputs dont les combinaisons linéaires peuvent satisfaire n'importe quelle formule chimique de tout produit fini (engrais personnalisé). C'est ainsi que nous appelons l'ensemble des inputs à déterminer par le RB : "Base Canonique (BC)", ces inputs étant des matières composites, ils sont qualifiés de "Composites de la Base Canonique (CBC)".

Compte tenu de ces appellations, le RB se définit comme étant un problème de mélange mono-étage, reposant sur un programme quadratique, dont les spécifications des inputs (c'est-à-dire. les CBC) sont des variables de décision, par opposition au blending classique où ces spécifications sont des paramètres (données d'entrée du modèle). Simultanément à la détermination des spécifications chimiques (en termes du % de chaque élément chimique) des CBC, le RB précise également les quantités optimales à prélever de ces CBC pour satisfaire les spécifications (en termes du % de chaque élément chimique) d'une grande variété d'outputs. Le critère pris en compte dans la recherche des valeurs optimales relatives à ces deux variables de décision est celui de la minimisation du nombre des composites de la BC (le modèle complet du RB est fourni dans la sous-section (§3.2)).

1.2 Sur le plan industriel

En langage industriel, la BC doit correspondre à une plateforme commune, comportant un ensemble de composants communs, à partir de laquelle n'importe quel produit fini pourrait être obtenu (soit l'équivalent des colorants de base dans l'industrie des colorants ou du châssis des véhicules dans l'industrie automobile) et les quantités à en prélever forment des nomenclatures pour la fabrication d'une grande variété de produits finis. Étant donné que ces nomenclatures portent sur un nombre réduit de CBC, elles garantissent la production de masse d'une très grande variété d'engrais. Le RB représente donc une technique de la PM permettant de faciliter la gestion de fortes diversités à travers une forte massification des flux. Grâce à cette massification, le RB permet : *i*) de produire les CBC en grandes quantités de manière plus économique dans des usines chimiques existantes, leur processus de production étant similaire à celui des produits finis (production pour stock) ; *ii*) l'expédition rentable de peu de CBC vers des points de vente, situés à proximité des zones d'utilisation finale, où seront installées de petites machines de mélange (une différenciation retardée) ; *iii*) l'obtention de produits personnalisés à travers une production locale sur commande en appliquant la nomenclature appropriée.

Bien entendu, plus la base des besoins nutritifs, utilisée dans la détermination de la BC, est diversifiée et importante, plus le RB présente un grand intérêt en termes de réduction de la diversité (d'où pourquoi le RB est rapporté principalement aux engrais personnalisés). Une base canonique doit en effet être créée sur la base d'un très grand nombre de besoins prenant en considération toutes les variétés agricoles ainsi que tous les types de sols existants. Néanmoins, pour des raisons

déjà évoquées dans la section (Chap.1/section 2), le taux d'utilisation des engrais, et a fortiori des engrais personnalisés, est encore très faible en Afrique. Ainsi, puisqu'il n'existe actuellement pas encore de demande en engrais adaptés, si le RB devait être appliqué sur une demande personnalisée, cette demande serait a priori potentielle. Par ailleurs, sachant que les besoins nutritifs dépendent d'un grand nombre de paramètres variant d'un exploitant agricole à un autre, il est donc très difficile et coûteux de mener des études de marché cherchant à mieux spécifier les demandes potentielles d'une large gamme de produits personnalisés. Ceci ne pose aucun problème car les études de marché ne sont pas un préalable à l'utilisation du RB qui peut traiter toutes les demandes comme étant potentielles en fixant conventionnellement leurs quantités à 100.

Par ailleurs, l'approche du RB est une solution qui est particulièrement dédiée aux industries continues opérant dans des contextes de mélange dont les inputs sont des matières composites — et non des matières premières utilisées dans leur état brut (ex. l'hydrocarbure pour l'industrie pétrolière) — pouvant être obtenues par transformation chimique. Bien évidemment, pour être en mesure de créer les CBC et leur trouver la meilleure composition chimique, ils doivent pouvoir être industriellement fabriqués. Dans ce contexte, ces CBC peuvent devoir être créés de toutes pièces, et des expériences en laboratoire peuvent ainsi être nécessaires pour obtenir des réactions chimiquement stables pour leur développement.

1.3 Méthode de résolution : Programmation quadratique non-convexe

Bien que le modèle de la programmation linéaire fonctionne dans beaucoup de situations, de nombreux aspects de notre monde ne se comportent pas de manière linéaire. Certains problèmes ne peuvent ainsi être modélisés avec précision sans inclure des composantes non linéaires. Un problème est dit non linéaire (PNL) si la fonction-objectif est non linéaire et/ou si le champ des solutions réalisables est déterminé par des contraintes non linéaires. Le RB étant un problème d'optimisation à contraintes bilinéaires, sa résolution fait alors appel à la programmation non linéaire.

En effet, outre les variables de décision de la quantité optimale à prélever de chaque CBC i pour produire chaque output j (engrais), le RB comporte d'autres variables continues qui sont celles relatives aux coefficients : part en % de chaque composant c (nutriment) dans le poids total de chaque CBC i . Par conséquent, la contrainte liée au respect des spécifications requises par la

composition de chaque engrais j en termes de chaque élément nutritif c oblige à ce que le poids relatif du nutriment c dans l'engrais j obtenu par mélange (c'est-à-dire la quantité du nutriment c contenue dans le volume total, divisée par le volume total) soit égal à une valeur précise. Ainsi, puisque la quantité du nutriment c contenue dans le volume total (c'est-à-dire quantité demandée pour un engrais j) est simplement la somme des spécifications chimiques des inputs multipliées par les quantités prélevées de ces inputs (multiplication de deux variables de décision), le problème devient alors non linéaire et plus exactement quadratique puisque ces contraintes sont des équations non linéaires du second degré. Plus encore, comme, en pratique, les contraintes d'égalité impliquant des fonctions non linéaires ne sont presque jamais convexes (les exceptions ont tendance à être triviales pour se réduire à un ensemble équivalent d'équations linéaires, ce qui n'est pas le cas ici), la méthode de résolution du RB est la programmation quadratique non convexe (NCQP : Non Convex Quadratic Programming).

La non-convexité de ce problème le rend intrinsèquement plus difficile à résoudre. En effet, lorsqu'un problème est convexe (cas des programmes linéaires), la région réalisable (ensemble des solutions faisables) - l'intersection des fonctions de contraintes convexes - est une région convexe. Par conséquent, il ne peut y avoir qu'une seule solution optimale, tout optimum local est un optimum global. Des méthodes d'optimisation locale, généralement plus rapides que celles de recherche globale, peuvent alors être utilisées (par exemple, les méthodes des points intérieurs) pour trouver cet optimum lorsqu'il existe ou, dans le cas contraire, prouver que le problème n'a pas de solution. Les problèmes convexes peuvent être résolus efficacement et rapidement même s'ils sont de très grande taille. En revanche, lorsqu'un problème est non convexe, il peut y avoir plusieurs régions réalisables et plusieurs points localement optimaux au niveau de chaque région. Un optimum local n'est optimal que par rapport à des solutions réalisables proches de ce point. Il faut beaucoup de temps pour déterminer si un problème non convexe est irréalisable, si la fonction-objectif est illimitée ou si une solution optimale est l'optimum global dans l'ensemble des régions réalisables.

À cet effet, de nombreux travaux de recherche se sont intéressés aux approches algorithmiques de résolution de problèmes non convexes, en particulier les problèmes quadratiques non convexes qui sont notamment essentiels pour résoudre les problèmes classiques de pooling (cf. Chap.4/§2.2/Axe 8:Méthode de résolution). Bien que plusieurs solveurs d'optimisation non linéaire recherchent pour

ces problèmes des solutions optimales locales, il existe aujourd'hui différents solveurs commerciaux pouvant ramener ces problèmes à l'optimalité globale. Pour le RB, le solveur utilisé est celui de FICO Xpress utilisé sur un PC (Intel® Xeon® CPU E3-1 240 v5 @ 3,50 GHz - 64 Go RAM).

2 Revue de littérature

Le RB peut être perçu comme une extension du problème classique de blending (*Classical Blending (CB)*) dans le sens où il s'agit d'un problème de mélange mono-étage où, contrairement au CB, les inputs ne sont ni préexistants ni connus et doivent être déterminés avant d'être industriellement créés. Ainsi, pour expliquer plus en quoi le RB est différent du CB et bien déceler leurs points de différences (§2.2), il convient de d'abord définir le CB et fournir une brève revue de littérature concernant les principaux travaux ayant été réalisés sur ce problème (§2.1).

2.1 Problème du blending classique

2.1.1 Définition

Le problème du blending classique (*Classical Blending (CB)*), premier problème que la programmation linéaire a traité (Dantzig, 1981), est un problème de mélange visant à trouver le mélange d'ingrédients (inputs) le moins coûteux permettant de respecter les spécifications requises par un ou plusieurs produits (outputs). Le premier problème de blending a été formulé en 1941 par G. J. Stigler où il a cherché à trouver le régime alimentaire le moins coûteux compte tenu des différentes exigences nutritionnelles. Avant les années 1950, les recettes de fabrication, dans les industries à production continue, étaient figées et se définissaient manuellement. En constatant la non-optimalité de cette approche qui néglige plusieurs paramètres tels que l'évolution des coûts d'acquisition des inputs ; Charnes et al. (1952) ont proposé de résoudre ce problème en s'orientant vers une fonction objectif fixe qui doit être régulièrement optimisée pour tenir compte des évolutions du terrain. Le CB est donc un ancien problème d'optimisation, très connu, utilisé dans de nombreuses industries telles que les industries pétrolières, chimiques, minières, papetières, métallurgique et agroalimentaire. Étant une application typique de la programmation linéaire, nous en donnons une brève définition dans le paragraphe suivant.

2.1.2 Programmation Linéaire

La Programmation Linéaire (PL) est une méthode de modélisation, largement utilisée dans la planification administrative, industrielle et économique, permettant aux gestionnaires des entreprises de tracer une voie de décisions détaillées à prendre dans le but de s'approcher au maximum de leurs objectifs et de faire face à des situations pratiques d'une grande complexité. Sous la forme d'un modèle mathématique, ces gestionnaires utilisent la PL afin de minimiser les coûts ou maximiser le profit tout en tenant compte de leurs ressources limitées.

En RO, la PL est une technique mathématique qui vise à optimiser, par maximisation ou minimisation, une fonction-objectif linéaire composée d'un ensemble de variables, soumises à une multitude de contraintes linéaires d'égalité et/ou d'inégalité (Kuester & Mize, 1973). Il s'agit du processus d'optimisation le plus important et le plus utilisé, et de nombreuses méthodes efficaces ont été conçues pour la résolution de ces problèmes linéaires. Le nombre de variables et de contraintes pour lesquelles des solutions peuvent aujourd'hui être calculées, va jusqu'à plusieurs millions. La méthode du Simplex, inventée par Dantzig, est l'une des méthodes les plus pratiques pour résoudre les programmes linéaires. Selon Render et al. (2006), la programmation linéaire implique : *i*) que tous les paramètres du modèle (par exemple, la disponibilité des ressources) doivent être connus et constants (certitude), *ii*) que les valeurs des paramètres et les valeurs de solution des variables de décision sont supposées avoir soit des nombres entiers, soit des nombres mixtes (entiers ou fractionnaires) (continuité), *iii*) que la valeur de la fonction-objectif doit être égale à la somme des contributions obtenues de chaque variable de décision et que la somme totale des ressources utilisées, doit être égale à la somme des ressources utilisées par chaque variable de décision (additivité) et *iv*) que toutes les relations du modèle, à savoir la fonction-objectif et les contraintes, doivent être proportionnellement linéaires (linéarité).

2.1.3 Analyse de la littérature

Dans cette sous-section, les problèmes classiques de blending mono-étage sont d'abord analysés de manière générale (§2.1.3.1), puis une attention particulière est accordée aux problèmes de mélange dans le secteur des engrais (§2.1.3.2).

2.1.3.1 Blending général

Le problème de blending, très bien connu par les chercheurs opérationnels depuis les travaux fondateurs de Danzig, a donné lieu à des centaines d'articles l'ayant étudié dans des contextes industriels spécifiques ((Azzamouri et al. (2020) ont récemment réalisé une revue de la littérature sur les problèmes de mélange dans différents secteurs industriels). À notre connaissance, dans tous ces articles, les inputs des mélanges sont déjà connus. Pour parvenir à cette conclusion, nous avons cherché dans plusieurs bases de données scientifiques (Science Direct et EBSCO), et plusieurs d'autres incluses dans Google scholar, pour une période allant de 1950 jusqu'à 2020, en utilisant plusieurs combinaisons de mots-clés (blending problems ; non-linear programming/ blending problems ; inputs/ blending ; inputs composition/ characteristics/ properties/ blending ; raw materials/ mixture problems/ inputs conception/ blending ; quadratic programming/ inputs chemical design/ inputs conception/ inputs specifications...). Suite à cette recherche, une vingtaine d'articles pertinents ont été retenus ; leur grille d'analyse est donnée dans le Tableau 4. Cette grille a été articulée autour de 6 grands axes d'analyse :

Axe 1 : Domaine d'application

Les articles que nous avons traités abordent le CB dans divers secteurs industriels, notamment :

Secteur agroalimentaire. Dantzig (1981) a utilisé la méthode du simplexe pour traiter le problème du mélange formulé par G. J. Stigler et dont l'objectif est de trouver un régime nutritionnel équilibré au moindre coût. Steuer (1984) a évoqué le problème du mélange des saucisses avec de multiples critères conflictuels consistant à ce que le niveau minimum de certains critères (par exemple, protéines) soit maintenu tout en s'assurant simultanément que le niveau maximum de certains autres critères ne soit pas dépassé (par exemple, la graisse). Yoon et al. (1997) ont proposé un programme linéaire qui détermine le mélange le moins coûteux des variétés de surimi en raison de la forte linéarité et de l'absence d'interactions entre ces différentes variétés. En ce qui concerne l'industrie de la minoterie, dans (Karmarkar & Rajaram, 2001), les auteurs ont résolu un problème de mélange non linéaire qui – afin de satisfaire un ensemble de produits finis à base de blé et de maïs tout en minimisant les coûts de production – choisit l'ensemble des produits de base qui constitueront les inputs du mélange, détermine la quantité à produire de chaque input ainsi que les quantités optimales suivant lesquelles ces inputs seront utilisés pour répondre à la demande de produits finis. Bilgen & Ozkarahan (2007) ont élaboré un modèle complet d'un réel problème de

mélange et d'expédition maritime de céréales en vrac. En se concentrant sur la partie « *blending* » du problème, ce modèle – formulé sous forme d'un MILP (Mixed Integer Linear Program) – vise à rechercher les mélanges optimaux qui respectent les exigences de la demande et la disponibilité des inputs tout en minimisant les coûts de mélange.

Secteur minier. Reddy (1975) a traité un problème de mélange de roches phosphatées sur plusieurs périodes en vue de trouver les mélanges optimaux permettant de remplir les contrats de vente et de maximiser les revenus nets perçus. Williams & Haley (1959) décrivent l'application de la programmation linéaire au problème du mélange des charbons à coke. Ce problème vise à optimiser l'affectation des charbons aux laveries et aux unités de mélange en minimisant les coûts de transport. Kumral (2003) traite du mélange optimal des différents minerais disponibles de manière que le coût total prévu pour l'achat du minerai soit réduit au minimum tout en satisfaisant les spécifications de qualité. En ce qui concerne le secteur pétrolier, Charnes et al. (1952) ont donné quelques techniques de programmation linéaire pour résoudre un problème de mélange appliqué aux carburants aviation. Dans (Snee, 1981), la création de modèles de mélange de carburants est abordée pour illustrer certains des problèmes pratiques rencontrés dans l'expérimentation des mélanges. Cain & Price (1986) ont proposé une nouvelle formulation du problème de *blending* basée sur une fonction-objectif probabiliste soumise à une contrainte de minimisation des coûts. Cette solution a été appliquée au problème du mélange des huiles lubrifiantes. Singh et al. (2000) fournissent une formulation améliorée pour le problème d'optimisation du mélange de carburants intégrant à la fois l'horizon du mélange et un modèle stochastique tenant compte d'un ensemble de perturbations. Bengtsson et al. (2013) présente une approche intégrée modélisant les trois sous-composants de la chaîne logistique d'une raffinerie, à savoir le déchargement du pétrole brut (depuis les navires ou les pipelines), la planification de l'unité de production, le mélange des produits pétroliers et l'optimisation des recettes. Ce problème est résolu par le biais d'une optimisation robuste.

Secteur cimentier. Kural & Özsoy (2004) ont discuté du problème de la variation de la composition chimique des matières premières dans l'industrie du ciment et ont développé des modèles dynamiques stochastiques multivariés pour gérer les perturbations résultant de cette variation avant d'essayer d'optimiser le problème du mélange faisant intervenir ces matières premières.

Secteur chimique. Nous ajoutons ce secteur pour évoquer les articles généraux qui ne se rapportent à aucun des domaines industriels cités ci-dessus. Par exemple, Montante et al. (2016) évoquent le problème du mélange des liquides miscibles de densités et de viscosités différentes dans un pipeline équipé d'un mélangeur statique. Mihailidis & Chelst (1998) ont abordé le problème du mélange de substances pulvérulentes. Ils ont utilisé la programmation linéaire en nombres entiers pour trouver les mélanges optimaux qui répondent aux spécifications des caractéristiques clés mesurables tout en visant à maximiser le nombre des mélanges produits.

Axe 2 : Caractéristiques des inputs

Les inputs désignent les matières premières ou composites miscibles qui entrent dans le mélangeur et dont la combinaison, selon des taux d'inclusion bien spécifiques, donne un ou plusieurs produits homogènes (par exemple, minerai de phosphate dans le secteur minier (Reddy, 1975)/ hydrocarbure dans le secteur pétrochimique (Singh et al., 2000)/ grains de blé dans le secteur minotier (Kilic et al., 2013), farine brute de ciment dans le secteur cimentier (Kural & Özsoy, 2004)...). Ces inputs peuvent être caractérisés par plusieurs éléments (voir (Azzamouri et al., 2020)), mais pour démontrer l'originalité du RB par rapport au CB, nous ne nous intéressons qu'aux éléments suivants :

Spécifications chimiques des inputs. En précisant si elles sont connues, auquel cas elles sont fixes et modélisées par des paramètres constants (données d'entrée du modèle), ou inconnues, auquel cas il faut indiquer si elles sont d'abord mesurées ou estimées avant d'être incluses comme paramètres constants dans le modèle d'optimisation ou si elles doivent être déterminées par le modèle (variables de décision).

Préexistence des inputs. Il s'agit de spécifier si l'ensemble des inputs existent ou pas réellement sur le terrain.

Disponibilité des inputs. Il convient d'indiquer si les inputs à utiliser sont à capacité illimitée (il n'y a aucune restriction sur la disponibilité d'inputs) ou limitée (la quantité consommable des inputs est restreinte par un seuil à ne pas dépasser ce qui limite le champ des solutions faisables).

À l'exception de (Kural & Özsoy, 2004), tous les articles extraits de cette recherche traitent du blending impliquant des inputs qui peuvent certes être non préexistants, comme c'est le cas de (Karmarkar & Rajaram, 2001), mais dont nous connaissons avec certitude leur composition

chimique. À cet égard, il est important d'établir une distinction claire entre inputs inconnus et inputs inexistantes. Le premier type correspond à des inputs ayant une composition chimique fixe et connue mais qui n'existent pas encore en stock et sont ainsi produits selon les quantités recommandées par les résultats du modèle d'optimisation (Karmarkar & Rajaram, 2001). Pour le deuxième type, les inputs existent déjà mais leurs propriétés peuvent varier dans le temps, sont non mesurées, inconnues ou mal connues. Les pourcentages en poids des composants de ce type d'inputs sont d'abord récupérés ou estimés avant de les intégrer, en tant que paramètres constants, dans le modèle d'optimisation. C'est le cas dans (Kural & Özsoy, 2004) où la composition chimique des inputs, matières premières composées d'oxyde, est non homogène et varie dans le temps. Les auteurs ont alors développé des modèles dynamiques stochastiques multivariés et ont conçu des contrôleurs prédictifs pour estimer les valeurs de composition en oxyde des matières premières compte tenu d'un ensemble de perturbations.

Axe 3 : Caractéristiques des outputs

Les outputs désignent les mélanges homogènes obtenus par l'association de deux ou plusieurs substances liquides, gazeuses ou solides (en poudre ou en granulés) (par exemple, roche phosphatée dans le secteur minier (Reddy, 1975)/ pétrole dans le secteur pétrochimique (Singh et al., 2000)/ farine dans le secteur meunier (Kilic et al., 2013), ciment dans le secteur cimentier (Kural & Özsoy, 2004)...). Ils sont définis par des compositions chimiques spécifiques, de telle sorte que le pourcentage en poids de chaque élément chimique doit se tenir dans une fourchette min-max ou doit être égal à une valeur exacte. La qualité de certains outputs peut être évaluée par un seul ingrédient clé (par exemple, la teneur en sucre mesurée par leur équivalence en dextrose dans certaines solutions sucrées (Karmarkar & Rajaram, 2001)), mais dans la plupart des cas, les outputs requis dans les problèmes de mélange sont caractérisés par plusieurs composants chimiques.

Nous caractérisons ces outputs par leur nombre (mono-produit ou multi-produits) et leur variété (moins de 10 outputs, entre 10 et 50, entre 50 et 100, plus de 100). Pour (Williams & Haley, 1959) ; (Goldsmith, 1966) ; (Reddy, 1975) ; (Snee, 1981) ; (Ashayeri et al., 1992) ; (Yoon et al., 1997) ; (Singh et al., 2000) ; (Kumral, 2003) ; (Montante et al., 2016), les modèles de mélange abordés sont mono-produit. Pour les autres articles, la variété des produits ne dépasse généralement pas une dizaine d'outputs. Karmarkar & Rajaram (2001) sont les seuls à avoir résolu leur modèle de mélange avec un nombre d'outputs qui est égal à 200. Cependant, il convient de préciser ici que

les 200 outputs ont été générés pour servir d'exemple numérique à un test de calcul ayant pour objectif de déterminer l'effet de l'augmentation du nombre de produits sur l'écart entre les heuristiques et les limites.

Axe 4 : Type de décision

En soi, le processus de mélange est une opération simple qui consiste à combiner une variété de matières et à les transformer en une masse uniforme. L'optimisation d'un problème de blending, sous sa version basique, se résume donc simplement à déterminer, à partir d'un ensemble disponible d'inputs, quels sont ceux à utiliser et en quelles quantités pour produire un ou plusieurs produits tout en minimisant les coûts, en maximisant le profit ou en améliorant la qualité ; comme d'ailleurs illustré par les articles (Charnes et al., 1952) ; (Steuer, 1984) ; (Cain & Price (1986) ; (Yoon et al., 1997) ; (Ashayeri et al., 1994) et bien d'autres. Dans ce cas (cas où le CB n'est pas associé à d'autres problèmes de production, stockage ou distribution), la prise de décision est principalement effectuée au niveau opérationnel. Dans certains articles, les problèmes de blending peuvent être encapsulés dans des problèmes plus généraux tels que la planification de la production (Glismann & Gruhn, 2001 ; Bengtsson et al., 2013 ; Jia & Ierapetritou, 2003 ; Singh et al., 2000), l'affectation des flux physiques aux unités et/ou installations de production (Williams & Haley, 1959), la configuration du réseau de transport maritime, etc. Dans ces cas, selon les périodes considérées, les modèles proposés peuvent être utilisés comme un outil important dans la prise de décision opérationnelle (par exemple, Bengtsson et al. (2013) ont développé un modèle intégré pour la planification des opérations de raffinage en cas d'incertitude), tactique (par exemple, Reddy (1975) a suggéré un modèle qui fournit le programme des expéditions de la roche phosphatée par mois sur un horizon d'un an) et stratégique (par exemple, Bilgen & Ozkarahan (2007) ont proposé un modèle complexe qui, en plus de permettre des décisions de mélange et de chargement des navires, permet des décisions stratégiques de transport telles que le choix des navires à louer pour chaque période de l'horizon de planification et la trajectoire qu'ils emprunteront).

Axe 5 : Méthode de résolution

Une fois qu'un problème est modélisé, il doit être traité en utilisant une méthode de résolution nécessitant en principe un algorithme, un programme pour traduire cet algorithme, et un ordinateur (solveur) pour exécuter ce programme. Nous désignons ici la méthode de résolution par la programmation mathématique que la machine « solveur » utilise pour résoudre le problème

d'optimisation. Les articles ayant traité le problème de blending indépendamment des autres modules de la chaîne logistique ont tous eu recours à la programmation linéaire (Charnes et al., 1952 ; Yoon et al., 1997 ; Aldeseit, 2014 ; Kural & Özsoy, 2004) ou à la programmation linéaire mixte (Mixed Integer Linear Programming (MILP)) lorsque des variables binaires sont utilisées. Pour les autres articles où le CB a été associé à d'autres problèmes tels que la planification de la distribution (Jia & Ierapetritou, 2003), certains modèles complexes à une seule fonction-objectif (Reddy, 1975) ou à plusieurs fonctions-objectif (Steuer, 1984) ont pu être résolus avec la LP/MILP ; d'autres ont dû faire appel à la programmation non linéaire (ex. Kumral, 2003). Karmarkar et Rajaram (2001) ont aussi eu recours à la programmation non linéaire mixte (Mixed Integer Non-Linear Programming (MINLP)) car avant de déterminer les quantités des inputs à mélanger, leur modèle doit d'abord spécifier quels inputs, parmi d'autres, doivent être considérés pour le mélange.

Axe 6 : Critère d'optimisation

Le critère d'optimisation fait référence à l'objectif que l'on souhaite atteindre une fois que le problème est optimisé. Il est mathématiquement formulé par une fonction-objectif et peut soit viser à maximiser/minimiser une équation linéaire ou non linéaire, soit, dans de rares cas, il peut viser à orienter cette équation vers une valeur exacte. Il peut également être fondé sur un seul objectif (fonction mono-objectif), ainsi que sur plusieurs objectifs (fonction multi-objectifs). En ce qui concerne notre analyse bibliographique, en fonction du problème étudié, les modèles d'optimisation peuvent viser : *i*) la minimisation des coûts de production : par exemple Yoon et al. (1997), Williams & Haley (1959) et Ashayeri et al. (1994) ont voulu dans leurs problèmes minimiser les coûts d'acquisition des matières premières ; Cain & Price (1986) ont visé la minimisation des coûts de mélange tandis que Stokes & Tozer (2006) ont essayé de minimiser le total des coûts de production de tous les produits ; *ii*) minimisation des coûts de stockage et de transport : par exemple Bilgen & Ozkarahan (2007) ont développé un modèle intégré dont la fonction-objectif consiste à minimiser les coûts de mélange, les coûts de chargement des navires, les coûts de stockage et les coûts de transport ; *iii*) maximisation du profit : par exemple, Charnes et al. (1952) et (Reddy, 1975) ont considéré que la meilleure solution est celle qui procure le revenu net le plus élevé. Bengtsson et al. (2013) les ont rejoints en optant pour une fonction-objectif qui maximise la différence entre le revenu des ventes et les coûts de production, y compris les pénalités pour livraison tardive, les coûts de stockage des matières premières, des produits semi-finis et finis,

les coûts des processus et procédures de production, les coûts de mélange et les coûts d'achat des matières premières ; *iv*) minimisation des écarts de qualité vis-à-vis des valeurs cibles comme illustré dans (Montante et al. 2016) et (Purohit & Suryawanshi, 2013). L'amélioration de la qualité – qui fait référence à la conformité aux spécifications du produit – peut également être traduite par un critère de coût. Cela peut être constaté dans (Karmarkar & Rajaram, 2001), où le problème étudié cherche à minimiser plusieurs coûts, dont les coûts de qualité, soit les frais prévus pour corriger le produit non conforme. Par ailleurs, pour certains articles, la fonction-objectif peut porter sur plusieurs différents objectifs comme illustré dans (Chanda & Dagdelen, 1995) où elle est composée de deux critères d'optimisation : la maximisation d'un critère économique et la minimisation de la somme des écarts absolus de la teneur et du tonnage par rapport à leurs valeurs cibles ; et dans (Steuer, 1984) où elle vise à minimiser les coûts et le pourcentage de matières grasses tout en maximisant le pourcentage de protéines, la couleur (un indice subjectif), le taux d'utilisation de la viande, etc. Pour d'autres articles, les termes des variables continues peuvent être absents dans la fonction-objectif, de sorte que seules les variables binaires sont concernées. C'est le cas de Mihailidis & Chelst (1998) ayant évoqué un problème de blending dont l'objectif est de maximiser le nombre des mélanges produits.

N° Article	Auteurs	Année	Secteur d'activité	Type de décision			Inputs							Outputs					Nature du mélange obtenu	Nature du blending	Méthode de résolution utilisée	Critère de résolution							
				Stratégique	Tactique	Opérationnel	Existence	Caractéristiques des inputs						Mono-produit	Variété des outputs							Coût	Qualité	Autre	Etude de cas				
								Inconnues							Moins de 10	Entre 10 et 50	Entre 50 et 100	Plus de 100								Granulés	Poudre	Liquide	Autre
								Connues	Variables	Non mesurées	Mal connues	Autres	Disponibilité																
1	Charnes et al.	1952	Industrie pétrolière		X	E	X						L	X	X					X		X	Linear programming	X		X			
2	Williams & Haley	1959	Industrie minière (charbon)	X		E	X							X	X				X			X	Linear programming	X					
3	Goldsmith	1966	Général		X	E	X							X									Statistics Methods			X			
4	Reddy	1975	Industrie minière (phosphate)		X	E	X							X	X				X				Linear programming	X					
5	Snee	1981	Industrie pétrolière		X	E	X							X	X				X	X			Linear programming	X					
6	Steuer	1984	Industrie agroalimentaire		X	E	X							X	X				X	X			Multiple Objective Linear programming	X					
7	Cain & Price	1986	Industrie pétrolière		X	E	X							X	X				X	X			Stochastic Programming	X		X			
8	Ashayeri et al.	1994	Industrie des engrais		X	E	X						IL	X	X				X	X		X	Mixed Integer Linear Programming	X		X			
9	Chanda & Dagdelen	1995	Industrie minière (charbon)	X	X	E	X							X	X				X			X	A combination of Interactive Graphics and Linear Programming		X	X			
10	Yoon et al.	1997	Industrie agroalimentaire	X		E	X						L	X	X						X		Linear programming	X		X			
11	Mihailidis & Chelst	1998	Industrie chimique		X	E	X							X	X				X			X	Mixed Integer Linear Programming			X			
12	Singh et al.	2000	Industrie pétrolière		X	E	X							X	X				X				A dynamic stochastic model of processes with Linear programming	X					
13	Karmarkar & Rajaram	2001	Minoterie		X	NE	X							X					X		X	X	Mixed Integer Non Linear Programming	X	X	X			
14	Glismann & Gruhn	2001	Industrie pétrolière		X	E	X							X	X				X	X			Mixed Integer Linear Programming			X			
15	Kumral	2003	Industrie minière		X	E	X						IL	X	X				X				A coupling between Chance-Constrained Programming and Multi-objective Simulated Annealing	X		X	X		
16	Jia & Terapetritou	2003	Industrie pétrolière	X		E	X						IL	X	X				X			X	Mixed Integer Linear Programming			X	X		
17	Kural & Özsoy	2004	Cimenterie		X	E	PE						IL	X	X				X		X		Linear programming			X	X		
18	Bilgen & Ozkarahan	2007	Minoterie		X	E	X							X	X				X			X	Mixed Integer Linear Programming	X		X			
19	Bengtsson et al.	2013	Industrie pétrolière	X		E	X						L	X	X				X			X	Robust Optimization	X		X			
20	Montante et al.	2016	Industrie chimique		X	X	X							X	X				X				Numerical calculation of chemical equations with Computational Fluid Dynamics simulation		X	X	X		
Us	Benhamou et al.	2019	Industrie des engrais	X		NE	VD							X					X	X			Non Convex Quadratic Programming			X	X		

E : Existant/ NE : Non-Existant/ L: Limitée/ IL: Illimitée

Tableau 4. Grille d'analyse des articles sur le blending mono-étage

2.1.3.2 Blending des engrais

Afin de mieux appréhender les spécificités des problèmes de CB liés à notre domaine d'application (le secteur des engrais), une analyse détaillée des articles abordant les problèmes de mélange des engrais a été réalisée. En effet, lors de la sélection des articles pertinents pour notre analyse, nous avons constaté qu'il existe un nombre considérable de travaux qui traitent des problèmes de mélange d'engrais, tant chimiques qu'organiques. Cependant – en excluant ceux qui : i) se

concentrent sur l'aspect pédologique et agronomique (par exemple, Wang et al. (2011) ont utilisé la technologie de mélange pour développer un engrais à libération lente en vrac pour le maïs de printemps), *ii*) s'intéressent aux propriétés physiques des engrais mélangés, plutôt qu'à leurs propriétés chimiques (par exemple, Hoffmeister et al. (1964) ont étudié l'aspect physique des engrais mélangés en se concentrant sur l'effet de la taille, de la forme et de la densité sur la ségrégation) et *iii*) examinent les processus chimiques indésirables qui peuvent résulter du mélange d'engrais (par exemple, Woodroof (2019) propose des solutions pour résoudre le problème de la déliquescence dans les engrais mélangés) – notre étude a été limitée à neuf articles (Babcock et al. (1984), Mínguez et al. (1988), Ashayeri et al. (1994), Lima et al. (2011), Aldeseit (2014), Srichaipanya et al. (2014), M. Cole et al. (2015), Loh et al. (2015) et Jareonkitpoolpol et al., 2018)). Parmi ceux-ci, seuls cinq ((Mínguez et al., 1988), (Ashayeri et al., 1994), (Aldeseit, 2014) (Cole et al., 2015) et (Jareonkitpoolpol et al., 2018)) ont résolu un problème d'optimisation au moyen d'un modèle mathématique qui, en considérant un ensemble de matières premières disponibles, cherche les quantités optimales à en prélever afin d'obtenir le ou les engrais requis. Quant aux quatre travaux de recherche restants : 1) Babcock et al. (1984) ont cherché à trouver le moins cher des 17 mélanges prédéfinis pour répondre aux besoins spécifiques de la culture du maïs dans une région du Texas en utilisant des techniques d'analyse sophistiquées exécutées par un micro-ordinateur ; 2) Lima et al. (2011) ont appliqué différentes méthodes de calcul (par exemple des techniques de régression) pour trouver, à partir de deux matières premières, la combinaison optimale permettant de maximiser la croissance du ricin ; 3) Loh et al (2015) ont également eu recours à des méthodes de calcul ainsi qu'à plusieurs représentations graphiques pour détecter, parmi 9 mélanges – préalablement trouvés et validés – relatifs à cinq inputs, le meilleur mélange présentant les caractéristiques les plus favorables pour une utilisation comme amendement du sol ; 4) Srichaipanya et al. (2014), bien qu'ils aient traité le problème de blending d'engrais où cinq inputs sont combinés pour produire un seul output, ils se sont plutôt concentrés sur l'aspect technique puisque leur objectif est de contrôler la vitesse du convoyeur alimentant le mélangeur afin de respecter les quantités nécessaires d'inputs. Pour ce faire, ils ont proposé des systèmes intelligents permettant de décider de la manière dont les paramètres doivent être réglés dans le processus de production d'engrais. La grille d'analyse de l'ensemble des neuf articles considérés est donnée dans le Tableau 5.

Comme le montre cette grille, en plus des éléments d'évaluation décrits dans (§2.1.3), les neuf articles sont examinés selon que les engrais à produire correspondent à des formules en % ou à des exigences quantitatives – exprimées en : unité de quantité/ unité de surface – et qu'il s'agit d'engrais minéraux ou organiques. En termes de modélisation, outre la méthode de résolution et le critère d'optimisation, ces articles sont également évalués en fonction des variables de décision et des contraintes prises en compte dans leur modèle d'optimisation. En effet, Mínguez et al. (1988) ont eu recours à la programmation multi-objectifs (*Goal Programming*) afin de trouver les quantités optimales à prélever d'un ensemble disponible de 8 inputs pour satisfaire les quantités des nutriments nécessaires à la croissance de la betterave sucrière cultivée dans la région de l'Andalousie occidentale en Espagne. En fonction-objectif, les auteurs ont visé à minimiser les écarts pondérés entre les besoins quantitatifs exigés et les quantités obtenues. Ashayeri et al. (1994) ont proposé un modèle d'optimisation mono-produit, résolu par la programmation linéaire en nombres entiers, qui permet d'indiquer les combinaisons optimales à réaliser à partir de 7 inputs disponibles tout en minimisant leurs coûts d'acquisition et en respectant plusieurs contraintes à savoir : *i*) les contraintes liées au respect des spécifications nutritives, *ii*) les contraintes techniques liées aux processus de fabrication (par exemple, le nombre de matières premières à introduire dans le mélangeur à travers des entonnoirs, est limité par le nombre d'entonnoirs), *iii*) la contrainte d'équilibre entre le poids des matières premières utilisées et celui du mélange final (limite due à l'évaporation de l'humidité), *iv*) contraintes liées aux taux d'inclusion de certaines matières premières (par exemple, si une matière première doit entrer dans la composition d'un produit, elle doit être utilisée à une concentration minimale de 10 %), *v*) autres contraintes de conditions logiques liées aux relations entre les matières premières (par exemple, si les matières premières A et B sont utilisées dans le mélange, une certaine quantité de la matière première C doit être incluse). Aldeseit (2014) s'est basé sur une programmation linéaire fondée sur un critère de minimisation de coûts, consistant à déterminer les quantités optimales à prendre de 9 engrais NPK pour satisfaire les exigences nutritives de 3 formules d'engrais. Cole et al. (2015) ont résolu un problème d'optimisation intégré qui s'étend du site de production des engrais chimiques aux unités de mélange en passant par le réseau de distribution. En se limitant à la partie « mélange d'engrais », ce problème détermine les mélanges optimaux à effectuer sur la base de 7 engrais disponibles afin de répondre aux spécifications de 15 engrais granulés personnalisés. La fonction-objectif étant de maximiser le taux de satisfaction de la demande en maximisant les mélanges NPK produits et distribués. Enfin, Jareonkitpoolpol et al. (2018) ont résolu un problème de mélange mono-produit qui vise à déterminer, en partant de 6 matières premières, les mélanges optimaux réduisant au minimum

le coût total d'achat des matières premières et respectant les spécifications chimiques de la formule d'engrais demandée ainsi que la quantité minimale à en produire.

Pour les autres éléments d'évaluation (le type de décision, l'existence d'inputs, les caractéristiques chimiques des inputs et la variété des outputs), tous les articles ont abordé un problème de mélange d'engrais qui implique une décision opérationnelle, dont les inputs préexistent et ont une composition connue et dont la variété des outputs est assez limitée ; Babcock et al. (1984) étant celui qui a traité de la plus grande variété parmi les neuf articles étudiés, laquelle ne dépassant pas une vingtaine d'engrais.

En résumé, les problèmes de blending d'engrais consistent à déterminer les quantités optimales à prélever d'un ensemble d'inputs pour produire une ou plusieurs formules d'engrais. Les inputs utilisés peuvent se référer soit à des matières composites, conventionnellement considérées comme des matières premières nutritives, comme c'est le cas par exemple dans Cole et al. (2015) et Srichaipanya et al. (2014), soit à des engrais, obtenus par réaction chimique ou par mélange, pour lesquels nous connaissons le pourcentage en poids de chaque élément nutritif, comme illustré notamment dans Mínguez et al. (1988). Dans les deux cas, ces inputs (matières composites), approvisionnés ou produits, préexistent et leur composition chimique est connue.

2.2 Positionnement du Reverse Blending en tant que problème de blending mono-étage

Dans cette sous-section, nous évaluons le problème du RB par rapport aux six axes d'analyse retenus. Pour le domaine d'application, le RB est initialement proposé pour traiter une problématique provenant de l'industrie des engrais. Pour appuyer les spécificités de notre domaine d'application (l'industrie des engrais), une attention particulière a été accordée aux travaux traitant des problèmes de mélange d'engrais au (§2.1.3.2). Pour les caractéristiques des inputs, dans le RB, ces derniers n'existent pas déjà, leur composition n'est pas connue et leurs spécifications chimiques sont à déterminer et constituent donc des variables de décision du modèle de RB. Pour les outputs, engrais granulés, leurs contraintes de spécifications chimiques sont en fait similaires à celles du CB. La particularité apportée par le RB par rapport aux problèmes de CB quant aux outputs est liée à la variété des outputs (nombre d'outputs). En effet, notre solution exige que cette variété soit la plus grande possible (des centaines voire des milliers d'outputs) pour pouvoir obtenir des résultats satisfaisants, alors que dans le cas du CB, l'optimisation peut se faire pour un seul produit (Ashayeri et al., 1994), ou s'il s'agit d'un problème multi-produits, elle porte généralement sur une variété limitée (une dizaine d'outputs). Quant au type de décision engendré par le RB, celui-ci étant un problème de développement de

nouveaux produits (i.e. produits semi-finis), la décision qui serait générée par l'exécution de son modèle est d'ordre stratégique. Il correspond à un modèle quadratique non convexe dont certaines contraintes sont quadratiques mais dont la fonction-objectif reste linéaire. Cette dernière vise à minimiser la somme des variables binaires (chacune étant liée à l'utilisation ou pas d'un input de la base canonique). Le critère d'optimisation du RB vise alors la minimisation du nombre des inputs à créer (c'est-à-dire la minimisation de la taille de la base canonique).

Par ailleurs, en se focalisant sur le secteur des engrais, nous soulignons à nouveau que, contrairement au CB où le type de décision invoqué est généralement opérationnel, où tous les inputs sont disponibles et connus et où la variété des outputs ne dépasse pas une cinquantaine d'engrais, le RB entraîne une décision stratégique, repose sur de très grandes variétés d'engrais personnalisés et porte sur des inputs inexistantes dont les spécifications chimiques doivent être définies. Cela explique pourquoi, outre les mélanges optimaux, le RB introduit de nouvelles variables de décision qui sont relatives à la composition optimale de ces inputs. En termes de "contraintes", cela risque d'introduire de nouvelles contraintes, telles que celles liées au % maximum des éléments nutritifs dans un input.

Pour conclure, après avoir poursuivi plusieurs pistes de recherche, nous nous permettons de souligner l'originalité de l'approche du RB car, à notre connaissance, tous les inputs associés aux problèmes de mélange mono-étage abordés dans la littérature, tous domaines d'application confondus, existent déjà (Benhamou et al., 2020d).

3 Modélisation mathématique

Afin de rendre compte clairement des différences et des complémentarités entre le CB et le RB, nous examinons leurs formulations mathématiques dans les sections (§3.1) et (§3.2) respectivement. Nous décrivons ensuite les modèles mathématiques de deux variantes du problème de blending : la première consiste à utiliser une base canonique, préalablement déterminée par le RB, pour répondre aux spécifications chimiques d'un engrais personnalisé (§3.3) ; la seconde vise à voir dans quelle mesure la diversité des engrais produits actuellement par les plus grands producteurs d'engrais au monde peut être réduite en utilisant le blending classique sans compromettre la diversité d'usage potentielle (§3.4).

3.1 Modèle de blending

Un problème de CB vise à satisfaire les demandes de J outputs en définissant les quantités optimales à prélever d'un ensemble existant et connu de I inputs, ce qui constitue la principale différence avec RB où cet ensemble d'inputs n'est pas encore disponible et doit être défini en nombre et en composition. La version standard de ce problème est décrite ci-dessous :

Indices et paramètres

- i Inputs existants (matière première ou matière composite) ($i = 1, \dots, I$)
- j Outputs ($j = 1, \dots, J$)
- c Composant chimique ($c = 1, \dots, C$)
- β_{cj}^{\min} Poids minimal en % du composant c dans le poids de l'output j
- β_{cj}^{\max} Poids maximal en % du composant c dans le poids de l'output j
- D_j Demande de l'output j , exprimée en poids.
- A_i Disponibilité de l'input i , exprimée en poids.
- α_{ci} Proportion du composant c dans le poids total de l'input i (matière première ou matière composite)
- ω_i Coût unitaire de l'input i .

Variables

- x_{ij} Quantité de l'input i utilisée pour produire l'output j .

Définition du problème

$$\text{Min}(\sum_j \sum_i \omega_i \cdot x_{ij}) \quad (1)$$

S.c.

$$\sum_i x_{ij} = D_j, \forall j \quad (2)$$

$$\beta_{cj}^{\min} \leq \sum_i \alpha_{ci} \cdot x_{ij} / D_j \leq \beta_{cj}^{\max}, \forall c, \forall j \quad (3)$$

$$\sum_j x_{ij} \leq A_i, \forall i \quad (4)$$

Commentaires

- Relation (1) : minimisation des coûts liés aux inputs utilisés.
- Relation (2) : satisfaction des demandes.
- Relation (3) : satisfaction de la contrainte liée à la composition chimique d'un output.
- Relation (4) : respect des disponibilités des inputs.
- Implicitement, cette formulation est mono-période (régime permanent).

3.2 Modèle de Reverse Blending

Le RB vise à répondre à une demande personnalisée portant sur un grand nombre d'engrais dont les caractéristiques de composition requises sont nécessairement connues et dont les quantités requises sont conventionnellement fixées à une valeur arbitraire. En outre, les spécifications des inputs, dont les mélanges rendent possible l'obtention des outputs requis, sont à déterminer. Il s'ensuit que les coûts des inputs (CBC) sont inconnus à ce stade rendant ainsi toute formulation basée sur une optimisation économique inutile puisque ni la demande ni les coûts ne sont connus. Le RB se contente alors de trouver une solution de mélange faisable en régime permanent pour un ensemble de produits spécifiques ainsi que la composition des CBC utilisés, dont le nombre doit être aussi réduit que possible afin de diminuer les problèmes de production, de stockage et de transport. La Figure 23 présente le schéma descriptif du modèle du RB.

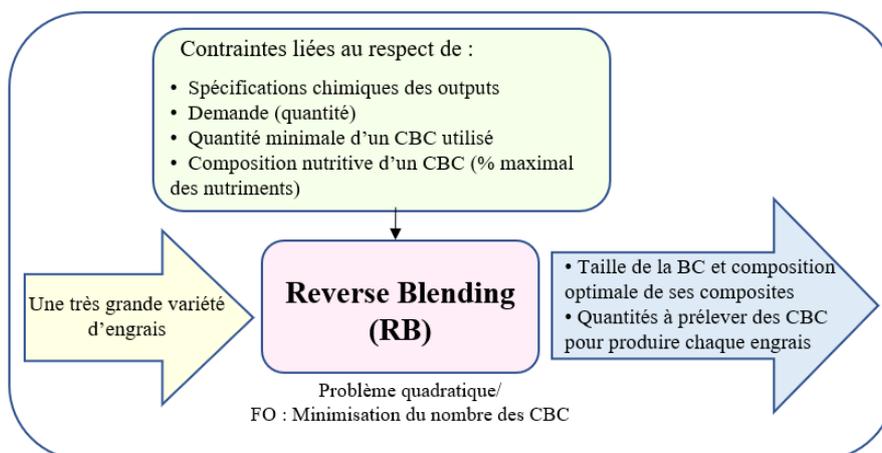


Figure 23 : Schéma descriptif du modèle de RB

Indices et paramètres

- j Devient l'indice d'un produit personnalisé.
- i Devient l'indice d'un CBC, qui est maintenant un nouveau composite à créer de toutes pièces, ($i = 1, \dots, I$) avec 'I' est la limite supérieure acceptable pour le nombre des CBC.
- c Indice des composants chimiques ($c = 1, \dots, C$)
- D_j Devient la demande conventionnelle pour le produit personnalisé j .
- β_{cj} Proportion cible du composant c dans le poids total du produit personnalisé j .
- η_{cj} Écart absolu maximal du composant c dans le poids total du produit personnalisé j .
- M Limite supérieure de toute quantité de CBC utilisée pour produire un output (ex., $M = 100000$).
- κ Poids minimal en % d'un CBC utilisé pour produire un output, si ce CBC est utilisé (ex., $\kappa = 0.01$).

Variables

- x_{ij} Quantité du CBC i utilisée pour obtenir un produit personnalisé j
- α_{ci} Devient la proportion du composant c dans le poids total d'un CBC i
- w_{ij} Variable binaire qui est égale à 1 si CBC i est utilisé pour produire l'output j et 0 sinon.
- y_i Variable binaire qui est égale à 1 si CBC i est utilisé et 0 sinon. L'ensemble $I = \sum_i y_i$ inputs constitue une base canonique permettant l'obtention de n'importe quel produit spécifique

Définition du Problème

$$\text{Min} \left[\sum_i y_i \right] \quad (5)$$

S.c.

$$\sum_i x_{ij} = D_j, \forall j \quad (2)$$

$$\sum_j x_{ij} \leq M \cdot y_i, \forall i \quad (6)$$

$$\left| \begin{array}{l} \beta_{cj} - \eta_{cj} \leq \sum_i \alpha_{ci} \cdot x_{ij} / D_j \leq \beta_{cj} + \eta_{cj}, \forall c, j \mid \beta_{cj} > 0 \\ \sum_i \alpha_{ci} \cdot x_{ij} / D_j = 0, \forall c, j \mid \beta_{cj} = 0 \end{array} \right. \quad (3')$$

$$\sum_c \alpha_{ci} = 1, \forall i \quad (7)$$

$$\left| \begin{array}{l} x_{ij} \leq M \cdot w_{ij} \\ x_{ij} \geq \kappa \cdot w_{ij} \cdot D_j \end{array} \right., \forall i, j \quad (8)$$

Commentaires

- La relation (5) définit le critère d'optimisation visant à obtenir une solution faisable (c'est-à-dire respectant les relations 2, 3', 7 et 8) où $I = \sum_i y_i$ est le plus petit possible.
- La relation (6) force y_i à n'être égal à 1 que lorsque CBC i est utilisé ; cela dit, la fonction-objectif (5) vise à maximiser le nombre de CBC inutilisés (l'ensemble des CBC i où $y_i = 0$) afin de garder I aussi petit que possible.
- Les relations (3') remplacent la relation (3) tout en tolérant un écart η_{cj} par rapport aux valeurs cibles β_{cj} lorsque $\beta_{cj} > 0$. Il est clair que (3') est équivalent à (3) quand $\eta_{cj} = (\beta_{cj}^{\max} - \beta_{cj}^{\min}) / 2$ et $\beta_{cj} = \beta_{cj}^{\min} + \eta_{cj}$, mais cette formulation est choisie en raison de la stratégie de régulation consistant, dans les industries de transformation (ex. industrie chimique), à maintenir une grandeur physique dans une plage de valeurs en lui fixant des teneurs cibles et des tolérances, à la différence des problèmes de blending classique où les spécifications sont exprimées sous la forme d'une fourchette min-max. Les tolérances vis-à-vis des spécifications chimiques des engrais prises en compte dans cette thèse sont celles fixées par la réglementation européenne (EU PE-CONS 76/18, 2019) (réglementation suivie par les équipes de recherche de l'OCP). En raison des relations (3'), le problème devient quadratique.
- La relation (7) contraint, pour chaque CBC, l'agrégat des proportions en % des composants à être égal à 100 %.
- Les relations (8), qui relient les variables continues aux variables binaires, garantissent que si CBC i doit être utilisé pour produire l'output j , il doit au moins représenter $\kappa\%$ du poids de cet output.

Contraintes additionnelles spécifiques aux engrais personnalisés

Dans l'industrie des engrais, les indices i , c et j se réfèrent respectivement aux CBC, éléments nutritifs et formules d'engrais personnalisés. En plus des nutriments, une formule d'engrais contient un composant supplémentaire neutre, appelé *filler*, utilisé pour la stabilisation chimique de la composition des granules. L'indice des composants c étant inclus dans l'intervalle $[1, C]$; nous choisissons d'attribuer le dernier indice $c = C$ au *filler*.

$$\alpha_{Ci} \geq \tau_{Ci}, \forall i \quad (9)$$

$$\alpha_{ci} \leq \tau_{ci}, \forall i, c | c < C \quad (10)$$

- La relation (9) impose à chaque CBC d'avoir un pourcentage minimum τ_{Ci} du *filler*.
- La relation (10) limite le pourcentage de nutriments ($c < C$) dans chaque CBC de manière à ce qu'il ne dépasse pas sa valeur maximale autorisée.

3.3 Modèle d'Utilisation de la Base Canonique (UBC)

Le problème UBC (Utilisation de la Base Canonique) a été développé pour démontrer qu'une base canonique est utilisable pour de nouveaux engrais, autres que ceux de l'échantillon initialement utilisé pour sa détermination. Plus cet échantillon initial serait soigneusement préparé, en tenant compte des exigences d'un très grand nombre de couples « sol, culture », plus il serait possible de produire n'importe quel engrais avec les CBC de cette base canonique. Le schéma descriptif du modèle UBC est fourni dans la Figure 24

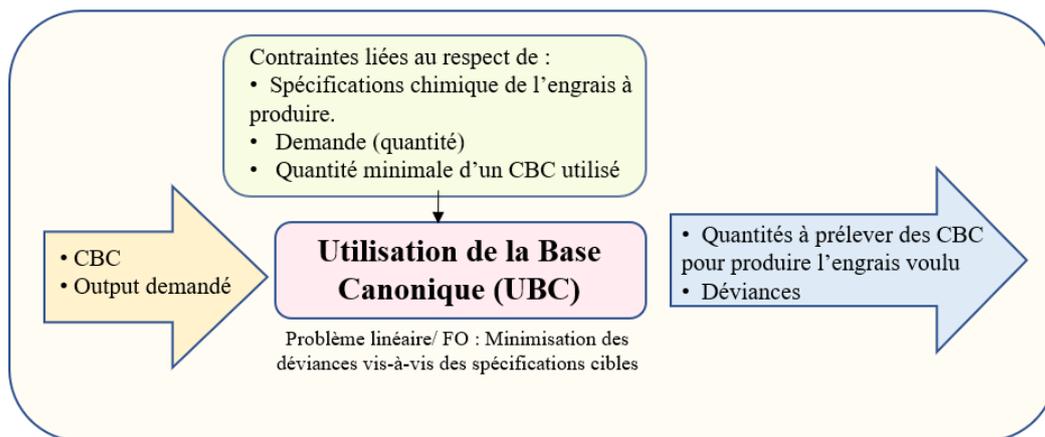


Figure 24 : Schéma descriptif du modèle de UBC

Ce modèle vise – à travers un petit programme linéaire sous le solveur d'Excel – de déterminer les quantités optimales à prélever des CBC pour satisfaire les spécifications de l'engrais à produire. Au lieu d'exiger qu'elles se tiennent dans une fourchette min-max, ces spécifications

doivent être satisfaites en respectant des déviations (variables de décision) que l'on cherche à minimiser dans la fonction-objectif. Le modèle repose sur l'hypothèse implicite d'une disponibilité sans faille des CBC et fait intervenir une contrainte de quantité minimale qui exige de consommer chaque CBC utilisé avec une certaine quantité minimale. Cela permettrait d'éviter des mélanges de recettes irréalistes (par exemple, utiliser un CBC en quelques milligrammes dans un mélange qui pèse plusieurs kilogrammes). Nous présentons ci-après la formulation mathématique de UBC.

Indices et paramètres

- i Composite de la base canonique précédemment créé ($i = 1, \dots, I$)
- c Composant chimique ($c = 1, \dots, C$)
- β_c Poids requis en % du composant c dans le poids de l'output demandé.
- D Quantité demandée de l'output à produire.
- α_{ci} Proportion du composant c dans le poids total du CBC i .
- κ Poids minimal en % d'un CBC utilisé pour produire l'output demandé, si ce CBC est utilisé.
- M Limite supérieure de toute quantité de CBC utilisée pour produire l'output demandé (ex., $M = 100000$).

Variables

- x_i Quantité du CBC i utilisée pour produire l'output demandé.
- w_i Variable binaire qui est égale à 1 si CBC i est utilisé pour produire l'output demandé et 0 sinon.
- η_c Écart absolu entre la proportion de c obtenue dans le mélange des CBC utilisés pour fabriquer l'output demandé et la proportion cible.

Définition du problème

$$\text{Min}(\sum_c \eta_c) \tag{11}$$

S.c.

$$\sum_i x_i = D \quad (12)$$

$$\beta_c - \eta_c \leq \sum_i \alpha_{ci} \cdot x_i / D \leq \beta_c + \eta_c, \forall c \quad (13)$$

$$0 \leq \eta_c \leq 1, \forall c \quad (14)$$

$$\begin{cases} x_i \leq M \cdot w_i \\ x_i \geq \kappa \cdot w_i \cdot D \end{cases}, \forall i \quad (15)$$

Commentaires

- Relation (11) : minimisation de la déviance absolue totale par rapport à la structure cible de l'output. Ici, le poids de la déviance est le même pour tous les composants, mais autrement une somme pondérée peut être utilisée sans problème dans cette formulation.
- Relation (12) : satisfaction de la quantité demandée pour l'output à produire. D est fixée à 100 tonnes.
- Relation (13) : satisfaction de la contrainte liée à la composition chimique de l'output à produire en acceptant une déviance η_c respectant largement les tolérances fixées par la réglementation (EU PE-CONS 76/18, 2019).
- Relation (14) : contrainte bornant les déviations η_c par rapport aux spécifications cibles de l'output demandé afin de toujours respecter les tolérances de la réglementation européenne, dont les règles de calcul sont assez complexes et dépendent du type et du nombre de nutriments présents dans l'engrais. Ceci est expliqué plus en détail dans (§4.2.2.1).
- Relation (15) : contrainte selon laquelle si un input i (un CBC) doit être utilisé pour produire l'engrais voulu, il doit l'être avec une quantité minimale de $\kappa\%$.D.
- Cette formulation mathématique est mono-output.

3.4 Modèle de la Réduction de la Diversité (RD)

Comme mentionné précédemment, le modèle du RB vise à minimiser le nombre d'inputs dont la composition optimale est à déterminer. Dans l'objectif de démontrer la valeur ajoutée du RB par rapport à l'approche actuellement utilisée par les agriculteurs, qui consiste à obtenir un engrais (output) en mélangeant des engrais existants (inputs), nous avons décidé de développer un nouveau modèle, appelé modèle de RD (Réduction de la Diversité). Il s'agit d'un modèle de blending ajusté conçu pour évaluer à quel point le blending classique permet de réduire la

diversité des engrais à produire sans limiter la diversité d'usage potentielle. Sa résolution fait appel à la programmation linéaire mixte. Cela est dû à l'introduction de deux variables binaires : w_j qui est égal à 1 si l'output j est produit et v_i qui est égal à 1 si l'input i est utilisé. Sachant que – compte tenu des contraintes liées au respect de la demande et des spécifications chimiques des outputs – nous cherchons à produire J engrais (outputs) tout en minimisant le nombre S d'inputs utilisés (S correspondant à un sous-ensemble des J engrais), la résolution de ce modèle commence par $S = J-1$ puis nous décrétons progressivement S ($S = J-2, J-3\dots$) jusqu'à ce que l'on trouve le nombre minimum d'inputs nécessaires pour que tous les outputs puissent être obtenus. La fonction-objectif étant de maximiser le nombre des engrais réalisables. Ce modèle a été décrit pour la première fois dans (Benhamou et al., 2019). Contrairement à ce dernier qui vise à respecter les spécifications des outputs de manière exacte, ici, la notion de tolérance est introduite afin de mener une comparaison équitable avec le RB où une très faible tolérance est autorisée pour chaque composant de chaque output. Son schéma descriptif est donné dans la Figure 25.

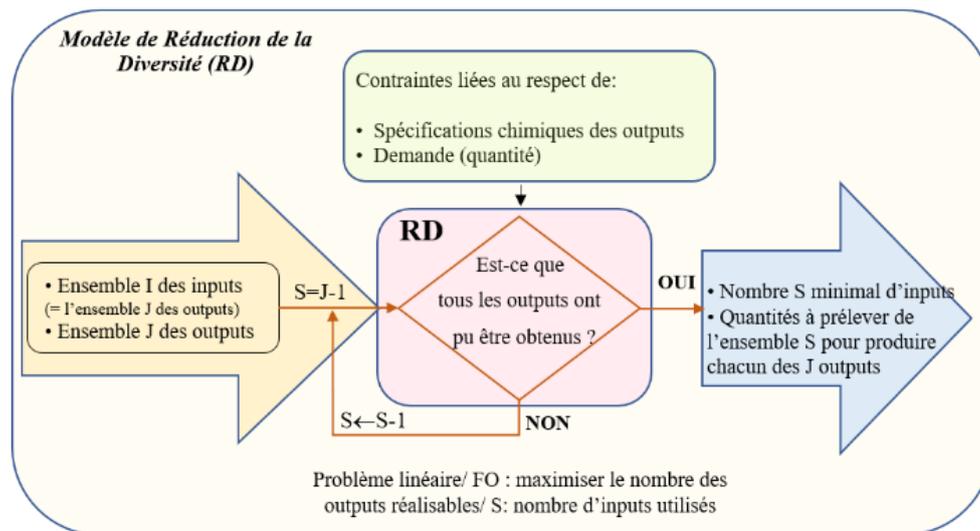


Figure 25 : Schéma descriptif du modèle de RD

Le modèle ci-dessus étant basé sur une programmation linéaire mixte paramétrique avec des variables continues, sa solution passe par l'utilisation de la méthode du simplex. Sa formulation mathématique est fournie dans ce qui suit.

Indices et paramètres

j Output ($j = 1, \dots, J$) (engrais commercialisé)

i Input existant (=output) ($i = 1, \dots, I$) (avec $I = J$).

c Composant chimique ($c = 1, \dots, C$).

β_{cj} Proportion cible du composant c dans le poids total de l'output j .

η_{cj} Écart absolu maximal du composant c dans le poids total de l'output j .

D_j Quantité demandée pour l'output j .

α_{ci} Proportion du composant c dans le poids total de l'input existant i .

M Limite supérieure de toute quantité d'input utilisée pour produire un output (ex., $M = 100000$).

Variables

x_{ij} Quantité de l'input existant i utilisée pour obtenir l'output j

w_j Variable binaire qui est égale à 1 si l'output j est produit et 0 sinon.

y_i Variable binaire qui est égale à 1 si l'input existant i est utilisé et 0 sinon. L'ensemble $S = \sum_i y_i$ inputs constitue le nombre minimal d'inputs existants à utiliser pour pouvoir répondre à la totalité de J outputs.

Définition du problème

$$\text{Max}(\sum_j w_j) \quad (16)$$

S.c.

$$\sum_i x_{ij} = D_j \cdot w_j, \forall j \quad (17)$$

$$(\beta_{cj} - \eta_{cj}) \cdot w_j \leq \sum_i \alpha_{ci} \cdot x_{ij} / D_j \leq (\beta_{cj} + \eta_{cj}) \cdot w_j, \forall c, j \quad (18)$$

$$\left| \begin{array}{l} \sum_j x_{ij} \leq M \cdot y_i, \forall i \\ S = \sum_i y_i \end{array} \right. \quad (19)$$

Commentaires

- Relation (16) : maximisation du nombre d'outputs pouvant être produits.

- Relation (17) : satisfaction de la quantité demandée pour chaque output j ($D_j = 100$ tonnes, $\forall j$).
- Relation (18) : satisfaction de la contrainte liée aux spécifications chimiques β_{cj} de l'output j tout en tolérant un écart η_{cj} par rapport aux valeurs cibles lorsque $\beta_{cj} > 0$.
- Relation (19) : contrainte attribuant à l'ensemble S le nombre des inputs utilisés en forçant y_i à être égale à 1 si l'input i est utilisé.

Afin d'avoir une vue d'ensemble et de pouvoir détecter facilement les différences entre les quatre modèles présentés ci-dessus, à savoir le modèle de blending classique (B), le modèle de Reverse Blending (RB), le modèle de l'utilisation de la base canonique (UBC) et le modèle de la réduction de la diversité (RD), nous les résumons dans un tableau synoptique que nous présentons en conclusion de ce chapitre.

4 Études de cas

Deux études de cas sont présentées dans cette section : une première qui a pour objectif d'appliquer le RB en montrant sa capacité à réduire la diversité des engrais à produire (diversité issue des impératifs écologiques de l'agriculture durable) (§4.1) et une deuxième dans laquelle nous analysons la réduction potentielle des engrais produits par les principaux producteurs au monde (§4.2).

4.1 Réduction de la diversité par le Reverse Blending

Pour appliquer la RB et définir une base canonique qui soit pertinente, il faut commencer par un grand échantillon qui doit être constitué d'une diversité colossale d'engrais personnalisés. Cette grande variété est la principale entrée du modèle RB (cf. Figure 23).

Considérant que l'utilisation de la fertilisation raisonnée est encore loin d'être une réalité en Afrique (cf. Chap.1/Section2), le Reverse Blending a été conçu pour répondre à une demande potentielle qui devrait comprendre des centaines de fertilisants adaptés. Pour définir cette demande, l'idéal serait de réaliser des études de marché sur les besoins potentiels en engrais personnalisés dans plusieurs régions, en tenant compte de leurs sols, de leurs cultures, de leurs superficies agricoles ainsi que des intérêts de leurs agriculteurs. Cela nécessite une connaissance approfondie des sciences agronomiques et d'avoir accès à toutes les données

relatives à la fertilité des sols de ces régions, aux exigences écologiques des cultures qui y sont pratiquées, aux surfaces cultivées, etc. Néanmoins, comme les seules données dont nous disposons sont celles concernant la fertilité des sols cultivés au Maroc, nous avons décidé d'appliquer le RB sur une demande potentielle adaptée à certaines provinces du Maroc. Le choix de ces provinces est justifié par la compatibilité parfaite de leurs caractéristiques pédologiques avec les exigences écologiques du blé, culture que nous avons sélectionnée en raison de son grand déficit de production agricole au Maroc. À cet effet, à l'aide de l'outil Fertimap (conseiller agricole informatisé développé par les plus grands experts en agronomie du Maroc pour calculer les besoins en nutriments en termes de N, P et K), un échantillon de 700 besoins en NPK a été défini. La méthode détaillée de construction de cet échantillon est donnée en (Annexe1). Un tableau exhaustif et détaillé des caractéristiques des 700 besoins, dont un extrait est donné dans le Tableau 6, est fourni dans (§Annexes - Tableau 1).

N° Besoin NPK	Coordonnées géographiques			Besoin nutritif calculé (Kg/Ha)	Recommandations de Fertimap	Ecart par rapport aux besoins calculés (Kg/Ha)		
	Région/ Préfecture or province/Commune	Longitude	Latitude					
1	Grand Casablanca-Settat/Berrechid/Sidi Rahal Chatai (Mun.)	-7.9447	33.4608	N	72.83	No regional fertilizer formula exists	N	-
				P	2.17		P	-
				K	0		K	-
2	Grand Casablanca-Settat/Berrechid/Sidi Rahal Chatai (Mun.)	-7.9369	33.4561	N	140.83	No regional fertilizer formula exists	N	-
				P	0		P	-
				K	0		K	-
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
362	Rabat-Salé-Kénitra/Khémisset/Ait Ouribel	-6.168	33.7713	N	138.33	3.73 q/Ha of 9-23-30 and 3.17 q/Ha of 33-0-0	N	-0.15
				P	26.06		P	59.73
				K	112		K	-0.1
363	Rabat-Salé-Kénitra/Khémisset/EL Ganzra	-5.9531	34.0845	N	197.33	5.37 q/Ha of 9-23-30 and 4.52 q/Ha of 33-0-0	N	0.16
				P	111.29		P	12.22
				K	161		K	0.1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
381	Tanger-Tetouan-Al Hoceïma/Ouezzane/ Kalaat Bouqorra	-5.1789	34.7444	N	79.33	16.3 q/Ha of 15-30-10	N	165.17
				P	82.24		P	406.76
				K	163.02		K	-0.02
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
699	Fès-Meknès/ Taza/ Zarda	-4.4452	33.9143	N	113.83	3.45 q/Ha of 33-0-0	N	0
				P	0		P	0
				K	0		K	0
700	Fès-Meknès/ Taza/ Zarda	-4.3941	33.9137	N	125.33	2.21 q/Ha of 10-20-20 and 3.13 q/Ha of 33-0-0	N	0.06
				P	0		P	44.2
				K	44.24		K	-0.04

Tableau 6. Extrait de l'échantillon des 700 NPK fourni par Fertimap

Pour cette première étude de cas, nous testons dans un premier lieu le RB sur l'échantillon des 700 besoins NPK. L'objectif est de trouver le nombre minimum de CBC permettant, par mélange physique, de satisfaire l'ensemble des 700 besoins (§4.1.1). Ensuite, nous montrons

que la BC trouvée dans (§4.1.1), à partir des 700 besoins NPK, ne permet pas seulement de satisfaire ces 700 besoins (ce qui est une conséquence directe du RB) mais que cette BC peut s'avérer suffisante pour répondre à une grande variété d'autres besoins d'engrais NPK. Cette possibilité est illustrée par une étude portant sur un échantillon aléatoire d'une cinquantaine de nouveaux engrais NPK (§4.1.2).

4.1.1 Exemple de définition de la Base Canonique

4.1.1.1 Objectif

L'objectif principal de cette étude de cas est de tester la faisabilité du modèle standard du RB. Pour ce faire, il doit être évalué en utilisant un grand nombre d'engrais diversifiés afin de pouvoir juger de sa capacité à réduire la diversité à produire sans pour autant compromettre la diversité de l'offre. Le recours à la fertilisation raisonnée associée pour l'industriel à la fabrication d'engrais personnalisés pourrait conduire au producteur d'engrais à avantageusement utiliser le RB ; en effet, étant donné la grande variété de sols et de cultures agricoles, des centaines voire des milliers de formules d'engrais devraient être produites. À cet effet, nous décidons d'appliquer le RB sur un échantillon de 700 solutions d'engrais personnalisés selon les exigences nutritives de la culture du blé dans certaines provinces du Maroc. Il faut alors trouver la composition optimale des composites de la BC permettant par mélange de satisfaire la totalité de ces 700 besoins. Les résultats relatifs à la base canonique trouvée en utilisant le modèle de RB sont présentés dans (§4.1.1.3).

4.1.1.2 Jeu de données

Les engrais personnalisés doivent être conformes à des formules spécifiquement adaptées dont les éléments nutritifs et leurs proportions diffèrent en fonction des caractéristiques pédologiques et des cultures concernées. Étant les trois nutriments les plus importants, les éléments nutritifs considérés dans cette étude de cas sont l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K). Les besoins variables pour ces trois nutriments se traduisent pour une grande diversité que nous illustrons par un exemple réel de 700 besoins différents en N, P et K.

Les 700 besoins en NPK sont donnés par Fertimap en kg/ha. Mais comme les engrais sont commercialisés sous forme de formules en %, nous avons dû convertir ces besoins quantitatifs en besoins exprimés en formules d'engrais. En effet, comme tout engrais contient une proportion de *filler*, nous avons décidé de procéder à cette conversion en fixant le pourcentage

du *filler*. L'idée étant de faire en sorte d'obtenir des formules similaires à celles des engrais actuellement commercialisés, facilitant ainsi leur production à l'aide des matières composites actuellement disponibles. Nous avons analysé environ 70 engrais NPK figurant dans les catalogues des principaux fabricants d'engrais au monde. Cette conversion a donné 482 différentes formules capables de satisfaire tous les 700 besoins NPK. Il convient de noter que ces besoins peuvent être satisfaits par d'autres formules, l'important étant de respecter les ratios de nutriments N/P, N/K et P/K dans chaque besoin quantitatif. Pourtant, quelles que soient les règles de conversion choisies, opter pour d'autres formules d'engrais ne va pas remettre en cause l'approche du RB. Un extrait des spécifications chimiques (β_{cj}) de ces formules et les demandes correspondantes D_j sont présentées au Tableau 7. Nous traitons tous les types de demande comme potentiels, en nous concentrant sur différentes parcelles représentatives de 1 ha, ignorant ainsi leur surface globale et le fait que les agriculteurs seraient prêts à acheter l'engrais personnalisé.

N° Besoin	Coordonnées Géographiques		Besoins exacts en NPK (Kg/Ha)			Les spécifications des outputs					
	Longitude	Latitude	N	P	K	Output j	Les spécifications nutritives (β_{cj})				Demande (D_j) (kg par 1 ha)
							%N	%P	%K	% <i>filler</i>	
1	-7.9447	33.4608	72.83	2.17	0	$j=1$	38.84%	1.16%	0.00%	60.00%	187.50
2	-7.9369	33.4561	140.83	0	0	$j=2$	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%	306.15
⋮	⋮	⋮				⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
362	-6.168	33.7713	138.33	26.06	112	$j=362$	26.03%	4.90%	21.07%	48.00%	531.52
363	-5.9531	34.0845	197.33	111.29	161	$j=363$	29.41%	16.59%	24.00%	30.00%	670.89
⋮	⋮	⋮				⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
381	-5.1789	34.7444	79.33	82.24	163.02	$j=381$	11.24%	11.65%	23.10%	54.00%	705.63
⋮	⋮	⋮				⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
699	-4.4452	33.9143	113.83	0	0	$j=699$	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%	247.46
700	-4.3941	33.9137	125.33	0	44.24	$j=700$	25.13%	0.00%	8.87%	66.00%	498.74

Tableau 7. La composition des formules d'engrais (β_{cj}) et les demandes (D_j)

Pour satisfaire le besoin NPK n° 362, en retenant un pourcentage *filler* de 48 %, il faut appliquer 531,52 kg/ha de la formule 26,0 (34,90 (21,07. En multipliant ces % par la quantité requise (531,52 kg/ha), nous obtenons respectivement 138,33 ; 26,06 et 112 kg/ha de N, P et K ce qui correspond exactement au 362^e besoin NPK.

Concernant les données d'entrée du RB, plus précisément celles relatives aux contraintes de composition des CBC (assurées par la relation (10)

nous avons fixé les pourcentages maximaux de N, P et K dans un CBC à $\tau_{1i} = 46\%$, $\tau_{2i} = 46\%$ and $\tau_{3i} = 75\%$, $\forall i > 1$ et le pourcentage minimum du *filler* à $\tau_{4i} = 5\%$. Nous supposons qu'un CBC doit représenter au moins $\kappa=1\%$ du poids d'un engrais. Pour l'écart absolu toléré, nous choisissons $\eta_{cj} = 0.0003$, $\forall c, j | c < 4$ (qui est largement conforme aux exigences réglementaires de l'UE).

4.1.1.3 Résultats

Les résultats ci-dessous ont été obtenus par le solveur Xpress en utilisant un PC (Intel® Xeon® CPU E3-1 240 v5 @ 3,50 GHz - 64 Go RAM). Ces résultats ne tiennent pas compte des aspects liés à l'efficacité computationnelle car, comme expliqué dans (§1.1), à ce stade de notre recherche, le problème peut être résolu avec un logiciel commercial. Lorsque nous traiterons de problèmes beaucoup plus larges, l'efficacité computationnelle sera bien sûr abordée.

L'application du modèle de RB (cf. (§3.2)) au jeu de données ci-dessus (variété d'environ 700 solutions d'engrais utilisant environ 482 formules différentes) montre que seul 8 CBC sont nécessaires, dont un agissant comme *filler* ($i = 1$). Le tableau ci-dessous indique la composition optimale de ces CBC.

			CBC i							
			$i=1(\text{filler})$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$	$i=6$	$i=7$	$i=8$
Composant c	%N	$c=1$	0,00	46,00	0,00	22,53	29,78	12,83	52,20	20,32
	%P	$c=2$	0,00	0,00	46,00	0,15	23,53	0,00	42,32	0,49
	%K	$c=3$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	47,09	0,49	74,19
	% <i>filler</i>	$c=4$	100,00	40,00	50,00	77,31	46,69	40,08	5,00	5,00

Tableau 8. Composition optimale des CBC du RB (α_{ci})

Le Tableau 9 contient un extrait des quantités optimales x_{ij} à prélever des CBC pour répondre à la demande de chaque engrais (voir le tableau complet dans (§Annexes - Tableau 2)).

		CBC i								Demande (Kg/ha) $\sum_i x_{ij} = D_j$
		$i=1(\text{filler})$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$	$i=6$	$i=7$	$i=8$	
Output j	$j=1$	0,00	127,53	0,00	51,05	8,92	0,00	0,00	0,00	187,50
	$j=2$	0,00	306,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	306,15
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	$j=362$	154,75	166,41	0,00	0,00	0,00	0,00	59,80	150,56	531,52
	$j=363$	156,84	38,20	0,00	0,00	0,00	0,00	260,52	215,31	670,89
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	$j=381$	304,62	0,00	115,12	0,00	0,00	0,00	66,60	219,29	705,63
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	$j=699$	0,00	247,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	247,46
	$j=700$	158,54	246,25	0,00	0,00	0,00	93,95	0,00	0,00	498,74

Tableau 9. Les quantités optimales à prélever des CBC du RB (x_{ij})

Avant de commenter les résultats ci-dessus, nous présentons dans ce qui suit ceux de la deuxième étude de cas, puis nous les analysons conjointement dans la sous-section (§4.1.3).

4.1.2 Utilisation de la Base Canonique pour produire des engrais du même type que ceux utilisés pour la création de cette BC

4.1.2.1 Objectif

Dans (§4.1.1), le RB a été appliqué à un échantillon de 700 besoins NPK (soit l'équivalent de 482 formules NPK) et 8 CBC se sont avérés suffisants pour les couvrir tous. Le RB a permis de déterminer la composition optimale des composites de la BC (cf. Tableau 8) et les quantités à prélever de chacun de ces composites pour satisfaire chacune des 482 formules. Très naturellement, cela signifie que tout engrais inclus dans l'échantillon du jeu de données d'entrée est « par construction » réalisable avec une combinaison précise des composites de la BC. En revanche, si la BC utilisée dans cet exemple a été définie pour répondre aux exigences du blé marocain (couple « Maroc/ blé »), cette base n'est pas, à proprement parler, dédiée à cette culture et à ce pays. En effet, les besoins exacts en NPK sont calculés par différence entre les exigences nutritives des cultures, compatibles avec une agriculture durable, et les apports possibles des parcelles de terre, compte tenu de leurs caractéristiques pédologiques. Cette différence, correspondant à des apports nutritifs complémentaires, peut se retrouver dans un très grand nombre d'autres couples « sol/ culture ». Par exemple, un engrais établi à la base pour satisfaire les besoins du blé dans une région du sud du Maroc peut parfaitement couvrir les besoins d'une autre plante (l'olivier par exemple) dans une région du nord du Maroc ou

même en dehors du Maroc. Cela laisse penser qu'une base canonique peut potentiellement servir à produire d'autres nouveaux engrais, ce qui soulève les questions suivantes :

Afin de produire un nouvel engrais, faudrait-il relancer la résolution du RB pour trouver une nouvelle BC qui produirait certainement cet engrais supplémentaire (il y aura alors 701 engrais dans le jeu de données d'entrée) ou, ce qui serait plus intéressant, est-ce que notre BC préalablement trouvée permettrait de satisfaire cet engrais additionnel – dans les limites des tolérances fixées par (EU PE-CONS 76/18, 2019) – même s'il n'a pas été pris en compte dans la définition de cette BC au tout début ?

Pour répondre à ces questions, il faut partir des 8 CBC et de l'engrais souhaité (approche « mono-produit ») et voir si cet engrais peut être produit en mélangeant les composites de cette BC, tout en respectant bien sûr ses exigences qualitatives et quantitatives. Pour ce faire, le modèle d'optimisation à utiliser est celui de l'UBC (Utilisation de la Base Canonique) décrit dans (§3.3).

4.1.2.2 Jeu de données

Les données d'entrée à utiliser pour cette étude complémentaire sont :

- Les CBC trouvés pour les 482 engrais par le RB dans la première partie du (§4.1). Ces CBC sont au nombre de huit et leurs compositions optimales sont données dans le Tableau 8.
- Les spécifications nutritives β_c , en termes de N ($c = 1$), P ($c = 2$) et K ($c = 3$), de l'output que l'on souhaite produire. Sur Excel, en fixant les intervalles acceptables pour les ratios nutritifs, ces spécifications ont été générées aléatoirement, 50 fois, ce qui a donné un échantillon de 50 engrais NPK. L'idée est de vérifier si notre BC peut, via un petit programme linéaire, satisfaire chacun de ces engrais avec des écarts aux spécifications exactes qui respectent largement les tolérances définies dans (EU PE-CONS 76/18, 2019). Un extrait de ces spécifications β_c est fourni dans le Tableau 10 (le tableau complet étant présenté dans (Annexes - Tableau 3)).

	Spécifications chimiques			β_c
	%N (c=1)	%P (c=2)	%K (c=3)	%filler (c=4)
Eng.1	20,52%	8,94%	0,00%	70,54%
Eng.2	30,30%	9,07%	27,26%	33,38%
Eng.3	20,64%	27,15%	0,00%	52,21%
...			...	
Eng.8	27,90%	12,00%	21,79%	38,31%
...			...	
Eng.17	11,00%	12,87%	16,92%	59,21%
...			...	
Eng.48	8,27%	15,93%	0,00%	75,80%
Eng.49	21,13%	19,50%	12,22%	47,15%
Eng.50	13,19%	6,70%	47,98%	32,13%

Tableau 10. Les spécifications chimiques β_c des 50 engrais NPK

- La proportion minimale qu'un CBC doit représenter dans un mélange quand il est utilisé est $\kappa\%=1\%$ et la quantité demandée pour l'engrais souhaité D est fixée à 100 tonnes.

4.1.2.3 Résultats

Après avoir résolu le modèle UBC pour chacun des 50 engrais (comme cela pourrait se passer dans la réalité), nous avons constaté que :

- Pour 48 des 50 engrais considérés, la fonction-objectif (une minimisation de la somme des écarts vis-à-vis des spécifications) prend la valeur de 0. Cela signifie que notre BC permet de satisfaire 96 % des besoins de manière exacte.
- Pour les deux autres engrais (les 4 % restants des besoins), la combinaison de CBC proposée conduit à de très faibles écarts par rapport aux cibles β_c exprimées en pourcentage, qui sont largement conformes aux tolérances imposées par la norme européenne (pour l'engrais 8 : 0 % pour N et K et +0.05 % pour P ; pour l'engrais 17 : +0.01 % pour N et 0 % pour P et K).

Le résultat des quantités x_i à prélever des CBC pour répondre aux demandes des nouveaux engrais (les nomenclatures), dont un extrait est présenté dans le Tableau 11, est fourni dans (§Annexes - Tableau 4). Ces quantités sont soit nulles (CBC non utilisé) soit supérieur à 1 tonne comme $\kappa\%$ a été fixé à 1 % et D à 100 tonnes.

	Quantités optimales x_i à prélever des CBC pour produire chaque output								Demande (tonnes)
	<i>filler</i>	<i>i=2</i>	<i>i=3</i>	<i>i=4</i>	<i>i=5</i>	<i>i=6</i>	<i>i=7</i>	<i>i=8</i>	
Eng.1	42,0	20,0	0,0	0,0	38,0	0,0	0,0	0,0	100
Eng.2	16,5	25,9	0,0	0,0	0,0	0,0	21,0	36,6	100
Eng.3	5,1	8,3	30,1	0,0	56,5	0,0	0,0	0,0	100
...				
Eng.8	23,9	13,4	0,0	5,6	0,0	0,0	27,9	29,2	100
...				
Eng.17	22,2	13,9	28,0	0,0	0,0	35,9	0,0	0,0	100
...				
Eng.48	29,8	1,0	34,5	34,7	0,0	0,0	0,0	0,0	100
Eng.49	2,7	38,7	42,2	0,0	0,0	0,0	0,0	16,5	100
Eng.50	21,5	0,0	13,9	0,0	0,0	0,0	0,0	64,7	100

Tableau 11. Extrait des compositions optimales de CBC à utiliser pour répondre aux caractéristiques chimiques des 50 engrais (solution de UBC)

4.1.3 Discussion et Synthèse

En plus du *filler*, le RB propose 7 CBC dont les combinaisons possibles satisfont pleinement les exigences des 700 NPK (cf. §4.1.1.3). En plus de répondre avec précision aux besoins nutritifs en termes de N, P et K, cela entraîne une énorme massification des flux en réduisant les flux à gérer, notamment au niveau des lignes de production et des hangars de stockage, de 100 % à seulement 1,57 % (sous réserve d'expériences en laboratoire permettant de trouver des réactions chimiquement stables pour le développement de ces nouvelles formules).

Cette étude montre que la variété d'engrais que l'on peut obtenir par combinaison linéaire des 7 CBC dépasse très largement les 482 engrais de l'échantillon initial. Un très grand nombre de ces combinaisons linéaires correspondant exactement à une composition demandée, d'autres s'en écartant un peu mais dans les limites de tolérance fixées par la réglementation européenne. Une BC peut alors répondre à de nouveaux ensembles complémentaires d'engrais du même type (N-P-K). En plus du fait qu'une formule d'engrais peut correspondre aux besoins de plusieurs couples « sol/ plante », cela s'explique largement par le fait que la nomenclature répondant aux spécifications d'un engrais est une combinaison linéaire (continue) des quantités prises des CBC. L'ensemble des combinaisons possibles peuvent donc permettre de répondre à un large éventail de spécifications. Il peut être ajouté enfin que la tolérance de déviations vis-à-vis des besoins exacts permet d'augmenter le nombre d'engrais qui peuvent être produits à partir d'une BC existante ; comme elle peut également être utilisée par le RB afin de minimiser davantage le nombre de composites de la BC qui sont à déterminer (plus il est accepté de s'éloigner des valeurs cibles, plus on a de chances d'avoir une BC réduite).

Nous sommes en droit de penser, au vu de ces résultats, que la constitution d'un échantillon raisonné de quelques milliers de besoins d'engrais croisant des caractéristiques pédologiques et celles de cultures puisse permettre de créer une base canonique permettant de couvrir l'essentiel des besoins en nutriments NPK, auxquels nous pouvons ajouter le soufre S que l'on rencontre partout dans le monde. D'autres nutriments sont quelquefois demandés, comme l'étude suivante va le montrer. Pour satisfaire ces nouveaux besoins, il suffit de partir de la base canonique initiale et d'ajouter de nouveaux composites à créer pour couvrir ces nouveaux besoins.

4.2 Analyse de la réduction potentielle des engrais produits par les principaux producteurs mondiaux

La diversité d'engrais vendus par les 10 plus grands producteurs mondiaux d'engrais est de 175 engrais composés mais si l'on ne tient compte que de ceux qui ont des formules différentes, un total de $J = 142$ formules d'engrais est atteint. Ces formules peuvent contenir de 2 à $C = 10$ composants ; de $c = 1$ à $c = 9$, correspondant respectivement à N, P, K, S, B_2O_3 , Zn, Mg (magnésium), Na (sodium) et Ca (calcium) et $c = C = 10$ correspondant au *filler*. Notons que les engrais contenant uniquement au moins un des composants majeurs (NPK) représentent 56 % de ces formules et si nous ajoutons le Soufre S, nous arrivons à 82 %.

Cette diversité de l'offre est loin de pouvoir couvrir les besoins d'une agriculture durable. Pour éviter d'augmenter cette variété par la création de nouveaux engrais, certains distributeurs mélangent des engrais existants, dans de petites unités de blending, localisées dans des zones agricoles. Ce mélange conduit à la création d'un nouvel engrais dont la composition diffère de celles des engrais existants. Il s'ensuit que la « diversité d'usage potentielle » des engrais existants est supérieure à la diversité de l'offre commerciale. Dans ce contexte, il est intéressant de voir jusqu'à quel point nous pouvons réduire la diversité de l'offre commerciale sans affecter la « diversité d'usage potentielle ».

Pour ce faire, nous commençons par regarder jusqu'à quel point certains engrais existants peuvent être obtenus par mélange d'autres engrais, ce qui conduit à la recherche de l'ensemble minimal des engrais (inputs) à partir duquel les 142 engrais peuvent être reconstitués (§4.2.1). Dans cette recherche, entre la valeur-cible d'un nutriment dans le poids total de l'engrais et la valeur obtenue par la solution trouvée, nous tolérons un écart absolu maximal de 0.0005 (par exemple, pour l'engrais 1, N devant représenter 20.52 % du poids total, la solution n'est acceptable que si cette valeur est comprise entre 20.47 % et 20.57 % dans la solution proposée). Cette marge d'erreur satisfait très largement la réglementation européenne (EU PE-CONS

76/18, 2019). Pour réduire davantage cet ensemble d'inputs permettant de reconstituer les 142 formules d'engrais, nous appliquons dans ce qui suit le modèle du RB pour déterminer la base canonique permettant de reconstituer ces formules d'engrais.

4.2.1 Réduction de la diversité de l'offre commerciale d'engrais par combinaison d'engrais existants

4.2.1.1 Objectif

Pour augmenter la diversité des engrais sans en créer de nouveaux, les distributeurs optent pour les engrais mélangés (outputs) qui s'obtiennent par le blending d'autres engrais (inputs). Il s'agit d'un simple problème de blending dont le critère d'optimisation est généralement lié à une minimisation de coûts. Cependant, comme l'objectif est de déterminer à quel point le mélange d'engrais existants peut contribuer à la réduction de la diversité à produire, un problème de mélange paramétrique, qualifié de « Réduction de la Diversité (RD) », est élaboré (voir le modèle décrit en §3.4 et résumé dans la colonne 4 du Tableau 18) où les considérations de coûts ne sont pas aussi pertinentes que de trouver, parmi l'ensemble des engrais ($J = 142$ outputs), le plus petit sous-ensemble d'engrais dont les mélanges peuvent répondre à toute la variété de ces outputs. Il s'agit d'un modèle d'optimisation mixte en raison de l'introduction de deux variables binaires, la première associée à la production d'un output et, la seconde, à l'utilisation d'un input. Ce programme est paramétré car nous cherchons à maximiser le nombre des engrais outputs que l'on peut fabriquer à partir d'une combinaison des engrais inputs appartenant à un sous-ensemble S (S correspondant à un sous-ensemble des J outputs). La résolution de ce modèle commence par $S = J-1$ puis S est progressivement décrémenté ($S = J-2, J-3, \dots$) jusqu'à ce que le nombre minimum d'inputs nécessaires pour que tous les outputs puissent être obtenus soit trouvé (voir le schéma descriptif de ce modèle dans Figure 25).

4.2.1.2 Jeu de données

Le jeu de données pris en considération ici est composé des $J = 142$ différentes formules d'engrais commercialisées par les plus grands producteurs d'engrais au monde (OCP Group, Yara, Agrium, K + S, Potashcorp, Mosaic, Uralkali, Belrarskali et CF Industries). Les caractéristiques chimiques de ces 142 engrais (β_{cj}) sont données dans le Tableau 12. Les quantités demandées D_j sont arbitrairement fixées à 100 tonnes et comme indiqué à

l'introduction de cette étude de cas, l'écart η_{cj} toléré vis-à-vis des spécifications requises est fixé à 0,0005.

		Composant c												Composant c									
Output j	Constructeur	N	P	K	S	B2O3	Zn	Mg	Na	Ca	filler	Constructeur	N	P	K	S	B2O3	Zn	Mg	Na	Ca	filler	
		c=1	c=2	c=3	c=4	c=5	c=6	c=7	c=8	c=9	c=10			c=1	c=2	c=3	c=4	c=5	c=6	c=7	c=8	c=9	c=10
j=1	AGRIUM	0,00%	0,00%	50,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	50,00%	j=37	12,00%	27,00%	0,00%	25,00%	0,00%	2,00%	0,00%	0,00%	0,00%	34,00%	
j=2		0,00%	0,00%	60,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	40,00%	j=38	12,00%	46,00%	0,00%	17,50%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	24,50%	
j=3		0,00%	20,00%	20,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	60,00%	j=39	12,00%	52,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	36,00%	
j=4		0,00%	22,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	78,00%	j=40	13,00%	0,00%	14,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	73,00%	
j=5		1,00%	3,00%	23,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	73,00%	j=41	13,00%	13,00%	13,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	61,00%	
j=6		2,00%	6,00%	42,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	50,00%	j=42	14,00%	4,00%	14,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	68,00%	
j=7		3,00%	5,00%	28,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	64,00%	j=43	14,00%	7,00%	14,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	65,00%	
j=8		3,00%	7,00%	28,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	62,00%	j=44	15,00%	5,00%	10,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	70,00%	
j=9		3,00%	9,00%	9,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	79,00%	j=45	16,00%	0,00%	16,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	68,00%	
j=10		3,00%	9,00%	18,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	70,00%	j=46	16,00%	4,00%	8,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	72,00%	
j=11		3,00%	10,00%	10,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	77,00%	j=47	18,00%	8,00%	0,00%	18,00%	0,00%	2,00%	0,00%	0,00%	0,00%	54,00%	
j=12		4,00%	6,00%	32,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	58,00%	j=48	20,20%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	79,80%	
j=13		4,00%	8,00%	12,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	76,00%	j=49	20,50%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	79,50%	
j=14		5,00%	5,00%	5,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	85,00%	j=50	21,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	79,00%	
j=15		5,00%	5,00%	25,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	65,00%	j=51	21,00%	0,00%	21,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	58,00%	
j=16		5,00%	8,00%	21,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	66,00%	j=52	21,00%	10,00%	10,00%	3,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	56,00%	
j=17		5,00%	10,00%	15,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	70,00%	j=53	25,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	75,00%	
j=18		5,00%	10,00%	25,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	60,00%	j=54	27,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	73,00%	
j=19		5,00%	10,00%	30,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	55,00%	j=55	34,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	66,00%	
j=20		5,00%	12,00%	12,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	71,00%	j=56	44,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	56,00%	
j=21		5,00%	20,00%	20,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	55,00%	j=57	0,00%	0,00%	0,00%	50,00%	0,00%	0,00%	25,00%	0,00%	0,00%	25,00%	
j=22		5,00%	22,00%	6,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	67,00%	j=58	0,00%	0,00%	0,00%	53,00%	0,00%	0,00%	26,00%	0,00%	0,00%	21,00%	
j=23		6,00%	3,00%	18,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	73,00%	j=59	0,00%	0,00%	11,00%	10,00%	0,00%	0,00%	5,00%	27,00%	0,00%	47,00%	
j=24		6,00%	6,00%	18,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	70,00%	j=60	0,00%	0,00%	30,00%	42,50%	0,00%	0,00%	10,00%	0,00%	0,00%	17,50%	
j=25		6,00%	6,00%	22,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	66,00%	j=61	0,00%	0,00%	40,00%	12,50%	0,00%	0,00%	6,00%	4,00%	0,00%	37,50%	
j=26		6,00%	12,00%	18,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	64,00%	j=62	0,00%	0,00%	50,00%	45,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	5,00%	
j=27		6,00%	24,00%	24,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	46,00%	j=63	0,00%	0,00%	51,00%	45,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	4,00%	
j=28		7,00%	20,00%	20,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	53,00%	j=64	0,00%	0,00%	52,00%	45,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	3,00%	
j=29		8,00%	8,00%	8,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	76,00%	j=65	0,00%	0,00%	62,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	38,00%	
j=30		8,00%	8,00%	24,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	60,00%	j=66	10,00%	50,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	40,00%	
j=31		8,00%	16,00%	16,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	60,00%	j=67	4,00%	16,00%	34,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	46,00%	
j=32		8,00%	16,00%	24,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	52,00%	j=68	5,00%	20,00%	30,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	45,00%	
j=33		9,00%	10,00%	30,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	51,00%	j=69	5,00%	20,50%	36,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	38,50%	
j=34		10,00%	5,00%	25,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	60,00%	j=70	6,00%	18,00%	34,00%	2,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	40,00%	
j=35		10,00%	10,00%	10,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	70,00%	j=71	6,00%	26,00%	30,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	38,00%	
j=36		12,00%	12,00%	12,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	64,00%	j=72	7,00%	20,00%	30,00%	2,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	41,00%	

	Constructeur	Composant c										Constructeur	Composant c										
		N c=1	P c=2	K c=3	S c=4	B2O3 c=5	Zn c=6	Mg c=7	Na c=8	Ca c=9	filler c=10		N c=1	P c=2	K c=3	S c=4	B2O3 c=5	Zn c=6	Mg c=7	Na c=8	Ca c=9	filler c=10	
Output j	j=73	9,00%	25,00%	25,00%	2,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	39,00%	j=109	0,00%	46,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	54,00%	
	j=74	13,00%	13,00%	21,00%	8,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	45,00%	j=110	10,00%	18,00%	24,00%	7,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	41,00%	
	j=75	15,00%	15,00%	15,00%	8,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	47,00%	j=111	10,00%	20,00%	10,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	60,00%	
	j=76	22,00%	5,00%	27,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	46,00%	j=112	10,00%	20,00%	10,00%	6,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	54,00%	
	j=77	10,00%	34,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	56,00%	j=113	11,00%	54,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	35,00%	
	j=78	11,00%	37,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	52,00%	j=114	12,00%	10,00%	20,00%	28,00%	0,00%	0,00%	3,00%	0,00%	0,00%	27,00%	
	j=79	11,00%	52,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	37,00%	j=115	12,00%	20,00%	18,00%	5,00%	1,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	44,00%	
	j=80	18,00%	46,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	36,00%	j=116	12,00%	23,00%	14,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	51,00%	
	j=81	28,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	72,00%	j=117	12,00%	24,00%	12,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	52,00%	
	j=82	30,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	70,00%	j=118	12,00%	24,00%	12,00%	6,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	46,00%	
	j=83	32,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	68,00%	j=119	12,00%	32,00%	16,00%	4,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	36,00%	
	j=84	CF INDUSTRIES	46,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	54,00%	j=120	12,00%	40,00%	0,00%	0,00%	0,00%	1,00%	0,00%	0,00%	0,00%	47,00%	
	j=85	YARA	13,00%	6,00%	23,00%	12,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	46,00%	j=121	12,00%	45,00%	0,00%	5,00%	0,00%	0,20%	0,00%	0,00%	0,00%	37,80%
	j=86		13,00%	10,00%	18,00%	14,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	45,00%	j=122	12,00%	45,00%	0,00%	5,00%	0,00%	1,00%	0,00%	0,00%	0,00%	37,00%
	j=87		13,60%	0,00%	45,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	41,40%	j=123	12,00%	46,00%	0,00%	5,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	37,00%
	j=88		14,00%	0,00%	25,00%	26,00%	0,00%	0,00%	2,00%	0,00%	0,00%	33,00%	j=124	12,00%	46,00%	0,00%	6,00%	0,50%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	35,50%
	j=89		14,00%	10,00%	20,00%	12,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	44,00%	j=125	12,00%	46,00%	0,00%	7,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	35,00%
	j=90		14,00%	16,00%	10,00%	10,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	50,00%	j=126	12,00%	46,00%	0,00%	7,00%	0,00%	1,00%	0,00%	0,00%	0,00%	34,00%
	j=91		14,50%	0,00%	22,50%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	13,00%	50,00%	j=127	12,00%	48,00%	0,00%	5,00%	0,00%	1,00%	0,00%	0,00%	0,00%	34,00%
	j=92		15,00%	15,00%	15,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	55,00%	j=128	12,00%	48,00%	0,00%	7,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	33,00%
	j=93		15,50%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	26,30%	58,20%	j=129	13,00%	17,00%	17,00%	6,00%	1,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	46,00%
	j=94		16,00%	15,00%	10,00%	17,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	42,00%	j=130	14,00%	15,00%	15,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	56,00%
	j=95		17,00%	17,00%	0,00%	17,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	49,00%	j=131	14,00%	15,00%	15,00%	10,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	46,00%
	j=96		20,00%	6,00%	9,00%	10,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	55,00%	j=132	14,00%	18,00%	18,00%	6,00%	1,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	43,00%
	j=97		20,00%	10,00%	10,00%	10,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	50,00%	j=133	14,00%	23,00%	14,00%	6,00%	1,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	42,00%
	j=98		21,00%	13,00%	0,00%	17,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	49,00%	j=134	14,00%	28,00%	14,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	44,00%
	j=99		24,00%	0,00%	0,00%	17,00%	0,00%	0,00%	4,00%	0,00%	0,00%	55,00%	j=135	16,00%	20,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	64,00%
	j=100		24,00%	0,00%	0,00%	18,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	58,00%	j=136	16,00%	20,00%	0,00%	13,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	51,00%
	j=101		24,00%	0,00%	0,00%	19,00%	0,00%	0,00%	4,00%	0,00%	0,00%	53,00%	j=137	17,70%	35,50%	0,00%	7,60%	0,32%	2,20%	0,00%	0,00%	0,00%	36,68%
	j=102		25,00%	0,00%	0,00%	20,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	55,00%	j=138	18,90%	37,70%	0,00%	6,95%	0,32%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	36,13%
	j=103		26,00%	0,00%	6,00%	10,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	58,00%	j=139	19,00%	38,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	43,00%
	j=104		27,00%	0,00%	0,00%	12,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	61,00%	j=140	19,00%	38,00%	0,00%	6,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	37,00%
	j=105		27,00%	5,00%	5,00%	9,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	54,00%	j=141	19,00%	38,00%	0,00%	7,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	36,00%
	j=106		27,00%	6,00%	0,00%	13,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	54,00%	j=142	20,00%	20,00%	0,00%	15,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	45,00%
j=107	30,00%		0,00%	0,00%	7,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	63,00%												
j=108	33,50%		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	66,50%												

Tableau 12. Les engrais vendus par les dix plus grands producteurs d'engrais au monde

4.2.1.3 Résultats

L'utilisation du modèle RD révèle qu'au lieu de produire la totalité des $J = 142$ engrais par transformation chimique, ce qui est fait actuellement, il est en effet possible de n'en produire que quelques-uns (correspondant à l'ensemble S qui doit être aussi petit que possible) dont les combinaisons linéaires permises (par mélange) permettent de satisfaire les $(J-S)$ engrais restants. En effet, la solution optimale trouvée montre qu'avec $S = 33$ inputs (sur les 142 potentiels), il est possible de produire les 109 $(142-33)$ engrais restants. Avec $S = 32$, la production d'un engrais parmi les 142 devient impossible. La composition de ces 33 engrais est donnée dans le Tableau 13.

Le nombre minimal S d'inputs nécessaires pour satisfaire les $J=142$ engrais est 33

		$i=1$	$i=4$	$i=5$	$i=14$	$i=37$	$i=38$	$i=40$	$i=47$	$i=48$	$i=57$	$i=58$	$i=59$	$i=62$	$i=64$	$i=65$	$i=80$	$i=84$	
Composant c	$c=1$	%N	0%	0%	1%	5%	12%	12%	13%	18%	20,2%	0%	0%	0%	0%	0%	18%	46%	
	$c=2$	%P	0%	22%	3%	5%	27%	46%	0%	8%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	46%	0%
	$c=3$	%K	50%	0%	23%	5%	0%	0%	14%	0%	0%	0%	0%	11%	50%	52%	62%	0%	0%
	$c=4$	%S	0%	0%	0%	0%	25%	17,5%	0%	18%	0%	50%	53%	10%	45%	45%	0%	0%	0%
	$c=5$	%B ₂ O ₃	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	$c=6$	%Zn	0%	0%	0%	0%	2%	0%	0%	2%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	$c=7$	%Mg	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	25%	26%	5%	0%	0%	0%	0%	0%
	$c=8$	%Na	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	27%	0%	0%	0%	0%	0%
	$c=9$	%Ca	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	$c=10$	%filler	50%	78%	73%	85%	34%	24,5%	73%	54%	79,8%	25%	21%	47%	5%	3%	38%	36%	54%
		$i=87$	$i=93$	$i=95$	$i=100$	$i=102$	$i=109$	$i=113$	$i=115$	$i=120$	$i=124$	$i=127$	$i=129$	$i=132$	$i=133$	$i=137$	$i=138$		
Composant c	$c=1$	%N	13,6%	15,5%	17%	24%	25%	0%	11%	12%	12%	12%	13%	14%	14%	17,7%	18,9%		
	$c=2$	%P	0%	0%	17%	0%	0%	46%	54%	20%	40%	46%	48%	17%	18%	23%	35,5%	37,7%	
	$c=3$	%K	45%	0%	0%	0%	0%	0%	18%	0%	0%	0%	17%	18%	14%	0%	0%		
	$c=4$	%S	0%	0%	17%	18%	20%	0%	0%	5%	0%	6%	5%	6%	6%	6%	7,60%	6,95%	
	$c=5$	%B ₂ O ₃	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0,50%	0%	1%	1%	1%	0,32%	0,32%		
	$c=6$	%Zn	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	1%	0%	0%	0%	2,20%	0%		
	$c=7$	%Mg	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%		
	$c=8$	%Na	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%		
	$c=9$	%Ca	0%	26,3%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%		
	$c=10$	%filler	41,4%	58,2%	49%	58%	55%	54%	35%	44%	47%	35,5%	34%	46%	43%	42%	36,7%	36,1%	

Tableau 13. Composition des 33 inputs utilisés pour produire tous les $J = 142$ engrais

Un extrait des quantités à prélever des inputs ci-dessus pour satisfaire toutes les spécifications chimiques des 142 engrais de manière exacte sont données dans le Tableau 14 (cf. le tableau complet dans (§Annexes - Tableau 5)). La tolérance vis-à-vis des spécifications cibles étant fixée à ± 0.0005 , un test complémentaire a été fait en diminuant la tolérance et il s'est avéré qu'une solution optimale exacte existe. Nous avons préféré garder cette solution.

		Constructeur	i=1	i=4	i=5	i=14	i=37	i=38	i=40	i=47	i=48	i=57	i=58	i=59	i=62	i=64	i=65	i=80	i=84	i=87	i=93	i=95	i=100	i=102	i=109	i=113	i=115	i=120	i=124	i=127	i=129	i=132	i=133	i=137	i=138	D _j			
Output	j=1	AGRUM	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100		
	j=2		16.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	83.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100		
	j=3		40.0	31.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100		
	
	j=77		0.0	8.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	21.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	69.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100		
	j=78	POTASHCROP	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	28.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	23.4	48.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100		
	j=79		0.0	4.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	94.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100		
	
	j=85		11.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	29.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	26.7	0.0	0.0	0.0	20.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100		
	j=86	YARA	0.0	34.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	31.1	2.9	5.2	26.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100	
	j=87		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100	

	j=140		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	34.3	0.0	0.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	48.3	10.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100	
	j=141	GROUPE OCP	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	30.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	52.2	8.1	0.0	0.0	0.0	9.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100	
j=142		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	32.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.6	0.0	0.0	0.0	0.0	46.9	11.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100		

Tableau 14. Extrait des quantités optimales à prélever des 33 inputs utilisés pour satisfaire les 142 engrais ((solution de RD)

4.2.2 Réduction de la diversité de l'offre commerciale d'engrais par le Reverse Blending

4.2.2.1 Objectif

L'objectif est ici de déterminer les composites de la BC permettant a priori de recréer les 142 engrais actuellement vendus, en respectant la réglementation européenne (EU PE-CONS 76/18, 2019) et de satisfaire un très grand nombre d'autres besoins nutritifs.

Le modèle d'optimisation à utiliser est celui du Reverse Blending standard (RB). Sa formulation mathématique a été présentée au §3.2. Comme déjà expliqué, de petits écarts par rapport aux spécifications cibles peuvent être admis dans le RB et le RD tant que ces écarts restent dans les limites des tolérances réglementées. Il convient de préciser que dans la réglementation (EU PE-CONS 76/18, 2019), les spécifications nutritives d'un engrais doivent être respectées, en tenant compte d'une marge de tolérance qui varie selon le nombre et le type de composants contenus dans cet engrais. Par exemple, pour les engrais binaires (NP, NK ou PK) et ternaires (NPK), la somme des écarts absolus par rapport à la valeur déclarée ne doit respectivement pas dépasser 1,5 % et 1,9 %. Pour les nutriments secondaires, les tolérances admises par rapport aux valeurs déclarées du calcium (Ca), du magnésium (Mg), du sodium (Na) et du soufre (S) sont fixées à un 1/4 des teneurs déclarées en ces éléments avec un maximum de 0,9 % en valeur absolue pour le CaO, le MgO, le Na₂O et le SO₃, soit 0,64 % pour le Ca, 0,55 % pour le Mg, 0,67 % pour le Na et 0,36 % pour le S. Pour les oligoéléments, ces tolérances sont fixées à 0,4 % en valeur absolue pour les teneurs supérieures à 2 % et à 1/5 de la valeur déclarée pour les teneurs inférieures ou égales à 2 %. Pour ne pas compliquer les modèles, quel que soit le nombre de composants et qu'il s'agisse de nutriments majeurs, secondaires ou d'oligoéléments, il a été décidé d'opter pour une tolérance très faible pour chaque nutriment, de manière que les tolérances réglementaires soient toujours maintenues.

4.2.2.2 Jeu de données

Comme le modèle utilisé pour cet exemple est celui du RB standard, en plus des $J = 142$ engrais dont les caractéristiques sont affichées dans le Tableau 12, il faut préciser les autres paramètres d'entrée, à savoir :

- La marge d'écart tolérée vis-à-vis des spécifications cible qui est $\eta_{cj} = 0.0005, \forall c, j | c < C$.
- Les pourcentages maximums de N, P, K, S, B_2O_3 et Zn dans un CBC qui sont respectivement fixés à 46 %, 57 %, 64 %, 60 %, 2 %, 6 % et à 27 % pour Mg, Na et Ca.
- Le pourcentage minimum du *filler* dans un CBC qui est fixé à 3 % et la proportion minimale d'un CBC utilisé dans le poids total d'un engrais qui est égale à $\kappa=1\%$.

4.2.2.3 Résultats

L'application du modèle de RB aux 142 engrais montre que la totalité de ces engrais, portant sur 10 différents composants, peuvent être satisfaits avec seulement 16 CBC, dont l'un joue le rôle du *filler*. La composition optimale des CBC est détaillée dans le Tableau 15.

			% min	% max	CBC i																
					<i>filler</i>	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$	$i=6$	$i=7$	$i=8$	$i=9$	$i=10$	$i=11$	$i=12$	$i=13$	$i=14$	$i=15$	$i=16$	
Composant c	$c=1$	N	0	46,0	0	46,0	0	11,5	0	3,7	5,5	0	40,7	9,7	0	16,5	22,8	0	0	15,7	
	$c=2$	P	0	57,0	0	0	46,0	56,6	0	7,0	32,8	0	0	56,0	0	26,4	23,1	0	0	0	
	$c=3$	K	0	64,0	0	0	0	0,0	63,9	14,0	58,6	52,0	0	0	0	0	0	0	0	11,0	0
	$c=4$	S	0	60,0	0	0	0	0	0	0	0	45,0	56,3	31,3	45,0	7,8	0	53,2	10,0	0	
	$c=5$	B_2O_3	0	2,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,6	0	0	0	0
	$c=6$	Zn	0	6,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,8	0	0	0
	$c=7$	Mg	0	27,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26,6	5,0	0
	$c=8$	Na	0	27,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,0	0
	$c=9$	Ca	0	27,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26,6
	$c=10$	<i>filler</i>		3,0	100	100	54,0	54,0	31,8	36,1	75,3	3,0	3,0	3,0	3,0	55,0	47,8	48,4	20,2	47,0	57,8

Tableau 15. Composition optimale des 16 CBC nécessaires pour répondre aux 142 engrais commercialisés (en %)

Les quantités à prélever de ces CBC pour produire chacun des 142 engrais sont données dans (§Annexes - Tableau 6). Nous en présentons un extrait dans le Tableau 16.

		Constructeur	filler	CBC 1	CBC 2	CBC 3	CBC 4	CBC 5	CBC 6	CBC 7	CBC 8	CBC 9	CBC 10	CBC 11	CBC 12	CBC 13	CBC 14	CBC 15	D_j
Outputs	$j=1$	AGRIUM	21,74	0,00	0,00	0,00	78,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
	$j=2$		6,09	0,00	0,00	0,00	93,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
	$j=3$		25,22	0,00	43,48	0,00	31,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
	$j=4$		52,17	0,00	47,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
	$j=5$		40,63	0,00	2,45	0,00	30,13	26,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
	$j=6$		0,00	0,00	1,00	0,00	49,27	41,75	7,97	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
																
	$j=59$	K+S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	100,00
	$j=60$		6,13	0,00	0,00	0,00	6,26	0,00	0,00	50,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	37,61	0,00	0,00	100,00
	$j=61$		5,14	0,00	0,00	0,00	59,15	0,00	0,00	1,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,78	14,81	0,00	100,00
	$j=62$		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	96,15	0,00	0,00	3,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
	$j=63$		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	98,08	0,00	0,00	1,92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
	$j=64$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	
																
$j=84$	CF INDUSTRIES	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	
...																	
$j=109$	OCP GROUP	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	
...																	
$j=142$		7,83	21,56	43,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	24,75	0,00	2,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	

Tableau 16. Extrait des quantités optimales à prélever des CBC pour produire les 142 engrais (solution du RB)

En analysant ces quantités, il est remarqué que pour produire 100 tonnes des outputs $j = 84, j = 109, j = 64$ et $j = 59$, il faut respectivement 100 tonnes des CBC $i = 2, i = 3, i = 8$ et $i = 15$. Cela signifie que ces CBC correspondent à des engrais, et puisqu'ils sont utilisés dans plusieurs autres mélanges, ils doivent être traités à la fois comme étant CBC et engrais.

Étant les trois nutriments les plus importants pour tout sol, les NPK sont les engrais les plus produits et vendus au monde. Pour les fabriquer les 79 engrais NPK, représentant environ 56 % de toutes les références prises en compte, le solveur a proposé, en plus du *filler* ($i = 1$), 6 CBC ($i = 2 \rightarrow i = 7$) dont la composition permet de satisfaire tous les besoins nutritionnels de l'ensemble des 79 NPK. Dans l'exemple des 700 besoins NPK, il ne fallait qu'un seul composite de plus (7 CBC). Cela confirme que la diversité de l'échantillon considéré n'est pas proportionnelle à la taille de la BC puisque, en termes de cardinalités, il a suffi d'un seul CBC de plus pour satisfaire 340 (482-142) formules d'engrais supplémentaires.

Le soufre est le 4^e plus essentiel des nutriments pour le sol, raison pour laquelle, les NPKS comptent pour 82 % des références considérées, soit 117 engrais. Pour les produire, le RB nécessite un nombre minimal de 10 CBC ($i = 2 \rightarrow i = 11$). Enfin, le RB permet de répondre à tous les engrais vendus par les leaders du marché des engrais avec seulement 15 CBC et ce en respectant les exigences nutritionnelles de manière presque exacte (à $\pm 0,05$ % près). Il peut être ajouté qu'en ayant opté au début pour une tolérance nulle, l'output $j = 79$ n'était pas faisable et que, pour pouvoir le fabriquer, le RB l'a proposé en tant que CBC, augmentant ainsi le nombre des CBC de 15 CBC à 16 CBC (sans compter le *filler*). Pour éviter cette augmentation des CBC,

il a été choisi de tolérer une déviation minimale de 0.05 % (déviation minimale à accepter pour que l'engrais $j = 79$ devienne réalisable), ce qui est conforme à la législation européenne.

4.2.3 Discussion et Synthèse

Dans les deux cas (§4.2.1 et §4.2.2), nous avons montré qu'il est possible de réduire la variété de production, sans réduire la variété d'usage potentielle liée à l'offre commerciale existante. Les résultats de RB montrent qu'avec seulement 15 CBC, il serait possible de satisfaire une offre internationale de plus de 140 engrais (diversité offerte par les 10 plus grands producteurs d'engrais) ; à l'inverse, l'approche actuelle utilisée par les industriels et qui consiste à mélanger les engrais existants exige un minimum de 33 engrais, même avec l'hypothèse d'une disponibilité simultanée des 142 engrais. De plus, une BC définie correctement et avec expertise permettrait de satisfaire, outre les besoins à partir desquels elle a été définie, de nombreux autres. Les 15 CBC trouvés pour les 142 engrais permettraient non seulement de recréer ces engrais actuellement vendus, qui doivent répondre exactement à autant de besoins, mais aussi de satisfaire un très grand nombre d'autres besoins qui ne sont pas suffisamment couverts par l'offre actuelle d'engrais. Nous pouvons raisonnablement penser que la solution du RB permet, par rapport à celle de RD, d'accroître la variété d'usage potentielle, parce que les CBC comportent, en moyenne, moins de composants. Cela étant, si cette forme de redondance de l'offre commerciale a de nombreuses justifications économiques, il convient de s'interroger sur la pertinence de la variété d'usage potentielle de cette offre. Il nous semble nécessaire de prendre le problème à l'envers en partant d'une variété d'usage potentielle couvrant une majorité de besoins, pour déterminer la variété minimale de production requise. C'est exactement la démarche du RB que l'on préconise d'appliquer dans une perspective d'agriculture raisonnée et durable. L'application du RB à un échantillon représentatif très large de besoins d'engrais permet de créer une BC d'importance numérique sans doute similaire à celle trouvée pour pouvoir obtenir par mélange les engrais existants, mais avec un spectre d'utilisation plus large et donc plus pertinent.

Bien entendu, lorsque l'ensemble des inputs est défini de manière optimale de façon à couvrir une grande variété d'outputs tout en maintenant le nombre de ces inputs le plus petit possible, il est évident que – au regard de tout ce qui pourrait contribuer à une gestion plus facile de la diversité, à la commonalité et à la différenciation retardée – le RB obtienne de meilleurs résultats que le blending actuellement utilisé où l'ensemble des inputs et des outputs (dont la

variété est assez limitée) sont imposés et où la seule optimalité qui est réalisée est liée aux recettes du mélange.

Par ailleurs, au-delà de la capacité du RB à réduire la diversité offerte, en termes de productivité agricole, les engrais obtenus par mélange des CBC permettent de répondre aux besoins adaptés des sols et des plantes de manière tout à fait satisfaisante comparés aux mélanges des engrais existants qui génèrent souvent des écarts importants par rapport aux besoins exacts des exploitants agricoles. Ceci a été démontré dans la première étude de cas à travers Fertimap (cf. la dernière colonne du Tableau 6). Il s'agit alors d'une approche qui, si elle est menée à bien, sera une situation gagnante pour tous : les producteurs pourraient proposer des solutions d'engrais personnalisées à des coûts abordables grâce à une différenciation retardée efficace ; les agriculteurs pourraient se permettre d'acheter des engrais adaptés et ainsi augmenter leurs rendements agricoles ; l'environnement et les générations futures, car c'est une approche promouvant la fertilisation raisonnée qui permet de conserver les ressources des sols et donc de maintenir leur fertilité à long terme.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons évoqué en premier lieu les fondements du Reverse Blending (RB) d'un point de vue « Recherche opérationnelle » et d'un point de vue industriel avant d'aborder brièvement sa méthode de résolution, soit la programmation quadratique non convexe qui a suscité beaucoup d'intérêt de la part des chercheurs opérationnels. Il convient de rappeler que la résolution numérique de ce problème n'est pas traitée dans cette thèse ; un solveur commercial a été utilisé à cette fin. Ensuite, nous avons réalisé une revue de littérature pour positionner le RB par rapport au problème classique du blending mono-étage, celui-ci devant son originalité à l'inexistence de ses inputs, qui constituent, outre les quantités des mélanges optimaux, des variables de décision à déterminer de manière optimale tout en gardant leur nombre aussi petit que possible. Le positionnement du RB par rapport à l'ensemble des axes de la grille d'analyse présenté dans le Tableau 4 est synthétisé dans le tableau ci-dessous.

Axe d'analyse	Cas du Reverse Blending
Domaine d'analyse	Industrie des engrais
Inputs	Non connus, Non préexistants, Disponibilité illimitée, Spécifications chimiques à déterminer (i.e. variables de décision), Composites de la base canonique
Outputs	Multi-produits, Outputs très diversifiés (plus d'une centaine d'outputs), Produits à flux continu, Produits granulés.
Type de décision	Stratégique (conception de nouveaux produits, restructuration de la chaîne logistique).
Formulation	Programmation quadratique non-convexe
Critère d'optimisation	Minimisation du nombre total des inputs (CBC) à créer

Tableau 17. Synthèse du positionnement du RB en tant que problème de blending mono-étage

Dans la section 3, nous avons proposé quatre variantes du modèle de blending mono-étage, y compris le RB, que nous considérons comme une extension de ce problème. Nous synthétisons ces modèles dans le Tableau 18. Ce tableau fournit une synthèse comparative de quatre modèles : le modèle du *Blending* (identifié par B dans le tableau), le modèle du *Reverse Blending* (identifié par RB dans le tableau), le modèle d'utilisation de la base canonique du RB pour produire des engrais ne figurant pas dans l'échantillon ayant servi de référentiel pour déterminer les caractéristiques de cette base canonique (identifié par URB dans le tableau) et celui de la Réduction de la Diversité dans un ensemble d'engrais existants (identifié par RD dans le tableau).

B	RB	UBC	RD	Liste des indices	
X	X	-	X	j	Output ($j \in J; J = J$)
X	X	X	X	c	Composant chimique ($c \in C; C = C$)
X	-	-	-	i	Input existant (matière première ou composite) ($i \in I; I = I$)
-	X	-	-	i	Composite de la Base Canonique à créer ($i \in I; I = I$)
-	-	X	-	i	Composite de la Base Canonique précédemment créé ($i \in I$), utilisé pour produire l'output demandé
-	-	-	X	i	Input existant (= output) ($i \in I \wedge I \subset J \wedge I = S$).
B	RB	UBC	RD	Liste des paramètres	
X	-	-	-	β_{cj}^{\min}	Poids minimal en % du composant c dans le poids total de l'output j
X	-	-	-	β_{cj}^{\max}	Poids maximal en % du composant c dans le poids total de l'output j
-	-	X	-	β_c	Poids requis en % du composant c dans le poids de l'output demandé
-	X	X	X	β_{cj}	Proportion cible du composant c dans le poids total de l'output j
X	X	-	X	D_j	Quantité demandée de l'output j , réelle pour B et conventionnelle pour RB et RD
-	-	X	-	D	Quantité demandée pour l'output à produire
X	-	-	-	A_i	Disponibilité de l'input i . Disponibilité garantie pour RB, RD et UBC
X	-	X	X	α_{ci}	Proportion du composant c dans le poids total de l'input/ CBC i
X	-	-	-	ω_j	Coût unitaire de l'input i
-	X	-	-	τ_{ci}^{\min}	Proportion minimale du composant c dans le poids total du CBC i
-	X	-	-	τ_{ci}^{\max}	Proportion maximale du composant c dans le poids total du CBC i
-	X	-	X	η_{cj}	Écart absolu maximal par rapport aux spécifications requises acceptables du composant c dans le poids total de l'output j
-	X	-	X	M	Constante élevée (Big M)
-	X	X	X	κ	Poids minimal en % d'un CBC utilisé pour produire un output, si ce CBC est utilisé
B	RB	UBC	RD	Liste des variables	
X	-	-	X	x_{ij}	Quantité de l'input i utilisée pour produire l'output j
-	X	-	-	x_{ij}	Quantité du CBC i utilisée pour produire l'output j
-	-	X	-	x_i	Quantité du CBC i utilisée pour produire l'output demandé
-	X	-	-	α_{ci}	Proportion du composant c dans le poids total du CBC i
-	X	-	-	w_{ij}	Variable binaire qui est égale à 1 si l'input (CBC) i est utilisé pour produire l'output j et 0 sinon
-	-	-	X	w_j	Variable binaire qui est égale à 1 si l'output j est produit et 0 sinon
-	X	-	X	y_i	Variable binaire qui est égale à 1 si l'input i est utilisé et 0 sinon
-	-	X	-	η_c	Ecart absolu maximal entre la proportion de c obtenue dans le mélange des inputs utilisés pour fabriquer l'output j et la proportion cible
B	RB	UBC	RD	Fonction-objectif	
X	-	-	-	$\text{Min}(\sum_j \sum_i \omega_i x_{ij})$	Minimisation du coût de production
-	X	-	-	$\text{Min}(\sum_i y_i)$	Minimisation du nombre de composite de la Base Canonique
-	-	X	-	$\text{Min}(\sum_c \eta_c)$	Minimisation de la déviance absolue totale par rapport à la structure cible de l'output demandé
-	-	-	X	$\text{Max}(\sum_j w_j)$	Maximisation du nombre d'outputs pouvant être produits avec l'ensemble $I \subset J \wedge I = S$
B	RB	UBC	RD	Respect des contraintes de composition de l'output	
X	-	-	-	$\beta_{cj}^{\min} \leq \sum_i \alpha_{ci} \cdot x_{ij} / D_j \leq \beta_{cj}^{\max}, \forall c, j$	Contrainte linéaire
-	X	-	-	$\beta_{cj} - \eta_{cj} \leq \sum_i \alpha_{ci} \cdot x_{ij} / D_j \leq \beta_{cj} + \eta_{cj}, \forall c, j$	Contrainte quadratique
-	-	X	-	$\beta_c - \eta_c \leq \sum_i \alpha_{ci} \cdot x_i / D \leq \beta_c + \eta_c, \forall c$	Contrainte linéaire
-	-	-	X	$(\beta_{cj} - \eta_{cj}) \cdot w_j \leq \sum_i \alpha_{ci} \cdot x_{ij} / D_j \leq (\beta_{cj} + \eta_{cj}) \cdot w_j, \forall c, j$	Contrainte linéaire
B	RB	UBC	RD	Satisfaction de la demande	
X	X	-	-	$\sum_i x_{ij} = D_j, \forall j$	
-	-	X	-	$\sum_i x_i = D$	
-	-	-	X	$\sum_i x_{ij} = D_j \cdot w_j, \forall j$	
B	RB	UBC	RD	Principales contraintes spécifiques	
X	-	-	-	$\sum_j x_{ij} \leq A_i, \forall i$	Contrainte de disponibilité des inputs
-	X	-	-	$\sum_c \alpha_{ci} = 1, \forall i$ $\tau_{ci}^{\min} \leq \alpha_{ci} \leq \tau_{ci}^{\max}, \forall i, c$	Contrainte sur la structure du CBC i
-	X	-	X	$\sum_j x_{ij} \leq M \cdot y_i, \forall i$	Détermination du binaire d'utilisation du CBC i
-	X	-	-	$x_{ij} \leq M \cdot w_{ij}$ $x_{ij} \geq \kappa \cdot w_{ij} \cdot D_j, \forall i, j$	Contrainte d'utilisation minimale du CBC i dans l'input j si l'input i est utilisé
-	-	-	X	$\sum_j x_{ij} \leq M \cdot y_i, \forall i$ $\sum_i y_i = S$	Pour forcer $y_i = 1$ si i est utilisé Décrément progressive de S (en partant de J) jusqu'à ce que $\sum_j w_j = J$

Tableau 18. Tableau comparatif des modèles de quatre variantes du blending mono-étage

La formulation « classique » du Blending retenue ici est celle de la détermination des quantités d'inputs à mélanger pour produire les quantités demandées de plusieurs outputs dont les contraintes de composition doivent être respectées. Les inputs sont disponibles en quantités limitées et leurs coûts unitaires d'obtention sont connus. Dans le problème mono-période, la solution recherchée est celle qui minimise le coût total d'obtention des inputs. Dans la formulation du Reverse blending, la préoccupation de coût est absente, en raison de la méconnaissance des demandes potentielles des engrais sur-mesure à fabriquer et de celle du coût de production des CBC. Dans ce problème, nous cherchons simultanément la composition des CBC (inputs) et les formules de mélange de ces CBC permettant d'atteindre avec une précision suffisante la structure des outputs à produire. La méconnaissance des demandes conduit à travailler avec des demandes identiques fixées à un niveau arbitraire, le problème étant de trouver une solution technique au problème posé sans se préoccuper, à ce stade, de considérations de coûts. Ce problème, qui vise à répondre à toutes les demandes identifiées, avec une base canonique la plus réduite (critère d'optimisation), relève d'une logique de régime de croisière. Ce problème comporte des contraintes quadratiques faisant intervenir le produit de quantités de CBC à utiliser pour produire les outputs de composition imposée, avec la composition des CBC devant être déterminée par l'optimisation. La formulation du modèle de réduction de la diversité (RD) vise à déterminer le plus petit sous-ensemble des outputs appartenant à un ensemble existant d'engrais, permettant de produire les autres outputs du sous-ensemble complémentaire, ainsi que la définition de leurs nomenclatures de mélange. Les considérations de coûts et de demandes réelles n'interviennent pas car nous ne nous intéressons ici qu'à la possibilité technique de fabriquer des engrais en combinant d'autres engrais. Enfin, la formulation du modèle d'utilisation de la base canonique pour fabriquer un output qui n'a pas été retenu dans l'échantillon ayant permis la création de cette base, est un problème ponctuel de réponse à une demande dans lequel on cherche le mélange de CBC dont la composition est la plus proche de celle de l'output à produire. Pour ce faire, on minimise un indicateur calculé comme la somme des écarts absolus obtenus dans la composition trouvée, par rapport à la composition-cible.

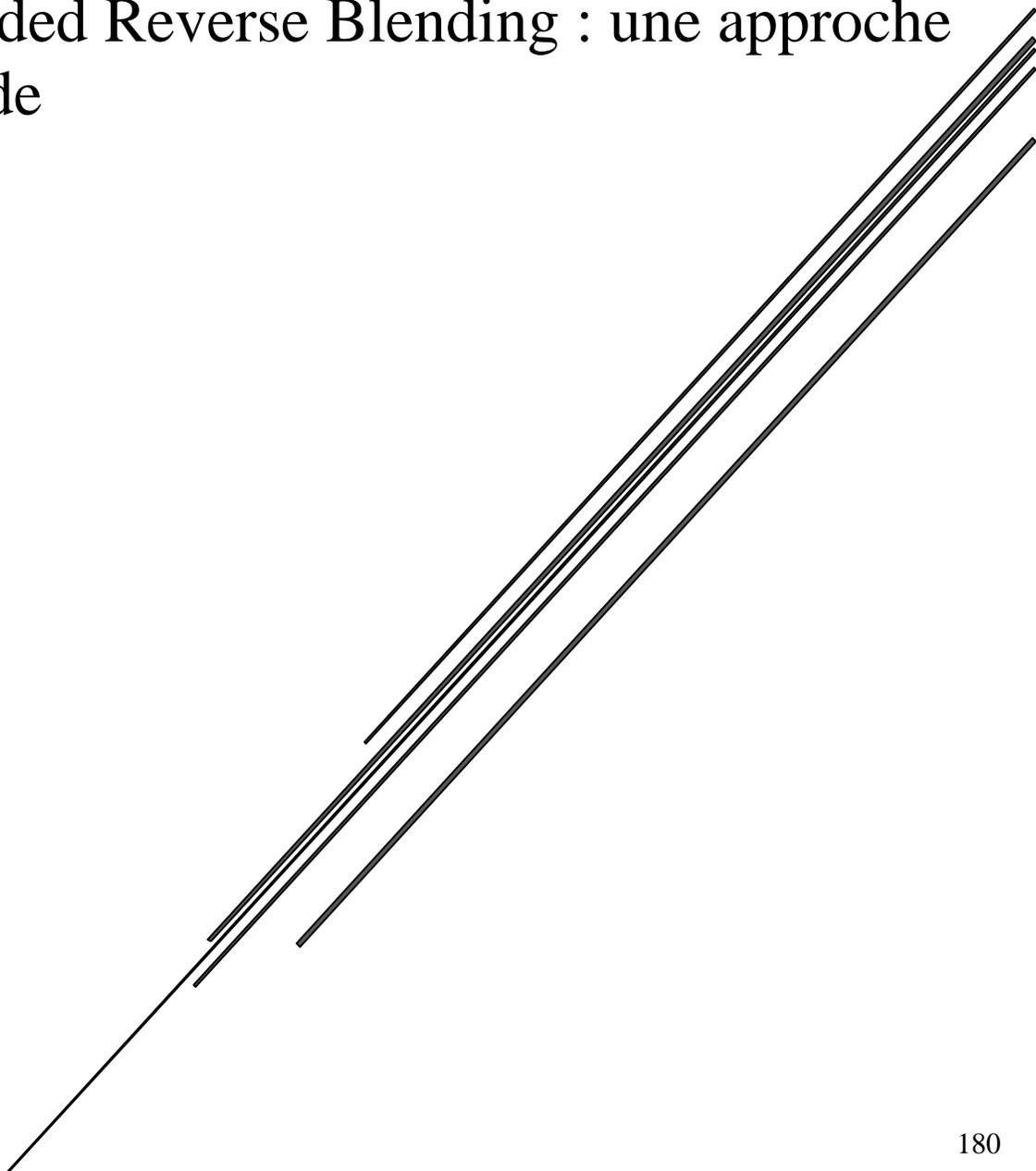
Dans la dernière section de ce chapitre, nous avons présenté deux études de cas. À travers la première (§4.1), nous avons d'abord présenté un exemple de base canonique composée, en plus du *filler*, de 8 CBC permettant de satisfaire une diversité de 482 formules d'engrais, suffisantes pour couvrir 700 besoins NPK définis pour la culture du blé dans certaines provinces marocaines (§4.1.1). Ensuite, nous sommes partis de cette base canonique et avons montré

qu'elle peut répondre à de nouveaux ensembles complémentaires d'engrais du même type (N, P, K) ; démontrant ainsi qu'une base canonique peut satisfaire un spectre d'engrais qui est largement plus étendu que celui des engrais considérés initialement dans la définition de cette base (§4.1.2). Dans la deuxième étude de cas (§4.2), il a d'abord été démontré qu'avec la méthode actuelle de mélange des engrais, la diversité qui peut potentiellement naître de la diversité commerciale offerte par les dix plus grands producteurs d'engrais peut être considérablement enrichie. Pour voir à quel point cet enrichissement est important, nous avons utilisé le modèle RD et conclu qu'au lieu de produire 142 engrais, 33 d'entre eux sont suffisants au sens où leurs combinaisons de mélanges sont capables de satisfaire les 109 (142-33) engrais restants. Ensuite, suivant la même logique, et afin de tester si le modèle RB peut réduire davantage l'offre commerciale (la diversité à produire) sans réduire la "diversité d'usage potentielle", nous avons appliqué le modèle RB aux 142 engrais sur le marché international et avons constaté que, par rapport au minimum de 33 engrais que l'on trouve avec l'approche actuelle des mélanges d'engrais, le modèle RB peut satisfaire les 142 avec seulement 15 CBC ; à condition que certaines expérimentations soient menées en vue de trouver des réactions chimiquement stables pour le développement de ces CBC.

Sinon, puisque - comme les experts en chimie de l'OCP nous l'ont indiqué - ces CBC peuvent techniquement être fabriqués de la même manière que les engrais (c'est-à-dire en combinant plusieurs composites existants), une alternative à la production de ces CBC consisterait à mélanger les composites existants (urée, phosphate monoammonique, chlorure de potassium...). Dans ce cas, les CBC deviennent des inputs intermédiaires transformant notre problème du RB d'un problème de mélange à un seul étage à un problème de mélange en deux étages. Nous consacrons le chapitre suivant à cette nouvelle version du RB : le RB étendu (*Extended Reverse Blending*).

CHAPITRE 4

Extended Reverse Blending : une approche hybride



Chapitre 4. Extended Reverse Blending : une approche hybride

Introduction

Le *Extended Reverse Blending*, un problème de Reverse Blending étendu, a été proposé après les discussions que nous avons eues avec le département R&D de l'OCP qui, avant de rechercher de nouvelles formules pour les CBC, a voulu d'abord tester l'approche du RB avec des CBC pouvant être obtenus en mélangeant des composites qui existent déjà sur le marché des engrais et qui ne présentent aucun risque d'incompatibilité chimique. En effet, prouver qu'une très grande variété de fertilisants peut être satisfaite avec peu de CBC tout en démontrant leur faisabilité technique et chimique rassurerait tout industriel souhaitant adopter le RB dans le sens où la solution que nous proposons n'est pas seulement une idée mais bien un nouveau mode de production potentiellement opérationnel.

Dans ce chapitre, nous présentons d'abord les fondements de la version étendue du Reverse Blending (section 1) en y indiquant la démarche hybride à suivre pour son application. Cette démarche consiste à coupler le RB avec une version adaptée du pooling, qui est un problème de mélange en deux étapes présentant plusieurs similitudes et différences avec les problèmes de pooling classiques. Ces différences et similitudes sont discutées en détail dans la revue de littérature présentée dans la section 2. La section 3 est quant à elle consacrée à la modélisation mathématique où nous décrivons les modèles respectifs du pooling et du pooling adapté, ainsi que l'algorithme de résolution de ce dernier. Enfin, dans la dernière section, nous appliquons cette version étendue au même exemple des 700 besoins NPK identifiés pour la culture du blé marocain et nous comparons les résultats trouvés avec ceux de la version standard du RB.

1 Fondements du Reverse Blending Étendu

Comme expliqué au (Chap.3/section1), l'idée que sous-tend le RB tel qu'il a été introduit à l'origine est de concevoir un nombre limité de nouveaux produits (c'est-à-dire les CBC) grâce auxquels n'importe quel engrais peut être obtenu par une simple opération de mélange. Mais pour y arriver, il faut que le RB soit appliqué dans des contextes industriels qui font appel à des processus de mélange mono-étage dont les inputs sont des matières composites pouvant être industriellement

fabriquées (par exemple, le secteur des engrais où les inputs de mélange se réfèrent à des produits composites obtenus par transformation chimique (ex. DAP, MAP...)) et non pas des matières premières brutes (par exemple, le secteur minier où les inputs de mélange sont des minerais bruts dont la composition ne peut être modifiée). Autrement, trouver la composition optimale des inputs serait complètement absurde puisque nous ne pourrions pas en contrôler les caractéristiques, celles-ci étant imposées par la nature. Cela dit, une fois les CBC déterminés, le RB s'en remet aux spécialistes de la chimie pour développer des réactions chimiques stables permettant leur production ; ceci peut entraîner le recours à de nouvelles ressources.

Néanmoins, avant de considérer l'approvisionnement de nouvelles matières premières et/ou la création de nouveaux composites et d'envisager le développement de nouveaux procédés chimiques, il serait plus judicieux de commencer par la recherche d'une base canonique, que l'on peut obtenir par le mélange des produits existants (ceux actuellement utilisés dans la production des engrais). Dans ce contexte, la faisabilité technique des CBC est assurée par le processus de mélange, tandis que leur faisabilité chimique est obtenue en combinant des matières qui sont déjà disponibles sur le marché des engrais tout en tenant compte de leurs incompatibilités chimiques. Il faut alors chercher des CBC qui, d'une part, permettent de répondre, par mélange, à toute la variété d'engrais souhaitée (outputs), et qui, d'autre part, peuvent être obtenus par le mélange des matières composites existantes (inputs primaires). Dans ce contexte, les CBC deviennent des mélanges intermédiaires, transformant ainsi le problème du RB d'un processus de blending mono-étage en un processus de blending multi-étages. Ce problème présente des similarités avec le problème du "Pooling" dont nous donnons la définition dans (§2.1). Ainsi, pour cette deuxième alternative de création d'inputs intermédiaires (CBC), nous mobilisons l'*Adapted Pooling* (AP) ; une analyse bibliographique est effectuée dans (§2.2) pour identifier les différences entre le problème de Pooling classique et le problème de AP que nous proposons pour notre cas des engrais.

Par ailleurs, dans l'industrie des engrais, pour qu'un fertilisant mélangé soit utilisable, il ne doit présenter aucun risque d'incompatibilité chimique, physique, sécuritaire ou autre. Or, compte tenu de l'ensemble des inputs primaires considérés et de leurs incompatibilités, il est très probable que l'AP ne soit pas en mesure de répondre à tous les besoins en engrais. C'est pourquoi nous avons conçu une approche hybride, couplant le RB et l'AP, appelée "Extended Reverse Blending".

L'Extended Reverse Blending vise la recherche d'une base canonique dans laquelle un maximum de CBC peut être obtenu par le mélange de composites existants compatibles. Étant déterminés par la version standard du RB, le reste des CBC sont à créer de toutes pièces. Nous présentons un schéma résumant cette approche dans la Figure 26.

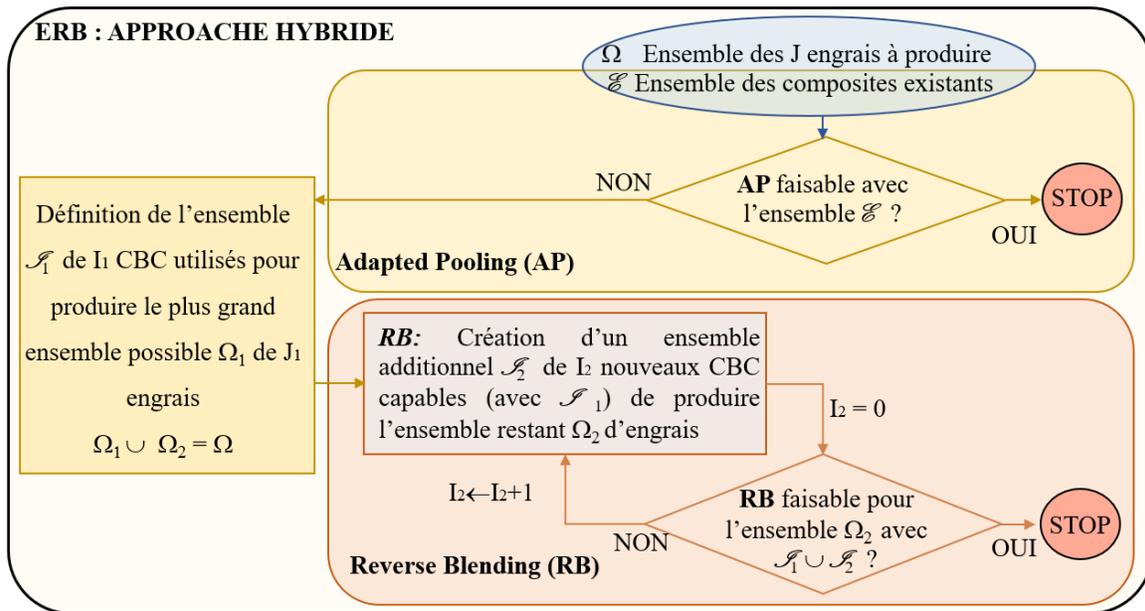


Figure 26 : Schéma descriptif de l'approche de l'ERB

La Figure 26 explique la démarche à suivre pour appliquer l'ERB. En effet, il faut commencer par résoudre l'AP pour trouver l'ensemble \mathcal{S}_1 de I_1 CBC – fabriqués à partir de composites existants – dont le mélange peut produire le plus grand ensemble Ω_1 d'engrais. Ensuite, il est nécessaire d'exécuter la version standard du RB afin de trouver le plus petit ensemble \mathcal{S}_2 de nouveaux composites correspondant à I_2 nouveaux CBC qui, combinés à l'ensemble initial \mathcal{S}_1 des CBC (trouvés par le moyen d'AP), donnent une solution de mélange pour les J_2 besoins en engrais restants. Au final, les spécifications de tous les engrais $\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2$ sont satisfaites.

Après avoir expliqué les fondements d'ERB, nous procédons dans la section suivante à une revue détaillée de la littérature qui montre en quoi l'ERB est différent des problèmes classiques de mélange à deux étages.

2 Revue de littérature

Afin de positionner l'approche RB par rapport aux problèmes de pooling (§2.3), nous en fournissons d'abord une brève définition dans (§2.1) avant de procéder à une revue détaillée de la littérature visant à identifier les spécifications de modélisation et les caractéristiques industrielles liées aux problèmes de pooling traités dans la littérature (§2.2).

2.1 Problème de Pooling classique

Dans certaines industries, comme l'industrie pétrolière, les matières premières (inputs primaires) sont mélangées pour former des produits intermédiaires qui, à leur tour, sont mélangés pour obtenir les produits finis. Ce type de problème de mélange à deux ou plusieurs étages est appelé Problème de Pooling (PP) (Chang et al., 2019).

Le PP est problème complexe combinant les problèmes classiques de blending avec ceux de l'optimisation d'un réseau de flux. Il vise, à partir d'un ensemble disponible de matières premières (inputs primaires) ayant des spécifications chimiques connues, à trouver le meilleur moyen (ex. le moins coûteux) de mélanger ces matières dans quelques réservoirs intermédiaires (inputs intermédiaires) de manière à répondre à la demande et spécifications chimiques requises par un ensemble de mélanges finaux (outputs) (Gupte et al., 2013). En d'autres termes, Audet et al. (2004) définissent le PP comme un problème de mélange à deux étages qui, compte tenu des disponibilités d'un certain nombre de matières premières et tout en visant à maximiser la différence entre leurs coûts d'acquisition et les recettes générées par les ventes des mélanges finaux (outputs), permet de définir la composition optimale des "inputs intermédiaires" ainsi que les quantités suivant lesquelles ils doivent être mélangés pour répondre aux besoins des différents outputs dont la composition doit satisfaire des exigences bien précises.

Dans les PP, les inputs primaires doivent d'abord être mélangés dans des réservoirs intermédiaires appelés « pools », puis être expédiées de ces réservoirs pour être à nouveau mélangées dans les réservoirs terminaux où seront créés les outputs. Il est également possible que les flux soient directement acheminés depuis les inputs primaires vers les outputs. Un schéma simplifié est présenté dans la Figure 27 pour illustrer cela.

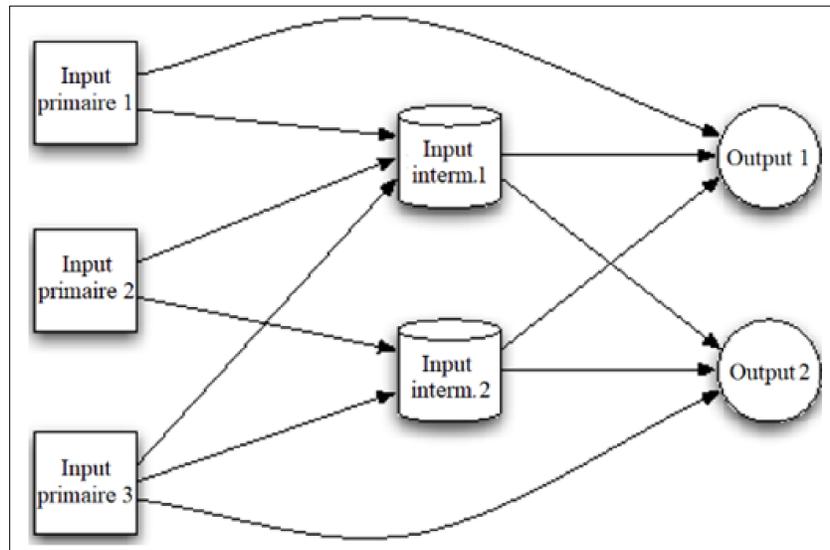


Figure 27 : Schéma simplifié de pooling (adapté de (Gupte et al., 2017))

Les variables de décision du modèle d'optimisation du PP sont alors les flux entrants, les flux sortants et les spécifications chimiques de chaque input intermédiaire. Les contraintes qui définissent la proportion en % de chaque composant dans le poids total de chaque input intermédiaire sont formulées sous forme de contraintes bilinéaires. Le PP est donc un problème non linéaire dont la résolution repose sur un programme quadratique non convexe qui rend difficile la recherche d'un optimum global puisque cette non-convexité peut donner lieu à de nombreux optimums locaux. Alors qu'une définition générale de la programmation quadratique a déjà été fournie dans (Chap.3/§1.3), les méthodes de résolution de ce type de programmation sont abordées dans le paragraphe (Chap.4/§2.2/Axe 8: Méthode de résolution) où nous passons en revue les différentes techniques utilisées pour résoudre le problème de pooling dans une trentaine d'articles.

2.2 Analyse de la littérature

À notre connaissance, le Problème de Pooling (PP) n'a pas encore été appliqué aux engrais, mais si l'on considère la production des CBC – à partir des matières composites existantes – comme une extension possible du RB, le PP peut devenir une alternative intéressante au RB, à condition qu'il puisse être adapté pour répondre à des contraintes spécifiques au secteur des engrais. Dans cette optique, nous avons réalisé une analyse bibliographique qui a permis d'identifier d'importantes différences entre le ERB et le PP, tel que généralement abordé dans la littérature. Pour cela, nous

avons effectué une recherche dans plusieurs bases de données scientifiques (Science Direct et EBSCO) ainsi que plusieurs autres incluses dans Google scholar en utilisant différentes combinaisons des mots-clés suivants : "pooling", "multi-stage blending", "optimization modeling", "intermediate blends", "Non-convex quadratic programming", etc. Par conséquent, nous avons sélectionné environ trente articles pertinents, dont la grille d'analyse est fournie dans le Tableau 19. Les paragraphes suivants détaillent les principales conclusions tirées de l'analyse de ces articles après les avoir évalués selon une multitude de critères :

Axe 1 : Domaine application

Si le Blending Classique (BC) peut être perçu comme un problème de flux de réseau avec seulement deux ensembles de nœuds (fournisseurs et clients), celui du pooling, une généralisation du CB, est un problème de flux de réseau avec au moins trois ensembles de nœuds : les sources (inputs primaires), les pools (mélanges intermédiaires) et les outputs (Gupte et al., 2017). Ainsi, contrairement aux processus de mélange qui sont très fréquemment rencontrés dans l'industrie de transformation, les applications du pooling sont limitées à quelques secteurs.

Secteur pétrolier. Sans compter le grand nombre de travaux qui ont un objectif plutôt informatique consistant à résoudre plus efficacement et de manière plus accélérée les modèles standards issus de l'industrie pétrochimique, notre analyse comprend différents articles qui ont porté sur la modélisation du problème du pooling dans les raffineries de pétrole. Amos et al. (1997) ont proposé un modèle de pooling non linéaire qui décrit le mode de fonctionnement d'une unité de raffinage en Nouvelle-Zélande. En plus des variables de décision classiques du pooling, cet article recherche également les meilleurs points de coupe qui produisent les fractions souhaitées tout en minimisant le coût total du pétrole brut. Heeman et al. (1996) ont abordé le problème du pooling dans le cadre d'un problème plus large qui est celui de la gestion des stocks d'une raffinerie important plusieurs types de pétrole brut livrés par différents navires. Ce problème, qui a pour but l'exploitation optimale du déchargement du pétrole brut, son transfert des réservoirs de stockage à ceux du chargement, et le planning de chargement de chaque Unité de Distillation du Pétrole Brut (UDPB), est résolu à l'aide d'un programme d'optimisation mixte reposant sur la discrétisation du temps. Castro (2016) a adopté une formulation de programmation non linéaire mixte, basée sur la source, pour des représentations discrètes et continues du temps, afin de résoudre un problème de

programmation à court terme des opérations de mélange de pétrole brut dans les raffineries. Il s'agit d'un problème de pooling avec d'importantes contraintes logistiques qui ont été modélisées à l'aide de propositions logiques impliquant des variables binaires qui présentent des connexions conflictuelles entre les différentes unités de la raffinerie.

Secteur agroalimentaire. Dans (Akkerman et al., 2010), une méthode est développée pour concevoir des produits intermédiaires dans un processus de production alimentaire en deux étapes, en tenant compte d'une grande variété de paramètres de qualité. La méthode consiste en un modèle de programmation mathématique en deux étapes (deux sous-modèles indépendants) – développé et appliqué sur une étude de cas portant sur les données d'un producteur de farine – visant à trouver un équilibre entre le coût des matières premières et le coût opérationnel. Dans (Kilic et al., 2013), les auteurs ont développé un modèle linéaire mixte pour résoudre le problème du mélange d'un nombre limité de produits intermédiaires dans l'industrie alimentaire. Le problème implique la sélection d'un ensemble de produits intermédiaires et la manière dont ils doivent être mélangés pour obtenir les produits finis souhaités tout en minimisant les coûts opérationnels totaux sous des contraintes de capacité.

Secteur du traitement des eaux usées. Le problème du traitement des eaux usées est l'une des applications typiques du pooling. Modélisé pour la première fois par (Meyer & Floudas, 2006), ce problème vise à minimiser le coût global du traitement d'un ensemble de flux d'eaux usées tout en réduisant leurs niveaux de polluants dans les limites spécifiées par la réglementation environnementale. En raison de sa complexité, due au couplage du problème de configuration d'un réseau combinatoire avec des contraintes d'équilibre de qualité non convexes, Meyer & Floudas (2006) ont résolu ce problème en utilisant un algorithme basé sur les principes de la technique de reformulation linéarisée. Plus tard en 2010, ce problème a été adapté par Misener & Floudas (2010) en intégrant des restrictions topologiques et en s'orientant vers une minimisation des coûts d'exploitation impliquant un coût fixe (pour l'activation d'un pipeline ou d'une usine de traitement) et un coût variable (pour le débit de chaque pipeline et usine de traitement). En termes de recherche opérationnelle, afin de renforcer les relaxations de (Meyer & Floudas, 2006), ces derniers ont proposé de nouvelles méthodes de résolution (sous-estimation par morceaux/ l'algorithme de "Branch-and-Bound"). Faria & Bagajewicz (2012a, 2012b) ont aussi essayé de résoudre, de manière globale, la non-convexité de ce problème en éliminant les sous-espaces où l'optimum

global ne peut pas exister. Cette méthode, recommandée pour les problèmes de grande envergure où il est difficile, voire impossible, de formuler un modèle de limite inférieure bien serrée, a montré une certaine amélioration en termes d'accélération de la recherche de l'optimalité globale.

Secteur du recyclage des matériaux. Les problèmes de pooling sont également utilisés pour la récupération des matériaux dans les opérations de recyclage à deux étages. Chang et al. (2019) ont élaboré et appliqué un modèle intégré afin de maximiser les avantages du recyclage en utilisant des débris de faible valeur dans des produits haut de gamme. Ils ont examiné les effets de la conception des produits intermédiaires dans les opérations de recyclage en deux étapes et ont conclu que la conception invariante en aval entraîne une sous-utilisation des matériaux recyclés. Ils en ont donc tiré une solution analytique pour démontrer l'importance des approches de planification intégrée avant de proposer un modèle qui optimise à la fois la conception et la production. Le modèle a été appliqué à une usine de recyclage de l'aluminium en Europe ; ses résultats montrent qu'il peut réduire les coûts des matériaux et augmenter l'utilisation de matériaux recyclés.

Secteur du gaz naturel. Li et al. (2011) ont présenté une formulation d'optimisation stochastique du problème de pooling dans le cadre du projet de conception et d'exploitation intégrées des systèmes de production du gaz naturel. Cette formulation, développée en combinant un modèle de pooling généralisé avec une approche de recours stochastique multi-scénarios en deux étapes, permet de déterminer les décisions de conception optimale du réseau qui maximisent la rentabilité du développement et de l'exploitation du système, tout en satisfaisant aux contraintes spécifiques du produit fini pour tous les scénarios d'incertitude abordés. Ce problème est résolu par un programme non linéaire mixte non convexe et une méthode de décomposition rigoureuse.

Axe 2 : Orientation de l'article

Il s'agit de préciser si l'article est orienté : *i*) "Recherche Opérationnelle", c'est-à-dire qu'il vise principalement à trouver – sur la base d'exemples types connus tirés de la littérature (par exemple, ceux de Haverly) – une méthode de résolution plus efficace comme l'ont effectué Audet et al., (2004), (Dey & Gupte, 2015), (Faria & Bagajewicz, 2012), (Floudas & Aggarwal, 1990), (Foulds et al., 1992), (Gupte et al., 2013), (Gounaris et al., 2009), (Pham et al., 2009), (Frimannslund et al., 2012) et plusieurs d'autres ; *ii*) "Management Industriel", c'est-à-dire qu'il se concentre sur un

problème industriel réel et le modélise en tenant compte de toutes ses contraintes avant d'exploiter ses résultats, que l'on trouve directement à l'aide d'un solveur commercial ; c'est le cas par exemple de (Kilic et al., 2013), (Akkerman et al., 2010) et (Amos et al., 1997) ; ou *iii*) éventuellement les deux à la fois, c'est-à-dire qu'il peut s'appuyer sur la modélisation d'un problème réel et proposer également des algorithmes, des heuristiques et/ou des approches de résolution qui sont améliorées par rapport à celles développées précédemment comme l'illustrent (Heeman et al., 1996), (Purohit & Suryawanshi, 2013), (Chang et al., 2019), (Li et al., 2011), (Meyer & Floudas, 2006), (Castro, 2016) et d'autres.

Axe 3 : Type de décision

En fonction des variables de décision considérées, les résultats du modèle de pooling des travaux consultés peuvent entraîner :

- *Des décisions d'ordre opérationnel.* Il s'agit du cas où le PP *i*) se limite à l'optimisation des mélanges au niveau des deux étages (Floudas & Aggarwal, 1990 ; Cheng et al., 2018 ; Alfaki & Haugland, 2013 ; Adhya et al., 1999 ; Audet et al., 2004 et bien d'autres) ; *ii*) est associé à un problème de planification à court terme en amont (par exemple, fonctionnement optimal du déchargement du pétrole brut (Castro, 2016)) et/ou en aval (par exemple, planification à court terme du chargement de chaque UDPB (Heeman et al., 1996)); *iii*) s'inscrit dans le cadre d'un problème de gestion des stocks (par exemple, niveaux d'inventaire optimaux des réservoirs de stockage et de chargement (Heeman et al., 1996 ; Visweswaran, 2009)); ou *iv*) traite de l'optimisation des paramètres du procédé de fabrication (par exemple, la sélection des meilleurs points de coupe qui produisent la fraction souhaitée (Amos et al., 1997)).
- *Des décisions d'ordre tactique.* Elles concernent les PP ayant des conséquences importantes à moyen terme, comme la détermination des recettes optimales des produits intermédiaires pour une certaine période de temps. Dans ce contexte, Akkerman et al. (2010) ont développé un modèle mathématique qui vise, entre autres objectifs opérationnels et stratégiques, à sélectionner un nombre limité de produits intermédiaires permettant d'équilibrer les coûts des matières premières et des opérations de mélange. En suivant le mode opératoire du système productif étudié, ce processus de sélection est effectué quelques fois par an (mesure tactique).

- *Des décisions d'ordre stratégique.* Elles font suite aux travaux qui ont abordé les PP avec des résultats pouvant déboucher sur des actions ayant un impact à long terme. Par exemple, le modèle d'Akkerman et al. (2010) peut aider à décider du nombre de produits intermédiaires, ce qui devrait faciliter la discussion sur la stratégie de production globale, les investissements dans les équipements de transformation, les silos de stockage intermédiaire et la capacité de mélange. Le PP examiné par Li et al (2011) relève également d'un projet stratégique dans la mesure où il permet de traiter les qualités des flux de gaz et les différentes sources d'incertitude dans le développement des infrastructures et la planification à long terme de la production du gaz naturel. Un autre secteur connu pour son utilisation du pooling dans un contexte stratégique est celui du traitement des eaux usées. En effet, dans (Meyer & Floudas, 2006) ; (Misener & Floudas, 2010) et (Faria & Bagajewicz, 2012a, 2012b), les auteurs ont montré que le PP peut servir à la conception de réseaux de traitement des eaux usées car il peut aider à prendre certaines mesures stratégiques, comme la construction d'une station d'épuration et/ou d'un pipeline.

Axe 4 : Type du pooling

En indiquant la nature du pooling, il faut préciser si le problème évoqué est :

- *Un PP standard.* Il a été introduit pour la première fois par (Haverly, 1978) et s'agit d'un PP dont les taux de débit sont déterminés de manière à maximiser le profit (ou minimiser les coûts) sur une structure de réseau fixe prédéterminée composée de nœuds d'entrée, de nœuds intermédiaires et de nœuds de sortie correspondant respectivement aux matières premières (inputs primaires), aux réservoirs de stockage (inputs intermédiaires ou pools) et aux produits finis (outputs).
- *Un PP généralisé.* Dans cette deuxième catégorie de PP, qui a fait l'objet d'une attention considérable au cours des dix dernières années, les liens entre les réservoirs de stockage (c'est-à-dire les inputs intermédiaires) sont autorisés et la topologie du réseau est transformée d'une structure fixe prédéterminée en une structure non prédéterminée où les interconnexions entre les nœuds sources, intermédiaires et de sortie, sont à choisir de manière optimale. Ainsi, comme la décision de l'activation/désactivation des connexions entre les différents nœuds est modélisée par des variables discrètes, le PP généralisé est résolu par un programme mixte non

convexe (MINLP non convexe) avec des égalités et des inégalités quadratiques qui rendent difficile la recherche d'une solution globale optimale.

- *Un PP étendu.* Introduit par (Gounaris & Floudas, 2007), ce problème maximise le profit sur un réseau de PP standard tout en respectant les contraintes environnementales sur les émissions des carburants reformulés. En effet, conformément aux directives environnementales édictées par l'EPA (Environmental Protection Agency), ces dernières doivent être conformes aux normes, ou aux limites supérieures, sur les polluants organiques volatils, les oxydes d'azote (NO_x) et les émissions toxiques en suspension dans l'air.

Axe 5 : Caractéristique du mélange du premier étage

Dans le premier étage du PP, les inputs primaires sont mélangés pour produire les inputs intermédiaires en respectant une multitude de contraintes. À ce niveau, il convient de connaître les spécificités de ces contraintes et celles des inputs primaires :

Sous-axe 5.1 : Caractéristiques des inputs primaires. Ces inputs, désignés aussi par les termes « sources », « nœuds source », « matières premières » ou encore « stocks d'alimentation », peuvent, selon le domaine d'application considéré, correspondre : *i*) aux pétroles bruts qui se distinguent notamment par leur teneur en soufre (secteur pétrochimique : (Audet et al., 2004) ; (Amos et al., 1997) ; (Adhya et al., 1999) ; (Misener et al., 2010)...), *ii*) aux grains de céréales qui se caractérisent par plusieurs attributs de qualité tels que le pourcentage de protéines (secteur alimentaire : (Akkerman et al., 2010 ; (Kilic et al., 2013)), *iii*) aux champs de gaz naturel, à des puits individuels dans les champs de gaz ou simplement aux gaz naturels bruts qui sont essentiellement définis par leur pourcentage de méthane (secteur du gaz naturel : (Li et al., 2011)), *vi*) aux flux d'effluents d'un ensemble de sites industriels dont chacun est caractérisé par un % différent de contaminants (secteur du traitement des eaux usées : (Meyer & Floudas, 2006, 2010) ; (Ting et al., 2016)), *v*) aux scories et déchets d'aluminium (par exemple, les canettes de boisson usagées) qui sont caractérisés par leur teneur en métal (secteur du recyclage des matériaux : (Chang et al., 2019)).

Pour évaluer ces inputs, ce qui importe dans notre analyse bibliographique est de déterminer si ces inputs sont des matières premières (c'est-à-dire des éléments bruts qui n'ont subi aucune

transformation chimique) ou des matières composites (c'est-à-dire des produits industrialisés ayant été créés à la suite d'une série de procédés chimiques et/ou physiques) et si leur disponibilité est soumise à une limite ou pas. En ce qui concerne les articles traités dans cette revue, comme le montre clairement la grille d'analyse (cf. Tableau 19), la quasi-totalité des travaux qui y sont abordés ont trait à des inputs primaires qui sont des éléments bruts. Il convient de noter que, bien que les inputs primaires des articles traitant du recyclage de l'aluminium (Chang et al., 2019) et du traitement des eaux usées (Meyer & Floudas, 2006, 2010 ; Ting et al., 2016) - se référant respectivement aux déchets d'aluminium et aux effluents industriels - ne soient pas à proprement parler des matières premières, nous les avons considérées comme telles, car il ne s'agit pas de composites pouvant être produits par une quelconque industrie. Ceux-ci étant des déchets industriels sans valeur.

Sous-axe 5.2 : Contraintes du mélange du premier étage. Notre analyse documentaire a permis de déduire que – selon le mode de résolution (PP résolu en globalité ou divisé en deux sous-problèmes) et la formulation du pooling adoptés (la p-formulation, qui utilise des variables dédiées pour la concentration de chaque composant chimique dans chaque pool, ou la q-formulation qui n'utilise pas explicitement les concentrations qualitatives du pool comme variables, mais plutôt des variables indiquant la fraction que chaque input apporte par rapport au flux total entrant à chaque pool) – certains types de contraintes se retrouvent dans presque tous les PP. Cependant, selon le domaine d'application et la façon dont les auteurs perçoivent leurs systèmes, celles-ci peuvent être modélisées de différentes manières. Les principales contraintes liées au 1^{er} mélange du PP sont :

Contraintes de respect des spécifications chimiques des inputs intermédiaires. Ceci suppose que les spécifications chimiques des inputs intermédiaires sont des paramètres d'entrée du modèle. C'est le cas des articles ayant divisé le PP en deux sous-problèmes comme illustré dans (Akkerman et al., 2010) où les caractéristiques chimiques des inputs intermédiaires sont des paramètres connus et où le but du premier mélange est de sélectionner, parmi environ 70 inputs intermédiaires potentiels, ceux qui permettent de réduire les coûts.

Contraintes de quantités minimales et/ou maximales pour chaque input primaire. Dans ce contexte, deux types de contraintes peuvent exister selon qu'il s'agit :

- De la quantité partielle à prélever de chaque input primaire pour produire chaque input intermédiaire. Les auteurs peuvent alors imposer soit des quantités minimales lorsqu'une consommation minimale est requise afin qu'un input primaire puisse être utilisé (Gounaris et al., 2009 ; Misener & Floudas, 2009) ou lorsque le but est de formuler une contrainte de non-négativité (dans ce cas, la quantité minimale est de zéro) (Li et al., 2011) ; soit des quantités maximales lorsque l'utilisation d'un input primaire ne doit pas dépasser une limite supérieure en raison des exigences du système étudié (Visweswaran, 2009 ; Akkerman et al., 2010) ou soit les deux en même temps et tel est souvent le cas, puisque dans la majorité des articles du PP, les systèmes étudiés sont modélisés par un réseau de flux consistant en des nœuds et des arcs ; ce qui implique des contraintes de capacité sur les limites supérieures et inférieures que doivent respecter les flux traversant les dispositifs (convoyeur ou pipeline) qui relient les différentes unités (Misener & Floudas, 2010 ; Gounaris et al., 2009 ; Faria & Bagajewicz, 2012 ; Misener et al., 2011 et d'autres).
- De la quantité totale nécessaire de chaque input primaire pour produire l'ensemble des inputs intermédiaires. Dans ce cas, cette quantité est soumise à une limite supérieure qui peut soit refléter la disponibilité de l'input primaire (Audet et al., 2004 ; Li et al., 2011 ; Pham et al., 2009 ; Castro, 2016), soit la capacité de son réservoir de stockage, implicitement, ce deuxième cas suppose que la capacité de stockage est entièrement exploitée (Gupte et al., 2013 ; Cheng et al., 2018).

Contrainte du nombre maximal d'inputs primaires. Cette contrainte empêche le modèle PP d'utiliser plus qu'un nombre fixe d'inputs primaires pour produire un certain input intermédiaire. On retrouve cette contrainte dans (Castro, 2016) qui a développé un modèle de PP multi-périodes où, en raison de la structure organisationnelle de la raffinerie de pétrole étudiée, le nombre de flux entrants dans les pools (c'est-à-dire sortant des sources) est limité par une limite supérieure à ne pas dépasser.

Contraintes liées au processus de fabrication et autres. Plusieurs autres contraintes peuvent limiter le champ des mélanges possibles au niveau du premier blending de PP. Par exemple, dans (Heeman et al., 1996), en raison des règles opérationnelles résultant des caractéristiques techniques des processus de fabrication, si un pool (input intermédiaire) charge un terminal (output), il ne devrait pas y avoir de transfert de pétrole entre une source (input primaire) et un pool. Dans (Amos et al.,

1997), les mélanges d'inputs primaires doivent répondre à des spécifications physiques (par exemple, des limites de densité inférieure et supérieure).

Axe 6 : Caractéristique des inputs intermédiaires

Pour ce qui est des inputs intermédiaires, les termes « mélanges intermédiaires » et « bruts mélangés » sont parfois utilisés, mais souvent ils sont désignés par les réservoirs où ils sont stockés qui, dans un contexte général, sont appelés « pools », « stocks intermédiaires » ou « usines de mélange » (comme appelés par Gounaris et al., 2009). Ils peuvent, selon le domaine d'application considéré, correspondre : *i*) aux distillateurs (c'est-à-dire les UDPB) qui sont caractérisés par des spécifications chimiques (ex. % de soufre) et des propriétés physiques (ex. température du point de coupe) (Amos et al., 1997) ou aux réservoirs de chargement – où les pétroles bruts sont mélangés – qui sont implémentés en amont des UDPB (secteur pétrochimique : (Heeman et al., 1996) ; (Castro, 2016)), *ii*) à des produits semi-finis obtenus par prétraitement, mélange et mouture de diverses variétés de céréales (secteur alimentaire : (Akkerman et al., 2010) ; (Kilic et al., 2013)), *iii*) à des plateformes de production, des plateformes élévatrices ou de simples unités de mélange et de séparation (secteur du gaz naturel : (Li et al., 2011)), *vi*) aux usines de traitement, ayant chacune une technologie de traitement différente, ou aux stations d'épuration des eaux usées (secteur du traitement des eaux usées : (Meyer & Floudas, 2006, 2010) ; (Ting et al., 2016)), *v*) aux produits finis en alliage qui sont créés en refondant les produits recyclés avec de l'aluminium primaire et des éléments d'alliage (secteur du recyclage des matériaux : (Chang et al., 2019)).

Sous-axe 6.1 : Nombre des inputs intermédiaires. Le caractère fixe ou variable du nombre d'inputs intermédiaires est l'une des principales propriétés à noter dans notre analyse bibliographique. En effet, la littérature révèle que le PP est généralement associé à des objectifs opérationnels visant à trouver la composition optimale des inputs intermédiaires stockés dans des réservoirs, ou silos ou cuves, qui sont implantés au sein des usines de production ou des stations d'épuration (pour le traitement des eaux usées). Le nombre des pools est alors un nombre fixe représentant un paramètre d'entrée pour les modèles de PP. Certes, certains des PP peuvent être utiles pour décider du nombre d'inputs intermédiaires, lors, par exemple, de la recherche de l'investissement optimal à réaliser sur les silos

intermédiaires à construire (Akkerman et al., 2010) ou lorsqu'il s'agit de déterminer s'il serait rentable ou non de construire une station d'épuration des eaux usées (Misener & Floudas, 2010). Cependant, il est important de préciser ici que, même s'il s'agit d'un paramètre que l'on cherche à déterminer, en termes de modélisation, ce nombre de pools n'est pas une variable de décision. En effet, Akkerman et al. (2010), par exemple, ont présenté à la fin de leur étude une variante du PP consistant à faire varier, selon une approche paramétrique, le nombre de pools et à étudier l'impact de cette variation sur les coûts. Ils ont d'ailleurs constaté que pour satisfaire une variété d'environ 50 produits finis, le nombre optimal de pools pour minimiser les coûts est de 10. Si ce nombre descend en dessous de 10, les 50 variétés sont toutes réalisables, mais les coûts augmentent. En dessous de 7 pools, certains produits finis deviennent impossibles à obtenir.

Sous-axe 6.2 : Composition chimique des inputs intermédiaires en fonction du temps. L'objectif est de préciser si les coefficients de la composition chimique des inputs intermédiaires sont fixes (paramètres constants du modèle de PP), comme illustré dans les articles qui ont opté pour une résolution progressive en divisant le PP en deux sous-problèmes (Kilic et al, 2013 ; Floudas & Aggarwal, 1990), ou variables (variables de décision) auquel cas une distinction doit être faite entre : *i*) les variables de décision qui sont fixes dans le temps, c'est le cas le plus fréquent puisque 27 articles sur 29 traitent d'un PP à période unique, et *ii*) les variables de décision qui sont variables dans le temps, comme c'est le cas pour les modèles de PP à plusieurs périodes (Heeman et al, 1996 ; Castro, 2016).

Sous-axe 6.3 : Contraintes de conservation. Les PP consistent à trouver la composition optimale des inputs intermédiaires qui, d'une part, sont à obtenir par le blending de matières premières et, d'autre part, doivent être mélangés, selon des quantités bien précises, pour répondre aux spécifications des produits finis. Dans cette perspective de blending à deux étages, des contraintes de conservation autour des pools s'imposent. En effet, une résolution globale du PP fait intervenir deux contraintes de conservation : *i*) la contrainte de conservation de la masse (ou contrainte de bilan de masse) fait que la quantité des flux entrants dans les pools soit égale à la quantité des flux qui en sortent (équilibre quantitatif) et *ii*) la contrainte de conservation de la qualité assure que la composition chimique des flux entrants dans les pools soit équilibrée avec celle des flux sortants de ces pools (équilibre qualitatif). Mis à part (Floudas & Aggarwal, 1990), (Akkerman et al. 2010)

et (Kilic et al., 2013) qui ont opté pour une méthode de résolution par étages, tous les PP étudiés comprennent ces contraintes de conservation.

Sous-axe 6.4 : Contraintes de capacité des stocks intermédiaires. Dans de nombreux articles (Audet et al., 2004 ; Gounaris et al., 2009 ; Pham et al., 2009 ; Misener & Floudas, 2009 ; Visweswaran, 2009, et d'autres), la quantité totale de l'ensemble des inputs primaires entrant dans les pools, ainsi que la quantité totale de l'ensemble d'inputs intermédiaires sortant des pools (puisque ces dernières sont égales en raison de la contrainte de bilan massique) ne doit pas dépasser la capacité limite des réservoirs où sont stockés les inputs intermédiaires.

Axe 7 : Caractéristique du mélange du deuxième étage

Dans le deuxième étage du PP, les inputs intermédiaires sont mélangés pour produire les outputs en respectant une multitude de contraintes. À ce niveau, il convient de connaître les spécificités de ces contraintes et celles des outputs :

Sous-axe 7.1 : Contraintes du deuxième mélange. Tout comme dans le premier mélange, plusieurs contraintes peuvent limiter la libre utilisation d'inputs intermédiaires pour la fabrication d'un ou de plusieurs produits finis au niveau du deuxième étage de mélange. Les principales contraintes liées au blending effectué dans le deuxième étage sont :

Contraintes du nombre maximal d'inputs intermédiaires. Comme nous l'avons déjà expliqué dans (§2.2/axe6/sous-axe6.1), le nombre de pools est un paramètre constant. Cela dit, la limitation du nombre d'inputs intermédiaires peut être interprétée de deux manières différentes : soit toutes les intermédiaires existent déjà et l'objectif est d'en sélectionner un sous-ensemble qui sera maintenu pendant toute une période donnée (cas illustré dans (Akkerman et al., 2010)). Soit les inputs intermédiaires correspondent à des stations d'épuration et l'objectif est d'en sélectionner les quelques-unes à activer (cas illustré dans (Misener & Floudas, 2010)). Ce nombre, qui est le nombre total maximum de pools, ne doit pas être confondu avec le nombre maximum d'inputs intermédiaires à utiliser pour la production de chaque output. En effet, pour des raisons de simplicité opérationnelle, la direction de l'entreprise considérée dans (Akkerman et al., 2010) souhaite utiliser un nombre maximum de produits intermédiaires par produit final. Ce nombre est bien entendu inférieure au nombre total des pools.

Contraintes liées aux spécifications chimiques et/ou physiques des outputs. Ces contraintes, qui justifient la présence des termes bilinéaires, sont communes à tous les problèmes de pooling et exigent que les inputs intermédiaires soient consommés en quantités optimales permettant de respecter les spécifications chimiques des outputs. Ces spécifications peuvent se présenter sous la forme d'intervalles min-max (Li et al., 2011 ; Castro, 2016 ; Cheng et al., 2018 ; Alfaki & Haugland, 2013 ; Pham et al., 2009 ; Adhya et al., 1999 ; Audet et al., 2004 et plusieurs d'autres), comme il peut s'agir de valeurs précises à satisfaire de manière exacte (Kilic et al., 2013 ; Akkerman et al., 2010). Des spécifications physiques peuvent aussi être requises. Dans (Amos et al., 1997), en plus des exigences chimiques (% du soufre), les mélanges des inputs intermédiaires (pétroles bruts mélangés) doivent être conformes aux limites inférieure et supérieure de la densité spécifiée pour chaque output (produits pétroliers).

Contraintes liées au respect de la demande. Bien entendu, qu'il s'agisse d'une production pour stock ou à la commande, chaque output doit être produit en une quantité spécifique. Cette contrainte force alors la somme des quantités à prélever des inputs intermédiaires pour produire chaque output (ou le total des flux entrant aux réservoirs des produits finis) à être soit : *i*) égale ou supérieure à la demande (cas des PP où les outputs sont produits à la commande (Kilic et al., 2013 ; Cheng et al., 2018 ; Frimannslund et al., 2012 ; Purohit & Suryawanshi, 2013...)) ou *ii*) inférieure à la capacité des réservoirs de stockage des outputs (cas des PP où les outputs sont fabriqués pour stock (Gupte et al., 2013 ; Heeman et al., 1996 ; Alfaki & Haugland, 2014 ; Dey & Gupte, 2015...)) où à la quantité maximale vendable (Foulds et al., 1992). Dans certains articles, tels que (Gounaris et al., 2009), (Castro, 2016) et (Misener & Floudas, 2009), la quantité totale à produire d'un produit peut être bornée à la fois par une limite inférieure (la production minimale requise) et une limite supérieure (la demande maximale).

Contraintes de quantités minimales et/ou maximales de chaque input intermédiaire. Ces contraintes peuvent soit s'appliquer *i*) à la quantité totale que l'on doit prélever d'un input intermédiaire pour pouvoir couvrir toutes les demandes des outputs, soit *ii*) à la quantité partielle ou individuelle à prendre de chaque pool pour produire chaque output. Similairement à ce type de contraintes dans le premier mélange, cette quantité peut être soumise à une borne inférieure et/ou supérieure se référant respectivement au flux de masse minimal requis pour la mise en service des équipements reliant les pools aux terminaux (pipelines ou convoyeurs) et à la capacité de transport

de ces équipements (Misener & Floudas, 2010 ; Gounaris et al., 2009 ; Faria & Bagajewicz, 2012 ; Misener et al., 2011 et plusieurs d'autres).

Autres contraintes opérationnelles. Outre les contraintes mentionnées ci-dessus, certains des problèmes de pooling peuvent en inclure qui sont plus spécifiques. Pour citer quelques exemples, dans (Heeman et al., 1996), où un PP pétrolier est évoqué, la configuration du système de production ne permet pas à un réservoir de charge (pool) de charger plus d'un CDU (terminal) à une période t et impose que si un CDU est chargé par un mélange intermédiaire au moment $t-1$ puis chargé par une autre entrée intermédiaire au moment t , alors un coût de changement d'output doit être encouru. Dans (Akkerman et al., 2010), des contraintes de spécification d'outputs particulières peuvent être prises en compte puisque certains clients peuvent avoir des demandes bien spécifiques (par exemple, pourcentage minimum d'une matière première dans le produit final). En outre, pour certains produits finis, tels que le pain, l'utilisation de certains intermédiaires n'est pas autorisée. Kilic et al. (2013) ont évoqué une contrainte de capacité spécifique qui est relative à la capacité journalière de mélange.

Sous-axe 7.2 : caractéristiques des outputs. Ces outputs, désignés aussi par les termes « produits finis », « terminaux », « les mélanges finaux » ou encore « nœud de sortie », peuvent, selon le domaine d'application considéré, correspondre : *i*) aux UDPB (quand celles-ci ne sont pas considérées comme des pools ou, dans le cas contraire, aux stocks des produits pétroliers finis (secteur pétrochimique : (Audet et al., 2004) ; (Amos et al., 1997) ; (Adhya et al., 1999) ; (Misener et al., 2010), etc.), *ii*) à des produits finis à base de farine (secteur alimentaire : (Akkerman et al., 2010 ; (Kilic et al., 2013)), *iii*) à des usines de Gaz Naturel Liquéfié (GNL) qui produisent du GNL pour le transport à longue distance ou à des terminaux de gaz sec qui approvisionnent directement les clients finaux par gazoduc (secteur du gaz naturel : (Li et al., 2011)), *vi*) aux nœuds de puits se référant aux rivières dans lesquelles les eaux usées traitées se déversent (secteur du traitement des eaux usées : (Meyer & Floudas, 2006, 2010) ; (Ting et al., 2016)), *v*) aux produits finis en alliage qui sont créés en refondant les produits recyclés avec de l'aluminium primaire et des éléments d'alliage (secteur du recyclage des matériaux : (Chang et al., 2019)).

Par ailleurs, étant donné que le RB est principalement associé à des produits commercialisables, pour illustrer ses différences par rapport au PP, seuls les articles portant sur du pooling dont les

outputs se rapportent à des produits finis vendables seront examinés ci-après (il est inutile de s'attarder sur des articles dont les outputs correspondent par exemple aux rivières où les eaux usées traitées sont évacuées). Les principales propriétés qui nous intéressent concernant les outputs sont :

Lieu de production des outputs par blending. Il est important pour nous de connaître le lieu du mélange des produits finis, car cela nous donnerait une idée du lieu où la différenciation intervient et jusqu'à quel point cette différenciation est reportée dans la chaîne logistique. Dans ce contexte, toujours en se limitant aux travaux portant sur des outputs consommables, nous avons constaté que dans la totalité des articles consultés, les stocks des produits finis sont localisés au sein des sites de production ; ce qui signifie que la différenciation, assurée par le deuxième mélange du PP, a lieu à l'intérieur des usines de fabrication. Cela rejoint en fait la définition du problème standard de pooling qui, selon (Meyer et Floudas, 2006), vise uniquement à définir les flux optimaux devant traverser les équipements reliant les nœuds sources aux nœuds pools, les nœuds pools aux nœuds terminaux et les nœuds sources aux nœuds terminaux. Ces nœuds étant fixes, et en raison des flux entre les sources et les terminaux, ceci suppose clairement que les processus de mélange sont effectués à l'intérieur de l'usine de production.

Type des outputs. Il s'agit d'indiquer le degré de personnalisation des produits finis : *i)* standard, c'est-à-dire des produits fabriqués pour stock et dont les préférences des clients n'interviennent pas, *ii)* semi-personnalisé, c'est-à-dire des produits, moyennement adaptés, destinés à des marchés de niche et *iii)* sur-mesure, c'est-à-dire des produits purement personnalisés pour répondre aux attentes individuelles de chaque client. En ce qui concerne notre analyse documentaire, les outputs évoqués sont soit des produits standards (Heeman et al., 1996 ; Amos et al., 1997 ; Castro, 2016) soit des produits finis qui sont partiellement adaptés aux clients (Akkerman et al., 2010 ; Kilic et al., 2013).

Variété des outputs. Selon que le nombre de produits finis est inférieur à 10, compris entre 10 et 50, 51 et 100 ou supérieur à 100, la variété des produits est estimée respectivement comme étant petite, moyenne, forte ou très forte. Bien entendu, ce critère est positivement corrélé au degré de personnalisation. Par exemple, dans Kilic et al. (2013) où les produits finis sont semi-personnalisés, une assez grande variété de 45 outputs est prise en compte. Certains PPs ont couvert une variété moyenne d'outputs (16 et 18 outputs respectivement dans (Adhya et al., 1999) et (Chang et al., 2019)), tandis que le reste des articles se sont limités à une faible variété d'outputs (<10).

Axe 8 : Méthode de résolution

Lorsque des réservoirs intermédiaires de pooling sont nécessaires, le modèle du réseau des flux, par ailleurs linéaire, est transformé en un problème non linéaire fortement NP-difficile (Alfaki & Haugland, 2014). Ceci est dû au fait que sa relaxation continue est non convexe en raison de la présence de termes bilinéaires dans les fonctions contraintes. De ce fait, un très grand nombre de travaux de recherche ont porté sur la résolution des PP en essayant de développer des techniques d'optimisation globale efficaces sur le plan du calcul et faciles à mettre en œuvre. En effet, Foulds et al. (1992), qui ont considéré le PP comme un modèle inévitablement non linéaire, ont proposé une approche bilinéaire dans laquelle des approximations convexes des termes bilinéaires sont indiquées. Heeman et al. (1996) ont étudié la possibilité de linéariser le PP en remplaçant les termes bilinéaires par des flux de composants individuels. Adhya et al. (1999) ont proposé une nouvelle approche de relaxation lagrangienne permettant de définir des limites inférieures pour le PP. Par ailleurs, dans (Audet et al., 2004), les auteurs ont étudié la meilleure méthode pour appliquer un nouvel algorithme "branch-and-cut" de la programmation quadratique. Meyer & Floudas (2006) ont de leur côté élaboré un nouvel algorithme pour trouver la solution globale en utilisant les principes de la technique de « Reformulation-Linéarisation ». Ils ont évoqué une nouvelle reformulation linéaire par morceaux et l'ont appliquée à la classe des PP généralisés. En 2009, cette technique, ainsi que d'autres telles que la programmation linéaire successive, l'algorithme d'optimisation globale et d'autres approches basées sur les relaxations lagrangiennes ont été passées en revue par Misener & Floudas. Durant le même an, Pham et al. ont proposé une nouvelle approche qui repose sur trois concepts principaux : la linéarisation par discrétisation de variables non linéaires, le prétraitement en utilisant une énumération implicite de la discrétisation pour former une enveloppe convexe qui limite la taille de l'espace de recherche, et l'application de coupes entières pour assurer la compatibilité entre le problème original et la formulation discrétisée. Alfaki & Haugland (2014) ont développé une heuristique basée sur une méthode de construction gourmande qui, à chaque itération, résout un PP avec un seul output. À la suite des travaux de (Alfaki & Haugland, 2014), Dey & Gupte (2015) ont présenté des méthodes de discrétisation pour l'approximation interne du champ des solutions possibles et pour l'obtention de limites primaires satisfaisantes. Plus tard en 2016, Castro (2016) a présenté un algorithme spécialisé comportant des relaxations issues d'une désagrégation multiparamétriques. Ces

relaxations ont également été utilisées par Ting et al. (2016) et ont été complétées par une approche permettant de sélectionner l'ensemble de variables le plus pertinent à discrétiser. Plusieurs autres techniques pour résoudre les PP peuvent être trouvées dans la littérature (voir l'ensemble des méthodes identifiées dans notre revue de la littérature dans la grille d'analyse du Tableau 19).

Axe 9 : Critère d'optimisation

De manière générale, le critère d'optimisation considéré dans les problèmes de pooling est celui de la minimisation des coûts. Effectivement, Meyer & Floudas (2006) ont opté pour une fonction-objectif minimisant le coût global du traitement d'un ensemble de flux d'eaux usées tout en réduisant les niveaux de polluants dans les limites spécifiées par la réglementation environnementale. Misener & Floudas (2010) ont aussi visé la minimisation des coûts d'exploitation comportant les coûts fixes liés à l'activation d'un pipeline ou d'une usine de traitement et les coûts variables liés au débit de chaque pipeline et usine de traitement. Chang et al. (2019) ont orienté leur optimisation vers un critère d'optimisation plus simple consistant à réduire le coût des matières premières utilisées dans la production finale de l'alliage. Pour Kilic et al. (2013), l'objectif du PP est de trouver une solution optimale permettant de réduire le coût total quotidien comprenant les coûts associés à la mise en place, au traitement et au stockage des produits intermédiaires et au mélange des produits finis. Plutôt que de viser la minimisation des coûts, certains articles choisissent de maximiser la marge bénéficiaire. C'est le cas de (Foulds et al., 1992) ; (Li et al., 2011) ; (Dey et Gupte, 2015) et (Cheng et al., 2018) dont l'objectif d'optimisation est de déterminer les débits optimaux le long de tous les arcs du réseau de telle sorte à ce que le profit total soit maximisé. Pour Castro (2016), le PP étudié fait appel à deux objectifs alternatifs. Le premier est la maximisation de la marge brute totale provenant des mélanges de bruts distillés. Le second concerne la minimisation du coût total d'exploitation, en tenant compte des coûts d'attente des navires, des coûts de port pour le déchargement du pétrole brut, des coûts d'inventaire des réservoirs de stockage et de chargement, et des coûts de changement des colonnes de distillation. Ting et al. (2016) ont opté pour une fonction-objectif différente qui vise à minimiser le débit total traversant les unités de traitement (les pools). Par ailleurs, (Purohit & Suryawanshi, 2013) ont traité d'un problème de pooling multi-objectifs. L'objectif premier étant de contrôler le processus de mélange afin que les produits soient conformes aux spécifications exigées (critère de qualité). Une fois que

les produits sont conformes à ces spécifications, l'objectif secondaire est de minimiser l'écart entre les variables de décision considérées et leurs valeurs cibles.

N° Article	Auteur	Année	Secteur	Orientation	Type de décision	Niveau de product	Nature du produit	Mélange du premier étage										Mélange du deuxième étage										Type du Pooling	Méthode de résolution utilisée	Critère de résolution							
								Inputs primaires		Contraintes liées au premier étage				Inputs Intermédiaires (pools)				Contraintes liées au deuxième étage						Outputs						Coût	Qualité	Autre					
								Source	Disponibilité	Infinité	Spécifications chimiques	Incompatibilité	Quantités minimales et/ou maximales	Nombre maximal d'inputs pr. in.	Limites de fabrication et autres	Conservation des spécifications chimiques	Conservation de masse	Capacité des stocks intern.	Nombre d'inputs intern.	Composition chimique en fonction du temps	Nbre maximal d'inputs intern.	Spécifications chimiques et/ou physiques	Quantité demandée	Quantités minimales et/ou maximales	Incompatibilités	Capacité des stocks	Lieu de blending						Mono/Multi	Variété des outputs	Type d'outputs		
																																				Matériau première	Matériau composite
21	Purohit & Suryawanshi	2013	Industrie pétrolière	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Algorithme à gradient réduit (fonction objectif formulée sous la forme langrangienne augmentée en introduisant des multiplicateurs langrangiens et des paramètres de pénalité)	X	X	X
22	Gupte et al.	2013	Général	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Discretization strategies for a general BLP	X	X	X	
23	Ruiz et al.	2013	Général	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	An exact branch and bound algorithm by combining existing algorithms.	X	X	X	
24	Alfaki & Haugland	2014	Industrie pétrolière	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Heuristic Methods	X	X	X	
25	Dey & Gupte	2015	Général	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Mixed Integer Linear Programming techniques/ Heuristic	X	X	X	
26	Ting et al.	2016	Traitement des eaux usées	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Mixed Integer Linear Relaxations derived from multiparametric disaggregation	X	X	X	
27	Castro	2016	Industrie pétrolière	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	A source-based mixed-integer nonlinear programming formulation	X	X	X	
28	Cheng et al.	2018	Industrie pétrochimique	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Two new Multi-Commodity Flow formulations.	X	X	X	
29	Chang et al.	2019	Recyclage des matériaux	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Integrated Planning through Non Linear Programming	X	X	X	
Us	Benhamou et al.	2019	Industrie des engrais	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Non Convex Quadratic Programming	X	X	X	

Tableau 19. Grille d'analyse des articles sur les problèmes de pooling

2.3 Positionnement de ERB en tant que problème de mélange à deux étages

Alors que certains CBC ne peuvent qu'être produits de toutes pièces (RB), il est possible pour d'autres, selon les experts en chimie, de suivre le même processus des engrais mélangés, qui sont obtenus par le blending de composites chimiquement compatibles. Combiner ces deux modes de production (c-à-d. la version étendue du RB) peut présenter certaines similitudes avec le PP, mais notre analyse bibliographique nous a permis de repérer plusieurs éléments rendant notre approche de RB, sous sa version étendue, différente des problèmes de pooling classiques. Nous résumons ces différences dans les points suivants :

Source des inputs primaires. Dans les PP, les inputs primaires utilisés pour produire les mélanges intermédiaires sont des matières premières qui correspondent soit à des éléments bruts [ex., pétrochimie : hydrocarbure pour le pétrole (Misener et al., 2010), agroalimentaire : blé pour la farine (Akkerman et al., 2010)], des flux d'eaux usées [ex., traitement des eaux usées (Ting et al., 2016)] ou des métaux recyclés [ex., recyclage de l'aluminium (Chang et Jiyoun, 2015)]. En revanche, pour l'approche du RB, les inputs primaires à utiliser pour produire les CBC sont des matières composites qui peuvent être de nouveaux produits chimiques à concevoir et à produire. Par exemple, le sulfate d'ammonium et l'urée, composants utilisés dans la production d'engrais, sont des composites qui ne peuvent être extraits de la terre ou obtenus par l'agriculture. À l'inverse, le minerai de phosphate, le pétrole ou le blé sont des matières premières dont la liste des principaux composants communs est connue. Cela n'est pas le cas des matières composites, telles que le sulfate d'ammonium et l'urée, qui ne partagent pas les mêmes composants. Ainsi, leur combinaison dans la production d'un CBC peut être interdite et cette contrainte peut également empêcher la libre combinaison des CBC pour produire un engrais.

Nombre et degré de personnalisation des produits finis. Dans le contexte de la fertilisation raisonnée, qui est de plus en plus adoptée, la diversité des produits finis que nous visons à fournir est : *i*) largement supérieure à la diversité offerte dans les travaux étudiés (la diversité maximale que nous avons trouvée dans notre corpus de recherche s'élève à une cinquantaine de produits (Akkerman et al., 2010), alors que la diversité permise par l'approche du RB est de l'ordre de plusieurs centaines) ; *ii*) relative à des engrais sur-mesure, purement personnalisés, alors que dans les PP consultés, les produits finis sont généralement des produits standards ou dans certains cas semi-personnalisés (Akkerman et al., 2010 ; Kilic et al., 2013).

Nombre d'inputs intermédiaires. Comme le PP est utilisé pour modéliser les systèmes qui comportent des mélangeurs intermédiaires (pools) (Audet et al., 2004), le nombre "I" des inputs intermédiaires est généralement modélisé par un paramètre fixe qui est égal au nombre de pools installés dans l'usine de fabrication (Adhya et al., 1999 ; Alfaki, 2012 ; Audet et al., 2004 ; Floudas & Aggarwal, 1990 ; Meyer & Floudas, 2006 ; Misener & Floudas, 2010 ; Visweswaran, 2009). D'autre part, étant donné le stockage « sur-sol » des engrais granulaires, la taille "I" de la base canonique n'est pas limitée par le nombre de réservoirs disponibles. Il s'agit plutôt du nombre minimum de CBC nécessaires pour pouvoir produire n'importe quel engrais.

Configuration du réseau. Dans les problèmes classiques de pooling, la structure du réseau définissant les connexions entre les sources et les pools, les pools et les terminaux, et les sources et les terminaux est fixe et seuls les flux doivent être optimisés (Meyer & Floudas, 2006). Cela implique que les emplacements des processus de mélange sont fixés à l'intérieur des sites de production, ce qui n'est pas le cas dans notre approche de RB où de petites unités de blending doivent être installées en dehors des sites de production (près du consommateur final) et leur localisation optimale peut être déterminée dans le cadre de recherches futures. En effet, contrairement au PP, qui est généralement résolu dans un contexte opérationnel où il est adapté à la structure réelle de la chaîne logistique, le modèle du RB doit être exécuté à un niveau stratégique plutôt qu'opérationnel, car il porte sur le développement de nouveaux produits et doit alors être conçu dans une perspective à long terme. Nous constatons également que la plupart des PP introduisent des contraintes de capacité pour les nœuds (réservoirs) et les arcs (transport) qui ne relèvent pas du problème de la PM des engrais.

Contraintes d'incompatibilité. Lorsqu'il s'agit de matières composites par opposition aux matières premières, le PP doit être adapté pour tenir compte de nouvelles contraintes :

- Celles liées aux incompatibilités des matières composites : les matières composites à utiliser pour produire un CBC doivent être chimiquement et physiquement compatibles (ex. un composite d'urée ne peut pas être mélangé avec un composite de TSP (un mono-composant contenant 46 % de P_2O_5),
- Celles liées à l'héritage de ces incompatibilités : dans notre exemple précédent, pour produire un engrais, un CBC utilisant de l'urée ne peut pas être mélangé avec un autre utilisant du TSP.

Enfin, l'ERB prend en considération l'ensemble des spécificités mentionnées ci-dessus afin de créer autant de CBC que possible à partir de matières composites existantes (en utilisant l'AP (*Adapted Pooling*)), tandis que les CBC restants doivent être créés en tant que nouveaux composites en faisant appel au modèle standard du RB. Ce dernier qui vise à trouver de nouveaux CBC (nouveaux produits) à fabriquer complètement en utilisant une série de procédés chimiques est bien entendu différent du PP, qui lui n'implique pas la création complète des inputs intermédiaires, tous les processus de transformation étant des opérations de mélange. Les différences entre ces deux problèmes sont plus facilement identifiables dans la section suivante, où nous présentons la formulation mathématique des modèles de PP et APP (Le modèle du RB étant déjà proposé dans (Chap.3/§3.2))

3 Modélisation mathématique

Dans cette section, nous reprenons en (§3.1) le modèle classique de pooling, puis nous décrivons en (§3.2.1) la formulation mathématique du modèle AP, qui est un modèle de pooling adapté aux particularités du secteur des engrais. Dans (§3.2.2), nous présentons l'algorithme de résolution de cette version adaptée.

3.1 Modèle de Pooling

Nous présentons ci-dessous la formulation du problème classique de pooling proposée par Gupte et al. (2016). Cette version classique s'applique aux modèles impliquant des réseaux de flux composés de plusieurs arcs (dispositifs reliant les différentes unités du site de production) et de nœuds (réservoirs), ayant chacun une capacité maximale à ne pas dépasser. Cependant, pour faciliter la distinction entre le PP et notre problème, nous avons adapté cette version pour ne conserver que les contraintes gardant des similitudes avec le RB. Les contraintes liées aux capacités maximales sont éliminées et les variables de décision se rapportent maintenant à des quantités et proportions plutôt qu'à des flux d'arcs. Par ailleurs, dans les problèmes de PP, en plus des arcs reliant les inputs primaires aux pools (mélanges intermédiaires) et les pools aux outputs, il existe des flux qui relient directement les inputs primaires aux outputs ce qui n'est pas le cas pour ERB (cf. Figure 27).

Indices et paramètres

- I Nombre des pools (valeur constante).
- k Indice d'une matière première existante ($k = 1, \dots, K$).

- i Devient l'indice d'un input intermédiaire à créer par le mélange des matières premières existantes ($i = 1, \dots, I$).
- j Comme dans le CB (Classical Blending), j est l'indice de l'output (mélange final) ($j = 1, \dots, J$).
- φ_{kj} Le coût de l'envoi d'un flux unitaire sur l'arc reliant la matière première k au mélange final j .
- φ_{ki} Le coût de l'envoi d'un flux unitaire sur l'arc reliant la matière première k à l'input intermédiaire i .
- φ_{ij} Le coût de l'envoi d'un flux unitaire sur l'arc reliant l'input intermédiaire i au mélange final j .
- γ_{ck} Proportion du composant c dans le poids total de la matière première k .
- A_k Disponibilité de la matière première k , exprimée en poids (remplace A_i dans la formulation du BP).
- D_j Devient la demande maximale pour j .
- β_{cj}^{\min} Part minimale en % du composant c dans le poids de l'output j .
- β_{cj}^{\max} Part maximale en % du composant c dans le poids de l'output j .

Variables

- x_{ij} Devient la quantité de l'input intermédiaire i utilisé dans la production de l'output j .
- α_{ci} Part en % du composant c dans le poids total de l'input intermédiaire i .
- y_{ki} Quantité de la matière première existante k utilisée dans la production de l'input intermédiaire i .
- z_{kj} Quantité de matière première k expédiée directement pour être utilisée dans la production de l'output j .

Définition du problème

$$\text{Min}(\sum_{j,k} \Phi_{kj} \cdot z_{kj} + \sum_{k,i} \Phi_{ki} \cdot y_{ki} + \sum_{i,j} \Phi_{ij} \cdot x_{ij}) \quad (20)$$

S.c

$$\sum_i x_{ij} + \sum_k z_{kj} \leq D_j, \forall j \quad (21)$$

$$\sum_j x_{ij} = \sum_k y_{ki}, \forall i \quad (22)$$

$$\sum_j z_{kj} + \sum_i y_{ki} \leq A_k, \forall k \quad (23)$$

$$\sum_k \gamma_{ck} \cdot y_{ki} = \alpha_{ci} \cdot \sum_j x_{ij}, \forall c, i \quad (24)$$

$$\beta_{jc}^{\min} \leq \frac{\sum_k \gamma_{ck} z_{kj} + \sum_i \alpha_{ci} x_{ij}}{(\sum_k z_{kj} + \sum_i x_{ij})} \leq \beta_{jc}^{\max}, \forall j, c \quad (25)$$

Commentaires

- Relation (20) : Minimisation des coûts.
- Relation (21) : Contrainte de quantité de prélèvement maximale (la somme des quantités à prélever des matières premières z_{kj} et/ou d'inputs intermédiaires x_{ij} ne doit pas dépasser la demande D_j).
- Relation (22) : Contrainte de conservation des flux au niveau des réservoirs des inputs intermédiaires.
- Relation (23) : Contrainte de disponibilité des matières premières (les flux sortants des réservoirs de matières premières, qu'ils aillent vers les réservoirs intermédiaires ou les réservoirs de sortie, ne doivent pas dépasser A_k).
- Relation (24) : Contrainte de conservation de la composition chimique.
- Relation (25) : Contrainte des spécifications des outputs compte tenu des flux sortants des pools et des réservoirs de matières premières.

3.2 Modèle du Pooling Adapté

Après une présentation du modèle AP dans (§3.2.1), nous décrivons son approche de résolution dans (§3.2.2).

3.2.1 Formulation mathématique

Dans le AP, nous cherchons à utiliser le PP, dans la mesure du possible, pour produire le nombre maximum d'engrais J_1 pouvant être obtenus en mélangeant I_1 CBC fabriqués avec des matières composites existantes que l'on suppose disponibles. I_1 est un paramètre que l'on augmente progressivement jusqu'à atteindre la valeur la plus élevée possible de J_1 (cf. Figure 26 et §3.2.2).

Adaptation de la formulation du de pooling.

k Devient l'indice d'une matière composite existante (au lieu d'une matière première).

i Devient l'indice d'un CBC obtenu par le mélange de matières composites ($i = 1, \dots, I_1$) où I_1 est paramètre à ajuster (et non un paramètre fixe comme c'est le cas dans le PP)

Nouveaux paramètres

$\zeta_{kk'}$ Paramètre booléen égal à 1 si les matières composites k et k' sont incompatibles, et 0 sinon.

κ' Pourcentage minimal en poids d'une matière composite k utilisée pour produire un CBC, si cette matière composite est utilisée.

ε Valeur très faible (ex., $\varepsilon = 0.00001$).

Nouvelle variables

v_j Variable binaire égale à 1 si l'engrais j est produit et 0 sinon.

z_{ki} Variable binaire égale à 1 si la matière composite k est utilisée pour produire le CBC i et 0 sinon.

Définition du problème

$$\text{Max} \left[\sum_j v_j \right] \quad (26)$$

S.c.

$$\sum_i x_{ij} = D_j, \forall j \quad (2)$$

$$\left| \beta_{cj} - \eta_{cj} \leq \sum_i \alpha_{ci} \cdot x_{ij} / D_j \leq \beta_{cj} + \eta_{cj}, \forall c, j \mid \beta_{cj} > 0 \right. \\ \left. \sum_i \alpha_{ci} \cdot x_{ij} / D_j = 0, \forall c, j \mid \beta_{cj} = 0 \right. \quad (3')$$

$$\begin{cases} x_{ij} \leq M \cdot w_{ij} \\ x_{ij} \geq \kappa \cdot w_{ij} \cdot D_j \end{cases}, \forall i, j \quad (9)$$

$$\begin{cases} \sum_i x_{ij} \leq M \cdot v_j \\ \sum_i x_{ij} \geq \varepsilon \cdot v_j \end{cases}, \forall j \quad (27)$$

$$\sum_k \gamma_{ck} \cdot y_{ki} = \alpha_{ci} \cdot \sum_j x_{ij}, \forall c, i \quad (24)$$

$$\sum_j x_{ij} = \sum_k y_{ki}, \forall i \quad (28)$$

$$\begin{cases} y_{ki} \leq M \cdot z_{ki} \\ y_{ki} \geq \kappa' \cdot z_{ki} \cdot \sum_j x_{ij} \end{cases}, \forall k, i \quad (29)$$

$$z_{ki} + z_{k'i} \leq 1, \forall i, k, k' | k \neq k' \wedge \zeta_{kk'} = 1 \quad (30)$$

$$w_{ij} + w_{i'j} \leq 3 - \zeta_{kk'} \cdot (z_{ki} + z_{k'i}), \forall j, \forall i, i' | i' \neq i, \forall k, k' | k \neq k' \wedge \zeta_{kk'} = 1 \quad (31)$$

Commentaires

- Relation (26) maximise le nombre d'engrais qui peuvent être produits avec I_1 CBC pouvant être obtenus par le mélange de matières composites existantes ; I_1 étant un paramètre qui doit être le plus petit possible, AP est un problème quadratique paramétrique
- Relation (2) est prise du modèle de blending classique (Chap.3/§3.1), les relations (3') et (9) sont issues du modèle de RB (Chap.3/§3.2) et la relation (24), relation de conservation de la composition chimique, vient du modèle classique de pooling (§3.1).
- Relations (27) force v_j à être égale à 1 si l'engrais j est produit par le mélange des CBC, 0 sinon.
- Relation (28) est une contrainte de conservation de flux tirée du PP. Dans une optique de mélange à deux étages, les relations commentées ci-dessus concernent le premier étage et les suivantes, le deuxième étage.
- Relations (29), qui sont similaires aux relations (9), assurent $z_{ki} = 1 \Leftrightarrow y_{ki} > 0$ (c'est-à-dire que la matière composite k est utilisée pour produire le CBC i) et imposent que le pourcentage de la matière composite k dans le poids du CBC i dépasse une proportion κ' (par exemple, $\kappa' = 1\%$), si la matière composite k est utilisée pour produire le CBC i .
- Relation (30), visant à éviter l'inclusion de matières composites incompatibles dans la nomenclature d'un CBC, interdit l'utilisation de mélanges chimiquement incompatibles lors

de la création des granulés des CBC. Ainsi, si par exemple les deux matières composites k et k' sont incompatibles (i.e. $\zeta_{kk'} = 1$), alors ces composites ne peuvent être combinés dans le mélange produisant le CBC i (i.e. $z_{ki} + z_{k'i} \leq 1$, z_{ki} étant une variable binaire qui est égale à 1 lorsque le composite k est utilisé pour produire le CBC i). Ces incompatibilités ont été abordées dans (Chap.1/§1.4.3.4).

- Relation (31), visant à éviter l'inclusion de CBC incompatibles dans la nomenclature des engrais, permet de respecter les incompatibilités chimiques héritées du premier étage de mélange lorsque les CBC sont mélangés pour produire un engrais. Considérons le cas où les CBC i et i' utilisent respectivement des composites k et k' (impliquant $z_{ki} + z_{k'i'} = 2$), les deux CBC étant obtenus par mélange de matières composites compatibles. Lorsque ces deux composites ne sont pas compatibles ($\zeta_{kk'} = 1$), alors les CBC i et i' ne doivent pas être combinés dans la production d'un engrais j (impliquant : $w_{ij} + w_{i'j} \leq 3 - (z_{ki} + z_{k'i'}) \Leftrightarrow w_{ij} + w_{i'j} \leq 1$, w_{ij} étant une variable binaire qui est égale à 1 lorsque le CBC i est utilisé pour produire l'engrais j).
- AP étant un programme quadratique paramétrique, son algorithme de résolution est détaillé ci-dessous.

3.2.2 Algorithme de résolution

L'AP étant un problème quadratique paramétrique où l'on recherche la valeur la plus grande du nombre d'engrais pouvant être obtenus avec une base canonique de I_1 CBC (caractéristique quadratique) tout en maintenant I_1 à sa valeur la plus réduite possible (caractéristique paramétrique) (cf. Figure 26), l'algorithme suivant doit être utilisé pour trouver la solution optimale (taille optimale I_1 de la base canonique et les mélanges d'engrais optimaux, i.e.

$$x_{ij} / D_j, \forall j \in \Omega_1, i \in \mathcal{I}_1).$$

- 1 $I_1 = 0$
- 2 $J_1^* = 0$
- 3 $I_1 \leftarrow I_1 + 1$
- 4 *Solve the AP*
- 5 *If $J_1 > J_1^*$ then*

- 6 $J_1^* \leftarrow J_1$
- 7 *Go to 3*
- 8 *Else go to 9*
- 9 *Stop*

Nous nous servons de cet algorithme de résolution dans la section suivante où nous présentons une étude de cas illustrant la faisabilité de la version étendue du RB.

4 Études de cas

Une application de la version étendue du Reverse Blending (ERB) est fournie dans cette section. Son objectif, jeu de données et ses résultats sont respectivement décrits dans les sous-sections (§4.1), (§4.2) et (§4.3).

4.1 Objectif

Nous cherchons à travers cette étude de cas à illustrer la faisabilité de l'ERB en le testant sur l'échantillon des 700 besoins en NPK introduit dans le chapitre précédent, qui correspond aux besoins nutritifs des parcelles de certaines provinces du Maroc où la culture du blé est considérée comme intéressante. Un extrait de cet échantillon est donné dans le Tableau 6, la totalité des besoins étant dans le tableau complété (§Annexes - Tableau 1). Dans (Chap.3/§4.1.1), nous avons constaté qu'une base canonique de 8 CBC suffirait à satisfaire l'ensemble des 700 besoins NPK. Pour éviter que ces CBC ne soient irréalistes, ils ont été proposés par le RB tout en tenant compte d'un certain nombre de contraintes de composition garantissant que le % de poids d'un nutriment soit inférieur à un seuil fixe. Ceci dit, RB ne va pas plus loin au sujet de la faisabilité des CBC et le confie aux spécialistes de la chimie qui devraient effectuer des expériences en laboratoire pour trouver des réactions chimiquement stables permettant le développement des CBC proposés par le RB. Cependant, comme le développement de ces nouvelles réactions chimiques peut nécessiter de nouvelles matières premières et/ou de nouveaux procédés chimiques, nous avons décidé, avec le responsable de l'entité engrais au sein du département R&D de Jorf Lasfar (cf. Figure 28), le plus grand complexe d'engrais au monde, de créer une version étendue du RB dont l'objectif est de proposer des CBC dont la faisabilité peut être démontrée en utilisant uniquement des matières premières et des procédés de fabrication existants. Pour cela, nous avons créé la version ERB qui vise à proposer une base canonique dont un maximum de composites peut être fabriqué en mélangeant

(procédé de fabrication simple) des composites qui sont commercialisés dans le marché des engrais (matières premières existantes). En appliquant cette version sur les 700 besoins NPK, cette étude de cas a pour objectif de montrer qu'une grande variété de fertilisants peut être satisfaite avec des CBC pouvant être obtenus en mélangeant des composites disponibles sur le marché des fertilisants (ex. TSP, DAP, MAP...)

4.2 Jeu de données

Cette étude de cas portant sur la variété de 700 besoins en NPK, correspondant aux 482 formules personnalisées, déjà utilisées dans l'exemple d'application de la version standard du RB, ses caractéristiques chimiques (β_{cj}) ainsi que ses demandes en kg/ha (D_j) peuvent être consultées dans le Tableau 7.

Pour les autres données d'entrée qui sont spécifiques à l'ERB, à savoir les caractéristiques des matières composites (γ_{ck}) à partir desquelles les CBC seront produits et leurs incompatibilités ($\zeta_{kk'}$), nous avons choisi de ne considérer que les sept principaux composites NPK vendus dans le marché des engrais (cf. Tableau 20).

			Matière composite k						
			<i>filler</i>	Urea	TSP	KCl	MAP	DAP	Potas. nitrates
			$k=1$	$k=2$	$k=3$	$k=4$	$k=5$	$k=6$	$k=7$
Composition des matières composites (γ_{ck})									
Composant c	%N	$c=1$	0	46	0	0	11,2	18,3	13,0
	%P	$c=2$	0	0	46	0	55,0	46,4	0
	%K	$c=3$	0	0	0	60	0	0	46,0
	% <i>filler</i>	$c=4$	100,0	54,0	54,0	40,0	33,8	35,3	41,0
Matrice des incompatibilités entre les matières composites ($\zeta_{kk'}$)									
Matière composite k	<i>filler</i>	$k=1$	0	0	0	0	0	0	0
	Urea	$k=2$	0	0	1	1	0	0	0
	TSP	$k=3$	0	1	0	0	0	0	0
	KCl	$k=4$	0	1	0	0	0	0	0
	MAP	$k=5$	0	0	0	0	0	0	0
	DAP	$k=6$	0	0	0	0	0	0	0
	Potas. nitrates	$k=7$	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 20. Composition des matières composites (γ_{ck}) et de leur matrice d'incompatibilités ($\zeta_{kk'}$)

Lorsque $\zeta_{kk'} = 1$, nous considérons que les matières composites k et k' sont strictement incompatibles. Cependant, en pratique, le mélange de certaines matières composites, interdit

ci-dessus, peut en fait être toléré sous réserve de respecter des ratios spécifiques dépendant des composites utilisés et des conditions ambiantes. Comme nous ignorons actuellement les valeurs exactes de ces ratios (à déterminer par expérimentation), les incompatibilités limitées sont considérées comme strictes. Nous supposons que le processus industriel utilisé pour la production d'un CBC nécessite, pour toute matière composite k , une proportion minimale de $\kappa=1\%$ pour qu'elle puisse être utilisée dans la production d'un CBC.

4.3 Résultats et Commentaires

Tout d'abord, avec le modèle AP, nous avons déterminé les CBC optimaux, pouvant être créés à partir des matières composites du Tableau 20, qui maximisent l'ensemble Ω_1 des J_1 engrais réalisables ($J_1 = 626$ engrais). Ces 626 peuvent être obtenus par des mélanges compatibles de seulement 9 CBC.

Ensuite, nous avons utilisé le modèle RB pour définir l'ensemble optimal des CBC restants qui peuvent être utilisés, combinés avec les CBC trouvés par l'AP, pour produire l'ensemble Ω_2 des $J_2 = 74$ (700-626) engrais restants. À cette fin, seulement deux CBC supplémentaires doivent être créées ($i = 10$ et $i = 11$) (cf. Tableau 21).

			Extended Reverse Blending : CBC i à obtenir avec										
			Composites existants (Résultat du modèle AP)									Nouveaux composites à créer (Résultat du modèle RB)	
			$i=1$ (filler)	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$	$i=6$	$i=7$	$i=8$	$i=9$	$i=10$	$i=11$
Composant c	%N	$c=1$	0	46	0	18,30	37,05	20,25	12,64	31,27	12,60	13,31	75
	%P	$c=2$	0	0	46	46,40	15	0	0	22,23	2,64	14,12	0,75
	%K	$c=3$	0	0	0	0,00	0	35,90	46,39	0	42,67	48,58	10,71
	% filler	$c=4$	100	54	54	35,30	47,95	43,86	40,97	46,50	42,09	23,99	13,54

Tableau 21. Composition optimale des CBC de l'ERB (α_{ci})

Un extrait des quantités x_{ij} à prélever de chaque CBC i pour satisfaire chaque output j est présenté dans le Tableau 22 dont nous expliquons les conventions de couleur dans le paragraphe suivant, tandis que les quantités y_{ki} à prélever de chaque composite k pour produire chaque CBC i sont indiquées dans le Tableau 23. Le tableau complet des quantités x_{ij} est fourni dans (§Annexes - Tableau 7).

		Les CBC de l'Extended Reverse Blending											Demande (kg/ha) $\sum_i x_{ij} = D_j$	
		CBC de l'APP									CBC du RB			
		$i=1$ (filler)	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$	$i=6$	$i=7$	$i=8$	$i=9$	$i=10$	$i=11$		
Output j	$j=1$	26,36	156,45	0,00	4,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	187,50
	$j=2$	0,00	306,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	306,15
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	$j=362$	22,29	141,11	0,00	56,13	0,00	311,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	531,52
	$j=363$	22,61	0,00	151,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	284,54	212,59	0,00	670,89
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	$j=381$	254,37	0,00	78,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	324,93	48,11	0,00	705,63
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	$j=699$	0,00	247,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	247,46
	$j=700$	157,28	218,21	0,00	0,00	0,00	123,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	498,74

 Tableau 22. Les quantités optimales à prélever des CBC de l'ERB (x_{ij})

Le Tableau 22 montre que les CBC ont été utilisés en quantités minimales de $0,01 \times D_j$ kg/ha et que l'héritage des incompatibilités, forcé par la relation (31), a été effectivement pris en compte. Par exemple, étant donné que l'urée est non compatible avec le TSP ($\zeta_{2,3} = 1$), lorsqu'un CBC fabriqué à partir de TSP (cas de CBC 3) est utilisé pour produire un output, les CBC fabriqués à partir de l'urée ne doivent pas entrer dans la composition de cet output et vice versa. Nous avons utilisé le surlignage en couleur pour souligner le fait que si un CBC i est utilisé (surlignage vert), alors les quantités à prélever des autres CBC qui lui sont incompatibles sont nulles (surlignage rouge).

Le Tableau 23 montre que les quantités y_{ki} correspondent toutes à 100 % de la quantité totale requise pour chaque CBC ($\sum_k y_{ki} = \sum_j x_{ij}$), satisfaisant ainsi la relation (28). En outre, grâce aux relations (29) et (30), la proportion minimale κ fixée à 1 % pour tous les composites ainsi que les incompatibilités du Tableau 20 ont été prises en compte.

		Matière composite k							$\sum_k y_{ki} = \sum_j x_{ij}$
		<i>filler</i>	Urea	TSP	KCl	MAP	DAP	Potassium nitrates	
		$k=1$	$k=2$	$k=3$	$k=4$	$k=5$	$k=6$	$k=7$	
CBC i	$i=1$	100	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
	$i=2$	0,00	108230,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	108230,83
	$i=3$	0,00	0,00	5623,60	0,00	0,00	0,00	0,00	5623,60
	$i=4$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	49659,79	0,00	49659,79
	$i=5$	0,00	5044,22	0,00	0,00	0,00	2409,66	0,00	7453,88
	$i=6$	0,00	2701,88	0,00	0,00	0,00	0,00	9598,68	12300,55
	$i=7$	0,00	0,00	0,00	48,92	0,00	0,00	1726,20	1775,12
	$i=8$	17,54	270,32	0,00	0,00	0,00	264,82	0,00	552,68
	$i=9$	135,46	0,00	0,00	0,00	266,84	0,00	5153,16	5555,45
	$i=10$	Ces CBC seraient obtenus soit par création directe (nouvelles réactions chimiques),							
$i=11$	soit par mélange de nouveaux composites à créer								

 Tableau 23. Quantités optimales y_{ki} requises pour chaque composite k

Comme nous l'avons vu dans (Chap.3/§4.1.1.3), le RB a proposé une base canonique avec une taille de $I = 8$ CBC (y compris le *filler*) dont les combinaisons possibles satisfont pleinement aux exigences de 700 formules NPK. Par contre, si la faisabilité technique et chimique d'un CBC doit être assurée par le mélange de composites vendus sur le marché des engrais et ne présentant aucun risque d'incompatibilité chimique (en utilisant l'AP), le nombre " I " de CBC pourrait légèrement augmenter. En effet, en utilisant l'approche hybride de l'ERB, nous sommes passés de 7 CBC (RB standard) à 10 CBC (RB étendu) (cf. Tableau 21) dont nous sommes certains de pouvoir fabriquer au moins 8 formules de CBC ($i \in \llbracket 2, 9 \rrbracket$) sans avoir à investir dans le développement de nouveaux procédés chimiques et/ou l'approvisionnement de nouvelles matières premières. Dans les deux cas, 700 solutions d'engrais peuvent être offertes avec un maximum de 10 CBC. Ces résultats montrent qu'une solution réalisable assurant une massification maximale des flux peut être trouvée et rendue opérationnelle.

Conclusion

Nous concluons par un rappel des principaux résultats examinés dans ce chapitre. Tout d'abord, nous rappelons que contrairement au RB standard dans lequel la fabricabilité des CBC n'est pas considérée, le RB étendu a le souci de proposer une base canonique avec un maximum de CBC que nous sommes sûrs de pouvoir produire en mélangeant les composites (i.e. les inputs primaires) existants sur le marché, les incompatibilités chimiques entre ces composites étant bien prises en compte dans cette version du RB. C'est d'ailleurs à cause de ces incompatibilités,

que nous avons considérées de manière très strictes, qu'il est difficile de pouvoir trouver une BC avec des CBC pouvant tous être créés par mélange. Nous proposons ainsi dans l'ERB une approche hybride consistant premièrement à produire le plus grand nombre possible des engrais avec des CBC à produire par mélange (en utilisant le pooling adapté (AP)) et ensuite, dans un deuxième temps pour le reste des engrais qui ne pourraient pas être fabriqués par le pooling adapté (faute d'incompatibilités entre les composites primaires), à utiliser le RB pour trouver les CBC à produire de toute pièce et dont les combinaisons, avec les premiers CBC trouvés par le AP, permettraient de satisfaire la totalité des engrais souhaités. Cette définition du RB étendu est développée plus en détail dans la section 1 du présent chapitre. Dans la section 2, nous avons construit une grille d'analyse reposant sur neuf axes généraux qui a permis de détecter en quoi l'ERB et plus particulièrement le pooling adapté est différent du problème classique de pooling. Le pooling adapté se distingue du pooling classique sur plusieurs points que nous résumons en quatre caractéristiques principales : *i)* l'état industriel des inputs primaires, contrairement à leur état naturellement brut dans le pooling, rend impossible le mélange de certains inputs primaires en raison de leur incompatibilité chimique ; cela peut interdire le mélange de certains inputs intermédiaires pour produire un output dû à l'héritage de ces contraintes d'incompatibilité chimique, *ii)* le degré de personnalisation des produits dans notre approche est très élevé par rapport à celui des produits générés par les systèmes de pooling traités jusqu'à présent, *iii)* le nombre d'inputs intermédiaires est un paramètre variable à minimiser alors que dans le problème classique de pooling, il est fixe et représente le nombre de réservoirs intermédiaires installés dans le site de production et *vi)* le deuxième mélange, qui assure une différenciation personnalisée, est situé près du consommateur, à l'inverse du pooling classique où ce mélange est effectué au sein de l'usine. Ces caractéristiques différenciatrices sont encore plus visibles dans les modèles mathématiques présentés dans la section 3 et que nous récapitulons dans le Tableau 24. Ce tableau permet de facilement comparer entre le modèle du *Pooling* (identifié par P dans le tableau) et le modèle de *Adapted pooling* (identifié par AP dans le tableau).

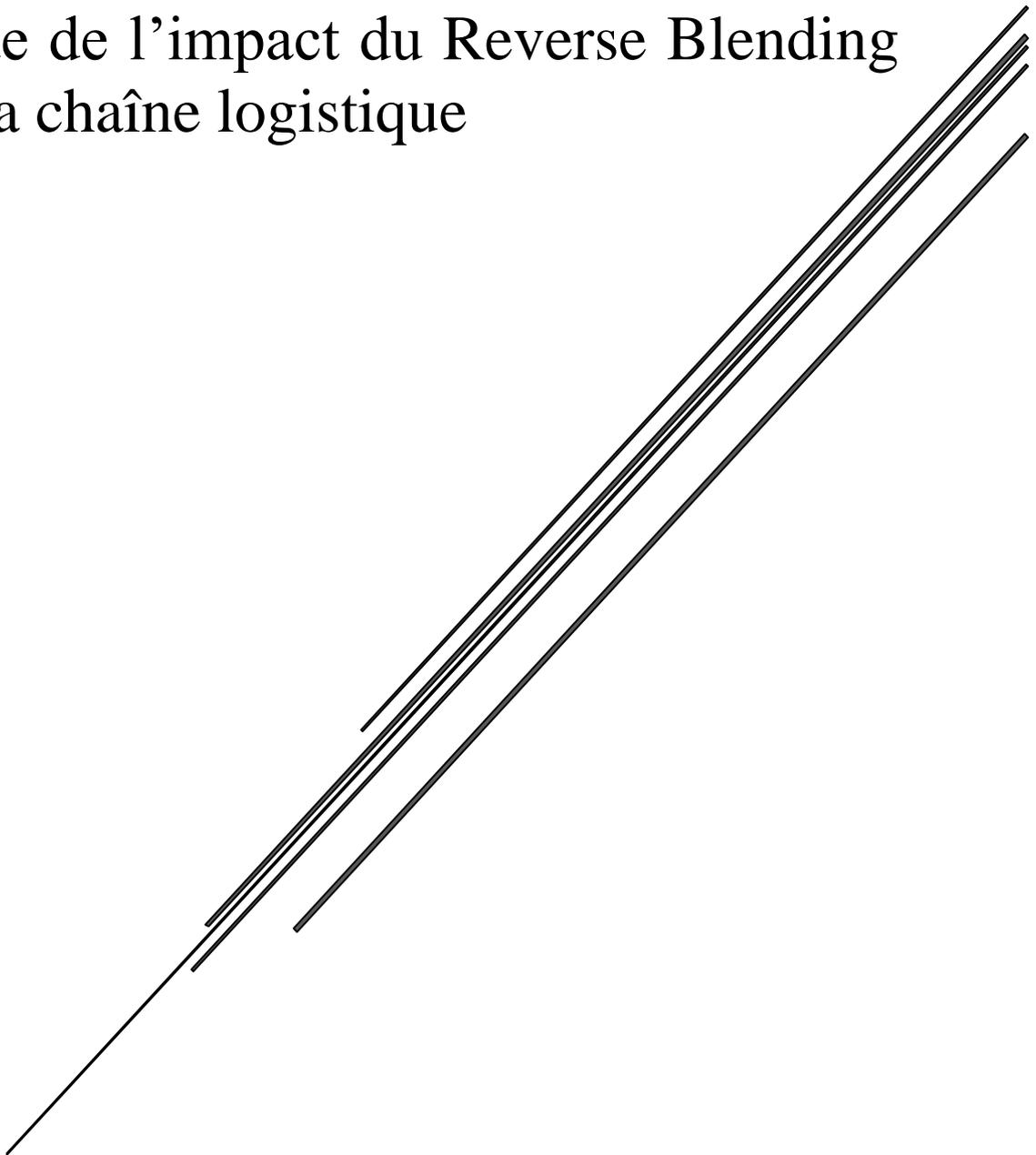
B	P	AP	Liste des indices	
X	X	X	j	Output ($j \in J; J = J$)
X	X	X	c	Composant chimique ($c \in C; C = C$)
X	-	-	i	Input existant (matière première) ($i \in I; I = I$)
-	X	-	i	Input intermédiaire ($i \in I'; I' = I'$), mélange d'inputs primaires. I' est un paramètre connu
-	-	X	i	Input intermédiaire ($i \in I'; I' = I'$), composite créé par mélange d'inputs primaires. I' est un paramètre à déterminer.
-	X	X	k	Input primaire ($k \in \mathcal{K}; \mathcal{K} = K$) : Matière première (pour P) ou composite existant (pour AP)
B	P	AP	Liste des paramètres	
X	X	-	β_{cj}^{\min}	Poids minimal en % du composant c dans le poids de l'output j
X	X	-	β_{cj}^{\max}	Poids maximal en % du composant c dans le poids de l'output j
-	-	X	β_{cj}	Poids requis en % du composant c dans le poids de l'output j
X	X	X	D_j	Quantité demandée de l'output j réelle (pour B) ou maximale (pour P) ou conventionnelle (pour AP)
X	X	-	A_i, A_k	Disponibilité (exprimée en poids) de l'input existant i (B) ou de l'input primaire k (P).
X	X	X	α_{ci}, γ_{ck}	Proportion du composant c dans le poids total de l'input i (B) ou dans le poids de l'input primaire k (P et AP)
-	X	-	$\phi_{ki}, \phi_{kj}, \phi_j$	Coût unitaire d'envoi d'un flux de k vers i , de i vers j et de k vers j
-	-	X	η_{cj}	Écart absolu maximal par rapport aux spécifications requises acceptables du composant c dans le poids total de l'output j
-	-	X	M	Constante élevée (Big M)
-	-	X	κ	Poids minimal en % d'un input intermédiaire utilisé pour produire un output, si cet input intermédiaire est utilisé
-	-	X	κ'	Poids minimal en % d'un input primaire utilisé pour produire un input intermédiaire, si cet input primaire est utilisé
-	-	X	$\zeta_{kk'}$	Booléen d'incompatibilité entre les composites correspondant aux inputs primaires k et k'
B	P	AP	Liste des variables	
X	X	X	x_{ij}	Quantité de l'input i (B) ou de l'input intermédiaire i (P et AP) utilisée pour produire l'output j
-	X	X	y_{ki}	Quantité de l'input primaire k utilisée pour produire l'input intermédiaire i
-	X	-	z_{ki}	Quantité de l'input primaire k utilisée pour produire l'output j
-	X	X	α_{ci}	Proportion du composant c dans l'input intermédiaire i
-	-	X	w_{ij}	Variable binaire qui est égale à 1 si CBC i est utilisé pour produire l'output j et 0 sinon
-	-	X	w_j	Variable binaire qui est égale à 1 si l'output j est produit et 0 sinon
B	P	AP	Fonction - objectif	
X	-	-	$\text{Min}(\sum_j \omega_i \cdot x_{ij})$	Minimisation du coût de production
-	X	-	$\text{Min}(\sum_{j,k} \phi_{kj} \cdot z_{kj} + \sum_{k,i} \phi_{ki} \cdot y_{ki} + \sum_{i,j} \phi_{ij} \cdot x_{ij})$	Minimisation du coût d'approvisionnement
-	-	X	$\text{Max}(\sum_j w_j)$	Maximisation du nombre d'outputs pouvant être produits
B	P	AP	Respect des contraintes de composition de l'output	
X	-	-	$\beta_{cj}^{\min} \leq \sum_i \alpha_{ci} \cdot x_{ij} / D_j \leq \beta_{cj}^{\max}, \forall c, j$	Contrainte linéaire
-	X	-	$\beta_{cj}^{\min} \leq [\sum_k \gamma_{ck} z_{kj} + \sum_i \alpha_{ci} x_{ij}] / [\sum_k z_{kj} + \sum_i x_{ij}] \leq \beta_{cj}^{\max}, \forall c, j$	Contrainte quadratique
-	-	X	$ \beta_{cj} - \eta_{cj} \leq \sum_i \alpha_{ci} \cdot x_{ij} / D_j \leq \beta_{cj} + \eta_{cj}, \forall c, j \beta_{cj} > 0$ $ \sum_i \alpha_{ci} \cdot x_{ij} / D_j - 0, \forall c, j \beta_{cj} = 0$	Contrainte quadratique
B	P	AP	Satisfaction de la demande	
X	-	-	$\sum_i x_{ij} = D_j, \forall j$	
-	X	-	$\sum_i x_{ij} + \sum_i z_{ij} \leq D_j, \forall j$	
-	-	X	$\sum_i x_{ij} = D_j \cdot w_j, \forall j$	
B	P	AP	Principales contraintes spécifiques	
X	-	-	$\sum_j x_{ij} \leq A_i, \forall i$	Contrainte de disponibilité des inputs
-	X	-	$\sum_j z_{kj} + \sum_i y_{ki} \leq A_k, \forall k$	Contrainte de disponibilité des inputs primaires
-	X	X	$\sum_j x_{ij} = \sum_k y_{ki}, \forall i$	Contrainte de conservation des flux des inputs intermédiaires
-	X	X	$\sum_k \gamma_{ck} \cdot y_{ki} = \alpha_{ci} \cdot \sum_j x_{ij}, \forall c, i$	Contrainte de conservation de la composition chimique
-	-	X	$\begin{cases} x_{ij} \leq M \cdot w_{ij} \\ x_{ij} \geq \kappa \cdot w_{ij} \cdot D_j \end{cases}, \forall i, j$	Contrainte d'utilisation minimale de l'input intermédiaire i dans l'output j si i est utilisé
-	-	X	$\begin{cases} y_{ki} \leq M \cdot z_{ki} \\ y_{ki} \geq \kappa' \cdot z_{ki} \cdot \sum_j x_{ij} \end{cases}, \forall k, i$	Contrainte d'utilisation minimale de l'input primaire k dans l'output intermédiaire i si k est utilisé
-	-	X	$\begin{cases} \sum_i x_{ij} \leq M \cdot w_j \\ \sum_i x_{ij} \geq (1/M) \cdot w_j \end{cases}, \forall j$	Contrainte forçant $w_j = 1$ si l'output j est produit
-	-	X	$z_{ki} + z_{k'i} \leq 1, \forall i, k, k' k \neq k' \wedge \zeta_{kk'} = 1$	Prise en compte des incompatibilités chimiques entre inputs primaires
-	-	X	$w_{ij} + w_{i'j} \leq 3 - \zeta_{kk'} \cdot (\sum_k z_{ki} + \sum_{k'} z_{k'i}), \forall j, \forall i, i' i' \neq i, \forall k, k' k \neq k' \wedge \zeta_{kk'} = 1$	Prise en compte de l'interdiction de mélange d'inputs intermédiaires, héritée de l'interdiction de mélange d'inputs primaires

Tableau 24. Tableau comparatif des modèles de deux variantes du blending double-étages

Dans la quatrième section, nous avons appliqué le RB étendu à l'échantillon des 700 besoins NPK correspondant à 482 formules NPK définies dans (Annexe1). Nous rappelons que dans le chapitre précédent nous avons testé le RB sur le même échantillon et avons trouvé que, en plus du *filler*, 7 CBC sont suffisants pour satisfaire les 482 formules et ce, bien entendu, sans prise en compte de la fabricabilité de ces CBC. Ici, dans le présent chapitre, en commençant d'abord par résoudre le modèle AP, nous avons trouvé que le maximum de formules que nous pouvons satisfaire avec des CBC pouvant facilement être obtenu par le mélange des composites existants est de 408 formules (soit 89 % des besoins). Pour satisfaire les 11 % des besoins restants, nous devons ajouter 2 CBC (trouvés par le RB standard) à créer de toutes pièces avec l'aide de la R&D. En effet, à l'instar de tous les projets stratégiques, en particulier ceux concernant la conception de nouveaux produits, investir en R&D est primordial. À ce stade de nos recherches, les coûts ne sont pas encore évalués. L'étude économique de ce projet et les investissements qui y seraient consacrés constituent l'une des principales perspectives de ce travail de recherche. Cependant, nous pensons qu'avec les économies qu'engendreraient la massification des flux permise par le RB, ces investissements seraient largement rentabilisés. Le chapitre suivant aborde les avantages potentiels de cette massification et son impact sur l'organisation de la chaîne logistique.

CHAPITRE 5

Étude de l'impact du Reverse Blending sur la chaîne logistique



Chapitre 5. Étude de l'impact du Reverse Blending sur la chaîne logistique

Introduction

Ce chapitre constitue la quatrième et dernière étape de notre méthodologie de recherche (cf. Figure 2), à savoir l'évaluation du Reverse Blending, solution proposée dans cette thèse comme nouvel outil de différenciation retardée dans la chaîne logistique des engrais. Nous étudions l'impact du RB sur la chaîne logistique de l'OCP. L'idéal serait d'expliquer en détail comment la standardisation du RB simplifie la production, le stockage et l'acheminement des engrais à l'intérieur et à l'extérieur du site de production de l'OCP, et de mener une étude économique comparative entre le mode de production actuel et celui basé sur notre approche. Afin de pouvoir plus particulièrement calculer les coûts de revient dans le cas de RB, il importe de disposer de tous les coûts afférents aux différentes charges de production fixes et variables. Cependant, comme nous ne disposons pas de ces coûts, nous nous limitons dans ce chapitre à l'étude des bienfaits et limites potentiels du RB dans une optique qualitative. Pour cela, dans la première section, nous rappelons d'abord l'organisation industrielle actuelle de l'OCP et ses principaux inconvénients, avant de présenter les caractéristiques de la structure industrielle que les producteurs d'engrais devraient adopter s'ils voulaient opter pour notre solution. Dans la deuxième section, nous présentons les avantages potentiels du RB et les illustrons par une étude de cas qui, à partir du programme de production 2019 de l'OCP, vise à déterminer comment ce programme aurait été exécuté si OCP avait utilisé le RB et à examiner ainsi les différents problèmes et pertes qu'il aurait pu éviter. Enfin, dans la troisième section, nous exposons certaines limites de l'approche du RB telle qu'elle a été introduite dans ce travail de recherche.

1 Organisation de la chaîne logistique et Reverse Blending

Afin de pouvoir avoir une vision claire de l'impact du RB sur la chaîne logistique de l'OCP, nous présentons dans (§1.1) la configuration industrielle actuelle de l'OCP tout en relevant les problèmes que celle-ci connaît à cause de la diversité avant de décrire dans (§1.2) la configuration industrielle de OCP dans le cas où il implémenterait le RB.

1.1 Configuration industrielle du groupe OCP avant implémentation du Reverse Blending

Le Groupe OCP intervient sur toute la chaîne de création de valeur de l'industrie des phosphates, depuis l'extraction et le traitement du minerai (matière première) jusqu'à la fabrication des engrais (produits finis), en passant par la production de l'acide phosphorique (produit intermédiaire). Pour la valorisation chimique de sa matière première, OCP dispose de deux centres de transformation chimique, à Safi et Jorf Lasfar, et en aura bientôt un troisième dans la ville de Laâyoune. Le site de Safi étant exclusivement axé sur la production du TSP, nous nous concentrons dans ce paragraphe sur le site de Jorf Lasfar, le plus grand site chimique de production d'engrais au monde. Ce dernier comprend huit entités de production de différentes structures juridiques, certaines étant entièrement détenues par OCP et d'autres étant des joint-ventures créées par l'OCP en partenariat avec d'autres pays. Chacune de ces entités est dotée d'une usine d'acide sulfurique, d'une usine d'acide phosphorique et d'une usine d'engrais où sont traités les acides sulfurique et phosphorique ainsi que d'autres matières premières. La Figure 28 présente une vue d'ensemble du site de Jorf Lasfar.

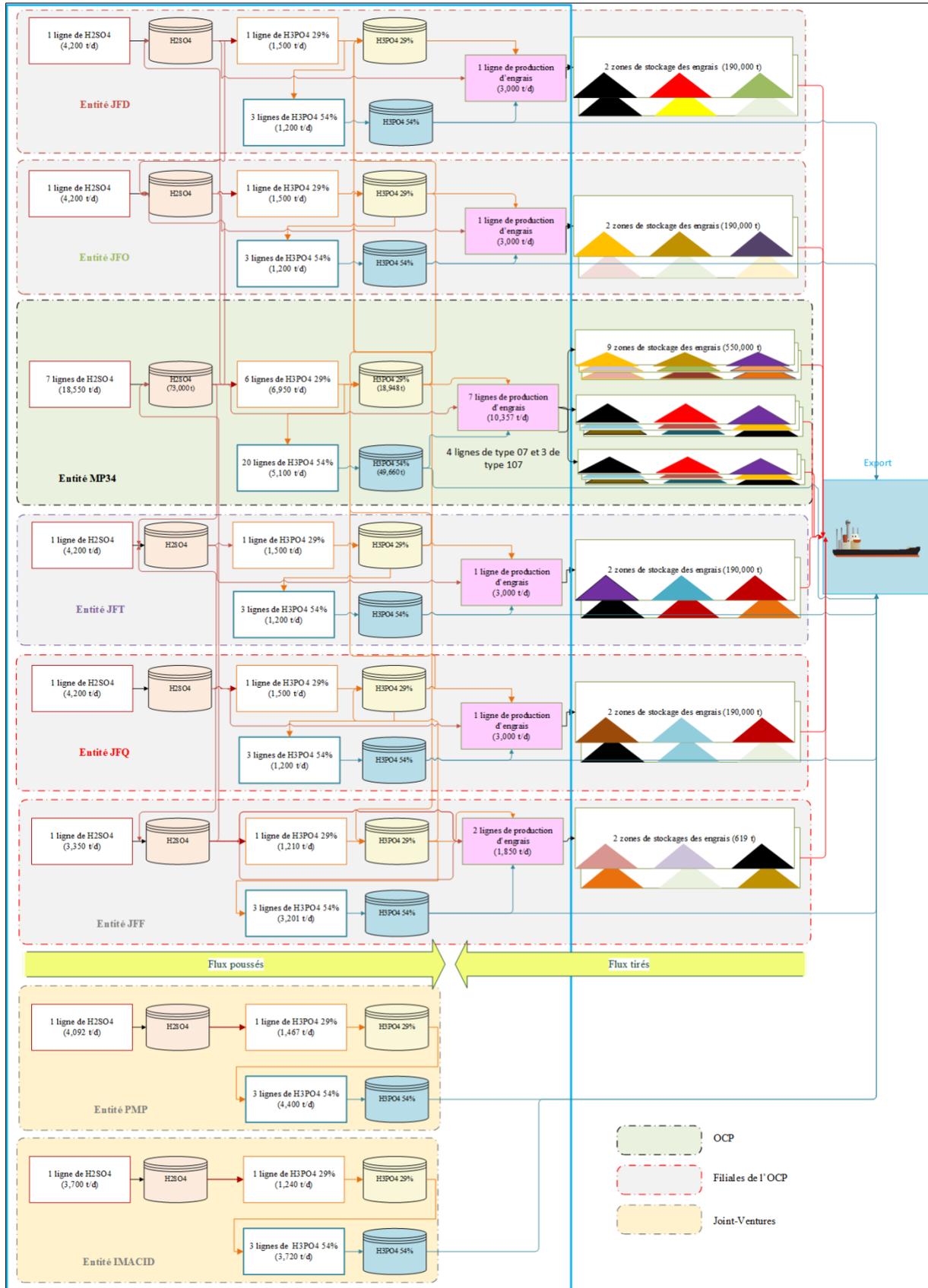


Figure 28 : Site chimique de Jorf Lasfar (source : Bara et al., 2020)

En nous limitant à la fabrication d'engrais, la chaîne logistique de l'OCP comprend 4 quais d'embarquement, 9 zones de hangars de stockage et un total de 13 lignes de production qui sont parallèles, hétérogènes et de différents débits de production (cf. Figure 29). Ces lignes de production permettent actuellement de fabriquer une cinquantaine de qualités d'engrais différentes, une diversité qui rend déjà difficile la gestion de la production au sein de Jorf Lasfar vu sa configuration industrielle entraînant 468 ($13 \times 9 \times 4$) chemins théoriques à traverser par une variété d'environ 50 flux. La majeure partie de cette variété correspond à des formules d'engrais standards, les autres étant des engrais spécifiques qui ont été produits suite aux demandes individuelles de certains clients. Comme le montre la Figure 29, les engrais standard sont expédiés aux distributeurs qui peuvent soit les vendre tels quels pour une utilisation directe, soit les mélanger pour avoir plus de variétés d'engrais. Cette dernière option de mélange permet une fertilisation plus efficace que la première, mais reste contestable d'un point de vue agronomique, car elle ne répond pas suffisamment bien aux besoins nutritifs des « sols×plantes ». Les engrais personnalisés remplissent les objectifs de l'agriculture durable mais sont plus coûteux du fait qu'ils induisent un coût supplémentaire de personnalisation. Le coût élevé des engrais personnalisés résulte du fait que la personnalisation des produits granulaires à travers un MTO intervient dès la phase de conception et se traduit au niveau des lignes de production par la fabrication successive de plusieurs petits lots de produits différents. Cela rend également très difficile la gestion de la planification et de l'ordonnancement des ordres de fabrication, du stockage et de l'expédition des engrais.

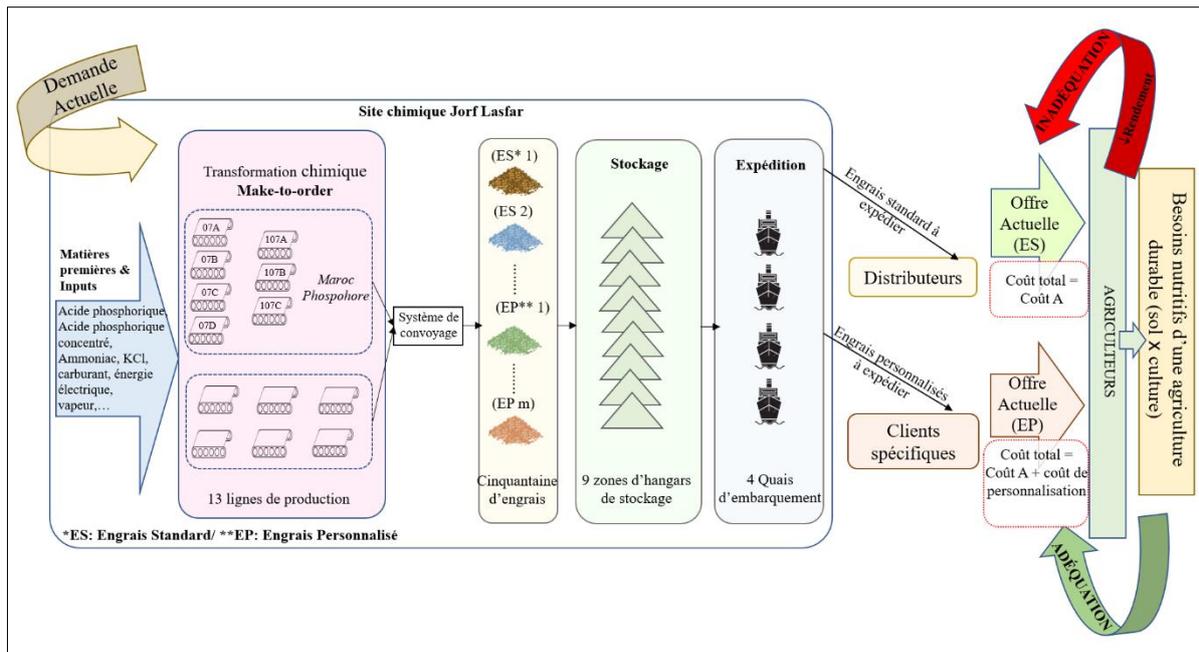


Figure 29 : Structure industrielle de la chaîne logistique de l'OCP depuis la valorisation chimique jusqu'à l'utilisation des engrais

En examinant de plus près le système de production du complexe Maroc Phosphore (détenu à 100 % par l'OCP), nous constatons que la diversité produite par le groupe OCP est à l'origine de plusieurs problèmes. Maroc Phosphore compte deux ensembles de lignes de production : 3 lignes « 107 » et 4 lignes « 07 » dont le débit de production est plus faible. En 2019, une diversité totale de 28 engrais a été produite sur ces lignes de production. La production journalière tout au long de cette année sur les sept lignes de production de Maroc Phosphore est fournie dans la Figure 30. La première observation que l'on peut faire à partir des courbes affichées dans cette figure est que la production journalière est très instable et fluctue d'une ligne à l'autre et d'un jour à l'autre. Cela est dû à la production sur commande entraînant le lancement irrégulier de différents petits lots. Une autre conséquence de cette situation est la diminution de la capacité de production, étant donné que la capacité nominale des lignes de production est souvent inexploitée (la production journalière étant souvent en dessous de la ligne verte dans la Figure 30). En outre, la production journalière en 2019 a été nulle pendant plusieurs jours, ce qui signifie qu'il y a eu plusieurs arrêts de production que nous pouvons expliquer entre autres par la saturation des stocks, les arrêts programmés (maintenance préventive) et surtout les arrêts dus aux temps de changement de formules d'engrais.

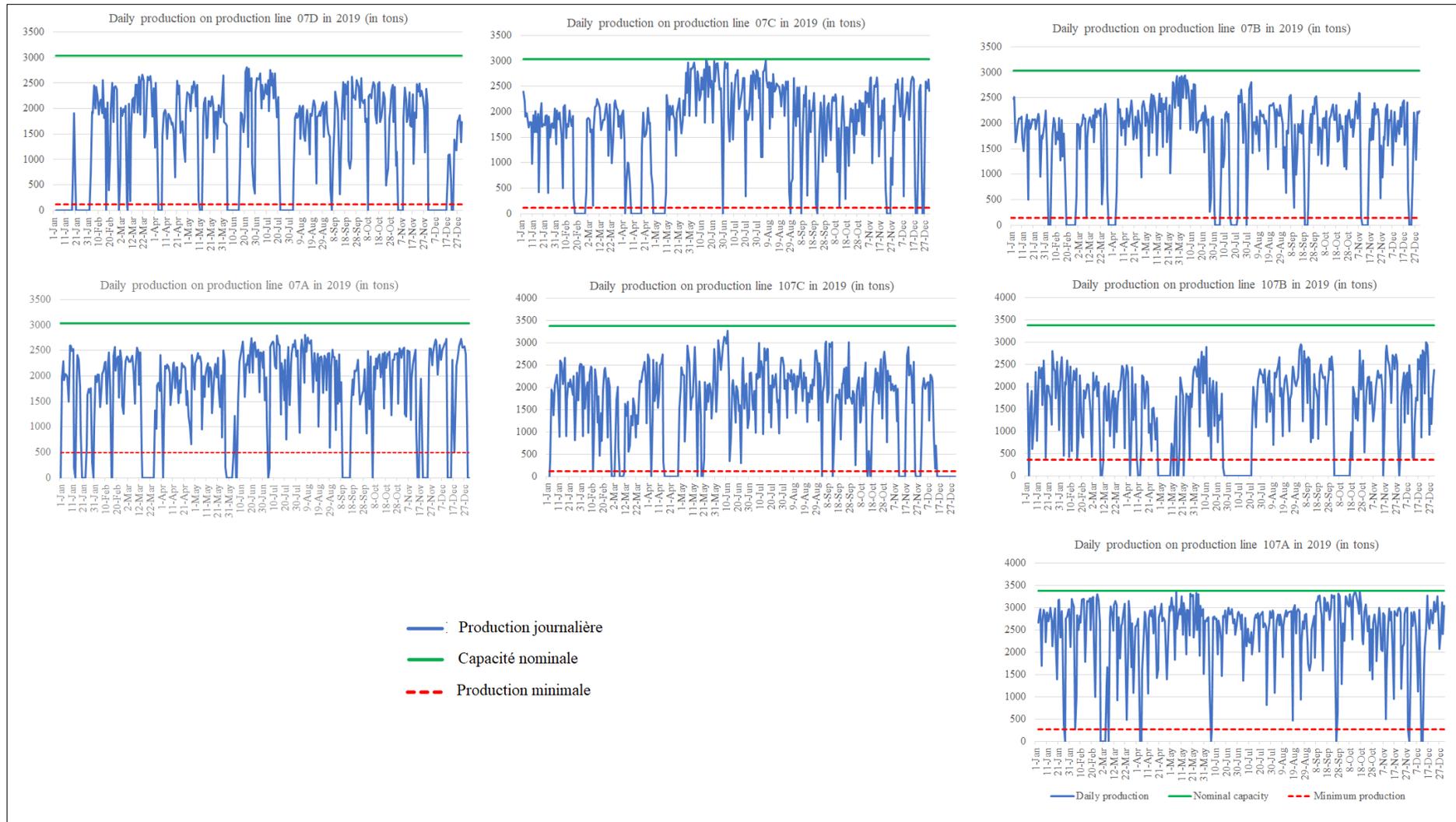


Figure 30 : Production journalière de l'OCF sur sept lignes de production en 2019 (source : OCF - Axe Nord de Jorf)

En effet, OCP supporte des coûts énormes et perd d'importants volumes d'engrais en raison des arrêts causés par les changements de séries, et ce en raison de son mode de production qui l'oblige à suivre un carnet de commandes de différents volumes de diverses qualités d'engrais. Pour basculer la production d'une formule à une autre, plusieurs activités doivent être réalisées à toutes les étapes de la production (par exemple, vider et nettoyer les équipements de production, modifier les paramètres de marche,...) dans un temps moyen de huit heures. Nous présentons dans la Figure 31 quelques scénarios possibles sur les activités à effectuer au niveau de chaque étape de production lors du changement de formule d'engrais.

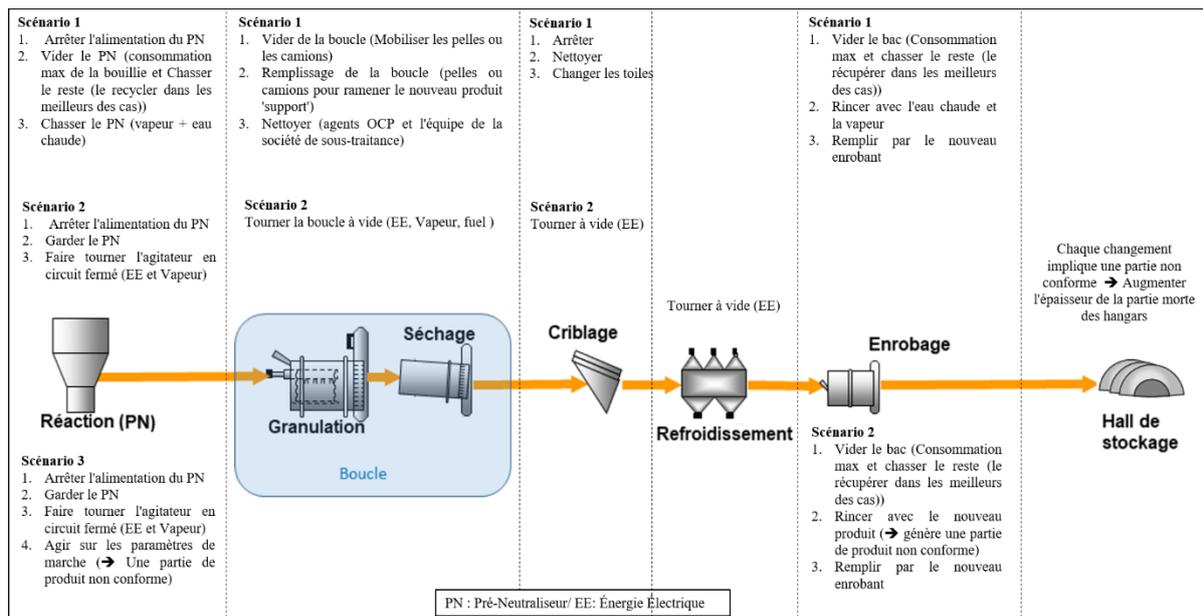


Figure 31 : Quelques scénarios d'activités liées au changement de formule d'engrais (source : adapté de Bara et al., 2020)

Les activités mentionnées dans la figure ci-dessus génèrent de lourdes dépenses liées, entre autres, à la main d'œuvre, au nettoyage sous-traité, au changement des toiles de criblage, à la consommation d'énergie électrique, de vapeur, d'enrobant, d'eau chaude, etc. Il est donc indispensable pour OCP de changer son mode de production s'il souhaite poursuivre sa stratégie de conquête de nouveaux clients en leur proposant des engrais personnalisés ; sinon le seul moyen pour y parvenir en personnalisant ses produits selon un mode de production MTO serait d'entreprendre des investissements importants sur ses infrastructures industrielles en créant notamment de nouvelles lignes de production et de nouveaux hangars de stockage, les actuels hangars de l'OCP étant confrontés à plusieurs problèmes dus à la diversité. Parmi ces problèmes figure la contamination des engrais causée par une mauvaise séparation des tas d'engrais. Par

exemple, le 6 juin 2019 à 7h00, 5 000 tonnes d'engrais NPK T15 ont été contaminées en raison de leur stockage sur les résidus du ramassage de l'engrais NPK 12-20-18 (cf. Figure 32).

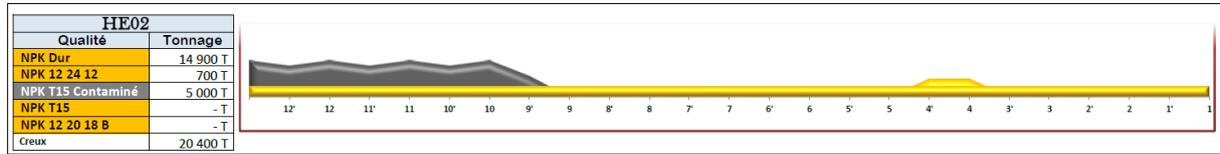


Figure 32 : État visuel d'un hangar de stockage à l'axe nord de Jorf à 7H00 du 06/06/2019 (source : OCP - Axe Nord de Jorf)

La saturation de certains hangars de stockage et les espaces vacants résultant du stockage de petits lots de production sont d'autres problèmes que rencontre l'OCP dans ses zones de stockage. En plus des problèmes liés à la production et au stockage, l'acheminement de plusieurs petits lots de produits différents vers les navires et leur chargement sur ces derniers posent de grandes difficultés, la segmentation des flux à distribuer devenant de plus en plus compliquée à mesure que la diversité augmente.

Pour remédier à ces limites, nous proposons à OCP une nouvelle organisation logistique basée sur le Reverse Blending, que nous détaillons dans ce qui suit.

1.2 Configuration industrielle du groupe OCP après implémentation du Reverse Blending

À l'instar de la structure logistique dont profite l'industrie des peintures pour soutenir la forte diversité de la demande portant sur des centaines voire des milliers de couleurs différentes, le bon fonctionnement du « Reverse blending » est conditionné par une chaîne logistique combinant un Make-To-Stock (MTS) (production à flux poussé des CBC) avec Make-To-Order (MTO) (production à flux tiré des engrais personnalisés). En effet, le principal impact du RB sur la chaîne logistique des engrais de OCP (qui s'étend de la valorisation chimique jusqu'à l'utilisation des engrais) est le passage d'une organisation basée sur le MTO à une organisation hybride MTS/MTO (cf. Figure 8). Ainsi, nous donnons d'abord une brève revue de la littérature sur ce mode d'organisation industrielle dans (§1.2.1) puis décrivons les principales composantes du système hybride MTS-MTO qu'implique le RB dans (§1.2.2).

1.2.1 Revue de littérature

Un producteur chimique qui utiliserait le RB bénéficierait d'un mode de production dans lequel très peu de CBC (produits communs) seraient fabriqués dans son site de production pour stock (MTS) avant d'être expédiés vers des unités de blending (points de vente) situées à proximité

du consommateur final, où tout produit personnalisé, répondant à une demande spécifique (MTO), pourrait être obtenu en mélangeant les composites de la BC selon la nomenclature appropriée.

Il existe une vaste revue de littérature évaluant la meilleure politique de production à adopter entre MTO, MTS et un système hybride MTS/MTO. Les conclusions d'analyses bibliographiques comparant ces trois modes de production sont les suivantes :

En général, MTS est utilisé lorsque la production est basée sur des prévisions de la demande (Kerkkänen, 2007 ; Sharda & Akiya, 2012), ce qui implique généralement la fabrication d'un nombre limité de produits standards à de faibles coûts de production. Cependant, même si cette approche permet de rationaliser les coûts de production, de réduire les délais de livraison aux clients, d'augmenter la capacité de production et de réduire les coûts liés aux temps de lancement, peu de systèmes productifs optent entièrement pour le MTS. Il est en effet indispensable d'être à l'écoute des clients et de répondre à leurs attentes pour que les entreprises puissent rester aujourd'hui compétitives (Kerkkänen, 2007). De l'autre côté, le MTO consiste certes à ne lancer la production qu'après réception de la commande du client, mais cela conduit à une assez grande variété de produits, à des délais de livraison plus longs et à des coûts de changement de séries plus élevés (Gupta & Benjaafar, 2004). Une solution alternative consiste à combiner ces deux approches dans un système hybride MTS/MTO, soit suivant une démarche hiérarchique (par exemple, priorité au MTO et recours au MTS pour le reste de la capacité de production (Agra et al., 2018), soit en stockant des produits semi-finis dans un entrepôt intermédiaire (MTS) avant de les assembler en fonction des commandes des clients (MTO) (Sharda & Akiya, 2012 ; Gupta & Benjaafar, 2004 ; Morikawa et al., 2014).

Le choix de la stratégie de production optimale est conditionné par plusieurs facteurs qui dépendent des caractéristiques des produits, des processus et du marché (Van Hoek, 2011) (ex., industrie de process (flux continu) ou d'objets (flux discret), variété de produits, expiration/contamination des produits, compétitivité du marché, structure de la chaîne logistique, procédés flexibles ou rigides...). Mais comme l'ont affirmé de nombreux chercheurs (Sharda & Akiya, 2012 ; Gupta & Benjaafar, 2004 ; Soman et al., 2004 ; Jewkes & Alfa, 2009), lorsque le contexte industriel est propice, le mode de production le plus efficace est celui basé sur un système hybride MTS/MTO en raison de sa capacité à fournir des produits personnalisés avec un délai d'exécution de commandes plus court (Jewkes & Alfa, 2009). Ce mode hybride consiste à développer des approches Lean basées sur l'efficacité, l'élimination des déchets, et la réduction des coûts dans les phases amont de la chaîne logistique et à concevoir des processus

agiles qui permettent de répondre rapidement aux changements de la demande en temps réel dans les phases aval (Fornasiero et al., 2015). Comme nous l'avons vu dans (Chap.2/§1.2.7), la différenciation retardée est considérée comme la meilleure solution. Néanmoins, pour réussir à la mettre en œuvre, il faut relever deux grands défis : *i*) trouver des points communs à une grande variété de produits afin de pouvoir concevoir une plateforme commune à laquelle des briques spécifiques peuvent être ajoutées pour obtenir des produits personnalisables (Tyagi, 2015) et *ii*) pouvoir reporter le point de différenciation des produits aux étapes en aval de la SC afin d'améliorer la réactivité à la demande des clients. Le RB répond à ces défis parce que, d'une part, il vise à fournir une plateforme commune solide qui peut servir une base étendue de produits personnalisés et, d'autre part, il assure une DR efficace et efficiente puisque la différenciation peut être effectuée à proximité des clients finaux, plutôt que sur les sites de production, dans de petites unités de blending qui peuvent produire, à des coûts similaires (par un processus commun de mélange), tout produit requis en utilisant la formule appropriée des CBC. Le RB peut ainsi devenir un levier clé pour la mise en œuvre réussie d'un système hybride MTS/MTO dans l'industrie chimique. Ses différentes composantes structurelles pour l'industrie des engrais sont décrites dans la sous-section suivante.

1.2.2 Organisation logistique impliquée par le Reverse Blending

La Figure 33 reprend le schéma de la structure d'une chaîne logistique utilisant l'approche du Reverse Blending.

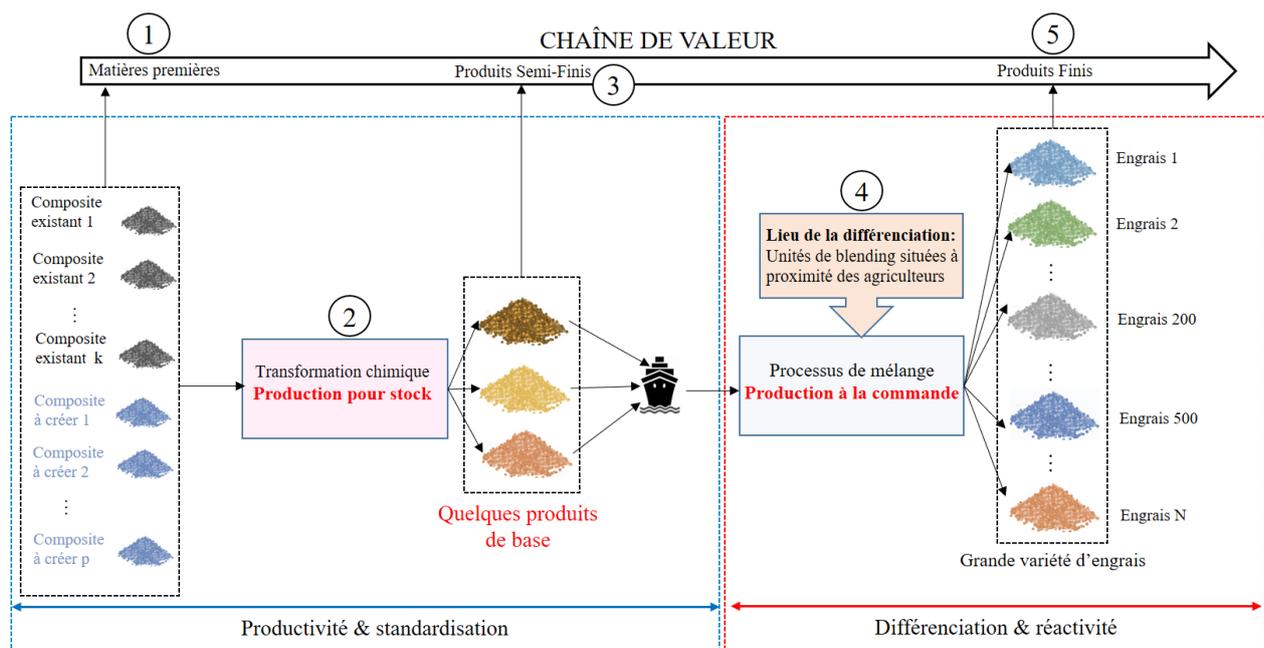


Figure 33 : Les cinq composantes principales d'une chaîne logistique basée sur le Reverse Blending

En se référant aux chiffres affichés sur cette figure, les principales composantes de cette chaîne logistique sont au nombre de cinq : les matières premières (composites considérés comme des matières premières puisqu'ils sont le premier input de toute la chaîne logistique) (1), le processus de transformation chimique (2), les produits semi-finis (3), le processus de différenciation (4) et les produits finis (5). Les 3 premières composantes se rapportent à l'usine chimique (partie encadrée en bleu sur la Figure 33), tandis que les deux dernières concernent l'unité de blending (partie encadrée en rouge sur la Figure 33).

1.2.2.1 Au niveau de l'usine chimique

La première partie de la Figure 33 (encadrée en bleu) repose sur la productivité et la standardisation parce qu'elle se rapporte à la production de quelques produits semi-finis (les CBC) qui sont fabriqués en grands volumes, permettant ainsi d'importantes économies d'échelle, et qui doivent constituer ensemble une plateforme standard commune pour l'ensemble des produits finis (engrais personnalisés). Cette partie de la chaîne logistique consiste à partir d'un ensemble de matières premières (§1.2.2.1.1) qui vont subir, selon une production pour stock, plusieurs transformations chimiques (§1.2.2.1.2) pour finalement en sortir avec un nombre réduit de produits de base (§1.2.2.1.3).

1.2.2.1.1 Matières premières

Les matières primaires, conventionnellement considérées comme des matières premières, utilisées dans la production des engrais sont en réalité des matières composites (par exemple, l'ammoniac (NH_3)), ne correspondant pas à des éléments bruts se trouvant dans la nature (par exemple, l'air comme source d'azote). Pour appliquer le RB, qui relève des problèmes de développement de nouveaux produits (*Product design*), il convient de distinguer entre deux types de matières composites, celles qui existent et celles qu'il faut créer.

1.2.2.1.1.1 Composites existants

Les composites existants se réfèrent aux matières premières actuellement utilisées, sous une forme réactive et soluble, pour la fabrication des engrais. Pour chaque nutriment, selon le processus d'industrialisation mis en œuvre, ces composites de base peuvent exister sous de nombreuses formes :

Pour l'azote, composant majoritaire de l'air sous forme de diazote N_2 (78 %), le composite constituant l'intrant primaire de pratiquement tous les engrais azotés est l'ammoniac (NH_3). Pour obtenir sa synthèse, les industriels font réagir le diazote (N_2) sur du dihydrogène (H_2) sous

haute pression et à haute température. Le N_2 est produit en extrayant l'azote contenu dans l'air tandis que H_2 est obtenu par la réaction du gaz naturel avec l'eau sous une forte pression et à haute température. Une fois créé, ce composite subi un certain nombre de procédés chimiques pour produire des matières fertilisantes azotées dont certaines peuvent être utilisées directement comme engrais en tant que telles (produits finis) et dont d'autres entrent dans la composition d'autres engrais finis en tant que produits semi-finis. Les composites solides les plus répandus dans la production des engrais azotés sont :

- L'urée est obtenue par combinaison de l'ammoniac et du dioxyde de carbone (CO_2). Elle contient 46 % de N (la plus dosée des engrais azotés solides) et doit se présenter en granulés ou en perles de calibre homogène pour assurer un épandage régulier (l'urée peut aussi être utilisée sous une forme liquide quand elle mise en réaction avec une solution de nitrate d'ammonium pour produire l'urée-nitrate d'ammonium (un engrais azoté liquide)).
- Le sulfate d'ammonium, un sel d'ammonium et d'acide sulfurique, est souvent dosé jusqu'à 21 % d'azote (sous forme d'ammonium) et contient environ 24 % de soufre (sous forme de sulfate). Il peut être soit cristallisé soit granulé et est généralement appliqué quand la plante est aussi en manque de soufre.
- Le nitrate d'ammonium est produit par réaction entre l'ammoniac et l'acide nitrique et est composé d'environ 34 % d'azote. Il est souvent appliqué sous une forme solide mais, grâce à sa forte solubilité dans l'eau, il peut également entrer dans la composition de plusieurs engrais liquides.
- Le nitrate de potassium est fabriqué en combinant le nitrate de sodium avec du chlorure de potassium et titre environ 13,5 % de l'azote et jusqu'à 45 % de potassium. Il peut ainsi être utilisé pour les plantes ayant une cadence à la fois pour l'azote et la potasse.
- Les composites nitriques, à base d'azote lié à l'oxygène (par exemple, nitrate de potassium), sont rapidement assimilables par les plantes mais ont tendance à disparaître rapidement du sol, alors que les composites ammoniacaux, à base d'azote lié à l'hydrogène (par exemple, sulfate d'ammonium), peuvent rester plus longtemps dans le sol mais doivent d'abord être minéralisés par les bactéries pour qu'ils deviennent assimilables par les plantes.

Pour le phosphore, élément provenant des gisements géologiques naturels de minerai de phosphate, la seule forme minérale sous laquelle il peut être assimilé par les plantes est P_2O_5 (anhydride phosphorique). Pour l'obtenir, le phosphate naturel doit subir une succession

d'opérations d'enrichissement afin de produire l'acide phosphorique — un composant intermédiaire, généralement obtenu dans un réacteur de phosphate naturel par attaque à l'acide sulfurique — utilisé en tant que matière première pour de nouvelles transformations chimiques donnant naissance à différents composites phosphatés dont les plus utilisés sont :

- Les superphosphates sont obtenus par traitement des phosphates naturels par l'acide sulfurique (cas du superphosphate simple (SSP)) ou l'acide phosphorique (cas du superphosphate triple (TSP)). SSP et TSP contiennent respectivement 16 % à 20 % et 35 à 48 % de P_2O_5 . Les superphosphates sont présentés sous forme de granulés.
- Le Phosphate monoammonique (MAP) (contenant 52 % de P_2O_5) et le phosphate diammonique (DAP) (contenant 46 % de P_2O_5) se fabriquent par traitement de l'acide phosphorique par de l'ammoniaque et sont souvent granulés (ils peuvent également être présents dans les engrais liquides). Leurs formules respectives sont 11-52-0 et 18-46-0.

Pour la potasse (ou potassium), minerai extrait des gisements de sel sous forme de chlorures ou de sulfates, la forme soluble et échangeable sous laquelle elle peut être absorbée par les plantes est l'oxyde de potassium (K_2O). Les composites potassiques couramment utilisés dans la production des engrais granulés sont :

- Le chlorure de potassium (KCl) est un sel pur contenant environ 60 % d'oxyde de potassium granularisé par compactage sous haute pression. Ce composite est compatible avec tous les types de sols et convient à la plupart des cultures. Il peut aussi se présenter en petites perles d'un diamètre compris entre 0,5 et 1,5 mm.
- Le sulfate de potassium, généralement produit en faisant réagir l'acide sulfurique avec le chlorure de potassium, est constitué de 50 % d'oxyde de potassium et d'environ 18 % de soufre. En raison de sa faible concentration en chlore (moins de 3 %), le sulfate de potassium est principalement dédié aux plantes excessivement sensibles à la présence du chlore (ex. tabac).
- Le nitrate de potassium, une source soluble de deux nutriments essentiels (l'oxyde de potassium (K_2O) et l'azote (N)), est obtenu en combinant le KCl avec du nitrate pouvant provenir du nitrate d'ammonium, de l'acide nitrique ou du nitrate de sodium. Ce composite titre 44 % à 46 % de K_2O et 13 % de N. Il est souvent utilisé pour traiter les grandes cultures, les légumes et les fruits.

L'ensemble de ces composites ainsi que leurs caractéristiques sont récapitulés dans le Tableau 25. En plus de ces composites, qui sont indispensables pour la fabrication d'engrais comprenant les principaux éléments nutritifs (azote, phosphore et potasse), et les produits intermédiaires qu'ils utilisent (acide sulfurique et phosphorique), il existe d'autres matières premières qui peuvent être exploitées dans l'industrie des engrais granulés telles que certaines substances nutritives entrant dans la composition des engrais calciques et magnésiens (fertilisants à nutriments secondaires) et les oligo-éléments.

Composites chimiques	Teneur en %				
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	Soufre
Composites mono-nutriments					
Ammonitrate	33.5				
Sulfate d'ammonium	21				24
Urée	46				
Suerphosphate simple (SSP)		18		18-22	12
Superphosphate triple (TSP)		45		3-14	1
Sulfate de potasse			48-50		17
Chlorure de potasse (KCl)			60		
Composites multi-nutriments					
Mono-Ammonium Phosphate (MAP)	11	55		2	1-3
Di-Ammonium phosphate (DAP)	18	46			
Ammonium Sulfo-Ososphate (ASP)	19	38			3-14
Nitrate de potassium	13		44	0,5	0,2
Nitrate de calcium	16			34	

Tableau 25. Principaux composites utilisés dans le secteur des engrais

Pour OCP, en se limitant aux lignes de production des engrais, les matières premières utilisées sont : l'acide phosphorique concentré à 54 % en P₂O₅, l'acide phosphorique concentré à 29 % en P₂O₅, l'acide sulfurique 98,5 % (H₂SO₄), l'ammoniac (NH₃), le chlorure de potassium (KCl), l'eau, le fuel, l'huile d'enrobage et le liquide de lavage.

1.2.2.1.1.2 Composites à créer

Les composites à créer correspondent à des matières composites qui n'existent pas mais qui doivent être développés pour servir de matière première à de nouveaux produits, la solution « Reverse Blending » que nous proposons, relevant d'une approche de conception de produit.

1.2.2.1.2 Processus de transformation chimique

Selon le responsable de l'entité des engrais du département R&D de l'OCP, la production, des produits de base (les CBC) à définir par le Reverse Blending, serait similaire à celle des engrais.

Par conséquent, même si l'obtention des CBC peut dépendre de nouveaux composites à créer, leur processus de production reste le même que celui des engrais granulés (cf. Figure 31) et se compose ainsi des étapes suivantes :

- Neutralisation/ Réaction : comme il peut exister divers procédés chimiques pour produire le même produit fini, cette étape de production dépend des matières premières disponibles et des équipements de production installés. En retenant le procédé de fabrication de OCP, la fabrication des engrais NPK est réalisée — suivant une température et un rapport molaire bien précis — en faisant réagir l'ammoniac gazeux avec les acides phosphoriques et sulfuriques de telle sorte à obtenir un mélange neutralisé de phosphate d'ammonium et de sulfate d'ammonium. Cette réaction prend lieu dans une cuve cylindrique (préneutraliseur) où les matières premières (l'ammoniac gazeux, l'acide phosphorique 54 % et l'acide sulfurique) sont mêlées par le moyen d'un agitateur vertical favorisant l'homogénéisation de la bouillie obtenue avec la densité voulue. Cette réaction de neutralisation étant exothermique, la chaleur qui s'en dégage fait augmenter la température jusqu'à environ 120 °C, provoquant ainsi l'évaporation de l'eau apportée par la dilution de l'acide phosphorique. La vapeur qui en résulte subit un lavage en utilisant une solution d'acide phosphorique 29 % pour récupérer l'ammoniac non réagi.
- Granulation : cette étape de production consiste à transformer la bouillie formée dans le préneutraliseur en un produit granulé suivant des dimensions très spécifiques. Pour ce faire, à l'intérieur d'un granulateur sous forme d'un tambour rotatif, la bouillie est pulvérisée sur un lit de recyclage sec dont le mouvement de rotation permet, grâce à une distribution uniforme sur la surface des granules, d'obtenir des grains durs, sphériques et assez uniformes. Les gaz générés lors de ce processus de granulation sont aspirés par un ventilateur et acheminés vers la zone de lavage.
- Séchage : après la granulation, les granules obtenus doivent subir un séchage rigoureux afin d'en éliminer une bonne partie d'eau et réduire leur taux d'humidité de 5,5 % à 1,5 %. Ceci permet d'éviter : *i*) les phénomènes de colmatage des systèmes poreux ou filtrant (par exemple, les appareils de broyage et de criblage) et *ii*) la prise en masse au niveau des hangars de stockage. L'opération de séchage est assurée en faisant passer, au-dessus des granules, des gaz chauds — provenant d'un four de séchage composé d'une chambre de combustion à fuel — dont la température est d'environ 150 °C à 200 °C. À la sortie du sécheur, la température de ces gaz diminue à 85 °C.

- Classification granulométrique : l'opération de classification consiste à séparer les produits dont la granulométrie est conforme aux exigences du marché (c.-à-d. les granulés ayant un diamètre compris entre 2 et 4 mm) de ceux qui ne le sont pas (c.-à-d. les granulés ayant un diamètre très petit (<2 mm) ou très grand (>4 mm)). Pour ce faire, un système de criblage, composé de 4 cribles, est mis en place afin de transmettre : *i*) les engrais commercialement conformes vers les cribles finisseurs, *ii*) les engrais fins vers la bande de recyclage, et *iii*) les engrais sur-granulés vers un système de broyage composé de 4 broyeurs où sont broyés ces engrais avant de rejoindre les granulés fins dans la bande de recyclage. Cette bande est dirigée vers le granulateur dans lequel les particules fines et grossières sont recyclées.
- Conditionnement du produit : le conditionnement des engrais granulés fait référence à leur *i*) refroidissement visant à refroidir les granules en les mettant en contact avec l'air ambiant ce qui permet de baisser leur température à 40/ 50 °C (leur température initiale étant de 82 °C), *ii*) enrobage consistant à enduire les granules par pulvérisation du fuel et/ou de l'huile d'enrobage, selon la référence d'engrais produite, afin d'éviter la prise en masse, la formation des poussières et l'absorption de l'humidité au niveau des hangars de stockage. Une fois enrobés, les engrais sont acheminés, par le biais d'un système de convoyage à bande, vers les zones de hangars de stockage.

1.2.2.1.3 Produits semi-finis

Dans la chaîne logistique qui recourt à l'utilisation du Reverse Blending, les produits semi-finis désignent les quelques CBC à partir desquels tout engrais personnalisé doit pouvoir être obtenu. Il s'agit de nouveaux produits intermédiaires dont la fabrication peut être assurée moyennant le mélange chimique (une réaction chimique) et/ou physique de composites existants et/ou de nouveaux composites à créer.

1.2.2.2 Au niveau de l'unité de blending

La deuxième partie de la Figure 33 (encadrée en rouge) permet une grande réactivité vis-à-vis des commandes des clients et ce, grâce à une différenciation retardée portée auprès du consommateur final. Par référence aux numéros apparaissant sur la Figure 33, nous donnons, dans ce qui suit, une explication des principaux points à savoir sur le processus de différenciation (§1.2.2.2.1) et les produits finis s'agissant ici de formules d'engrais personnalisées (§1.2.2.2.2).

1.2.2.2.1 Processus de différenciation

La différenciation, ou la personnalisation, est l'opération par laquelle l'engrais est adapté en fonction des exigences nutritives spécifiées dans la commande du client. Il s'agit alors d'un processus déclenché à la demande du client et qui s'effectue : *i*) à partir d'un nombre réduit de produits de base (les CBC), *ii*) par un simple processus de mélange dont la flexibilité permet une meilleure réactivité vis-à-vis de la demande de chaque client, *iii*) à travers une production locale dans de petites unités de blending situées à proximité des agriculteurs, comme celles déjà implantées un peu partout dans le monde, et *iv*) à des coûts similaires standard, la machine de blending étant un équipement commun utilisable pour la production de n'importe quel engrais granulé et ce en appliquant la nomenclature, couvrant les quelques produits de base, appropriée de chaque engrais personnalisé.

1.2.2.2.2 Produits finis

Les produits finis se rapportent ici aux formules d'engrais, dont la variété doit être très large pour que le recours au Reverse Blending soit aussi efficace et efficient que possible. C'est le cas des engrais conçus pour répondre aux besoins d'une fertilisation raisonnée consistant à personnaliser les fertilisants en fonction d'une multitude de variables (ex. climat, composition du sol, exigences nutritives des plantes, etc.). À l'issue de cette personnalisation, la demande en engrais peut porter sur des milliers de fertilisants ayant chacun des proportions différentes en termes des macronutriments (l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K)), des nutriments secondaires (le soufre (S), le calcium (Ca) et le magnésium (Mg)) et des micronutriments, dont les plus essentiels sont : le manganèse (Mn), le bore (B), le zinc (Zn), le fer (Fe), le cuivre (Cu) et le chlore (Cl).

En réalité, l'identité d'un produit fini dans le secteur des engrais granulés peut être associée à plusieurs caractéristiques telles que la formule chimique, la couleur et la taille des granulés. Cependant, comme l'apport nutritif est la raison d'être et la fonctionnalité principale d'un engrais, dans ce premier travail sur le RB, nous ne prenons en compte que l'aspect chimique des engrais, qu'ils soient considérés comme produits finis ou semi-finis.

Après avoir décrit les principales composantes d'une chaîne logistique faisant appel à l'approche du Reverse Blending, nous abordons dans la section suivante certains des principaux avantages potentiels de cette approche.

2 Avantages potentiels du Reverse Blending

Dans cette section, les avantages potentiels du RB sont d'abord abordés d'un point de vue stratégique (§2.1) avant d'être examinés au niveau opérationnel (§2.2). Une étude de cas destinée à examiner l'impact du Reverse Blending sur la gestion de la diversité produite par OCP à Maroc Phosphore est menée dans (§2.3) afin de mettre en évidence les avantages du RB en utilisant un exemple concret.

2.1 Avantages stratégiques

Les décisions auxquelles peut aboutir l'application du Reverse Blending (décisions relatives à la restructuration des processus et à la conception des produits) sont d'ordre stratégique et peuvent avoir des répercussions majeures à long terme sur l'OCP.

Pour commencer, le RB est en rupture avec les approches commerciales classiques où l'offre est proposée pour répondre à une demande existante. En effet, les études de marché ne sont pas une condition préalable à l'application du RB. Après tout, ce n'est pas parce qu'un produit n'est pas conçu pour répondre à une demande existante (un besoin exprimé) qu'il n'attirera pas de clients. Par exemple, dans le passé (les années 80), les consommateurs utilisaient des téléphones portables sans GPS, sans reconnaissance faciale ou d'empreintes digitales, sans technologie NFC...et ne savaient même pas qu'ils avaient besoin de telles fonctionnalités dans leurs téléphones. Pourtant, ces fonctionnalités sont aujourd'hui ce qui distingue les smartphones de la concurrence et ce qui fait ainsi augmenter les ventes. Dans le contexte des engrais, la demande d'engrais personnalisés n'est pas encore manifestée par les agriculteurs, mais la nécessité pour chaque agriculteur de recourir à des formules d'engrais adaptées est indéniable. En effet, la diversité que peut apporter le RB découle d'une personnalisation pure permettant, dans le secteur des engrais, des fertilisants plus adaptés et plus efficaces. Cela permettra aux agriculteurs de pratiquer une fertilisation raisonnée et ainsi d'augmenter leurs rendements agricoles et d'améliorer leurs revenus. Il n'y a donc aucun doute quant à la disposition des agriculteurs à se procurer des engrais totalement adaptés. Si à ce jour la demande d'engrais personnalisés est encore assez faible, c'est principalement en raison de leur coût très onéreux. Or, dans le cas d'une personnalisation assurée par une différenciation retardée locale d'un nombre réduit de CBC, la réponse à n'importe quelle demande est possible dans les mêmes conditions économiques. Les coûts de mélange des CBC dans des unités de mélange éloignées des sites de production de ces CBC ne dépendant pas du processus de mélange. De ce fait, le

RB permettrait des prix de vente abordables et les agriculteurs seraient ainsi disposés à les acheter, que la demande vienne d'eux ou non. Dans ce contexte *c'est l'offre qui crée la demande*.

Par ailleurs, le RB se veut en phase avec les trois principales stratégies business de l'OCP, à savoir sa stratégie d'innovation, sa stratégie commerciale et sa stratégie environnementale. Conformément à sa stratégie globale basée sur 4 piliers (innovation, personnalisation, éducation et Afrique), dans le cadre de sa stratégie d'innovation, OCP veille à mettre l'innovation au cœur de sa stratégie avec pour ultime objectif de proposer à ses clients "le bon engrais, dans la bonne quantité, au bon moment et au bon endroit". Ainsi, en favorisant la fertilisation raisonnée, RB tend vers le même objectif, celui de fournir aux agriculteurs le bon engrais à la bonne dose, tout en étant économiquement efficace grâce à une grande massification des flux. En outre, RB mise sur l'innovation en faisant appel à la R&D pour la recherche de nouveaux procédés chimiques permettant de créer les nouveaux CBC.

Dans le cadre de sa stratégie commerciale, OCP s'engage à réaliser des investissements importants afin d'accroître la diversité de son portefeuille de produits, de régions et de clients. Le projet stratégique de RB va exactement dans ce sens puisqu'il s'agit d'investir dans le développement de quelques nouveaux produits (CBC) qui : *i*) seront utilisés comme produits de base communs capables de donner lieu à une grande variété d'engrais adaptés aux besoins de plusieurs régions, *ii*) permettront de répondre à toute demande d'engrais par le même processus (mélange), rendant ainsi l'étude de la solvabilité du marché non nécessaire, *iii*) seront vendus à des prix avantageux, augmentant ainsi la satisfaction des clients ainsi que les parts de marché. C'est ainsi que le RB, une fois adopté, permettrait à l'OCP d'augmenter la diversité de son portefeuille de produits, de régions et de clients.

Quant à la stratégie environnementale d'OCP, celui-ci vise principalement à conserver sa position de leader de l'agriculture durable. À nouveau, le RB répond parfaitement aux besoins de cette stratégie. En effet, pouvoir répondre à des centaines de formules d'engrais personnalisées avec moins d'une dizaine de CBC (comme démontré en (Chap.3/§4.1.1)) permettrait de proposer aux agriculteurs africains des formules d'engrais équilibrées en nutriments à des prix très raisonnables. Cela les encouragera à les acheter et par conséquent à pratiquer une fertilisation raisonnée permettant de préserver la fertilité des sols sur le long terme et de maximiser le potentiel de l'agriculture africaine.

Enfin, nous pouvons dire qu'en plus de ses avantages économiques, le RB pourrait consolider l'image positive de l'OCP dans le sens où il supprimerait ou du moins réduirait les changements de séries au niveau de ses lignes de production, ce qui conduirait ainsi à une réduction de la

consommation d'énergie électrique, d'eau, de fuel, de produits chimiques utilisés pour le nettoyage...et donc permettrait à l'OCP de considérablement réduire son impact sur l'environnement.

2.2 Avantages opérationnels

Le RB est un projet stratégique impliquant des conséquences opérationnelles majeures et positives sur le terrain (Benhamou et al., 2020b, 2020c). En effet, le RB permettrait à l'OCP de produire pour stock (MTS) tout en répondant à des commandes spécifiquement personnalisées. En plus d'exploiter la principale force du MTO, grâce à une grande réactivité et à la prévention des pertes de ventes, la transformation organisationnelle requise par le RB offre plusieurs avantages opérationnels :

Au niveau de la production. Comme très peu de CBC seraient fabriqués (un ou deux CBC sur chaque ligne de production) au sein de l'usine chimique, la production serait en flux continu sans ou avec très peu de changements de séries (cela sera démontré par un exemple réel dans l'étude de cas de (§2.3)). Ces derniers entraînent en effet de nombreuses charges (cf. Figure 31) et peuvent provoquer des pertes de produits et de temps, des consommations supplémentaires d'eau et d'énergie, des charges importantes liées aux processus de nettoyage (ex. consommation de détergent), des eaux usées... (Gungor & Evans, 2017)). La réduction des temps de lancement est donc très importante pour répondre aux demandes des clients et atteindre les objectifs de productivité (Karam et al., 2018 ; Gungor et Evans, 2017 ; Ferradás et Salonitis, 2013 ; Meixell, 2005). Une production en flux continu d'un nombre réduit de CBC améliorerait considérablement la performance des lignes de production par rapport à une production en flux tiré impliquant de petites quantités d'une grande diversité de produits (par exemple, Grundermann et al. (2012) ont évalué l'impact de la transformation d'une production discontinue en production continue et ont conclu que cette transformation pourrait réduire l'utilisation de détergent et d'eau jusqu'à 95 %). La suppression des arrêts dus aux temps de lancement permettrait également d'augmenter la capacité de production et d'éviter de perdre des parts de marché au profit des concurrents. Par ailleurs, il est admis que la production pour stock entraîne des coûts de stockage élevés et comporte des risques que les commandes prévues ne se concrétisent pas (Agra et al., 2018 ; Karasu et al., 2014). Le RB élimine presque ces risques puisque les quelques CBC à stocker sont censés correspondre à une plateforme commune universelle pour tout engrais sur-mesure, ce qui assurerait une forte demande pour ces CBC.

Au niveau du stockage. Le mode de gestion des stocks serait aussi positivement influencé par le RB. Avec un système productif où chaque ligne de production est affectée à un/deux CBC, la gestion des hangars deviendrait également plus facile puisque chaque hangar pourrait être affecté à un/deux CBC. Cela éliminerait les problèmes de stockage causés principalement par une forte diversité tels que les espaces vacants dus au mode de production de l'OCP basé sur le lancement de plusieurs différents lots de petite taille, les produits contaminés en raison d'une mauvaise séparation entre les différentes qualités d'engrais (cf. Figure 32), les arrêts de la production en raison de la saturation des stocks, les zones de stockage mal gérées en raison de la saturation de certains hangars de stockage alors que d'autres présentent des espaces vides, etc.

Au niveau de la distribution. Les problèmes liés à la diversité au niveau des expéditions seraient également résolus grâce à la standardisation associée au RB. Le fait de produire très peu de CBC simplifierait les opérations d'acheminement en facilitant la segmentation des flux (puisque les mêmes CBC seraient utilisés pour tous les clients), réduirait les coûts liés au processus de nettoyage des convoyeurs, les coûts de livraison ainsi que tous les problèmes liés au chargement des produits sur les navires, pour n'en citer que quelques-uns.

Au niveau commercial. Le RB garantirait une grande flexibilité et une grande réactivité à la demande de chaque client. Cela augmenterait sensiblement la base de clientèle, d'autant plus que cette personnalisation serait plus rentable qu'une personnalisation basée sur la production à la commande. Dans ce cas, il n'y a pas de demande perdue et la satisfaction du client est optimale.

Pour résumer, le RB permet de bénéficier à la fois des avantages d'un MTS (c'est-à-dire faciliter la gestion de la production, du stockage et de la distribution, augmenter la capacité de production et réduire les délais de livraison aux clients) et des avantages d'un MTO (c'est-à-dire offrir des produits personnalisés et conserver un avantage concurrentiel), tout en supprimant leurs principaux inconvénients respectifs : les coûts élevés de stockage et les longs délais de livraison.

2.3 Impact du Reverse Blending sur la gestion de la diversité produite par OCP à Jorf

Cette étude est celle d'un scénario du remplacement de la production d'engrais de Maroc Phosphore à Jorf (le plus grand centre de production d'engrais en Afrique) en 2019, par une production de CBC dont le mélange permet d'obtenir exactement ces engrais. L'intérêt se porte alors sur les conséquences d'une réduction sensible de la diversité à produire sur l'organisation

de la production et du stockage, à la maille mensuelle. Cette étude ne vise absolument pas à proposer le remplacement des engrais existants mais à définir un scénario plausible d'une BC répondant techniquement à une offre commerciale d'engrais existante, dont le remplacement par une production de CBC ne présente guère d'intérêt.

OCP cherche à accroître sa part du marché mondial des engrais et à conquérir de nouveaux clients en leur offrant des solutions d'engrais personnalisées. Accroître la diversité de son portefeuille de produits est une stratégie que OCP poursuit depuis de nombreuses années. En effet, depuis 2000, OCP a décuplé la variété de ses engrais et vend aujourd'hui environ 50 engrais. La Figure 34 souligne l'évolution du nombre des engrais produits par le groupe OCP depuis 2000.

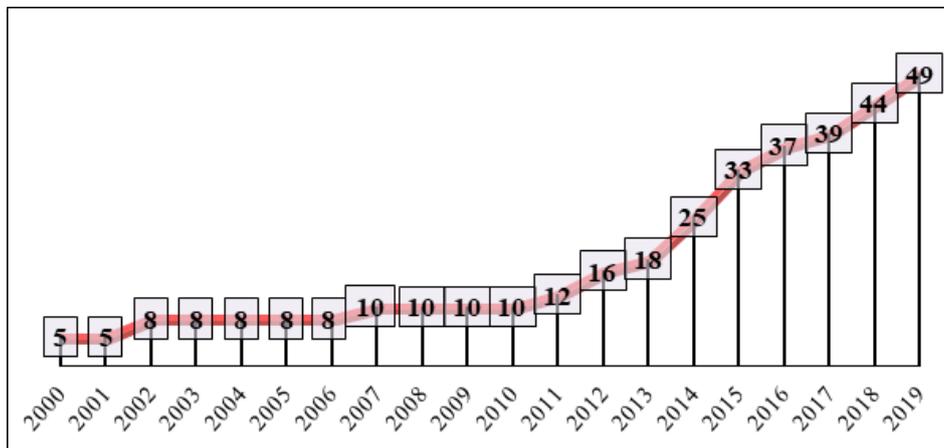


Figure 34 : Évolution du nombre d'engrais OCP depuis 2000.

Cette diversité croissante améliore l'agilité et la flexibilité, et conforte le leadership du Groupe. Cependant, dans une approche dominée par le MTO, plus la diversité est importante, plus il est difficile de gérer les flux au niveau de la production, du stockage et de la distribution. L'objectif de notre étude de cas est alors de montrer que les problèmes liés à la diversité produite par OCP pourraient être résolus par le RB à travers un passage d'une production MTO à une production MTS. À cette fin, nous partons du programme de production quotidienne de l'OCP en 2019 et cherchons la composition optimale des CBC qui satisferaient ce programme avant d'examiner comment la production et le stockage seraient organisés si la production d'OCP en 2019 aurait été réalisée en utilisant le RB.

2.3.1 Jeu de données

Pour cette étude de cas, nous partons du programme de production quotidienne de l'OCP sur 7 lignes de production (4 lignes 07 et 3 lignes 107) en 2019. Sur ces sept lignes, OCP a produit cette année $J = 28$ engrais composés, en plus du *filler*, de cinq composants (N, P, K, B_2O_3 (bore) et Zn (zinc)). Les spécifications chimiques de ces composants (β_{cj}) et les volumes totaux mensuels produits (D_j) figurent dans le programme de la production mensuelle donné dans le Tableau 26. Nous appliquons d'abord le modèle RB à cet ensemble de données annuelles avant d'analyser ses résultats sur un maillage mensuel. La production annuelle de l'OCP est indiquée dans le Tableau 27.

Mois	Référence Engr.	Les spécifications chimiques β_{cj} (en%)						Volume produit (tonnes)	Mois	Référence Engr.	Les spécifications chimiques β_{cj} (en%)						Volume produit (tonnes)	Mois	Référence Engr.	Les spécifications chimiques β_{cj} (en%)						Volume produit (tonnes)
		N (c=1)	P (c=2)	K (c=3)	S (c=4)	B ₂ O ₃ (c=5)	Zn (c=6)				N (c=1)	P (c=2)	K (c=3)	S (c=4)	B ₂ O ₃ (c=5)	Zn (c=6)				N (c=1)	P (c=2)	K (c=3)	S (c=4)	B ₂ O ₃ (c=5)	Zn (c=6)	
Janvier	Engr. 1	18,0%	46,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	120060	Mai	Engr. 3	18,0%	46,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1750	Septembre	Engr. 3	18,0%	46,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	76595
	Engr. 7	11,0%	52,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	12275		Engr. 4	18,0%	46,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	101785		Engr. 5	18,0%	46,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	10025
	Engr. 9	11,0%	52,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	11330		Engr. 9	11,0%	52,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	85920		Engr. 6	18,0%	46,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	119825
	Engr. 23	13,0%	17,0%	17,0%	6,0%	1,0%	0,0%	1490		Engr. 8	11,0%	52,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	75920		Engr. 9	11,0%	52,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	116170
	Engr. 27	15,0%	15,0%	15,0%	6,0%	1,0%	0,0%	22020		Engr. 26	15,0%	15,0%	15,0%	0,0%	0,0%	0,0%	24385		Engr. 26	15,0%	15,0%	15,0%	0,0%	0,0%	0,0%	4905
	Engr. 13	14,0%	18,0%	18,0%	6,0%	1,0%	0,0%	78800		Engr. 22	12,0%	24,0%	12,0%	0,0%	0,0%	0,0%	2110		Engr. 22	12,0%	24,0%	12,0%	0,0%	0,0%	0,0%	11050
	Engr. 17	12,0%	45,0%	0,0%	5,0%	0,0%	1,0%	24080		Engr. 19	19,0%	38,0%	0,0%	7,0%	0,0%	0,0%	49995		Engr. 18	19,0%	38,0%	0,0%	6,0%	0,0%	0,0%	7845
	Engr. 21	17,8%	35,7%	0,0%	7,7%	0,3%	2,2%	44665		Engr. 20	18,9%	37,7%	0,0%	6,9%	0,3%	0,0%	34510		Engr. 28	10,0%	20,0%	10,0%	0,0%	0,0%	0,0%	30010
Février	Engr. 1	18,0%	46,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1720	Engr. 24	14,0%	23,0%	14,0%	6,0%	1,0%	0,0%	4510	Engr. 17	12,0%	45,0%	0,0%	5,0%	0,0%	1,0%	9780		
	Engr. 4	18,0%	46,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	67095	Engr. 25	12,0%	20,0%	18,0%	5,0%	1,0%	0,0%	16410	Engr. 15	12,0%	46,0%	0,0%	6,0%	0,5%	0,0%	1765		
	Engr. 9	11,0%	52,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	74015	Juin	Engr. 3	18,0%	46,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	53315	Octobre	Engr. 3	18,0%	46,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100195
	Engr. 20	18,9%	37,7%	0,0%	6,9%	0,3%	0,0%	54750		Engr. 4	18,0%	46,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	54910		Engr. 6	18,0%	46,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	125980
	Engr. 23	13,0%	17,0%	17,0%	6,0%	1,0%	0,0%	39910		Engr. 6	18,0%	46,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	55555		Engr. 9	11,0%	52,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	121280
	Engr. 27	15,0%	15,0%	15,0%	6,0%	1,0%	0,0%	5800		Engr. 8	11,0%	52,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	25655		Engr. 26	15,0%	15,0%	15,0%	0,0%	0,0%	0,0%	9965
	Engr. 13	14,0%	18,0%	18,0%	6,0%	1,0%	0,0%	28615		Engr. 9	11,0%	52,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	147260		Engr. 22	12,0%	24,0%	12,0%	0,0%	0,0%	0,0%	3845
	Engr. 14	14,0%	18,0%	18,0%	6,0%	1,0%	0,0%	14465		Engr. 26	15,0%	15,0%	15,0%	0,0%	0,0%	0,0%	21865		Engr. 12	14,0%	18,0%	18,0%	6,0%	1,0%	0,0%	36940
Engr. 17	12,0%	45,0%	0,0%	5,0%	0,0%	1,0%	16405	Engr. 22		12,0%	24,0%	12,0%	0,0%	0,0%	0,0%	13550	Novembre		Engr. 1	18,0%	46,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	63480
Engr. 21	17,8%	35,7%	0,0%	7,7%	0,3%	2,2%	9850	Engr. 27		15,0%	15,0%	15,0%	6,0%	1,0%	0,0%	11480			Engr. 6	18,0%	46,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	106300
Mars	Engr. 1	18,0%	46,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	121570	Engr. 14	14,0%	18,0%	18,0%	6,0%	1,0%	0,0%	2520		Engr. 9	11,0%	52,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	124195	
	Engr. 8	11,0%	52,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	31685	Engr. 16	12,0%	45,0%	0,0%	5,0%	0,0%	0,2%	4925		Engr. 26	15,0%	15,0%	15,0%	0,0%	0,0%	0,0%	36160	
	Engr. 9	11,0%	52,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	34280	Engr. 17	12,0%	45,0%	0,0%	5,0%	0,0%	1,0%	10725		Engr. 27	15,0%	15,0%	15,0%	6,0%	1,0%	0,0%	2415	
	Engr. 26	15,0%	15,0%	15,0%	0,0%	0,0%	0,0%	4910	Juillet	Engr. 2	18,0%	46,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%		12775	Engr. 12	14,0%	18,0%	18,0%	6,0%	1,0%	0,0%	4475
	Engr. 18	19,2%	38,3%	0,0%	6,1%	0,0%	0,0%	16361		Engr. 6	18,0%	46,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%		101750	Engr. 14	14,0%	18,0%	18,0%	6,0%	1,0%	0,0%	3080
	Engr. 27	15,0%	15,0%	15,0%	6,0%	1,0%	0,0%	27840		Engr. 8	11,0%	52,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%		116485	Engr. 17	12,0%	45,0%	0,0%	5,0%	0,0%	1,0%	10720
	Engr. 13	14,0%	18,0%	18,0%	6,0%	1,0%	0,0%	58190		Engr. 9	11,0%	52,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	75180	Décembre	Engr. 1	18,0%	46,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	330
	Engr. 17	12,0%	45,0%	0,0%	5,0%	0,0%	1,0%	18225		Engr. 26	15,0%	15,0%	15,0%	0,0%	0,0%	0,0%	26825		Engr. 6	18,0%	46,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	102695
Engr. 21	17,8%	35,7%	0,0%	7,7%	0,3%	2,2%	27580	Engr. 22		12,0%	24,0%	12,0%	0,0%	0,0%	0,0%	36755	Engr. 9		11,0%	52,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	89375	
Engr. 15	12,0%	46,0%	0,0%	6,0%	0,5%	0,0%	27265	Engr. 17		12,0%	45,0%	0,0%	5,0%	0,0%	1,0%	10330	Engr. 11		11,0%	52,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	5650	
Avril	Engr. 1	18,0%	46,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	89590		Août	Engr. 6	18,0%	46,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%		206515	Engr. 26	15,0%	15,0%	15,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Engr. 8	11,0%	52,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	103210	Engr. 8		11,0%	52,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	20990		Engr. 20	18,9%	37,7%	0,0%	6,9%	0,3%	0,0%	81490
	Engr. 9	11,0%	52,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	59070	Engr. 9		11,0%	52,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	115120		Engr. 27	15,0%	15,0%	15,0%	6,0%	1,0%	0,0%	14900
	Engr. 10	11,0%	52,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	11985	Engr. 26		15,0%	15,0%	15,0%	0,0%	0,0%	0,0%	72120		Engr. 14	14,0%	18,0%	18,0%	6,0%	1,0%	0,0%	28020
	Engr. 20	18,9%	37,7%	0,0%	6,9%	0,3%	0,0%	21020	Engr. 22		12,0%	24,0%	12,0%	0,0%	0,0%	0,0%	5100	Engr. 17	12,0%	45,0%	0,0%	5,0%	0,0%	1,0%	13985	
	Engr. 13	14,0%	18,0%	18,0%	6,0%	1,0%	0,0%	22320	Engr. 13		14,0%	18,0%	18,0%	6,0%	1,0%	0,0%	14865									
									Engr. 15	12,0%	46,0%	0,0%	6,0%	0,5%	0,0%	19100										

Tableau 26. Programme mensuel de production de l'OCP sur sept lignes de production pour l'année 2019

Pour les autres paramètres du RB, la marge d'écart tolérée vis-à-vis des spécifications cible est fixée $\eta_{cj} = 0, \forall c, j | c < C$ (structure exacte), *ii*) les pourcentages maximums de N, P, K, S, B₂O₃ et Zn dans un CBC sont respectivement fixés à 46 %, 57 %, 64 %, 60 %, 8 % et 8 %, *iii*) le pourcentage minimum du *filler* dans un CBC est fixé à 3 % et *vi*) la proportion minimale d'un CBC utilisé dans le poids total d'un engrais est égale à $\kappa=1\%$.

Référence Engrais	Volume annuel (tonnes)	Référence Engrais	Volume annuel (tonnes)
Engrais 1	65.530	Engrais 15	48.130
Engrais 2	12.775	Engrais 16	4.925
Engrais 3	231.855	Engrais 17	114.250
Engrais 4	555.010	Engrais 18	16.500
Engrais 5	10.025	Engrais 19	82.805
Engrais 6	818.620	Engrais 20	191.770
Engrais 7	12.275	Engrais 21	82.095
Engrais 8	373.945	Engrais 22	72.410
Engrais 9	1.053.195	Engrais 23	41.400
Engrais 10	11.985	Engrais 24	4.510
Engrais 11	5.650	Engrais 25	16.410
Engrais 12	41.415	Engrais 26	207.325
Engrais 13	202.790	Engrais 27	84.455
Engrais 14	48.085	Engrais 28	30.010

Tableau 27. La production annuelle de l'OCP sur sept lignes de production en 2019

Nous appliquons le modèle du RB aux données présentées dans les tableaux ci-dessus pour examiner ce qui aurait pu se passer sur les sept lignes de production si OCP avait utilisé le RB. Nous présentons les résultats dans ce qui suit.

2.3.2 Résultats

Pour analyser l'impact du remplacement de l'organisation actuelle par la production de CBC, il fallait d'abord définir une base canonique difficile à contester. On a retenu la BC dont les composites permettent de satisfaire les $J = 28$ engrais. Ces derniers sont au nombre de 8 et leur composition optimale en termes de N, P, K, B₂O₃ (bore), Zn (zinc) et *filler* est décrite dans le Tableau 28.

		CBC 1	CBC 2	CBC 3	CBC 4	CBC 5	CBC 6	CBC 7	CBC 8	filler
		<i>i</i> =1	<i>i</i> =2	<i>i</i> =3	<i>i</i> =4	<i>i</i> =5	<i>i</i> =6	<i>i</i> =7	<i>i</i> =8	
Composants (nutriments)	N (<i>c</i> =1)	46,00%	11,86%	12,70%	19,00%	0,00%	2,34%	2,14%	0,00%	0,00%
	P (<i>c</i> =2)	0,00%	56,08%	16,11%	38,00%	0,00%	56,00%	56,00%	51,24%	0,00%
	K (<i>c</i> =3)	0,00%	0,00%	16,11%	0,00%	63,60%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	S (<i>c</i> =4)	0,00%	0,00%	0,00%	7,00%	25,27%	11,78%	7,06%	19,67%	0,00%
	B ₂ O ₃ (<i>c</i> =5)	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	6,13%	3,15%	0,00%	0,00%	0,00%
	Zn (<i>c</i> =6)	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	7,79%	0,00%
	filler (<i>c</i> =7)	54,00%	32,06%	55,07%	36,00%	5,00%	26,72%	34,81%	21,30%	100,00%

Tableau 28. Composition optimale des CBC à utiliser pour reproduire la production de l'OCP sur 7 lignes de production en 2019

En plus d'identifier les CBC, RB indique les quantités à prélever de chaque CBC pour produire le volume exact que l'OCP a fabriqué en 2019 de chaque engrais et pour satisfaire de manière exacte leur composition chimique (voir un extrait de ces quantités dans le Tableau 29 le détail complet de cette solution est dans (§Annexes - Tableau 8)). Nous rappelons que le *filler* doit être utilisé en combinaison avec les CBC pour obtenir les volumes souhaités.

Mois	Référence de l'engrais	filler	CBC 1 <i>i</i> =1	CBC 2 <i>i</i> =2	CBC 3 <i>i</i> =3	CBC 4 <i>i</i> =4	CBC 5 <i>i</i> =5	CBC 6 <i>i</i> =6	CBC 7 <i>i</i> =7	CBC 8 <i>i</i> =8	Volume produit (tonnes)
Janvier	Engr. 1	0,00	21582,71	98477,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	120060
	Engr. 7	893,36	0,00	11381,64	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	12275
	Engr. 9	824,58	0,00	10505,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11330
	Engr. 23	142,10	84,70	0,00	618,39	400,62	241,63	2,56	0,00	0,00	1490
	Engr. 27	3124,93	2965,21	8,51	6395,27	5919,95	3573,45	32,69	0,00	0,00	22020
	Engr. 13	2261,65	4841,78	0,00	37595,33	21187,20	12778,60	135,44	0,00	0,00	78800
	Engr. 17	1747,27	0,00	10731,06	0,15	8507,99	0,00	0,76	0,00	3092,76	24080
	Engr. 21	1,72	15125,92	6391,38	0,00	0,00	0,06	4532,55	5993,50	12619,86	44665
...
Décembre	Engr. 1	0,00	59,32	270,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	330
	Engr. 6	0,00	18461,07	84233,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	102695
	Engr. 9	6504,61	0,00	82870,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	89375
	Engr. 11	411,20	0,00	5238,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5650
	Engr. 26	0,00	426,87	0,00	5763,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6190
	Engr. 20	0,00	5096,43	1129,58	0,00	66997,64	0,00	8266,34	0,00	0,00	81490
	Engr. 27	2114,50	2006,43	5,76	4327,41	4005,78	2418,00	22,12	0,00	0,00	14900
	Engr. 14	804,21	1721,66	0,00	13368,29	7533,82	4543,86	48,16	0,00	0,00	28020
Engr. 17	1014,77	0,00	6232,30	0,09	4941,21	0,00	0,44	0,00	1796,19	13985	

Tableau 29. Quantités optimales à prélever de chaque CBC *i* pour produire chaque engrais de l'OCP *j*

Il convient de souligner que les résultats qui suivent ne visent pas à proposer le remplacement des engrais existants mais à montrer que le RB permet de faciliter la gestion de la production et du stockage en répondant à la demande avec moins d'une dizaine de CBC, sachant qu'avec une dizaine de CBC, il est possible de répondre à la demande de plusieurs centaines d'engrais.

2.3.2.1 Résultats annuels

Une étude plus approfondie des résultats montre que le volume de production annuel de OCP, soit 4 440 150 tonnes, comprenant 28 engrais (voir les parts correspondantes en % dans la partie gauche de la Figure 35), peut être entièrement obtenu en produisant seulement 4 290 687 tonnes réparties sur 8 CBC (voir la part en % de chaque CBC dans la partie droite de la Figure 35) dont les quatre premiers représentent plus de 96 % de la production totale.

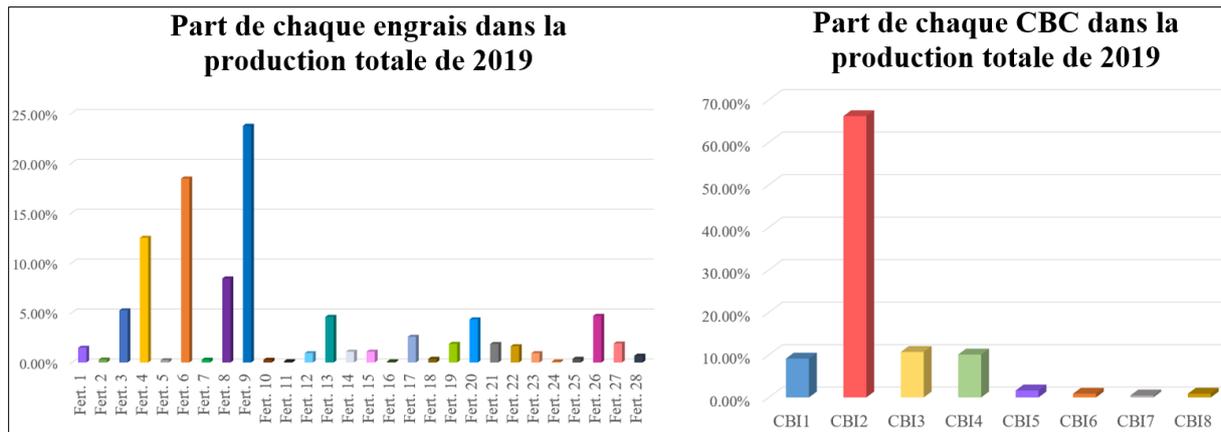


Figure 35 : Production actuelle de l'OCP vs. Production basée sur les CBC

La massification des flux ci-dessus aurait été encore plus importante si nous nous étions face à une variété plus grande que 28 engrais (dans (Chap.3/§4.1.1), il a été montré que le RB répond aux exigences de plus de 480 formules NPK avec un maximum de dix CBC). Nous croyons cependant qu'avec l'accent mis aujourd'hui sur l'agriculture de précision, en particulier en Afrique, l'OCP devra accroître considérablement la diversité de son portefeuille au cours des prochaines années et la contribution du RB sera à ce moment-là plus révélatrice.

2.3.2.2 Résultats mensuels

L'intérêt du RB est encore plus évident sur la base des résultats mensuels. En adoptant le système productif actuel (cf. Figure 36), nous remarquons que la diversité des produits et les volumes de production varient d'un mois à l'autre et que les volumes correspondent à de petits lots (le système de production étant alimenté par des commandes réelles (MTO)).

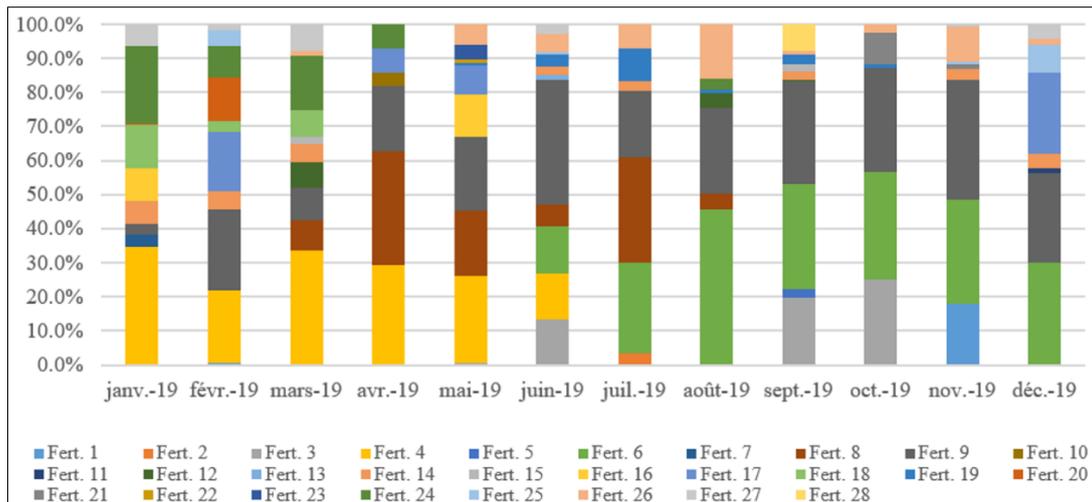


Figure 36 : Part des engrais dans la production mensuelle globale de l'OCP

Les différentes couleurs (se référant aux différentes qualités d'engrais) dans chaque bâton (production mensuelle globale sur les 7 lignes de production) illustrent la diversité et fournissent une indication quant au nombre de changements de séries qui ont dû être effectués sur les 7 lignes de production étudiées. Compte tenu du calendrier de production quotidienne, le nombre total de changements de séries pour les 7 lignes de production s'est élevé à 175. Comme le temps de lancement dépend de la nature du couple « référence précédente/référence suivante » et sachant que le temps de lancement le plus court est de près de deux heures, la production a dû être arrêtée pendant au moins 350 heures (175×2). Le complexe Maroc Phosphore de l'OCP a deux types de lignes de production (lignes 107 et 07 avec des taux de production de 108,3 tonnes/heure et 80,82 tonnes/heure respectivement). En termes de capacité de production, sur les lignes 107, où l'arrêt de la production s'est élevé à 200 heures, la capacité de production perdue a atteint 21 660 tonnes ($108,3 \times 200$) et sur les lignes 07, où la production a été arrêtée pendant au moins 150 heures, la capacité de production perdue était de 12 123 tonnes ($80,82 \times 150$ tonnes). En outre, OCP connaît une gestion ardue des stocks dans ses 9 hangars de stockage, en raison, entre autres, de son système de production qui est basé sur le lancement irrégulier de petits lots.

Par ailleurs, puisque nous examinons l'impact du RB sur le système productif de l'usine chimique, la préoccupation du producteur est le volume des CBC à produire dans son site de production et non la manière dont ceux-ci seront utilisés plus loin dans la chaîne logistique au niveau des unités de blending. Figure 37 montre comment la production aurait été obtenue mois par mois si les CBC auraient été utilisées. Une comparaison de Figure 36 et Figure 37 montre à quel point cette transformation simplifie considérablement la gestion de la production puisque

le programme de production mensuelle de l'OCP peut être assuré avec seulement 8 CBC dont les 4 premiers représentent plus de 90 % de la production mensuelle.

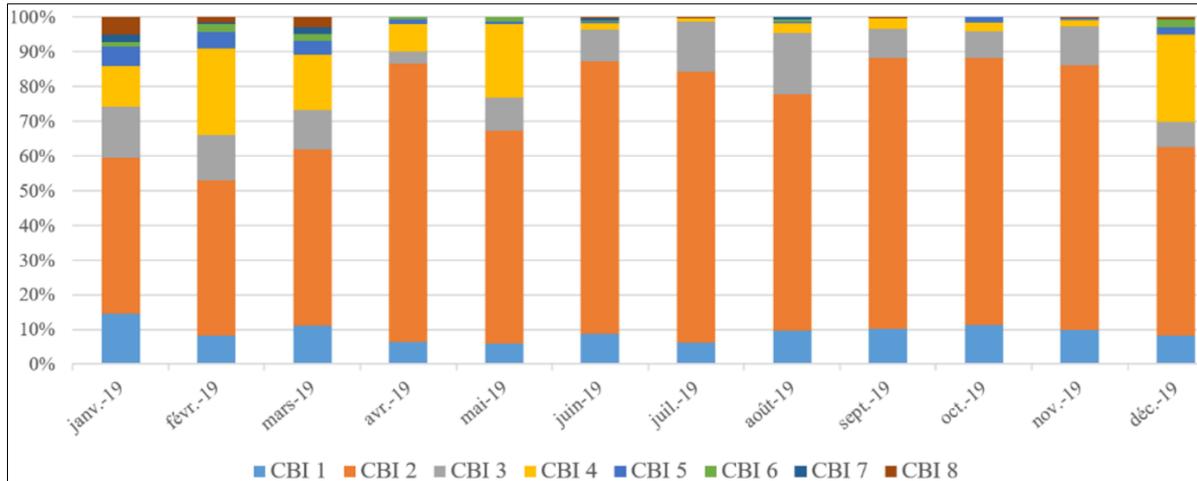


Figure 37 : Part des CBC dans la production mensuelle globale de l'OCP

La massification des flux présentée ci-dessus montre l'opportunité de concevoir un nouveau système de production basé sur une production MTS. En utilisant sept lignes de production, dont trois ont un débit annuel d'environ 897 000 tonnes et quatre un débit annuel d'environ 669 000 tonnes, la gestion de la production de 8 CBC est relativement simple. En effet, compte tenu des parts respectives des CBC (cf. le graphique de droite de la Figure 35) et des débits de ces lignes de production, il est choisi d'affecter arbitrairement les CBC les plus demandés aux lignes les plus productives (et accessoirement les plus économiques) (cf. Figure 38).

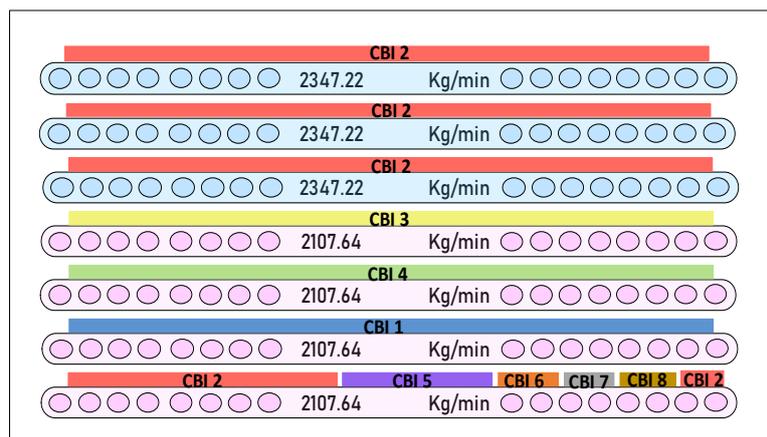


Figure 38 : Proposition de l'affectation des CBC aux sept lignes de production de l'OCP

Comme illustré dans la figure ci-dessus, étant donné que CBC 2 représente plus de 66 % du volume de production annuel, trois lignes de production peuvent lui être entièrement consacrées. Pour les CBC 1, 3 et 4, représentant chacun environ 10 %, il faut prévoir une ligne

de production pour chacun d'eux. Enfin, le reste des CBC représentant moins de 4 % de la production totale, tous les CBC peuvent être affectés à une seule ligne de production.

En produisant en flux continu, les lignes mono-produit élimineraient les arrêts dus aux temps de lancement, augmentant ainsi la capacité de production. Quant à la seule ligne multi-produits restante, elle pourrait conserver une logique de production au point de commande (la production démarre lorsqu'un niveau de stock donné est atteint) pour produire CBI 5 qui représente près de 2 % de la production annuelle. Concernant les CBC 6, 7 et 8 (représentant chacun moins de 1 % de la production annuelle), la production pourrait être déclenchée lorsque le stock descend en dessous du stock de sécurité et arrêtée lorsque la capacité de stockage est pleinement utilisée.

La gestion des hangars de stockage deviendrait également plus facile puisque, étant donné que OCP a 9 hangars, le stockage de 8 CBC, contre celui de 28 engrais, ne posera pas de problème. Chaque hangar pourrait en effet être affecté à un/deux CBC ce qui éliminerait les problèmes de stockage causés principalement par une forte diversité tels que l'espace vacant en raison de petits lots de production et l'arrêt de la production en raison de la saturation des stocks.

2.3.3 Synthèse de l'étude de cas

Pour conclure, revenons sur la pertinence de la BC retenue. Nous avons montré les implications de la production des CBC d'une BC permettant de reconstituer tous les engrais produits par OCP sur 7 lignes de production en 2019. En partant d'une analyse des besoins d'engrais sur un échantillon raisonné de grande envergure, il est possible, avec une autre BC comportant le même nombre de CBC, de répondre à des centaines, voire des milliers, de besoins d'engrais. À travers cette étude de cas, il a été révélé qu'avec le RB, un minimum de 33 783 tonnes de production pourrait être récupéré des pertes de production que l'OCP encourt actuellement suite à la multitude des arrêts dans son système productif.

Nous ajoutons que le portefeuille de produits actuel de l'OCP couvre une cinquantaine d'engrais avec 5 références représentant plus de 60 % de ses ventes. Dans ce contexte, la contribution du RB paraît peu cruciale. Néanmoins, notre objectif n'est pas de remplacer la production des 28 engrais par celle des 8 CBC, mais plutôt de démontrer l'impact sur la production et le stockage d'une BC permettant de fabriquer à la demande des centaines de formules d'engrais. L'argument en faveur de notre solution devient très convaincant si OCP poursuit sa stratégie de conquête des marchés émergents en leur proposant des engrais personnalisés, car il devra alors augmenter considérablement la diversité de ses produits. Dans ces conditions, la contribution de RB devient évidente. Néanmoins, comme il s'agit d'un projet stratégique de long terme pouvant

impliquer une transformation des processus, le RB peut présenter quelques limitations auxquelles les producteurs peuvent être confrontés lorsqu'ils envisageraient son implémentation. Ces limitations sont discutées dans la section suivante.

3 Limites potentielles du Reverse Blending

Telle qu'elle est présentée dans ce travail de recherche, l'approche du Reverse Blending peut présenter certaines limites qui pourraient rendre les industriels réticents à mettre en œuvre cette approche dans leurs chaînes logistiques.

En tout premier lieu, puisque le Reverse Blending se propose de relever un défi majeur lié à la survie alimentaire de l'humanité, pour en bénéficier, l'expertise d'une équipe multidisciplinaire est indispensable. Réunir des scientifiques d'horizons différents est un élément crucial pour résoudre les grands problèmes de notre planète, surtout lorsqu'il s'agit de projets impliquant plusieurs disciplines scientifiques comme c'est le cas du Reverse Blending. En effet, comme le montre la Figure 39, son application à l'industrie des engrais nécessite principalement une expertise en agronomie, chimie, recherche opérationnelle et génie industriel.

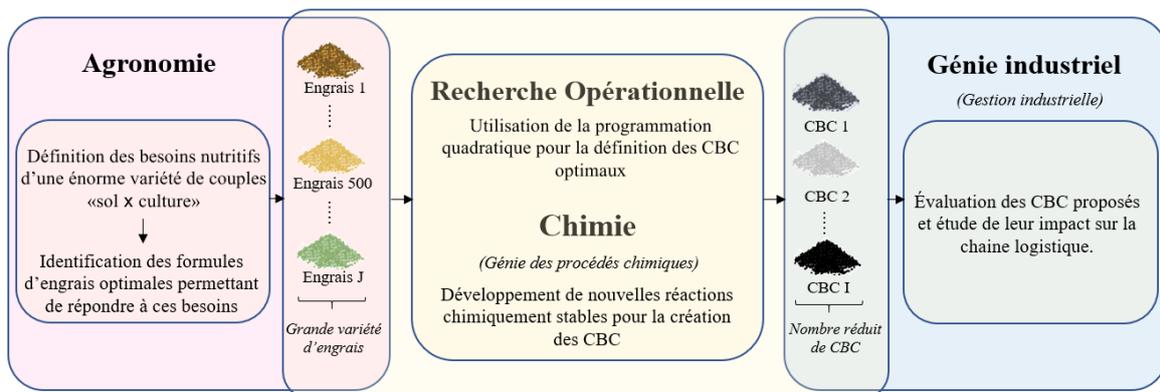


Figure 39 : Processus d'application du RB et les domaines d'expertise associés.

Bien que les avantages potentiels de notre travail de recherche soient évidents, il présente certaines limites qui, si elles sont prises en compte, permettront de convaincre OCP du grand intérêt de notre travail. Pour la partie agronomique de notre projet de recherche, nous nous sommes appuyés sur Fertimap en suivant la démarche présentée en (Annexe1/section2) pour définir un échantillon assez large de 700 besoins NPK. Cependant, bien que ces besoins soient réels (calculés par un outil de conseil agricole développé sous le contrôle du ministère marocain de l'agriculture), ils correspondent à une demande fictive et ont été définis sur la base de plusieurs hypothèses simplificatrices. En effet, pour simplifier la construction de notre

échantillon, nous avons préféré partir d'une seule culture (celle du blé) et explorer ensuite les régions dont les caractéristiques pédologiques sont les plus compatibles avec le blé, et ce, indépendamment des préférences des agriculteurs des sols que nous avons sélectionnés dans les quelques provinces étudiées, et des variétés agricoles qui y sont réellement cultivées. La bonne démarche serait normalement de partir d'une ou plusieurs zones géographiques et de rechercher les cultures qui y sont pratiquées avant de calculer les besoins NPK en fonction des exigences écologiques de ces cultures et des caractéristiques pédologiques des zones géographiques sélectionnées. Cela nous permettrait de mieux convaincre les industriels et surtout les agriculteurs, car le RB répondrait dans ce cas à une demande potentielle qui tient compte de leurs pratiques agricoles actuelles. Cela ne signifie toutefois pas que leurs choix de cultures sont forcément les plus appropriés, leurs pratiques agricoles actuelles risquant d'être non optimales. Ce point sera discuté plus en détail dans la conclusion générale de ce manuscrit lorsque nous aborderons les perspectives futures de notre travail de recherche.

Concernant les limites liées à la partie modélisation du RB et à la définition des CBC, nous en retiendrons deux principales : la non prise en compte de la faisabilité chimique des CBC dans la version standard du RB et la non prise en compte du facteur coût dans la définition de ces CBC.

En effet, contrairement aux problèmes de blending classique où aucune contrainte de composition ne se pose dans la définition des inputs (car les inputs existent), le RB fait intervenir des inputs (CBC) qui doivent être créés par la réaction chimique de différentes matières composites, car les matières à composant unique ne peuvent exister à l'état pur et stable dans un environnement industriel. Cela nous a conduit à introduire un certain nombre de contraintes de composition dans le RB pour faire en sorte que le poids en % d'un composant donné soit inférieur à un seuil fixé (cf. Relation 10). Par exemple, l'azote N, dont l'industrialisation consiste à le séparer de l'oxygène présent dans l'air comprimé, ne peut être contenu dans un produit chimique à un pourcentage supérieur à 78 %, l'air sec (la source brute d'azote) en étant composé à 78,08 %. Dans nos études de cas, le pourcentage maximal de N dans un engrais a été fixé à 46 %, car cela représente le pourcentage le plus élevé de N contenu dans les engrais actuellement commercialisés. Cela permet d'éviter de proposer des CBC qui sont industriellement impossibles à fabriquer mais ne garantit pas pour autant leur faisabilité chimique. D'ailleurs, la version standard du RB consiste à créer de nouveaux CBC mais sous réserve de réaliser des expériences en laboratoire pour trouver des réactions chimiquement stables pour le développement de ces nouveaux CBC. Avant de contacter le chimiste responsable de l'unité engrais du département R&D de Jorf, il était prévu d'intégrer des

contraintes de faisabilité chimique dans le modèle du RB afin que les CBC proposés soient sans doute faisables d'un point de vue chimique. Cependant, s'agissant de nouvelles formulations, il nous a été précisé que de telles contraintes chimiques ne peuvent être modélisées que si des expériences sont conduites en laboratoire pour définir les taux d'inclusion limites à ne pas dépasser lors des réactions chimiques des matières premières. Les CBC qui sont alors proposés en utilisant la version standard de RB peuvent donc s'avérer chimiquement irréalisables. Quant à la version étendue du RB, cette limite ne se pose pas car la création des CBC est à assurer par le mélange physique de composites existants sur le marché des engrais et ne présentant aucun risque d'incompatibilité chimique. Il convient de rappeler tout de même que ces incompatibilités se présentent en trois catégories : compatible (indiquée par C dans Tableau 1), compatibilité limitée (indiquée par L dans Tableau 1) et incompatible (indiquée par X dans Tableau 1). Le risque dû aux incompatibilités entre les substances chimiques n'est pas non plus un problème simple à résoudre car il varie non seulement en fonction des combinaisons de mélange mais aussi en fonction des ratios des substances présentes dans ces combinaisons ainsi qu'en fonction des conditions ambiantes. Ceci dit, le mélange de composites à compatibilité limitée peut en fait être autorisé, mais il est possible que ce mélange devienne incompatible dans certains cas (par exemple, un composite consommé à un taux d'inclusion dépassant un certain seuil minimal). Ne connaissant pas ces taux d'inclusion, qui sont à déterminer par expérimentation, nous avons considéré que les composites à compatibilité limitée sont strictement non compatibles. Cette simplification conduit à proposer des CBC qui peuvent sans doute être fabriqués mais qui ne sont peut-être pas les moins chers à produire. En parlant de coûts, leur non-intégration dans le modèle du RB peut être perçue comme une lacune majeure de ce travail de recherche. Or, comme le RB est un concept innovant que nous avons imaginé pour répondre au défi des grandes variétés d'engrais indispensables à une agriculture durable, ce manuscrit présente les tout premiers travaux d'une nouvelle approche dont il nous faut d'abord démontrer l'intérêt industriel. Ceci dit, notre principal objectif dans cette thèse est de démontrer la possibilité de produire une très grande variété de fertilisants en combinant un très petit nombre de CBC. À ce stade de notre recherche, la préoccupation de coût est absente en raison de la méconnaissance des coûts et de leurs formules de calcul. En effet, nous ne disposons ni d'informations sur les matières premières qui seront utilisées par les CBC, ni des coûts d'acquisition de ces matières premières, ni des procédés chimiques par lesquels ces CBC seront produits, ni des demandes potentielles réelles des engrais sur-mesure auxquelles ces derniers doivent répondre... Dans cette situation, les considérations de coûts ne sont pas aussi pertinentes que de prouver à quel point le RB peut massifier les flux.

Pour la partie gestion industrielle du RB, qui concerne l'étude de son impact sur la chaîne logistique de l'OCP, on peut nous reprocher de nous être contentés d'une évaluation qualitative du RB et de ne pas avoir poussé plus loin la comparaison entre une chaîne logistique sans et avec RB en réalisant une comparaison basée sur une étude économique. En effet, le RB étant présenté comme une approche pouvant impliquer des changements importants dans les processus de production et de distribution, les industriels pourraient légitimement se demander si les gains apportés par cette approche pourront ou pas compenser les investissements à consentir pour accompagner ces changements. Or, comme nous venons de l'expliquer dans le paragraphe précédent, tant que la faisabilité chimique, technique et économique des CBC à créer n'est pas encore validée, les coûts liés aux différentes charges fixes et variables de production ne peuvent être correctement estimés. Dans ce contexte, une évaluation économique du RB n'est pas envisageable à ce stade de la recherche mais, comme pour l'industrie de la peinture, nous sommes convaincus que l'énorme massification des flux permise par le RB permettrait de satisfaire les clients et d'augmenter les parts de marché tout en produisant en masse ce qui assurerait ainsi un retour sur investissement rapide.

Par ailleurs, il ne faut pas oublier que l'opérationnalisation du RB est conditionnée par la disponibilité d'un réseau de petites unités de blending qui doivent être implantées un peu partout dans les régions agricoles. Comme ce n'est pas le cas pour la plupart des régions africaines, cela peut créer une certaine réticence de la part des industriels qui envisageraient de mettre en œuvre le RB. Enfin, les exploitants agricoles, en particulier ceux qui gèrent de grandes surfaces agricoles, pourraient également se montrer réticents à utiliser des engrais mélangés, car ceux-ci sont souvent perçus comme étant moins efficaces que les engrais complexes qui sont fabriqués de manière à ce que chaque granule corresponde à une formule chimique spécifique. La principale raison pour laquelle les engrais mélangés sont évités par certains agriculteurs est que leurs particules peuvent se ségréguer au moment de l'épandage (les autres limites des engrais mélangés sont abordées dans (Chap.1/§1.4.3.3)), ce qui peut entraîner des concentrations en nutriments déséquilibrées. Or, si notre approche du RB devait un jour être appliquée, ce problème ne devrait plus se poser. En effet, contrairement au blending actuellement utilisé où les engrais à mélanger sont souvent fabriqués séparément, le RB implique le mélange de CBC qui seraient tous produits au même endroit et qui seraient alors conçus de telle sorte que leurs particules soient bien granulées et de taille uniforme ce qui permettrait des mélanges finaux plus homogènes.

Conclusion

Si un producteur d'engrais choisissait de recourir au RB, il devrait alors produire un nombre limité de produits dans son usine avant de les expédier vers des unités de mélange où ils seront adaptés en fonction des besoins individuels des agriculteurs. Si l'on considère l'ensemble de la chaîne logistique (du fournisseur à l'agriculteur), ce mode de production correspond à une organisation hybride "MTS/MTO" qui bénéficie à la fois des avantages du "MTS" (se résumant principalement dans les économies d'échelle) et du "MTO" (se résumant principalement dans le renforcement de la compétitivité grâce à la satisfaction des clients). La revue de la littérature présentée dans ce chapitre reprend brièvement les principales conclusions tirées des analyses bibliographiques comparant "MTS", "MTO" et "MTS/MTO" hybride. Dans la section 1, avant de détailler les différentes composantes de l'organisation industrielle qu'implique le RB, nous avons d'abord fait état de la structure organisationnelle actuellement en vigueur dans l'OCP, laquelle repose majoritairement sur la production à la commande d'engrais standard et/ou d'engrais personnalisés par segments. Cela se traduit par des lancements de production irréguliers impliquant des lots de petite taille. En conséquence, la production devient fluctuante et instable ; les temps de changement de série augmentent, ce qui entraîne plusieurs arrêts de production et une augmentation des coûts de lancements générés par les changements de formule d'engrais (ex. coûts liés aux processus de nettoyage des lignes). Du coup, la capacité de production diminue car les capacités nominales des lignes de production ne sont pas pleinement exploitées. Cela peut d'ailleurs être observé dans l'étude de cas présentée dans la section 3 dans laquelle on peut voir que l'OCP n'exploite pas au maximum son outil industriel en raison de son mode de production impliquant plusieurs arrêts et changement de série. Pour aboutir à cette conclusion, il a d'abord fallu trouver une base canonique qui puisse remplir le carnet des commandes de l'OCP en 2019. On a montré qu'un programme de production couvrant 8 CBC, dont 4 CBC représentent plus de 96 %, pourrait remplacer celui proposé par l'OCP en 2019 sur 28 références d'engrais. Cette massification des flux aurait été encore plus significative et plus conséquente si la variété traitée avait été supérieure à 28 engrais. Cependant, notons que même avec cette variété restreinte, le RB offre des perspectives prometteuses qui pourraient inciter les industriels à envisager de passer d'une production essentiellement à la commande à une production pour stock. En effet, en nous plaçant dans le périmètre du producteur d'engrais, opérer en mode RB mènerait à un système de gestion à flux poussé par lequel une forte productivité serait rendue possible (en produisant en grandes quantités). Le scénario de production des CBC dans cette étude de cas illustre l'opportunité de

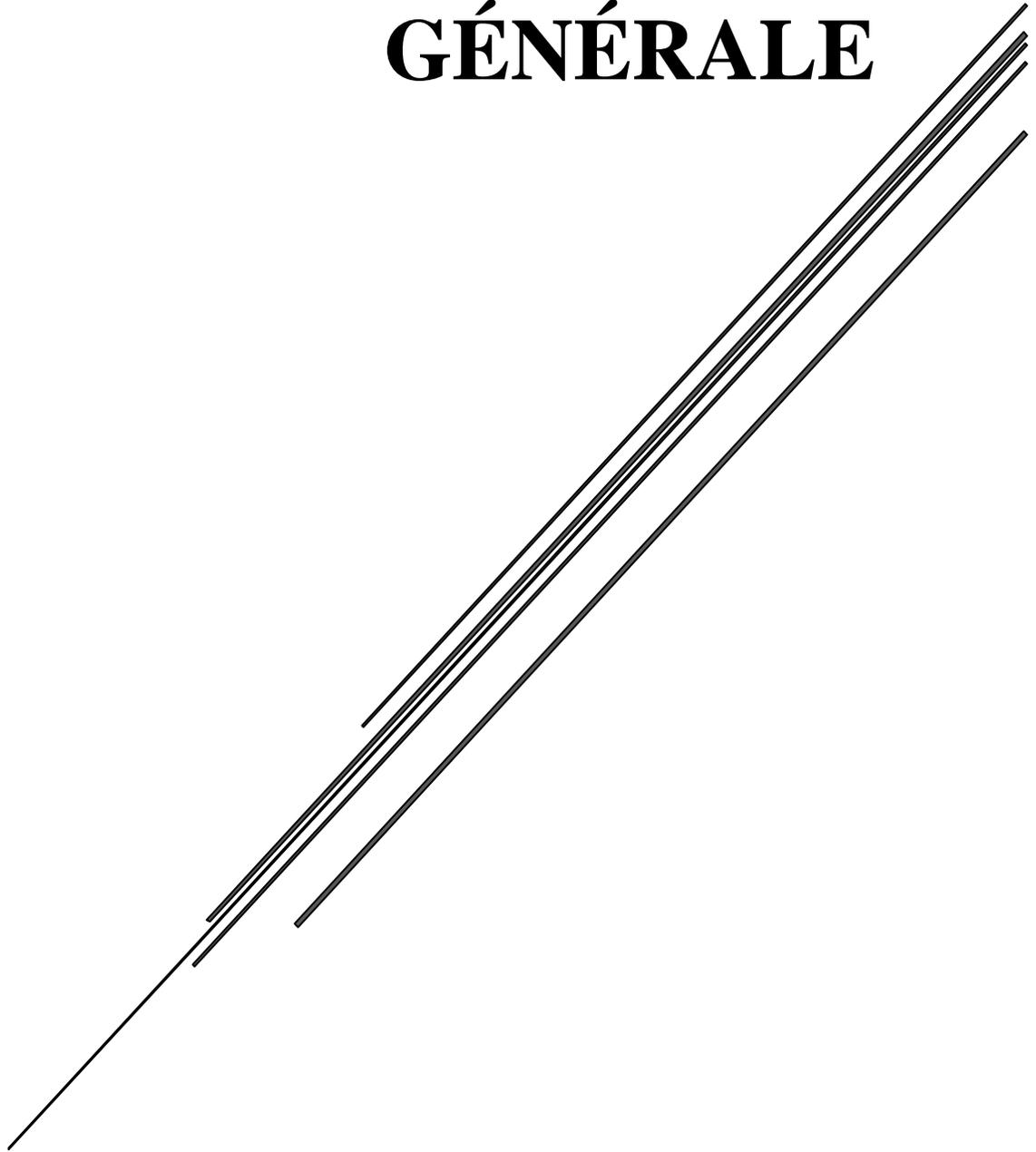
basculer vers un modèle de production où les lignes de production pourraient fonctionner sans interruption, car il s'agirait de lignes "mono-produit" (i.e. un produit (CBC) sur chaque ligne de production). Cela permettrait de faire disparaître les temps de lancement, augmentant ainsi la capacité de production. Dans le cas étudié, avec le RB, 6 des 7 lignes de production pourraient chacune être entièrement dédiées à un seul CBC. Outre le fait de faciliter la gestion de la production, cela permettrait naturellement de remédier aux différents problèmes découlant de la diversité des produits dans les hangars de stockage. Le stockage de 8 CBC, contre celui de 28 engrais, dans 9 hangars de stockage permettrait sans doute, entre autres, de considérablement réduire les problèmes des espaces vacants causés par le stockage de petits lots et d'éviter les arrêts de production provoqués par la saturation des stocks. Cette transformation aurait également d'autres impacts positifs, notamment sur l'acheminement des flux entre les différentes unités de l'usine chimique ainsi que sur les expéditions maritimes des CBC, que ce soit en vrac ou en conteneurs.

Nous pouvons ajouter enfin que pour obtenir une BC encore plus réduite, l'utilisateur du RB pourrait l'appliquer uniquement sur les produits qui représentent une part importante de ses ventes (ex. ceux composés uniquement des nutriments majeurs NPK). Cependant, si par exemple cette part correspond à très peu de produits, le RB ne compterait pas pour autant. C'est un peu le cas du groupe OCP qui commercialise environ 50 engrais, dont 5 seulement représentent environ 80 % de ses ventes. Dans ce cas, l'OCP pourrait vouloir continuer à produire ses 5 meilleurs produits et pourrait alors faire appel au RB pour ses autres 45 produits. Mieux encore, ces best-sellers peuvent être considérés comme des CBC et le RB n'aurait plus qu'à rechercher les CBC restants qui, avec les 5 premiers CBC, permettrait d'obtenir tous les produits d'OCP. Cela semblerait encore plus efficace quand l'OCP progressera dans sa stratégie d'augmentation de la diversité de son portefeuille de produits. Ainsi, comme cela a été montré également dans les autres études de cas évoquées dans ce manuscrit, le RB peut être exploité en fonction des priorités de son utilisateur, bien que le but reste celui de considérablement massifier et donc faciliter la production et la gestion de fortes diversités. Si l'intérêt potentiel du RB est évident, il peut présenter un certain nombre de limites que nous avons discutées dans la section 3 et qui peuvent être résumées dans le choix d'une demande potentielle fictive impliquant une seule culture agricole (le blé), la non-validation chimique et économique des CBC et la non-évaluation quantitative du RB. Nous soulignons cependant que ces limites se rapportent à des pistes de recherche non explorées plutôt qu'à des points "faibles" de l'approche

du RB. Comme ces limites font ressortir les grands axes d'amélioration de nos futurs travaux de recherche, nous les évoquons dans notre conclusion générale.

CONCLUSION

GÉNÉRALE



Conclusion Générale

SYNTHÈSE

Avec 65 % de terres agricoles non exploitées, l'Afrique a le potentiel pour devenir le grenier du monde. Son grand potentiel agricole lui permet de nourrir non seulement sa propre population mais éventuellement celle du monde entier. Le continent dispose de réels atouts (une main d'œuvre importante, des ressources naturellement riches, des terres abondantes,...) lui donnant l'opportunité de développer une agriculture à la fois performante et durable. Cependant, malgré ces atouts, l'Afrique est la région la plus exposée à l'insécurité alimentaire, principalement en raison de ses pratiques agricoles rudimentaires qui entraînent un épuisement de la fertilité des sols et une extraction excessive de nutriments sans apport complémentaire, le taux d'utilisation des engrais en Afrique pour l'année 2016 étant de 90 % inférieur à la moyenne mondiale. Ce taux n'est pas aussi faible au Maroc mais la productivité agricole y reste limitée, en grande partie à cause de l'utilisation inefficace d'engrais. Une enquête réalisée en 2019 auprès de 100 agriculteurs marocains démontre que 98 % utilisent tous les ans les mêmes engrais (les plus populaires dans le marché) indépendamment des caractéristiques de leur sols et des cultures pratiqués. Il devient alors urgent de s'attaquer à ce problème, faute de quoi les rendements agricoles resteront déficitaires et la durabilité de l'agriculture marocaine et africaine sera compromise. Conscient de cela, OCP, groupe africain qui est leader mondial dans le secteur des engrais chimiques, s'engage à transformer l'agriculture africaine en développant des solutions innovantes permettant de promouvoir des pratiques agricoles durables notamment la fertilisation raisonnée. Le groupe repose ainsi sa stratégie globale sur quatre piliers : l'Afrique, la personnalisation, l'éducation et l'innovation. En d'autres termes, il vise à promouvoir une agriculture durable et résiliente en Afrique en investissant dans l'innovation et le développement de solutions d'engrais personnalisées. Au premier abord, la nature chimique des engrais de l'OCP pourrait paraître en contradiction avec les exigences de l'écologie et de la durabilité. Il est pourtant important de noter que les effets indésirables des engrais chimiques résultent de leur mauvaise utilisation plutôt que de leurs propriétés intrinsèques. Lorsqu'ils sont appliqués de manière raisonnable, ils apportent une fertilisation plus efficace que les engrais organiques, dont les éléments nutritifs sont en faible concentration et sont libérés très lentement dans le sol. Ces derniers sont plus adaptés au jardinage qu'à une cause aussi fondamentale que la survie alimentaire de l'humanité. C'est pourquoi OCP accorde une grande importance à la personnalisation des engrais et entreprend, à travers sa filiale OCP Africa, de renforcer

l'ensemble de l'écosystème agricole de l'Afrique en accompagnant ses agriculteurs à travers la transmission de connaissances théoriques et pratiques (les tests agronomiques, les analyses de sol, les recommandations d'engrais...) et en les sensibilisant aux meilleures pratiques agricoles à mettre en œuvre pour assurer une utilisation optimale des fertilisants et gagner ainsi le pari de la fertilisation raisonnée. Il convient toutefois de souligner que tous ces programmes d'accompagnement seront de peu d'utilité si l'offre des engrais n'est pas adaptée aux carences en nutriments des sols africains, ce qui est encore loin d'être le cas compte tenu de l'énorme diversité des sols et des variétés agricoles de l'Afrique (celle-ci étant un continent très hétérogène avec plusieurs différents types de climats, de sols et de cultures...). D'ailleurs, rien que pour répondre aux besoins nutritifs du blé marocain, il a été montré dans cette thèse qu'au moins 400 formules d'engrais sont nécessaires. En partenariat avec le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime, OCP a développé 11 formules NPK à utiliser comme inputs dans le blending d'engrais afin de mieux approcher les besoins du sol. Cela permet d'augmenter un peu la « diversité d'usage potentielle » des engrais, mais reste contestable d'un point de vue agronomique. En effet, il a été montré dans cette thèse que le blending des engrais existants entraîne généralement une présence insuffisante ou excessive d'un ou plusieurs nutriments, à moins de mélanger un très grand nombre d'engrais (inputs), ce qui devient très onéreux. L'utilisation d'engrais complexes personnalisés, dont chaque granule contient exactement les teneurs en nutriments requises, est évidemment meilleure pour la nutrition des plantes, mais ce type d'engrais est également extrêmement coûteux, surtout pour les agriculteurs africains. OCP a parfois vendu des engrais personnalisés mais à des prix très élevés en raison du long processus de fabrication qu'ils impliquent. Bien qu'il soit ouvert à la commercialisation de ce type d'engrais, OCP concentre plutôt son portefeuille de produits sur les engrais conventionnels enrichis qui peuvent être soit directement utilisés, soit utilisés comme inputs pour les engrais mélangés. Aujourd'hui, OCP produit 50 formules d'engrais et vise à en produire davantage afin d'offrir à ses clients des solutions fertilisantes plus adaptées à leurs besoins.

Néanmoins, que ce soit par la production d'engrais 100 % sur-mesure ou par l'augmentation de la diversité des fertilisants utilisables comme inputs pour le blending d'engrais, OCP devra produire une diversité colossale de fertilisants s'il souhaite pouvoir répondre suffisamment bien aux exigences écologiques de l'agriculture durable. Avec son organisation industrielle actuelle basée sur une production à la commande (MTO), OCP ne peut pas gérer pleinement la diversité et tous les problèmes qu'elle entraîne au niveau de la production et du stockage. Cette thèse relève d'une recherche partenariale qui s'inscrit dans le cadre d'une « chaire OCP

d'optimisation industrielle » rattachée à l'EMINES (School of Industrial Management), et avait pour objectif d'aider OCP dans la gestion de la diversité d'engrais afin d'offrir des produits capables de répondre avec précision aux besoins des sols de ses clients tout en facilitant la gestion de cette diversité et en diminuant les coûts logistiques associés. C'est ainsi que nous nous sommes donnés pour objectif de répondre à la question de recherche suivante : Quelle est l'organisation industrielle à adopter par OCP pour accompagner la croissance de la diversité ? La formulation de cette question de recherche a fait l'objet de la première étape de notre méthodologie de recherche, qui a été adaptée de la méthodologie Recherche Ingénierique traitant des projets nécessitant un changement organisationnel stratégique.

La deuxième étape de notre méthodologie consistant à étudier les connaissances théoriques existantes sur ce type de problématique, nous avons réalisé une revue de la littérature générale sur les modes de gestion de la diversité et avons constaté que les organisations industrielles qui ont réussi à relever le défi de la grande diversité sont celles qui utilisent la PM à travers des outils de standardisation, le plus économiquement efficace étant la différenciation retardée. Celle-ci est généralement associée à la production discrète (ex. l'industrie automobile) où elle est obtenue, à travers un processus d'assemblage, par une modularité permettant au client de choisir le produit qu'il souhaite parmi un ensemble pouvant comporter des centaines de milliers de produits possibles. Une telle solution - où le point de différenciation est retardé jusqu'à la dernière étape de la production et pour laquelle la flexibilité apportée par le processus d'assemblage permet l'obtention d'une énorme diversité de produits dont les nomenclatures ne sont pas nécessairement prédéterminées - est très rare dans les chaînes logistiques continues, voire inexistante puisque nous n'avons trouvé dans la littérature aucune industrie de process intégrant la différenciation retardée. Ceci est dû au fait que les industries de process traitent de produits homogènes (poudres, granulés, crème, liquides...) qui ne peuvent pas être décomposés en plusieurs sous-modules assemblables à la commande. Pour proposer alors une nouvelle organisation industrielle qui puisse répondre à notre problématique, il a fallu adapter la PM des industries manufacturières à la chaîne logistique de l'OCP en décidant de deux points principaux : le point de différenciation et le processus de différenciation. Ainsi, pour le processus de différenciation, nous avons retenu le processus de mélange car, dans une chaîne logistique à flux continu, il s'agit du seul processus dont la flexibilité pourrait être comparée à celle du processus d'assemblage. Quant au point de différenciation, nous proposons de le positionner à l'extérieur du site chimique de l'OCP à proximité de l'agriculteur car, d'une part, plus ce point de découplage serait reporté vers l'aval de la chaîne logistique, plus il permettrait

de grandes économies d'échelle et une meilleure réactivité et, d'autre part, parce que si les engrais étaient mélangés à l'intérieur du site de production, ils risqueraient de se ségréguer à cause des vibrations qu'ils pourraient subir lors de leur manipulation et de leur transport. Par conséquent, la nouvelle organisation industrielle que nous proposons pour répondre à notre problématique de recherche est basée sur PM assurée par une différenciation retardée dont le point de découplage doit être situé à l'extérieur de l'usine chimique à proximité des agriculteurs et dont la personnalisation doit être obtenue par le mélange d'un ensemble de produits de base ; leur nombre doit bien sûr être le plus petit possible. Cette personnalisation doit pouvoir répondre aux besoins individuels de tout agriculteur. Dans ce contexte, la personnalisation est individualisée et agit sur l'identité du produit, à savoir la composition chimique de l'engrais, ce qui est très rarement le cas dans les chaînes logistiques continues. Une revue de la littérature (plus spécifique que la première) soulignant l'originalité du système de PM proposé, indique que la différenciation des produits à flux continu agit souvent sur la forme et/ou le conditionnement sans modifier les propriétés internes du produit lorsqu'elle est effectuée en dehors du site de fabrication ; l'industrie de la peinture étant la seule exception notable à y parvenir avec une grande efficacité. La chaîne logistique de cette industrie est d'ailleurs très similaire à celle que nous proposons à la différence qu'elle traite une variété de peintures qui ne résulte pas d'une personnalisation et dont les nomenclatures sont déjà prédéterminées.

La troisième étape d'une RI typique consiste à développer des outils qui permettront le nouveau changement organisationnel stratégique. Pour notre travail de recherche, cela revient à développer un nouvel outil qui rendra possible le système de PM proposé, soit de trouver les quelques produits de base dont les compositions chimiques doivent être les plus optimisées possibles de sorte qu'elles soient capables, par combinaison linéaire, de satisfaire des milliers voire des millions de formules d'engrais chimiques. À cet effet, une nouvelle approche de Reverse Blending a été développée dans cette thèse en deux versions : la version standard (RB) et la version étendue (ERB). Le RB standard est une nouvelle approche d'optimisation qui consiste à partir d'un échantillon d'une très grande variété d'engrais et de définir simultanément par un programme quadratique : *i*) les spécifications chimiques optimales de nouveaux composites appartenant au plus petit ensemble possible (la base canonique) et *ii*) les nomenclatures de production utilisant les composites de cette base canonique (les CBC) pour produire les engrais de l'échantillon considéré. Une revue de littérature a été effectuée pour démontrer l'originalité du RB par rapport aux problèmes classiques de blending où les inputs de mélange sont connus et préexistants. La fabrication des CBC n'étant pas prise en compte

dans la version standard, et sachant que les procédés de fabrication des composites à créer pour obtenir la base canonique sont techniquement, selon les experts, proches de ceux de la fabrication des engrais, l'ERB a été conçu pour offrir une base canonique dont un maximum de composites peuvent d'une part satisfaire par mélange une grande diversité d'engrais et d'autre part peuvent être fabriqués par le mélange des matières composites existantes sur le marché des engrais. Une revue de la littérature a été menée pour mettre en évidence les différences entre ERB et le *pooling* qui est un problème classique de mélange à deux étages. Plusieurs études de cas ont été menées dans ce travail de recherche pour illustrer l'intérêt de l'approche du RB sous ses deux versions. L'analyse de ces études de cas appuie la capacité du RB à massifier les flux en parvenant à produire des centaines d'engrais avec seulement une dizaine de CBC.

Dans la continuité de notre méthodologie de recherche, la dernière étape consiste à commencer par une évaluation du RB avant de faire la synthèse des connaissances qui sont apportées par cette thèse et qui peuvent être généralisées à toutes les industries chimiques traitant de grandes variétés de produits. Pour ce faire, cette thèse se contente d'étudier qualitativement l'impact du RB sur OCP en comparant son organisation industrielle actuelle à celle impliquée par le RB. D'une manière très synthétique, si OCP venait aujourd'hui à appliquer le RB, il basculerait d'une production MTO d'une cinquantaine d'engrais à une production MTS d'une dizaine de CBC ; ce qui le libérerait de plusieurs problèmes auxquels il est actuellement confronté à cause de son mode de production à la commande impliquant la fabrication successive et irrégulière de plusieurs petits lots différents (plusieurs changements de série provoquant une hausse des coûts de production, capacité des lignes de production non exploitée, plusieurs arrêts de production, saturation des stocks, contamination des engrais à cause d'une mauvaise séparation entre les différentes qualités d'engrais au niveau des hangars de stockage...). Pour résumer, le RB réunit les économies d'échelle et la gestion facile associées à un MTS avec la diversité, la réactivité et la satisfaction des clients offertes par un MTO. Tout cela en offrant une personnalisation individualisée qui, dans le contexte des engrais, permet une fertilisation raisonnée laquelle constitue une condition sine qua non pour une sécurité alimentaire mondiale.

Les bienfaits du RB peuvent être transposés à d'autres industries de process opérant dans des contextes de mélange et devant accroître la diversité de leurs produits, que cette diversité soit liée à une personnalisation indispensable (comme c'est le cas des engrais) ou à une personnalisation à des fins commerciales (comme c'est le cas des cosmétiques). Dans ce contexte, une étude de cas a été menée sur l'industrie cosmétique afin d'étendre le champ d'application du RB. Cette étude de cas, présentée dans les annexes, révèle que le RB peut être

d'un grand intérêt pour la production de masse de produits cosmétiques sur-mesure. En effet, avec seulement 8 CBC, le RB a pu satisfaire une centaine de poudres faciales correspondant à une centaine de formules chimiques personnalisées en termes de plusieurs propriétés dermocosmétiques. Grâce à sa forte massification des flux, le RB semble être le seul moyen économiquement efficace pour fournir de très grandes variétés de produits purement personnalisés tout en réduisant les problèmes de production, de stockage et de transport.

En revanche, si l'approche du RB présente de nombreux avantages potentiels, elle comporte certaines limites qui peuvent sans doute être améliorées par de futures travaux de recherche. La première limite réside dans l'échantillon principal que nous avons utilisé à titre d'exemple pour illustrer la définition d'une base canonique. Cette dernière devant être définie à partir d'une demande potentielle réelle qui doit prendre en compte une grande variété de sols et de cultures, nous nous sommes contentés dans cette thèse d'une seule culture (le blé) et de quelques provinces marocaines. L'absence d'une validation chimique et économique des CBC est également l'une des principales limites de ce travail. Sans une étude de la rentabilité des CBC, une évaluation quantitative du RB ne peut être envisagée, ce qui explique pourquoi nous nous sommes limités à une évaluation qualitative lors de ces premiers travaux sur le RB. De plus, le succès de l'approche que nous proposons repose sur l'implantation de petites unités de blending au niveau des régions agricoles ainsi que sur la volonté des industriels d'investir dans le développement de nouveaux produits et d'opérer les changements que cela peut impliquer, ce qui n'est pas évident, les industriels étant généralement très réticents à restructurer leur chaîne logistique. Enfin, les agriculteurs peuvent également se montrer peu enclins à utiliser des CBC mélangés, d'autant plus que les engrais mélangés sont généralement considérés comme moins efficaces que les engrais complexes.

Pour surmonter ces limites, un certain nombre de problèmes doivent être traités dans une perspective multidisciplinaire. En ce sens, la deuxième partie de cette conclusion générale est consacrée aux principaux axes d'amélioration de ce travail de recherche.

PERSPECTIVES

Le caractère disruptif de l'approche du RB implique qu'une telle transformation ne soit possible qu'à partir d'une approche pluridisciplinaire mobilisant non seulement des compétences en génie industriel mais aussi en chimie pour la fabrication des CBC et celles de spécialistes pour l'analyse des besoins potentiels à satisfaire (agronomes, dermatologues, pharmacologues...).

Dans le contexte des engrais, la définition d'une base canonique robuste pouvant répondre de manière satisfaisante aux besoins en nutriments de toute région agricole est tributaire de l'utilisation d'un vaste échantillon planétaire de besoins nutritifs. Sachant que ces besoins correspondent à des apports complémentaires d'éléments nutritifs qui se déterminent par la différence entre les besoins écologiques des cultures et les apports possibles des sols, il faut solliciter l'aide des agronomes pour définir les besoins exacts d'un très grand nombre d'autres couples « sol/ culture ». Le choix des cultures peut porter sur les cultures actuelles ou éventuellement sur celles que les administrations locales voudraient promouvoir, notamment pour assurer une autosuffisance alimentaire. Cependant, pour une agriculture encore plus écologique, le choix des cultures peut aussi être optimisé en retenant celles qui sont les plus compatibles avec les caractéristiques du sol. La Figure 40 montre la démarche à suivre pour obtenir une recommandation de fertilisation optimisée.

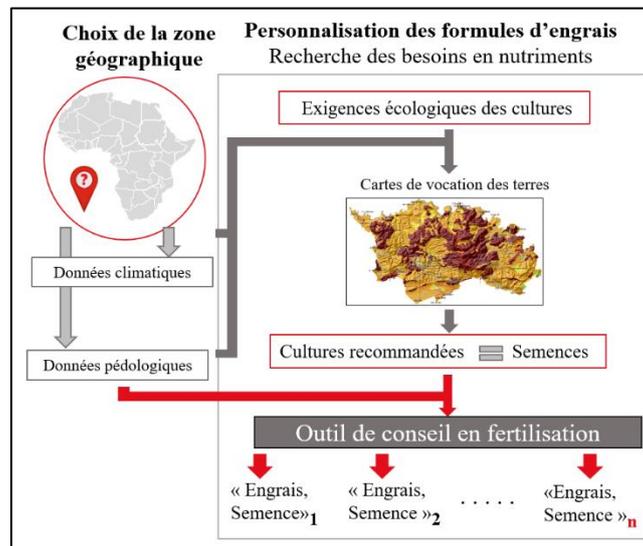


Figure 40 : Démarche à suivre pour un conseil en fertilisation optimal

Au lieu de laisser l'agriculteur choisir la zone géographique et la culture (comme c'est le cas dans Fertimap), l'idéal serait de concevoir un outil de conseil en fertilisation dans lequel seule la zone géographique serait saisie, et l'outil utiliserait alors les cartes de vocation des sols (cartes indiquant l'aptitude des terres à produire différentes cultures agricoles en fonction des caractéristiques pédologiques et climatiques de ces terres) pour conseiller l'agriculteur sur les semences et les engrais qui conviennent le mieux à sa zone géographique. Plus la superficie de cette zone serait petite, plus nous nous rapprocherions d'une agriculture sur-mesure ; une agriculture de très haute précision consistant à déposer au pied de chaque plante ce dont elle a exactement besoin. Pour l'exemple des cosmétiques, des spécialistes en dermatologie doivent

être sollicités afin de pouvoir identifier, en tenant compte de plusieurs facteurs (ex. le type de peau, l'âge, le régime alimentaire, le climat, le stress, etc.), une large base de besoins dermocosmétiques à partir de laquelle le RB pourrait définir une base canonique pertinente.

L'expertise de chimistes doit aussi être sollicitée pour expérimenter et étudier la stabilité de nouvelles réactions chimiques qui donneront lieu aux CBC. Une série de tests en laboratoire doivent être menés pour déterminer quels éléments chimiques ne peuvent pas être réunis dans une granule, à quel point la combinaison de deux substances chimiques peut être tolérée, quels sont les taux d'inclusion à accepter pour deux substances à compatibilité limitée, etc. Une fois que toutes ces contraintes chimiques seront connues, elles devront être modélisées, puis mathématiquement formulées avant d'être intégrées dans le modèle d'optimisation du RB. Cela permettrait de proposer des CBC chimiquement réalisables sans faire appel à la R&D chaque fois qu'une base canonique est définie.

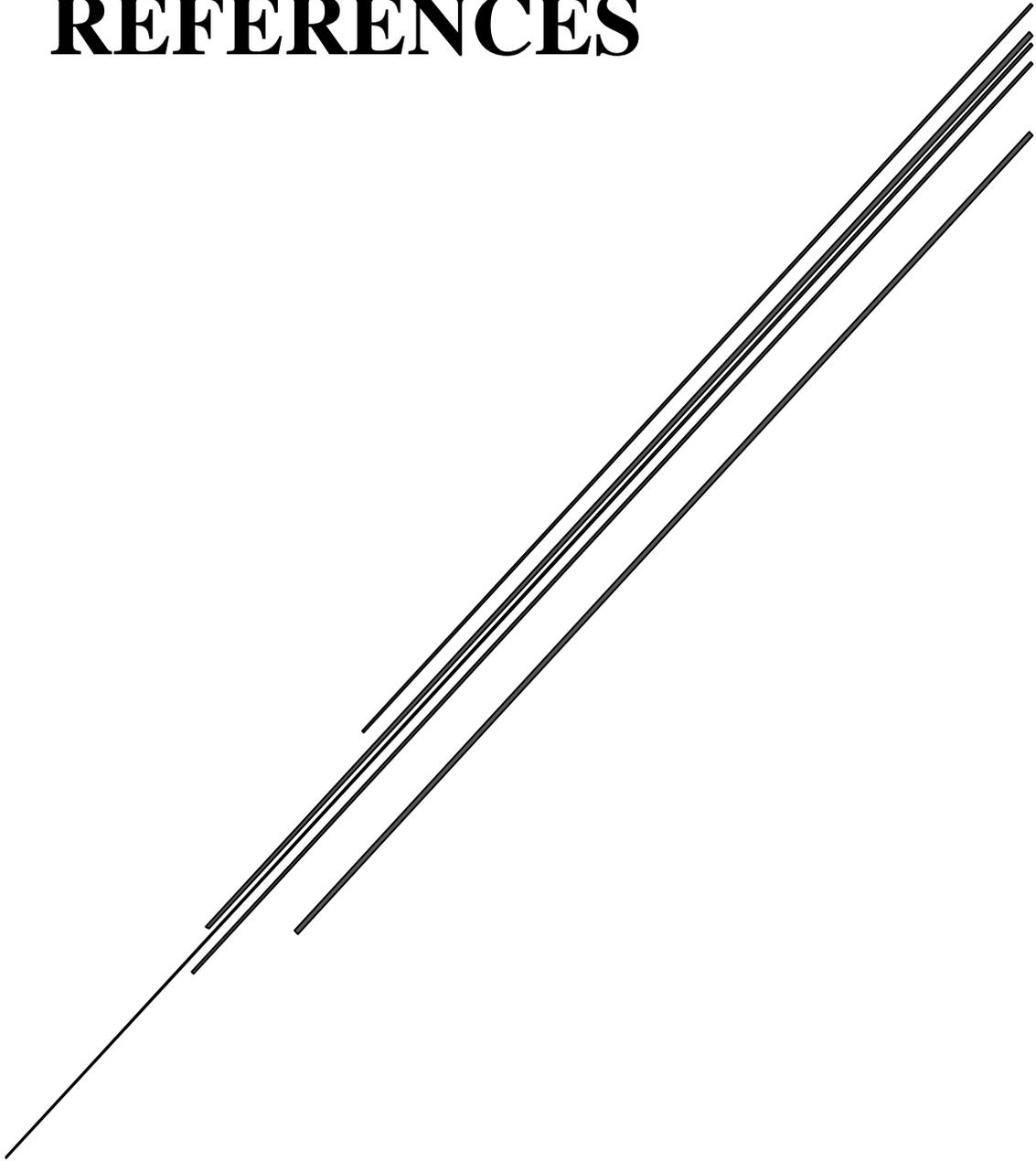
La validation chimique des CBC suppose la connaissance de leur procédé de fabrication ainsi que des matières premières à utiliser. Cette étape est essentielle pour déterminer le coût de revient des CBC. Pour convaincre les industriels des avantages potentiels du RB, il est impératif de prendre en compte la minimisation des coûts dans son modèle d'optimisation (même si implicitement la minimisation du nombre des CBC implique la minimisation des coûts de production). En ce sens, le critère d'optimisation du RB doit consister en une fonction économique dont les paramètres doivent refléter tous les coûts unitaires fixes et variables intervenant dans le calcul du coût de revient des CBC (coût unitaire d'achat des matières premières, coût unitaire de stockage, coût unitaire de transport entre les différentes unités de production, etc.)

Par ailleurs, bien qu'ils soient conscients des avantages de la différenciation retardée, les industriels sont généralement très réticents à l'appliquer car ils la jugent trop coûteuse, voire irréaliste, du fait qu'elle implique des changements radicaux incluant la conception de nouveaux produits et la restructuration de leurs processus. Avec le RB, nous estimons que tous ces changements en valent la peine en raison de la grande massification des flux que permet cette approche. Pour en convaincre les industriels et OCP en particulier, une évaluation quantitative du RB doit être conduite en se basant sur des études économiques mobilisant des systèmes de coûts pertinents. Cette évaluation économique pourrait se faire en étudiant de nouveaux schémas de distribution et de production qui s'appuieront sur plusieurs scénarios décrivant l'impact de la massification des flux sur la production et le transport. Enfin, puisque le succès du RB est conditionné par la disponibilité de petites unités de blending un peu partout dans les

régions agricoles, des études sur les emplacements optimaux et le dimensionnement de ces unités doivent être réalisées. Il serait également intéressant de mener une étude économique liée au dimensionnement et à l'implantation de ces unités de blending afin d'évaluer les investissements globaux nécessaires à la mise en œuvre du RB.

Pour conclure, ce n'est qu'en travaillant sur toutes ces pistes de recherche que le RB pourrait avoir une chance d'être adopté. Même si des investissements et des changements radicaux sont à prévoir (comme c'est le cas pour tout projet stratégique), compte tenu de l'énorme diversité des engrais qu'implique l'agriculture durable, le RB semble être le seul moyen économiquement efficace pour relever ce défi. Grâce à cette approche, l'Afrique pourrait éviter de répéter les erreurs agricoles commises dans d'autres régions du monde en passant du non-recours aux engrais à directement utiliser des engrais personnalisés, ce qui lui permettrait de "faire un saut agricole", notamment en matière de fertilisation raisonnée.

RÉFÉRENCES



- Adesina, A. (2019, juin 8). Feed Africa [Text]. African Development Bank - Building Today, a Better Africa Tomorrow; African Development Bank Group. <https://www.afdb.org/en/the-high-5/feed-africa>
- Adhya, N., Tawarmalani, M., & Sahinidis, N. V. (1999). A Lagrangian Approach to the Pooling Problem. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 38(5), 1956–1972. <https://doi.org/10.1021/ie980666q>
- Agard, B., & Kusiak, A. (2004). Standardization of Components, Products and Processes with Data Mining. *International Conference on Production Research Americas*, 1–9.
- Agra, A., Poss, M., & Santos, M. (2018a). Optimizing make-to-stock policies through a robust lot-sizing model. *International Journal of Production Economics*, 200, 302–310.
- Agra, A., Poss, M., & Santos, M. (2018b). Optimizing make-to-stock policies through a robust lot-sizing model. *International Journal of Production Economics*, 200, 302–310. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.04.002>
- Åhlström, P., & Westbrook, R. (1999). Implications of mass customization for operations management: An exploratory survey. *International Journal of Operations & Production Management*.
- Ahmed, S. (2015). Realization of sustainable competitive advantage through product differentiation in commercial banks in Kenya: A case study of first community bank. University of Nairobi.
- Akkerman, R., Van Der Meer, D., & Van Donk, D. P. (2010). Make to stock and mix to order: Choosing intermediate products in the food-processing industry. *International Journal of Production Research*, 48(12), 3475–3492. <https://doi.org/10.1080/00207540902810569>
- Alderson, W. (1950). Marketing Efficiency and the Principle of Postponement, Cost and Profit Outlook, 4 (September) as quoted in Bucklin, LP (1966), *A Theory of Distribution Channel Structure*. Berkeley, CA: IBER Special Publications.
- Aldesait, B. (2014). Linear Programming-Based Optimization of Synthetic Fertilizers Formulation. *Journal of Agricultural Science*, 6(12). <https://doi.org/10.5539/jas.v6n12p194>
- Alfaki, M., & Haugland, D. (2013). A cost minimization heuristic for the pooling problem. *Annals of Operations Research*, 222(1), 73–87. <https://doi.org/10.1007/s10479-013-1433-1>
- Alfnes, E., & Strandhagen, J. O. (2000). Enterprise design for mass customisation: The control model methodology. *International journal of logistics*, 3(2), 111–125.
- Alford, D., Sackett, P., & Nelder, G. (2000). Mass customisation—An automotive perspective. *International Journal of production economics*, 65(1), 99–110.

- AlGeddawy, T., & ElMaraghy, H. (2010). Assembly systems layout design model for delayed products differentiation. *International Journal of Production Research*, 48(18), 5281-5305. <https://doi.org/10.1080/00207540903117832>
- Amos, F., Rönnqvist, M., & Gill, G. (1997). Modelling the pooling problem at the New Zealand Refining Company. *Journal of the Operational Research Society*, 48(8), 767-778. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2600436>
- Andel, T. (2002). From common to custom : The case for make-to-order. *Material Handling Management*, 57(12), 24-24.
- Anderson-Connell, L. J., Ulrich, P. V., & Brannon, E. L. (2002). A consumer-driven model for mass customization in the apparel market. *Journal of Fashion Marketing and Management: An International Journal*.
- Ashayeri, J., van Eijs, A. G. M., & Nederstigt, P. (1994). Blending modelling in a process manufacturing : A case study. 72(3), 460-468. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)90416-2](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)90416-2)
- Assessing Regional Integration in Africa I : ECA Policy Research Report. (2004). Commission Economique Pour l'Afrique. <https://repository.uneca.org/handle/10855/5513>
- Ater, A. (2017). Les engrais, levier crucial pour l'agriculture africaine. *La Tribune*. <https://afrique.latribune.fr/entreprises/agriculture/2017-12-05/les-engrais-levier-crucial-pour-l-agriculture-africaine-760331.html>
- Audet, C., Brimberg, J., Hansen, P., Digabel, S. L., & Mladenović, N. (2004). Pooling Problem : Alternate Formulations and Solution Methods. *Management Science*, 50(6), 761-776. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1030.0207>
- Aviv, Y., & Federgruen, A. (2001). Capacitated Multi-Item Inventory Systems with Random and Seasonally Fluctuating Demands : Implications for Postponement Strategies. *Management Science*, 47(4), 512-531.
- Azzamouri, A., Bamoumen, M., Hilali, H., Hovelaque, V., & Giard, V. (2020). Flexibility of dynamic blending with alternative routings combined with security stocks : A new approach in a mining supply chain. *International Journal of Production Research*, 1-18.
- Babcock, B., Rister, M. E., Kay, R. D., & Wallers, J. A. (1984). Identifying Least-Cost Sources of Required Fertilizer Nutrients. *American Journal of Agricultural Economics*, 66(3), 385-391. <https://doi.org/10.2307/1240806>
- BAD. (2021). Kenya—Projet d'Appui au Développement des Zones Vertes—Phase II. Groupe de la Banque Africaine de Développement. <https://projectsportal.afdb.org/dataportal/VProject/show/P-KE-AAD-005>
- Baker, K. R. (1985). Safety stocks and component commonality. *Journal of Operations Management*, 6(1), 13-22.
- Balakrishnan, N. R., & Chakravarty, A. K. (2008). Product design with multiple suppliers for component variants. *International Journal of Production Economics*, 112(2), 723-741.

- Baldwin, M. I., & Clark, L. A. (1997). Push-off shear strength with inadequately anchored interface reinforcement. *Magazine of Concrete Research*, 49(178), 35-43.
- Bandaly, D. C., & Hassan, H. F. (2020). Postponement implementation in integrated production and inventory plan under deterioration effects : A case study of a juice producer with limited storage capacity. *Production Planning & Control*, 31(4), 322-337.
- Baud-Lavigne, B., Agard, B., & Penz, B. (2012). Mutual impacts of product standardization and supply chain design. *International Journal of Production Economics*, 135(1), 50-60. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.09.024>
- Beaton, J. D. (1997). *Bulk Blending of Dry Fertilizer Materials for China*. 2.
- Bengtsson, J., Bredström, D., Flisberg, P., & Rönnqvist, M. (2013). Robust planning of blending activities at refineries. *Journal of the Operational Research Society*, 64(6), 848-863.
- Benhamou, L., Fenies, P., Fontane, F., & Giard, V. (2020a). Reverse Blending as a Strategy for Purely Customizing Fertilizers While Considerably Reducing the Diversity to Be Produced : A Case Study. Available at SSRN 3636066.
- Benhamou, L., Fénies, P., & Giard, V. (2020b). Avantages Potentiels Du Reverse Blending Sur La Chaîne Logistique De L'Industrie Des Engrais. 13ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation-MOSIM'20.
- Benhamou, L., Fenies, P., & Giard, V. (2020c). Potential Benefits of Reverse Blending in the Fertilizer Industry. IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems, 227-236.
- Benhamou, L., Giard, V., Fenies, P., Fontane, F., & Khoulood, M. (2019). Reverse blending : Une réponse efficace au défi de la personnalisation de masse dans la production de granulés. 13ème Conférence internationale de CIGI QUALITA 2019. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02277532>
- Benhamou, L., Giard, V., Fontane, F., & Grabot, B. (2018a). Reverse Blending : An efficient answer to the challenge of obtaining required fertilizer variety. *Cahier Du LAMSADE* 385. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24568.34563>
- Benhamou, L., Giard, V., Fontane, F., & Grabot, B. (2018b). Reverse Blending : An efficient answer to the challenge of obtaining required fertilizer variety. *Information System, Logistics and Supply (ILS 2018)*.
- Benhamou, L., Giard, V., Khoulood, M., Fenies, P., & Fontane, F. (2020d). Reverse Blending : An economically efficient approach to the challenge of fertilizer mass customization. *International Journal of Production Economics*, 226, 107603. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.107603>
- Ben-Jebara, M., & Modi, S. B. (2020). Product personalization and firm performance : An empirical analysis of the pharmaceutical industry. *Journal of Operations Management*, 67(1), 82-104.

- Benton, W. C., & Krajewski, L. (1990). Vendor performance and alternative manufacturing environments. *Decision Sciences*, 21(2), 403-415.
- Berman, B. (2002). Should your firm adopt a mass customization strategy? *Business Horizons*, 45(4), 51-51.
- Beucher, O., & Bazin, F. (2012). *L'agriculture en Afrique Face aux Défis du Changement Climatique*. Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie: Québec, QC, Canada, 170.
- Bhamu, J., & Sangwan, K. S. (2014). Lean manufacturing : Literature review and research issues. *International Journal of Operations & Production Management*.
- Bilgen, B., & Ozkarahan, I. (2007). A mixed-integer linear programming model for bulk grain blending and shipping. *International Journal of Production Economics*, 107(2), 555-571. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2006.11.008>
- Blecker, T., Friedrich, G., Kaluza, B., Abdelkafi, N., & Kreutler, G. (Éds.). (2005). *Product Customization : Theoretical Basics*. In *Information and Management Systems for Product Customization* (p. 9-44). Springer US. https://doi.org/10.1007/0-387-23348-2_2
- Boone, C. A., Craighead, C. W., & Hanna, J. B. (2007). Postponement : An evolving supply chain concept. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 37(8), 594-611. <https://doi.org/10.1108/09600030710825676>
- Bowersox, D. J., & Closs, D. J. (1996). *Logistical management : The integrated supply chain process*. McGraw-Hill College.
- Bown, H. E., Watt, M. S., Clinton, P. W., & Mason, E. G. (2010). Influence of ammonium and nitrate supply on growth, dry matter partitioning, N uptake and photosynthetic capacity of *Pinus radiata* seedlings. *Trees*, 24(6), 1097-1107. <https://doi.org/10.1007/s00468-010-0482-1>
- Boynton, A. C., Victor, B., & Pine II, B. J. (1993). New competitive strategies : Challenges to organizations and information technology. *IBM systems journal*, 32(1), 40-64.
- Bruinsma, J. (2002). *World Agriculture : Towards 2015/2030 : Summary Report*. (Numéro BRU 631). Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Bucklin, L. P. (1965). Postponement, speculation and the structure of distribution channels. *Journal of marketing research*, 2(1), 26-31.
- Cain, M., & Price, M. L. R. (1986). Optimal Mixture Choice. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, 35(1), 1-7. <https://doi.org/10.2307/2347858>
- Cakmak, I. (2002). Plant nutrition research : Priorities to meet human needs for food in sustainable ways. *Plant and Soil*, 247(1), 3-24.
- Castro, P. M. (2016). Source-based discrete and continuous-time formulations for the crude oil pooling problem. *Computers & Chemical Engineering*, 93, 382-401.

- Caussanel, P. (2018). La personnalisation dans le domaine de la beauté, vers des cosmétiques adaptés aux besoins de chacun. Université Toulouse III-Paul Sabatier.
- Caux, C., David, F., & Pierreval, H. (2006). Implementation of delayed differentiation in batch process industries : A standardization problem. *International Journal of Production Research*, 44(16), 3243-3255.
- Chanal, V. (1995). Le management de l'innovation de produit industriel : Mise en oeuvre d'une démarche de diagnostic pour améliorer notre compréhension du processus. Grenoble 2.
- Chanal, V., Lesca, H., & Martinet, A. C. (1997). Recherche ingénierique et connaissances procédurales en sciences de gestion : Réflexions épistémologiques et méthodologiques. *Revue française de gestion*, 116, 41-51.
- Chanda, E. K. C., & Dagdelen, K. (1995). Optimal blending of mine production using goal programming and interactive graphics systems. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 9(4), 203-208. <https://doi.org/10.1080/09208119508964748>
- Chang, J. C., Graves, S. C., Kirchain, R., & Olivetti, E. (2019). Integrated planning for design and production in two-stage recycling operations. *European Journal of Operational Research*, 273(2), 535-547. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.08.022>
- Chang, & Jiyou, C. (2015). Designing two-stage recycling operations for increased usage of undervalued raw materials [Thesis, Massachusetts Institute of Technology]. <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/101795>
- Charnes, A., Cooper, W. W., & Mellon, B. (1952). Blending Aviation Gasolines—A Study in Programming Interdependent Activities in an Integrated Oil Company. *Econometrica*, 20(2), 135-159. <https://doi.org/10.2307/1907844>
- Chatras, C. (2016). Contribution à la gestion de la personnalisation de masse [These de doctorat, Paris Sciences et Lettres (ComUE)]. <http://www.theses.fr/2016PSLED002>
- Chen, J., & Hao, Y. (2007). Outsourcing for Achieving Mass Customization in Service Operations : Lessons from the " Smaller Kitchen" Strategy in Chinese Catering Services. 2007 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 3732-3735.
- Cheng, F., Ettl, M., Lin, G., & Yao, D. D. (2002). Inventory-service optimization in configure-to-order systems. *Manufacturing & Service Operations Management*, 4(2), 114-132.
- Cheng, X., Tang, K., & Li, X. (2018). New Multi-Commodity Flow Formulations for the Generalized Pooling Problem. *IFAC-PapersOnLine*, 51(18), 162-167. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.09.293>
- Child, P., Diederichs, R., Sanders, F.-H., & Wisniowski, S. (1991). SMR forum : The management of complexity. *MIT Sloan Management Review*, 33(1), 73.

- Chiou, J.-S., Wu, L.-Y., & Hsu, J. C. (2002). The adoption of form postponement strategy in a global logistics system : The case of Taiwanese information technology industry. *Journal of Business Logistics*, 23(1), 107 124.
- Cholette, S. (2009). Mitigating demand uncertainty across a winery's sales channels through postponement. *International Journal of Production Research*, 47(13), 3587 3609.
- Choudhary, S. K., Kumar, R., Kumar, A., & Ranjan, R. D. (2020). Customized Fertilizers-All in One a Review. *International Research Journal of Pure and Applied Chemistry*, 27 39.
- Claveau, N. (1993). Conception d'outils informatisés d'aide au diagnostic stratégique en PME: expérience et enseignements. Université Jean Moulin Lyon 3.
- Claveau, N., & Tannery, F. (1996). Élaboration de connaissances procédurales en management stratégique. Réflexion à partir de deux recherches cliniques. *Conférence Internationale de Management Stratégique*, 49 51.
- Conforti, P., & Sarris, A. S. (2012). Challenges and policies for the world agricultural and food economy in the 2050 perspective. *FAO*, chapter 12, 509 540.
- Cooper, R., & Kaplan, R. S. (1991). Profit priorities from activity-based costing. *Harvard business review*, 69(3), 130 135.
- Cottenie, A. (1980). Soil and plant testing as a basis of fertilizer recommendations. *F.A.O. Soils Bulletin*, No. 38/2. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19806734748>
- Cvsa, V., & Gilbert, S. M. (2002). Strategic commitment versus postponement in a two-tier supply chain. *European Journal of Operational Research*, 141(3), 526 543.
- Da Silveira, G., Borenstein, D., & Fogliatto, F. S. (2001). Mass customization : Literature review and research directions. *International Journal of Production Economics*, 72(1), 1 13. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(00\)00079-7](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(00)00079-7)
- Daaboul, J., & Da Cunha, C. M. (2014). Differentiation and Customer Decoupling Points : Key Value Enablers for Mass Customization. In B. Grabot, B. Vallespir, S. Gomes, A. Bouras, & D. Kiritsis (Éds.), *Advances in Production Management Systems. Innovative and Knowledge-Based Production Management in a Global-Local World* (Vol. 440, p. 43 50). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-44733-8_6
- da Cunha Reis, A., Scavarda, L. F., & Pancieri, B. M. (2013). Product variety management : A synthesis of existing research. *African Journal of Business Management*, 7(1), 39.
- Dantzig, G. B. (1981). Reminiscences about the Origins of Linear Programming. STANFORD UNIV CA SYSTEMS OPTIMIZATION LAB.
- Davis, S. M. (1989). From "future perfect": Mass customizing. *Planning Review*. <https://doi.org/10.1108/eb054249>
- DEGOUN, M., FÉNIÉS, P., GIARD, V., RETMI, K., & SAADI, J. (2015). Évaluation de la performance économique d'une chaîne logistique hybride.

- DeVOR, R., GRAVES, R., & MILLS, J. J. (1997). Agile manufacturing research : Accomplishments and opportunities. *IIE Transactions*, 29(10), 813 823. <https://doi.org/10.1080/07408179708966404>
- Dey, S. S., & Gupte, A. (2015). Analysis of MILP Techniques for the Pooling Problem. *Operations Research*, 63(2), 412 427. <https://doi.org/10.1287/opre.2015.1357>
- Drejer, A., & Gudmundsson, A. (2002). Towards multiple product development. *Technovation*, 22(12), 733 745.
- Dubey, R., & Dubey, J. (2009). Pharmaceutical product differentiation : A strategy for strengthening product pipeline and life cycle management. *Journal of Medical Marketing*, 9(2), 104 118.
- Duray, R. (2002). Mass customization origins : Mass or custom manufacturing? *International Journal of Operations & Production Management*.
- Eastwood, M. A. (1996). Implementing mass customization. *Computers in industry*, 30(3), 171 174.
- ElMaraghy, H., Schuh, G., ElMaraghy, W., Piller, F., Schönsleben, P., Tseng, M., & Bernard, A. (2013). Product variety management. *Cirp Annals*, 62(2), 629 652.
- Epstein, E., & Bloom, A. J. (2005). *Mineral nutrition of plants : Principles and perspectives* (2nd ed). Sunderland, Mass. ; [Great Britain] : Sinauer Associates. <https://trove.nla.gov.au/version/22790470>
- Erens, F. J., & Hegge, H. M. H. (1994). Manufacturing and sales co-ordination for product variety. *International Journal of Production Economics*, 37(1), 83 99.
- Ernst, R., & Kamrad, B. (2000). Evaluation of supply chain structures through modularization and postponement. *European journal of operational research*, 124(3), 495 510.
- Escobar-Saldívar, L. J., Smith, N. R., & González-Velarde, J. L. (2008). An approach to product variety management in the painted sheet metal industry. *Computers & Industrial Engineering*, 54(3), 474 483.
- Fan, M. X., & Mackenzie, A. F. (1993). Urea and Phosphate Interactions in Fertilizer Microsites : Ammonia Volatilization and pH Changes. *Soil Science Society of America Journal*, 57(3), 839 845. <https://doi.org/10.2136/sssaj1993.03615995005700030034x>
- Fan, M. X., MacKenzie, A. F., & Blenkhorn, H. D. (1995). A modified urea based NP fertilizer : Urea-TSP-MAP combinations. *Fertilizer Research*, 45(3), 217 220. <https://doi.org/10.1007/BF00748592>
- Faria, D. C., & Bagajewicz, M. J. (2012a). A new approach for global optimization of a class of MINLP problems with applications to water management and pooling problems. *AIChE Journal*, 58(8), 2320 2335. <https://doi.org/10.1002/aic.12754>

- Faria, D. C., & Bagajewicz, M. J. (2012b). Global optimization based on subspaces elimination : Applications to generalized pooling and water management problems. *AIChE journal*, 58(8), 2336 2345.
- Feinerman, E., & Komen, M. H. C. (2005). The Use of Organic vs. Chemical Fertilizer with a Mineral Losses Tax : The Case of Dutch Arable Farmers. *Environmental & Resource Economics*, 32(3), 367 388. <https://doi.org/10.1007/s10640-005-6647-5>
- Feitzinger, E., & Lee, H. L. (1997). Mass Customization at Hewlett-Packard : The Power of Postponement. *Harvard Business Review*, 75(1), 116 121.
- Ferradás, P. G., & Salonitis, K. (2013). Improving Changeover Time : A Tailored SMED Approach for Welding Cells. *Procedia CIRP*, 7, 598 603. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.039>
- Ferreira, K. A., & Alcantara, R. L. C. (2016). Postponement adoption in manufacturers of tomato-derived products. *British Food Journal*.
- Fisher, M. L., & Ittner, C. D. (1999). The impact of product variety on automobile assembly operations : Empirical evidence and simulation analysis. *Management science*, 45(6), 771 786.
- Fixen, P., Brentrup, F., Bruulsema, T., Garcia, F., Norton, R., & Zingore, S. (2015). Nutrient/fertilizer use efficiency : Measurement, current situation and trends. In *Managing Water and Fertilizer for Sustainable Agricultural Intensification* (Vol. 270, p. 8). https://www.researchgate.net/publication/269709648_Nutrientfertilizer_use_efficiency_measurement_current_situation_and_trends
- Floudas, C. A., & Aggarwal, A. (1990). A Decomposition Strategy for Global Optimum Search in the Pooling Problem. *ORSA Journal on Computing*, 2(3), 225 235. <https://doi.org/10.1287/ijoc.2.3.225>
- Fondements du Plan Maroc Vert. (2008). Agence pour le Développement Agricole. <https://www.ada.gov.ma/fr/fondements>
- Fong, D. K., Fu, H., & Li, Z. (2004). Efficiency in shortage reduction when using a more expensive common component. *Computers & Operations Research*, 31(1), 123 138.
- Formisani, C. (2005). Trends in Bulk Blending World Wide. AJ Sackett & Sons Company, Baltimore, Maryland USA.
- Fornasiero, R., Macchion, L., & Vinelli, A. (2015). Supply chain configuration towards customization : A comparison between small and large series production. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 1428 1433. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.287>
- Foulds, L. R., Haugland, D., & Jörnsten, K. (1992). A bilinear approach to the pooling problem. *Optimization*, 24(1 2), 165 180. <https://doi.org/10.1080/02331939208843786>
- Fox, B. (2018, septembre 30). L'Afrique en manque d'investissements agricoles. www.euractiv.fr. <https://www.euractiv.fr/section/agriculture-alimentation/news/bridging-african-agricultures-financing-gap/>

- Frimannslund, L., El Ghami, M., Alfaki, M., & Haugland, D. (2012). Solving the pooling problem with LMI relaxations. *Models and Solution Methods for the Pooling Problem*.
- Gatune, J. (2011). *The Future of Agriculture in Africa*.
- Glismann, K., & Gruhn, G. (2001). Short-term scheduling and recipe optimization of blending processes. *Computers & chemical engineering*, 25(4-6), 627-634.
- Global Specialty Fertilizers Market—Growth, Trends, and Forecast (2020—2025). (s. d.). Consulté 25 mai 2021, à l'adresse <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/specialty-fertilizers-market>
- Goldsmith, P. L. (1966). The theoretical performance of a semi-continuous blending system. *Journal of the Royal Statistical Society. Series D (The Statistician)*, 16(3), 227-251.
- Goulding, K., Jarvis, S., & Whitmore, A. (2008). Optimizing nutrient management for farm systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1491), 667-680. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2177>
- Gounaris, C. E., & Floudas, C. A. (2007). Formulation and relaxation of an extended pooling problem. 2007 AIChE Annual Meeting.
- Gounaris, Chrysanthos E., Misener, R., & Floudas, C. A. (2009). Computational Comparison of Piecewise-Linear Relaxations for Pooling Problems. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(12), 5742-5766. <https://doi.org/10.1021/ie8016048>
- Graziosi, S., & Germani, M. (2008). Sustainable Production in the Age of Mass Customization : An Example in the Footwear Industry. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 48692, 887-895.
- Grundemann, L., Gonschorowski, V., Fischer, N., & Scholl, S. (2012). Cleaning waste minimization for multiproduct plants : Transferring macro batch to micro conti manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 24, 92-101.
- Gungor, Z. E., & Evans, S. (2017a). Understanding the hidden cost and identifying the root causes of changeover impacts. *Journal of Cleaner Production*, 167, 1138-1147.
- Gungor, Z. E., & Evans, S. (2017b). Understanding the hidden cost and identifying the root causes of changeover impacts. *Journal of Cleaner Production*, 167, 1138-1147. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.055>
- Gupta, D., & Benjaafar, S. (2004a). Make-to-order, make-to-stock, or delay product differentiation ? A common framework for modeling and analysis. *IIE transactions*, 36(6), 529-546.
- Gupta, D., & Benjaafar, S. (2004b). Make-to-order, make-to-stock, or delay product differentiation? A common framework for modeling and analysis. *IIE Transactions*, 529-546.
- Gupta, S., & Jain, S. K. (2013). A literature review of lean manufacturing. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 8(4), 241-249.

- Gupte, A., Ahmed, S., Dey, S. S., & Cheon, M. S. (2013). Pooling problems : Relaxations and discretizations. 38.
- Gupte, A., Ahmed, S., Dey, S. S., & Cheon, M. S. (2016). Pooling problems : Relaxations and discretizations. 38.
- Gupte, A., Ahmed, S., Dey, S. S., & Cheon, M. S. (2017). Relaxations and discretizations for the pooling problem. *Journal of Global Optimization*, 67(3), 631–669. <https://doi.org/10.1007/s10898-016-0434-4>
- Gusenbauer, M. (2019). Google Scholar to overshadow them all? Comparing the sizes of 12 academic search engines and bibliographic databases. *Scientometrics*, 118(1), 177–214. <https://doi.org/10.1007/s11192-018-2958-5>
- Haglund, M., & Helander, J. (1998). Development of value networks-an empirical study of networking in Swedish manufacturing industries. IEMC'98 Proceedings. International Conference on Engineering and Technology Management. Pioneering New Technologies: Management Issues and Challenges in the Third Millennium (Cat. No. 98CH36266), 350–358.
- Hanafy, M., & ElMaraghy, H. (2015). >Developing assembly line layout for delayed product differentiation using phylogenetic networks. *International Journal of Production Research*, 53(9), 2633–2651. <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.974839>
- Handfield, R. B., & Nichols, E. L. (2002). *Supply chain redesign : Transforming supply chains into integrated value systems*. Ft Press.
- Harsch, E. (2016, août 30). L'agriculture africaine, « vecteur de croissance ». *AfriqueRenouveau*. <https://www.un.org/africarenewal/fr/magazine/janvier-2004/lagriculture-africaine-vecteur-de-croissance>
- Hart, C. W. (1995). Mass customization : Conceptual underpinnings, opportunities and limits. *International Journal of Service Industry Management*.
- Haverly, C. A. (1978). Studies of the behavior of recursion for the pooling problem. *ACM SIGMAP Bulletin*, 25, 19–28. <https://doi.org/10.1145/1111237.1111238>
- Heizer, J., & Render, B. (2006). *Operations Management (Manajemen Operasi)*. Jakarta: Salemba Empat.
- Hillier, M. S. (2002). Using commonality as backup safety stock. *European Journal of Operational Research*, 136(2), 353–365.
- Hirel, B., Tétu, T., Lea, P., & Dubois, F. (2011). Improving Nitrogen Use Efficiency in Crops for Sustainable Agriculture. *Sustainability* 3, 3, 1452–1485.
- Hirsch, B. E., Thoben, K.-D., & Hoheisel, J. (1998). Requirements upon human competencies in globally distributed manufacturing. *Computers in Industry*, 36(1–2), 49–54.
- Hoffmeister, G., Watkins, S. C., & Silverberg, J. (1964a). Fertilizer consistency, bulk blending of fertilizer material : Effect of size, shape, and density on segregation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 12(1), 64–69.

- Hoffmeister, G., Watkins, S. C., & Silverberg, J. (1964b). Fertilizer Consistency, Bulk Blending of Fertilizer Material: Effect of Size, Shape, and Density on Segregation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 12(1), 64-69. <https://doi.org/10.1021/jf60131a020>
- Hsu, H.-M., & Wang, W.-P. (2004). Dynamic programming for delayed product differentiation. *European Journal of Operational Research*, 156(1), 183-193.
- Incrocci, L., Massa, D., & Pardossi, A. (2017). New trends in the fertigation management of irrigated vegetable crops. *Horticulturae*, 3(2), 37.
- Ismaili, F. (2019). Plan Maroc Vert: Le bilan des finances. [fr.le360.ma. https://fr.le360.ma/economie/plan-maroc-vert-le-bilan-des-finances-195243](https://fr.le360.ma/economie/plan-maroc-vert-le-bilan-des-finances-195243)
- Istook, C. L. (2002). Enabling mass customization: Computer-driven alteration methods. *International Journal of Clothing Science and Technology*.
- Jagdev, H. S., & Browne, J. (1998). The extended enterprise-a context for manufacturing. *Production Planning & Control*, 9(3), 216-229.
- Janneh, A., & Ping, J. (2012). L'Afrique en tant que pôle de croissance mondiale. 3.
- Jareonkitpoolpol, A., Ongkunaruk, P., & Janssens, G. K. (2018). Determination of the optimal blending problem of organic-chemical fertilizer under uncertainty. *Soil Use and Management*, 34(4), 449-460. <https://doi.org/10.1111/sum.12449>
- Jenny, H. (1941). *Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology*. <http://store.doverpublications.com/0486681289.html>
- Jensen, K. N., Nielsen, K., & Brunoe, T. D. (2015). Application of mass customization in the construction industry. IFIP international conference on advances in production management systems, 161-168.
- Jewkes, E. M., & Alfa, A. S. (2009a). A queueing model of delayed product differentiation. *European Journal of Operational Research*, 199(3), 734-743.
- Jewkes, E. M., & Alfa, A. S. (2009b). A queueing model of delayed product differentiation. *European Journal of Operational Research*, 199(3), 734-743. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.08.001>
- Jia, Z., & Ierapetritou, M. (2003). Mixed-integer linear programming model for gasoline blending and distribution scheduling. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 42(4), 825-835.
- Jin, J., Tang, C., & Sale, P. (2015). The impact of elevated carbon dioxide on the phosphorus nutrition of plants: A review. *Annals of Botany*, 116(6), 987-999. <https://doi.org/10.1093/aob/mcv088>
- Johnson, M. D., & Kirchain, R. E. (2009). Quantifying the effects of product family decisions on material selection: A process-based costing approach. *International Journal of Production Economics*, 120(2), 653-668.

- Jones, C., & Jacobsen, J. (2005). Plant nutrition and soil fertility. *Nutrient management module*, 2(11).
- Kampen, T. V., & Donk, D. P. V. (2014). Coping with product variety in the food processing industry: The effect of form postponement. *International Journal of Production Research*, 52(2), 353-367. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.825741>
- Karasu, M. K., Cakmakci, M., Cakiroglu, M. B., Ayva, E., & Demirel-Ortabas, N. (2014). Improvement of changeover times via Taguchi empowered SMED/case study on injection molding production. *Measurement*, 47, 741-748.
- Karmarkar, U. S., & Rajaram, K. (2001). Grade selection and blending to optimize cost and quality. *Operations Research*, 49(2), 271-280.
- Kerckänen, A. (2007). Determining semi-finished products to be stocked when changing the MTS-MTO policy: Case of a steel mill. *International Journal of Production Economics*, 108(1-2), 111-118.
- Kilic, O. A., Akkerman, R., van Donk, D. P., & Grunow, M. (2013a). Intermediate product selection and blending in the food processing industry. *International Journal of Production Research*, 51(1), 26-42. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.640955>
- Kilic, O. A., Akkerman, R., van Donk, D. P., & Grunow, M. (2013b). Intermediate product selection and blending in the food processing industry. *International Journal of Production Research*, 51(1), 26-42. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.640955>
- Kobri, B. (2018). Les pays africains classés selon le nouvel Indice de l'Émergence en Afrique 2017 (OBEMA). Agence Ecofin. <https://www.agenceecofin.com/gouvernance-economique/2802-54801-les-pays-africains-classes-selon-le-nouvel-indice-de-l-emergence-en-afrique-2017-obema>
- Kotha, S. (1995). Mass Customization: Implementing the Emerging Paradigm for Competitive Advantage. *Strategic Management Journal*, 16, 21-42.
- Kotha, S. (1996). From mass production to mass customization: The case of the National Industrial Bicycle Company of Japan. *European Management Journal*, 14(5), 442-450.
- Kotler, P. (1989). From mass marketing to mass customization. *Planning review*.
- Krapp, A., David, L. C., Chardin, C., Girin, T., Marmagne, A., Leprince, A.-S., Chaillou, S., Ferrario-Méry, S., Meyer, C., & Daniel-Vedele, F. (2014). Nitrate transport and signalling in *Arabidopsis*. *Journal of Experimental Botany*, 65(3), 789-798. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru001>
- Kuester, J. L., & Mize, J. H. (s. d.). *Optimization techniques with FORTRAN*, 1973. McGraw-Hill, New York.
- Kumar, A. (2004). Mass customization: Metrics and modularity. *International journal of flexible manufacturing systems*, 16(4), 287-311.

Kumar, D. (2019). Chapter-4 Specialty Fertilizers and Their Importance in Yield Maximization of Agricultural Crops. *AGRONOMY*, 71.

Kumral, M. (2003). Application of chance-constrained programming based on multi-objective simulated annealing to solve a mineral blending problem. *Engineering Optimization*, 35(6), 661-673.

Kural, A., & Özsoy, C. (2004). Identification and control of the raw material blending process in cement industry. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 18(5), 427-442.

L'agriculteur au coeur du développement. (2019). Rapports annuels | OCP GROUP. <https://corpo.ocpgroup.ma/en/investors/annual-report>

Lampel, J., & Mintzberg, H. (1996). Customizing customization. *Sloan management review*, 38(1), 21-30.

Lancaster, K. (1979). *Variety, equity, and efficiency : Product variety in an industrial society* (Vol. 10). New York: Columbia University Press.

Larsen, M. S. S., Lindhard, S. M., Brunoe, T. D., Nielsen, K., & Larsen, J. K. (2019). Mass Customization in the House Building Industry : Literature Review and Research Directions. *Built Environ*, 5, 115.

Lau, R. S. M. (1995). Mass customization : The next industrial revolution. *Industrial Management; Norcross*, 37(5), 18.

Le Capitaine, S., & Carison, C. (2018, septembre 6). Complex Fertilizers Outperform Blends in Uniform Nutrient Distribution. <https://feeco.com/complex-fertilizers-outperform-blends-in-uniform-nutrient-distribution/>

Lee, H. L., & Tang, C. S. (1997). Modelling the Costs and Benefits of Delayed Product Differentiation. *Management Science*, 43(1), 40-53.

Lee, H., Pinto, J. M., Grossmann, I. E., & Park, S. (1996). Mixed-Integer Linear Programming Model for Refinery Short-Term Scheduling of Crude Oil Unloading with Inventory Management. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 35(5), 1630-1641. <https://doi.org/10.1021/ie950519h>

Li, D.-C., Chang, F. M., & Chang, S.-C. (2010). The relationship between affecting factors and mass-customisation level : The case of a pigment company in Taiwan. *International Journal of Production Research*, 48(18), 5385-5395. <https://doi.org/10.1080/00207540903130884>

Li, X., Armagan, E., Tomasgard, A., & Barton, P. I. (2011). Stochastic pooling problem for natural gas production network design and operation under uncertainty. *AIChE Journal*, 57(8), 2120-2135. <https://doi.org/10.1002/aic.12419>

Lima, R. L. S., Severino, L. S., Sampaio, L. R., Sofiatti, V., Gomes, J. A., & Beltrão, N. E. M. (2011). Blends of castor meal and castor husks for optimized use as organic fertilizer. *Industrial Crops and Products*, 33(2), 364-368. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.11.008>

- Liu, W., Wang, Q., Zhu, D., & Liu, Y. (2014). A determination method of optimal customization degree of logistics service supply chain with mass customization service. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2014.
- Loh, S. K., Cheong, K. Y., Choo, Y. M., & Salimon, J. (2015). Formulation and optimisation of spent bleaching earth-based bio organic fertiliser. *Journal of Oil Palm Research*, 27(1), 57-66.
- Lu, S., Su, H., Johnsson, C., Wang, Y., & Xie, L. (2015). Modeling and optimization methods of integrated production planning for steel plate mill with flexible customization. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 23(12), 2037-2047.
- M. Cole, B., Bradshaw, S., & Potgieter, H. (2015). An optimisation methodology for a supply chain operating under any pertinent conditions of uncertainty—An application with two forms of operational uncertainty, multi-objectivity and fuzziness. 23(2), 200-227.
- Ma, S., Wang, W., & Liu, L. (2002). Commonality and postponement in multistage assembly systems. *European Journal of Operational Research*, 142(3), 523-538.
- MacCarthy, B., Brabazon, P. G., & Bramham, J. (2003). Fundamental modes of operation for mass customization. *International Journal of Production Economics*, 85(3), 289-304. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(03\)00117-8](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(03)00117-8)
- MacDuffie, J. P., Sethuraman, K., & Fisher, M. L. (1996). Product variety and manufacturing performance : Evidence from the international automotive assembly plant study. *Management Science*, 42(3), 350-369.
- Magretta, J. (1998). The power of virtual integration : An interview with Dell Computer's Michael Dell.
- Majumdar, S., & Prakash, N. B. (2018). Prospects of Customized Fertilizers in Indian Agriculture. *Current Science*, 115(2), 242. <https://doi.org/10.18520/cs/v115/i2/242-248>
- MAPM. (2019). Le secteur agricole marocain : Tendances structurelles, enjeux et perspectives de développement. *Transfert de Technologie en Agriculture Maroc*. <https://www.agrimaroc.net/2019/07/27/2801/>
- Mchunu, C., de Alwis, A., & Efstathiou, J. (2003). A Framework for Selecting a Best-Fit Mass Customization Strategy. In *The Customer Centric Enterprise* (p. 429-445). Springer.
- McIntosh, R. I., Matthews, J., Mullineux, G., & Medland, A. J. (2010). Late customisation : Issues of mass customisation in the food industry. *International Journal of Production Research*, 48(6), 1557-1574. <https://doi.org/10.1080/00207540802577938>
- Meixell, M. J. (2005). The impact of setup costs, commonality, and capacity on schedule stability : An exploratory study. *International Journal of Production Economics*, 95(1), 95-107. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2003.11.010>
- Meixell, M. J., & Wu, S. D. (2004). Collaborative manufacturing for mass customization. In *Mass Customization* (p. 169-189). Springer.

- Menessier, M. (2017). Le jardinage bio n'est pas meilleur pour la santé. LEFIGARO. <https://www.lefigaro.fr/jardin/2017/01/20/30008-20170120ARTFIG00058-le-jardinage-bio-est-il-meilleur-pour-la-sante.php>
- Meunier, J. (2002). Afrique : Agriculture, développement et recherche Agriculture et recherche agronomique : une histoire et des enjeux partagés. *Oléagineux, Corps gras, Lipides*, 9(6), 400 401. <https://doi.org/10.1051/ocl.2002.0400>
- Meyer, C. A., & Floudas, C. A. (2006). Global optimization of a combinatorially complex generalized pooling problem. *AICHE Journal*, 52(3), 1027 1037. <https://doi.org/10.1002/aic.10717>
- Migas, N., Anastasiadou, C., & Stirling, A. (2008). Individualized tourism brochures as a novel approach to mass customization. *Journal of Hospitality & Leisure Marketing*, 17(1 2), 237 257.
- Mihailidis, D., & Chelst, K. R. (1998). Optimal blending of out-of-specifications substances. *Journal of the Operational Research Society*, 49(5), 458 466.
- Mikula, K., Izydorczyk, G., Skrzypczak, D., Mironiuk, M., Moustakas, K., Witek-Krowiak, A., & Chojnacka, K. (2020). Controlled release micronutrient fertilizers for precision agriculture—A review. *Science of The Total Environment*, 712, 136365.
- Mínguez, M. I., Romero, C., & Domingo, J. (1988). Determining Optimum Fertilizer Combinations Through Goal Programming with Penalty Functions : An Application to Sugar Beet production in Spain. *Journal of the Operational Research Society*, 39(1), 61 70. <https://doi.org/10.1057/jors.1988.8>
- Misener, R., & Floudas, C. A. (2010). Global Optimization of Large-Scale Generalized Pooling Problems : Quadratically Constrained MINLP Models. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 49(11), 5424 5438. <https://doi.org/10.1021/ie100025e>
- Misener, R., Gounaris, C. E., & Floudas, C. A. (2010). Mathematical modeling and global optimization of large-scale extended pooling problems with the (EPA) complex emissions constraints. *Computers & Chemical Engineering*, 34(9), 1432 1456. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2010.02.014>
- Miserque, O., & Pirard, E. (2004). Segregation of the bulk blend fertilizers. *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, 74(1), 215 224.
- Montante, G., Coroneo, M., & Paglianti, A. (2016). Blending of miscible liquids with different densities and viscosities in static mixers. *Chemical Engineering Science*, 141, 250 260.
- Morikawa, K., Takahashi, K., & Hirotsu, D. (2014). Make-to-stock policies for a multistage serial system under a make-to-order production environment. *International Journal of Production Economics*, 147, 30 37. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.02.016>
- Mrabet, R. (2016). Quelles réponses aux défis liés à la réduction de l'empreinte écologique?

- Murthy, D., Hagmark, P.-E., & Virtanen, S. (2009). Product variety and reliability. Undefined. [/paper/Product-variety-and-reliability-Murthy-Hagmark/9194191aae7ed22ee76a16099587c1e536e5f3dc](#)
- Myung, S., & Han, S. (2001). Knowledge-based parametric design of mechanical products based on configuration design method. *Expert Systems with applications*, 21(2), 99-107.
- Naamane, A., Sadiq, A., Belhouari, A., Iounes, N., & Amrani, S. E. (2020). Enquête sur l'utilisation des engrais et pesticides chez les agriculteurs de la région de Casablanca-Settat. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 8(3). https://www.agrimaroc.org/index.php/Actes_IAVH2/article/view/836
- Nagarur, N., & Azeem, A. (1999). Impact of commonality and flexibility on manufacturing performance : A simulation study. *International Journal of Production Economics*, 60, 125-134.
- Nepal, B., Monplaisir, L., & Singh, N. (2005). Integrated fuzzy logic-based model for product modularization during concept development phase. *International Journal of Production Economics*, 96(2), 157-174.
- O'Brien, J. A., Vega, A., Bouguyon, E., Krouk, G., Gojon, A., Coruzzi, G., & Gutiérrez, R. A. (2016). Nitrate Transport, Sensing, and Responses in Plants. *Molecular Plant*, 9(6), 837-856. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2016.05.004>
- Organization, U. I. D., & Center, I. F. D. (Éds.). (1998). *Fertilizer Manual*. Springer Netherlands. <https://www.springer.com/gp/book/9780792350323>
- Panara, M. (2019, octobre 8). Ces pays africains parmi les plus prometteurs. *Le Point*. https://www.lepoint.fr/afrique/ces-pays-africains-parmi-les-plus-prometteurs-08-10-2019-2340114_3826.php
- Paull, J. (2009). *A Century of Synthetic Fertilizer : 1909-2009*. 94, 6.
- Perera, H. S. C., Nagarur, N., & Tabucanon, M. T. (1999). Component part standardization : A way to reduce the life-cycle costs of products. *International journal of production economics*, 60, 109-116.
- Peters, L., & Saidin, H. (2000). IT and the mass customization of services : The challenge of implementation. *International Journal of Information Management*, 20(2), 103-119.
- Petrovets, V. R., Samsonov, V. L., & Kolos, S. V. (2010). About the efficiency of application of mineral fertilizers in the system of precise farming. *Bulletin of the Belarussian State Agricultural Academy: the guidance journal*.
- Pham, V., Laird, C., & El-Halwagi, M. (2009). Convex Hull Discretization Approach to the Global Optimization of Pooling Problems. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(4), 1973-1979. <https://doi.org/10.1021/ie8003573>
- Pil, F. K., & Holweg, M. (2004). Linking product variety to order-fulfillment strategies. *Interfaces*, 34(5), 394-403.

- Piller, Frank T. (2004). Mass customization: Reflections on the state of the concept. *International journal of flexible manufacturing systems*, 16(4), 313-334.
- Piller, Frank Thomas. (2000). Mass customization. In *Handbuch Produktmanagement* (p. 883-907). Springer.
- Pine, B. J., Pine, J., Davis, S., & Press, H. B. (1993). *Mass Customization: The New Frontier in Business Competition*. Harvard Business School Press. <https://books.google.co.ma/books?id=Seli55Gt-sEC>
- Pine, B. Joseph. (1993). Mass customizing products and services. *Planning Review*, 21(4), 6-55. <https://doi.org/10.1108/eb054420>
- Pine, B. Joseph, & Gilmore, J. H. (1999). *The experience economy: Work is theatre & every business a stage*. Harvard Business Press.
- Pine, B. Joseph, Victor, B., & Boynton, A. C. (1993). Making mass customization work. *Harvard business review*, 71(5), 108-111.
- Pine, I. I. (1993). *The new frontier in Business Competition*. Harvard Business School Press, Boston.
- Pine, J., & Gilmore, J. (1997). *Beyond goods and services*. Strategy & Leadership-London: Emerald Group Publishing Limited, 25(3).
- Prajapati, K. (2012). THE IMPORTANCE OF POTASSIUM IN PLANT GROWTH – A REVIEW. *Indian Journal of Plant Sciences*, 1, 177-186.
- Pratt, C. J. (1965). Chemical Fertilizers. *Scientific American*, 212(6), 62-75.
- Programme, U. N. E. (2006). *Africa Environment Outlook 2: Our Environment, our wealth*. UNEP. <https://wedocs.unep.org/xmlui/handle/20.500.11822/9626>
- Publications de Fertilizers Europe. (2014). *Fertilizers Europe*. <https://www.fertilizerseurope.com/publications/>
- Pulidindi, K., & Prakash, A. (2020). Fertilizer Market Size, Share & Growth | Industry Outlook—2026. Global Market Insights, Inc. <https://www.gminsights.com/industry-analysis/fertilizer-market>
- Purohit, A., & Suryawanshi, T. (2013). Integrated Product Blending Optimization for Oil Refinery Operations. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(32), 343-348.
- Rajani, A. (2019). CHAPTER: 8 FERTILIZER MIXTURES (MIXED FERTILIZERS). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23850.36801>
- Rakshit, R., Rakshit, A., & Das, A. (2012). Customized fertilizers: Marker in fertilizer revolution. *International journal of agriculture, environment and biotechnology*, 5(1), 67-75.
- Rautenstrauch, C., Tangemann, H., & Turowski, K. (2002). Manufacturing planning and control content management in virtual enterprises pursuing mass customization. In *Moving into Mass Customization* (p. 103-118). Springer.

Reddy, J. M. (1975). A model to schedule sales optimally blended from scarce resources. *Interfaces*, 6(1-part-2), 97-106.

Regulation (EU) 2019 of the European parliament and of the council of the European Union. (2019, mai 8). <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/PE-76-2018-INIT/en/pdf>

Render, M. L., Brungs, S., Kotagal, U., Nicholson, M., Burns, P., Ellis, D., Clifton, M., Fardo, R., Scott, M., & Hirschhorn, L. (2006). Evidence-based practice to reduce central line infections. *The Joint Commission Journal on Quality and Patient Safety*, 32(5), 253-260.

Roebroek, H. (2009). *Le prélèvement de terre : Quels acquis méthodologiques*. 27.

Ross, A. (1996). Selling uniqueness. *Manufacturing Engineer*, 75(6), 260-263.

Ruffel, S., Gojon, A., & Lejay, L. (2014). Signal interactions in the regulation of root nitrate uptake. *Journal of Experimental Botany*, 65(19), 5509-5517. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru321>

Sachs, J. D., McArthur, J. W., Schmidt-Traub, G., Kruk, M., Bahadur, C., Faye, M., & McCord, G. (2004). Ending Africa's Poverty Trap. *Brookings Papers on Economic Activity*, 2004(1), 117-216.

Salehi, M., Shirouyehzad, H., & Dabestani, R. (2013). Labour productivity measurement through classification and standardisation of products. *International Journal of Productivity and Quality Management*, 11(1), 57-72.

Salvador, F., Forza, C., & Rungtusanatham, M. (2002). Modularity, product variety, production volume, and component sourcing: Theorizing beyond generic prescriptions. *Journal of operations management*, 20(5), 549-575.

Sandrin, E. (2016). An empirical study of the external environmental factors influencing the degree of product customization. *International Journal of Industrial Engineering and Management*, 7(4), 135-142.

Schuler, M. (1993). *Genèse d'un outil informatique pour l'apprentissage et la mise-en-oeuvre de la veille stratégique : Un cas de gestion de la communication entre école et entreprise*. Grenoble 2.

Search | Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. (2019). <http://www.fao.org/home/search/fr/?q=l%27%C3%A9tat%20de%20la%20s%C3%A9curit%C3%A9%20alimentaire>

Seth, D., & Panigrahi, A. (2015). Application and evaluation of packaging postponement strategy to boost supply chain responsiveness: A case study. *Production planning & control*, 26(13), 1069-1089.

Shao, X.-F., & Ji, J.-H. (2008a). Evaluation of postponement strategies in mass customization with service guarantees. *International Journal of Production Research*, 46(1), 153-171.

Shao, X.-F., & Ji, J.-H. (2008b). Evaluation of postponement strategies in mass customization with service guarantees. *International Journal of Production Research*, 46(1), 153-171. <https://doi.org/10.1080/00207540600844027>

Sharda, B., & Akiya, N. (2012a). Selecting make-to-stock and postponement policies for different products in a chemical plant: A case study using discrete event simulation. *International Journal of Production Economics*, 136(1), 161-171.

Sharda, B., & Akiya, N. (2012b). Selecting make-to-stock and postponement policies for different products in a chemical plant: A case study using discrete event simulation. *International Journal of Production Economics*, 136(1), 161-171. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.10.001>

Sharma, A., & Chetani, R. (2017). A review on the effect of organic and chemical fertilizers on plants. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, 5(2), 677-680.

Singh, A., Forbes, J. F., Vermeer, P. J., & Woo, S. S. (2000). Model-based real-time optimization of automotive gasoline blending operations. *Journal of process control*, 10(1), 43-58.

Skipworth, H., & Harrison, A. (2004). Implications of form postponement to manufacturing: A case study. *International Journal of Production Research*, 42(10), 2063-2081. <https://doi.org/10.1080/00207540410001661373>

Smith, W. R. (1956). Product differentiation and market segmentation as alternative marketing strategies. *Journal of marketing*, 21(1), 3-8.

Snee, R. D. (1981). Developing blending models for gasoline and other mixtures. *Technometrics*, 23(2), 119-130.

Soman, C. A., Van Donk, D. P., & Gaalman, G. (2004). Combined make-to-order and make-to-stock in a food production system. *International Journal of Production Economics*, 90(2), 223-235.

Srichaipanya, W., Artrit, P., & Sangrung, A. (2014). Fertilizer Quality Control of a Bulk-Blending Plant Using Intelligent Systems. *Suranaree Journal of Science & Technology*, 21(3), 137-146.

Steuer, R. E. (1984). Sausage blending using multiple objective linear programming. *Management Science*, 30(11), 1376-1384.

Stokes, J. R., & Tozer, P. R. (2006). Optimal feed mill blending. *Review of agricultural economics*, 28(4), 543-552.

Su, J. C. P., Chang, Y.-L., & Ferguson, M. (2005). Evaluation of postponement structures to accommodate mass customization. *Journal of Operations Management*, 23(3), 305-318. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2004.10.016>

Sundar, R., Balaji, A. N., & Kumar, R. S. (2014). A review on lean manufacturing implementation techniques. *Procedia Engineering*, 97(1), 1875-1885.

The World's Most Expensive Fertilizer Market: Sub-Saharan Africa. (2016). Gro Intelligence. <https://gro-intelligence.com/>

- Thompson, M., & Nussbaum, R. (2000). An HMO survey on mass customization of healthcare delivery for women. *Women's Health Issues*, 10(1), 10-19.
- Ting, L., Castro, P. M., & Zhimin, L. (2016). Models and relaxations for the wastewater treatment design problem. *Chemical Engineering Research and Design*, 106, 191-204. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.12.013>
- Toffler, A. (1970). *Future shock*, 1970. Sydney. Pan.
- Tseng, M. M., & Jiao, J. (2001). Mass customization. *Handbook of industrial engineering*, 3, 684-709.
- Tseng, M. M., Jiao, J., & Merchant, M. E. (1996). Design for mass customization. *CIRP annals*, 45(1), 153-156.
- Tu, Q., Vonderembse, M. A., Ragu-Nathan, T. S., & Ragu-Nathan, B. (2004). Measuring modularity-based manufacturing practices and their impact on mass customization capability: A customer-driven perspective. *Decision Sciences*, 35(2), 147-168.
- Twede, D., Clarke, R. H., & Tait, J. A. (2000). Packaging postponement: A global packaging strategy. *Packaging Technology and Science*, 13(3), 105-115. [https://doi.org/10.1002/1099-1522\(200005\)13:3<105::AID-PTS503>3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/1099-1522(200005)13:3<105::AID-PTS503>3.0.CO;2-9)
- Tyagi, S. (2015). Optimization of a platform configuration with generational changes. *International Journal of Production Economics*, 169, 299-309.
- Urea—Nutrient Source Specifics Series. (2016). International Plant Nutrition Institute (IPNI), Ref # 10061. [https://www.ipni.net/publication/nss.nsf/0/5FE74632D6D80872852579AF00706626/\\$FILE/NSS-01%20Urea.pdf](https://www.ipni.net/publication/nss.nsf/0/5FE74632D6D80872852579AF00706626/$FILE/NSS-01%20Urea.pdf)
- Van Donk, D. P. (2001). Make to stock or make to order: The decoupling point in the food processing industries. *International Journal of Production Economics*, 69(3), 297-306.
- Van Hoek, R. (1997). Postponed manufacturing: A case study in the food supply chain. *Supply Chain Management: An International Journal*, 2(2), 63-75. <https://doi.org/10.1108/13598549710166113>
- Van Hoek, R. I. (2001). The rediscovery of postponement a literature review and directions for research. *Journal of operations management*, 19(2), 161-184.
- Van Hoek, R. I., Cammandeur, H. R., & Vos, B. (1998). Reconfiguring logistics systems through postponement strategies. *Journal of Business logistics*, 19(1.1998), 33.
- Vanlauwe, B. (2015, avril 27). Time to end the false debate of organic vs. Mineral fertilizer. *Devex*. <https://www.devex.com/news/sponsored/time-to-end-the-false-debate-of-organic-vs-mineral-fertilizer-85982>
- Vidal, E. A., Álvarez, J. M., & Gutiérrez, R. A. (2014). Nitrate regulation of AFB3 and NAC4 gene expression in Arabidopsis roots depends on NRT1.1 nitrate transport function. *Plant Signaling & Behavior*, 9(3), e28501.

- Visweswaran, V. (2009). MINLP : Applications in blending and pooling problems MINLP: Applications in Blending and Pooling Problems. In C. A. Floudas & P. M. Pardalos (Éds.), *Encyclopedia of Optimization* (p. 2114 2121). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-0-387-74759-0_375
- Wagner, J. (2019). Mounir Halim (Africom) : « Le monde des engrais est très opaque en Afrique » – Jeune Afrique. JeuneAfrique.com. <https://www.jeuneafrique.com/793358/economie/mounir-halim-africom-le-monde-des-engrais-est-tres-opaque-en-afrique/>
- WANG, J., YAN, C., & HAN, B. (2011). Development of Slow Release Bulk Blending Fertilizer for Spring Maize and Fertilizer Efficiency Experiment. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2.
- Wang, Y.-Y., Hsu, P.-K., & Tsay, Y.-F. (2012). Uptake, allocation and signaling of nitrate. *Trends in Plant Science*, 17(8), 458 467. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.04.006>
- Warncke, D. D. (2000). Sampling Soils for Fertilizer and Lime Recommendations (Extension Bulletin No E498; p. 6). Michigan State University Extension. [http://msue.anr.msu.edu/uploads/resources/pdfs/soil_sampling_guide_\(E0498\).pdf](http://msue.anr.msu.edu/uploads/resources/pdfs/soil_sampling_guide_(E0498).pdf)
- Warnecke, H. J., & Hüser, M. (1995). Lean production. *International Journal of Production Economics*, 41(1), 37 43. [https://doi.org/10.1016/0925-5273\(95\)00080-1](https://doi.org/10.1016/0925-5273(95)00080-1)
- Watson, C. a., Atkinson, D., Gosling, P., Jackson, L. r., & Rayns, F. w. (2002). Managing soil fertility in organic farming systems. *Soil Use and Management*, 18, 239 247. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2002.tb00265.x>
- Westbrook, R., & Williamson, P. (1993). Mass customization : Japan's new frontier. *European Management Journal*, 11(1), 38 45.
- White, P. J., & Brown, P. H. (2010). Plant nutrition for sustainable development and global health. *Annals of Botany*, 105(7), 1073 1080. <https://doi.org/10.1093/aob/mcq085>
- Whitelock, J. M. (1987). Global marketing and the case for international product standardisation. *European Journal of marketing*.
- Williams, K. B., & Haley, K. B. (1959). A practical application of linear programming in the mining industry. *Journal of the Operational Research Society*, 10(3), 131 137.
- Wong, H., Potter, A., & Naim, M. (2011). Evaluation of postponement in the soluble coffee supply chain : A case study. *International Journal of Production Economics*, 131(1), 355 364. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.08.015>
- xian. (s. d.). Engrais minéraux composés. Consulté 25 mai 2021, à l'adresse <https://fertilisation-edu.fr/production-ressources/engrais-mineraux-composes.html>
- Yang, B., Burns, N. D., & Backhouse, C. J. (2004). Postponement : A review and an integrated framework. *International Journal of Operations & Production Management*.

- Yao, A. C., & Carlson, J. G. (2003). Agility and mixed-model furniture production. *International Journal of Production Economics*, 81, 95-102.
- Yoon, W. B., Park, J. W., & Kim, B. Y. (1997). Surimi-starch interactions based on mixture design and regression models. *Journal of food science*, 62(3), 555-560.
- Zhang, J., Shou, B., & Chen, J. (2013). Postponed product differentiation with demand information update. *International Journal of Production Economics*, 141(2), 529-540. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.09.007>
- Zhang, M., & Tseng, M. M. (2007). A product and process modeling based approach to study cost implications of product variety in mass customization. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 54(1), 130-144.
- Zhang, X., & Huang, G. Q. (2010). Game-theoretic approach to simultaneous configuration of platform products and supply chains with one manufacturing firm and multiple cooperative suppliers. *International Journal of Production Economics*, 124(1), 121-136.
- Zinn, W. (1990). Developing heuristics to estimate the impact of postponement on safety stock. *The International Journal of Logistics Management*, 1(2), 11-16.
- Zinn, W., & Bowersox, D. J. (1988). Planning physical distribution with the principle of postponement. *Journal of business logistics*, 9(2).
- Zipkin, P. (2001). The Limits of Mass Customization. *MIT Sloan Management Review*, 42(3), 81-87.

ANNEXES

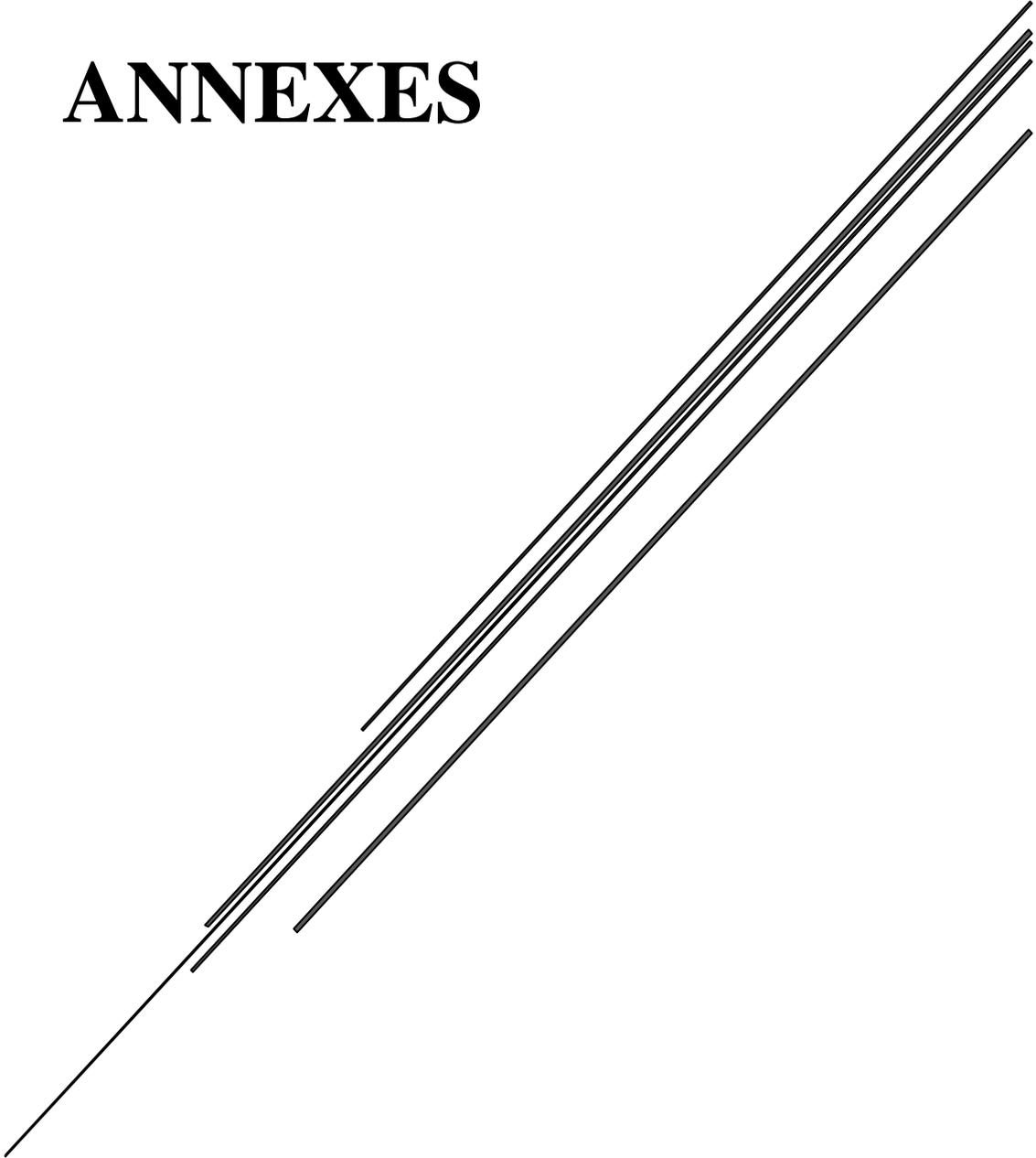


Table des Annexes

Annexe 1. Construction d'un échantillon de 700 solutions d'engrais par Fertimap	295
1 Présentation de l'outil Fertimap	295
1.1.1 Cadre général du projet Fertimap	295
1.1.2 Base de données de Fertimap	296
1.1.3 Interfaces de Fertimap	296
2 Démarche de définition de construction de l'échantillon des 700 solutions d'engrais	298
Annexe 2. Résultats relatifs à l'étude de cas utilisant la version standard du RB sur un échantillon de 700 besoins NPK	315
Annexe 3. Données et résultats relatifs à l'étude de cas utilisant le modèle UBC sur un échantillon de 50 engrais.....	320
Annexe 4. Résultats relatifs à l'étude de cas utilisant le modèle RD sur les 142 engrais vendus par les dix plus grands producteurs d'engrais.....	322
Annexe 6. Résultats relatifs à l'étude de cas utilisant le modèle RB sur les 142 engrais vendus par les dix plus grands producteurs d'engrais.....	326
Annexe 7. Résultats relatifs à l'étude de cas utilisant le modèle ERB (version étendue du RB) sur un échantillon de 700 besoins NPK.....	330
Annexe 8. Résultats relatifs à l'étude de cas testant le modèle du RB sur le programme mensuel de production de l'OCP en 2019	337
Annexe 9. Application possible du Reverse Blending pour obtenir une différenciation retardée des cosmétiques	339
1 Revue de littérature	339
2 Étude de cas.....	341
2.1 Jeu de données	342
2.2 Résultats et commentaires.....	345

Annexe 1. Construction d'un échantillon de 700 solutions d'engrais par Fertimap

Un lien Mendeleev vers plusieurs classeurs Excel résumant les caractéristiques de ces 700 solutions d'engrais et les résultats des différentes études de cas liées à cet échantillon a été créé :

<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.107603>

1 Présentation de l'outil Fertimap

Le Maroc a déployé de grands efforts ces dernières années pour promouvoir son secteur agricole. Il a pris conscience que l'agriculteur reste l'élément clé pour la réussite de sa recherche et ses projets agricoles. Ce dernier doit en effet être impliqué, sensibilisé, formé et encadré, de façon permanente, sur l'ensemble des projets réalisés et en cours. C'est ainsi que le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime (MAPM) et le Groupe OCP ont lancé le projet Fertimap dont la finalité est de mettre en place une solution informatique servant comme outil de conseil en fertilisation accessible, par le grand public et par les agriculteurs en particulier, depuis le site de Fertimap : <http://194.204.220.89/fertimap/map.html>

1.1.1 Cadre général du projet Fertimap

Le projet « Fertimap » ou « Carte de fertilité des sols cultivés au Maroc » est réalisé, dans le cadre de la stratégie agricole nationale *Plan Maroc Vert*, à la suite à une convention de recherche et développement signée, en juin 2007, entre le MAPM et le Groupe OCP. Cette convention est réalisée par l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) en partenariat avec l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II (IAV) et l'École Nationale d'Agriculture de Meknès (ENA).

Afin de connaître la fertilité des sols du Maroc et d'assurer ainsi une fertilisation raisonnée et durable des cultures, ce projet consiste à élaborer une cartographie de la fertilité des sols cultivés à l'échelle nationale. Celle-ci sera utilisée par l'application de « Fertimap » permettant aux exploitants agricoles de sélectionner une zone géographique, une culture et un rendement objectif afin de calculer leurs besoins exacts, exprimés en kg/ha, en azote N, phosphore P et potassium K. Pour les satisfaire, Fertimap recommande une solution d'engrais indiquant, en fonction des engrais disponibles sur le marché local, quelles formules utiliser et en quelles quantités.

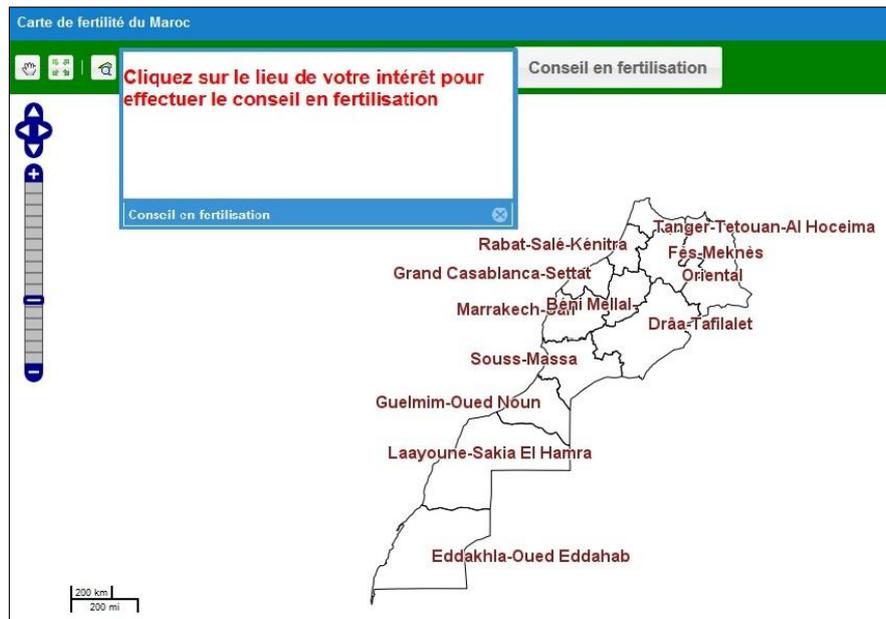
1.1.2 Base de données de Fertimap

Pour pousser, une plante a besoin d'un bon rayonnement et de températures adéquates, d'humidité, d'oxygène et d'une combinaison de nutriments. Les besoins exacts d'une culture en ces nutriments sont calculés par la différence entre ses exigences nutritives et l'apport en nutriments par le sol. La Base de Données (BD) de Fertimap porte alors principalement sur les exigences écologiques de l'ensemble des cultures considérées et les indicateurs de fertilité des régions agricoles concernées par le projet de Fertimap (soit environ 7,12 millions d'hectares en 2019).

Pour les exigences écologiques des cultures, elles sont formalisées dans des référentiels standardisés que Fertimap intègre dans sa BD. Pour les indicateurs de fertilité des sols, ils doivent d'abord être déterminés par des analyses de sol. Ces derniers ont été effectués sur la base d'un échantillonnage systématique en adoptant une densité moyenne de l'ordre d'un échantillon composite tous les 200 ha pour les zones d'agriculture pluviale et de l'ordre d'un échantillon composite tous les 50 ha pour les zones irriguées. Les points d'échantillonnage ont été relevés par GPS afin que leur position serve à l'interpolation surfacique des paramètres mesurés. Les paramètres mesurés comportent le pH, la matière organique (%), le phosphore assimilable (mg/kg P_2O_5) et le potassium échangeable (mg/kg K_2O). D'autres données sont également incluses dans la BD de Fertimap telles que les coordonnées géographiques des localités étudiées et les cartes pédologiques permettant entre autres de connaître le type des sols (sols minéraux bruts, peu évolués, calci-magnésiques...) ainsi que leur texture globale (sols limoneux, argileux ou sableux).

1.1.3 Interfaces de Fertimap

L'aperçu de la fenêtre d'accueil du conseiller de Fertimap est donné dans (§Annexes - Figure 1). Celle-ci donne accès à la carte du Maroc qui peut soit être visualisé en mode Terrain ESRI, Topographie, Satellite Google ou en mode None (mode d'affichage choisi dans la figure ci-dessous).



Annexes - Figure 1. Fenêtre d'accueil de Fertimap

Sur cette carte, l'utilisateur doit cliquer sur le point géographique qui l'intéresse afin de réaliser le conseil en fertilisation. Une fois ce clic effectué, la fenêtre des recommandations présentée dans (§ Annexes - Figure 2) s'affiche. Nous en expliquons ci-après les différentes composantes :

Données géographiques 1		Données de fertilité 2	
Longitude	(5° 24' 48" W) -5.4135	Type de sol	Vertisols, i _c ½ drainage externe possible arrondie
Latitude	(33° 57' 28" N) 33.9578	Texture globale	Argile limoneuse
Région : FÃs-MeknÃs Préfecture / Province : MeknÃs		pH	0
		Matière organique(%)	2.31
		Phosphore assimilable (mg/kg P ₂ O ₅)	26.86
		Potassium (mg/kg K ₂ O)	189.23
		Choisir la culture	Blé bour
Rendement visé :		40 qx/ha	
Recommandations 4			
Elément	Besoin	Recommandations basées sur les formules disponibles :	
N (kg N/ha)	87.83	• 0.38qx/ha du TSP comme engrais de fond	
P (kg P/ha)	17.05	• 2.66qx/ha d'Ammonitrates comme engrais de couverture	
K (kg K/ha)	0	pour un cout de 591.79 dh/ha	

Annexes - Figure 2. Composantes de la fenêtre des recommandations de Fertimap

1. Les données géographiques indiquent la longitude, la latitude, la région et la préfecture ou province correspondant au point géographique choisi. La localisation du lieu d'étude peut également se faire manuellement en renseignant les coordonnées géographiques de la zone souhaitée.
2. Les données de fertilité fournissent *i)* le type et la texture du sol permettant d'avoir une idée sur certaines propriétés pédologiques telles que la capacité d'échange anionique et cationique, les réserves en eau, la richesse en éléments nutritifs, et *ii)* les mesures de quelques indicateurs de fertilité à savoir : le pH (indiquant l'acidité du sol qui a une influence sur l'assimilation des nutriments), la matière organique (représentant un réservoir important de carbone et la principale source d'éléments minéraux pour les plantes), phosphore assimilable (élément essentiel pour la floraison, la nouaison, la précocité, la maturation des graines et le grossissement des fruits) et potassium échangeable (élément responsable de l'absorption des cations, du maintien de la turgescence de la cellule ainsi que de la régulation de l'économie en eau).
3. Le choix de la culture et du rendement visé : il appartient à l'utilisateur de choisir la culture qu'il souhaite pratiquer sur sa parcelle et le rendement agricole qu'il vise à l'hectare.
4. Les recommandations sont affichées après validation de la sélection de la culture et du rendement cible. Elles précisent d'une part les besoins exacts en N, P et K et d'autre part les quantités de formules d'engrais à utiliser pour répondre à ces besoins. Une estimation du coût de la solution recommandée est également fournie.

2 Démarche de définition de construction de l'échantillon des 700 solutions d'engrais

L'échantillon des 700 besoins en N, P et K a été créé en suivant les étapes décrites ci-dessous :

a. Choix de la culture

Les statistiques de l'Office National Interprofessionnel des Céréales et des Légumineuses (ONICL) montrent que, de tous les secteurs agricoles, celui des céréales (en particulier le blé) s'est avéré le plus difficile à réformer. Chaque année, un habitant consomme 200 kg de blé, ce qui est trois fois plus que la moyenne mondiale. En 2017-2018, 45 % des besoins en céréales ne pouvaient être couverts par la production locale, ce qui a conduit le Maroc à importer plus de 66 millions de quintaux, dont 38 millions de blé. Pour ces raisons, nous décidons d'identifier les besoins en NPK pour la culture pour laquelle le Maroc a enregistré le plus grand déficit de

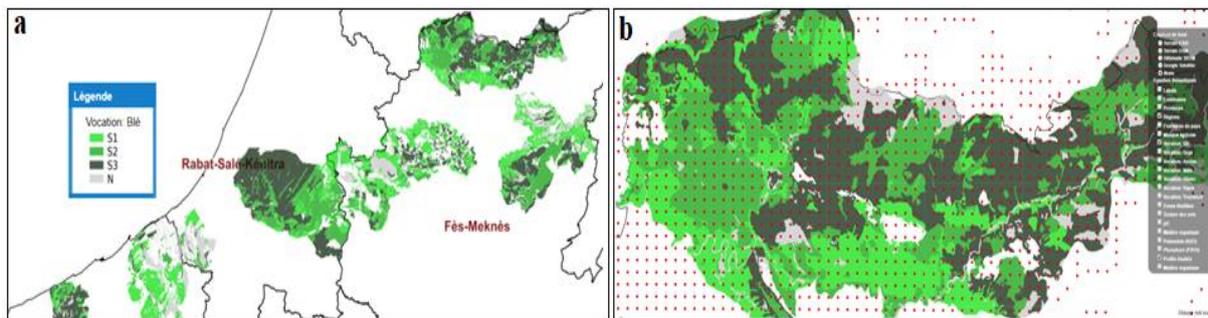
production agricole en 2017-2018, à savoir le blé (Ghouibi, 2019) et, plus précisément la variété "bour" qui pousse dans les zones pluviales.

b. Choix du rendement objectif

Le rendement objectif a été fixé à 40 q/ha, soit le rendement optimal à viser pour le blé "bour" (Alaoui, 2005).

c. Choix de la zone géographique

Sur Fertimap, le choix de la zone géographique et de la culture se fait en fonction des pratiques agricoles de l'utilisateur de Fertimap. Une culture peut ainsi être associée à un sol dont les caractéristiques ne sont pas compatibles avec elle, ce qui peut ainsi avoir un impact négatif sur les rendements agricoles. Pour faire face à cette situation, nous décidons dans cet exemple de nous limiter aux zones géographiques dont les caractéristiques du sol sont compatibles avec les exigences écologiques du blé. Pour ce faire, nous avons utilisé la carte de vocation des sols pour le blé et nous nous sommes contentés des profils étudiés appartenant à des zones géographiques ayant une forte aptitude à la culture du blé (cf. (§Annexes - Figure 3)). Cela a donné lieu à 700 parcelles de terre dont nous avons défini pour chacune le besoin exact en N, P et K. Ces besoins sont indiqués dans les colonnes 7, 8 et 9 de (§Annexes - Tableau 1).



Annexes - Figure 3. (a) Carte de vocation des terres pour le blé ; (b) Marquage des profils agricoles étudiés.

Pour chaque parcelle, Fertimap propose ce qui est considéré comme la meilleure solution opérationnelle possible à obtenir en mélangeant les engrais disponibles sur le marché. Une ou deux solutions sont proposées selon qu'il existe ou non une formule d'engrais régionale et/ou générique. Nous avons retenu les solutions opérationnelles proposées pour les 700 besoins NPK (colonnes 10 à 17 de (§Annexes - Tableau 1)) et avons calculé leurs écarts par rapport aux besoins exacts. Ces écarts sont affichés dans les colonnes 18, 19 et 20 de (§Annexes - Tableau 1). Par exemple, pour la parcelle n°381, le besoin optimal en phosphore est de 82,24 kg/ha, alors que la solution de Fertimap qui mélange les engrais régionaux apporte $16,3 \times 30 = 489,3$

kg/ha, soit une différence de +406,76 kg/ha. Il convient de noter que cet écart dépasse largement la tolérance fixée par la réglementation européenne (UE PE-CONS 76/18, 2019).

Par ailleurs, les engrais étant des produits commercialisés sous forme de formules en %, nous avons dû convertir les 700 besoins quantitatifs en 700 formules nutritives exprimées en % (voir les colonnes 24 à 33 de (§Annexes - Tableau 1)). Lorsque les besoins nutritifs portent sur un seul nutriment, ils peuvent facilement être obtenus à partir d'un mono-composé riche en ce nutriment. Par exemple, les besoins consistant uniquement en N peuvent être satisfaits en utilisant de l'urée (un mono-composé qui contient 46 % de N). La quantité requise pour ce type de besoins est obtenue en mélangeant ce composé avec le *filler* selon les proportions adéquates pour obtenir l'apport nutritionnel requis (par exemple, pour répondre au 2^e besoin NPK, il faut appliquer 306,15 kg/ha de la formule 46-0-0 : $306,15 \times 46 \% = 140,38$ kg/ha, ce qui correspond exactement au 2^e besoin, plus le *filler* ($306,15 - 140,38 = 165,32$ kg/ha). Sur nos 700 parcelles, 219 ont nécessité des engrais portant uniquement sur l'azote (N) et une seule parcelle a eu besoin d'engrais portant uniquement sur le phosphore (P). En excluant les engrais à composant unique (qui sont au nombre de 220), nous optimisons nos modèles pour les 482 engrais restants ($J = 700 - 220 + 2 = 482$ formules d'engrais).

No. Need	Geographical data					Exact NPK Requirements (Kg/Ha)			Fertimap Recommendations						The deviations from the exact requirements (Kg/ha)						Converting the quantities (Kg/ha) to percent formulas (%)													
	Geographical coordinates		Region	Prefecture/Province	District	N	P	K	Regional Fertilizer Formula 1			Regional Fertilizer Formula 2			Absolute deviation			Relative deviation			Exact NPK Requirements (Kg/ha)			Total quantity of N,P and K	Filler %	Demand (Dj) (Kg/ha)	The nutritional specifications (β_{ij})							
	Longitude	Latitude							%N	%P	%K	%N	%P	%K	N	P	K	N	P	K	N	P	K				%N	%P	%K	%Filler				
	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha
51	-6.9253	33.8072	Rabat-Salé-Kénitra	Skhirate- Témara	Sidi Yahya Zaer	98.83	0	0	9	23	30	0	33	0	0	2.99	-0.16	0	0	0.16%	0.00%	0.00%	98.83	0	0	98.83	54%	214.85	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%		
52	-6.9119	33.7955	Rabat-Salé-Kénitra	Skhirate- Témara	Sidi Yahya Zaer	101.33	0	160.66	9	23	30	0	33	0	0	3.07	-0.02	0	-160.66	0.02%	0.00%	100.00%	101.33	0	160.66	261.99	54%	569.54	17.79%	0.00%	28.21%	54.00%		
53	-6.9433	33.794	Rabat-Salé-Kénitra	Skhirate- Témara	Sidi Yahya Zaer	61.83	0	0	9	23	30	5.36	33	0	0	0.41	-0.06	123.28	160.8	0.10%	NS	NS	61.83	0	0	61.83	54%	134.41	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%		
54	-6.9409	33.7909	Rabat-Salé-Kénitra	Skhirate- Témara	Sidi Yahya Zaer	89.83	78.17	155.01	9	23	30	5.17	33	0	0	1.31	-0.07	40.74	0.09	0.08%	52.12%	0.06%	89.83	78.17	155.01	323.01	54%	702.20	12.79%	11.13%	22.08%	54.00%		
55	-6.9607	33.7928	Rabat-Salé-Kénitra	Skhirate- Témara	Sidi Yahya Zaer	109.83	85.23	104.72	9	23	30	3.71	33	0	0	2.32	0.12	0.1	6.58	0.11%	0.12%	6.28%	109.83	85.23	104.72	299.78	54%	651.70	16.85%	13.08%	16.07%	54.00%		
56	-6.8766	33.7938	Rabat-Salé-Kénitra	Skhirate- Témara	Sidi Yahya Zaer	140.33	0	161.22	9	23	30	5.37	33	0	0	2.79	0.07	123.51	-0.12	0.05%	NS	0.07%	140.33	0	161.22	301.55	54%	655.54	21.41%	0.00%	24.59%	54.00%		
57	-6.8409	33.7746	Rabat-Salé-Kénitra	Skhirate- Témara	Sidi Yahya Zaer	73.33	0	0	9	23	30	0	33	0	0	2.22	-0.07	0	0	0.10%	0.00%	0.00%	73.33	0	0	73.33	54%	159.41	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%		
58	-6.8752	33.7592	Rabat-Salé-Kénitra	Skhirate- Témara	Sidi Yahya Zaer	38.33	93.91	140	9	23	30	4.67	33	0	0	0	3.7	13.5	0.1	9.65%	14.38%	0.07%	38.33	93.91	140	272.24	54%	591.83	6.48%	15.87%	23.66%	54.00%		
59	-6.8372	33.7871	Rabat-Salé-Kénitra	Skhirate- Témara	Oumazza	109.83	0	174.94	9	23	30	5.83	33	0	0	1.74	0.06	134.09	-0.04	0.05%	NS	0.02%	109.83	0	174.94	284.77	54%	619.07	17.74%	0.00%	28.26%	54.00%		
60	-7.1435	33.7986	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Charrate	124.33	82.79	0	10	20	20	4.14	33	0	0	2.51	-0.1	0.01	82.8	0.08%	0.01%	NS	124.33	82.79	0	207.12	55%	460.27	27.01%	17.99%	0.00%	55.00%		
61	-7.0711	33.7427	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Charrate	123.33	0	91	10	20	20	4.55	33	0	0	2.36	0.05	91	0	0.04%	NS	0.00%	123.33	0	91	214.33	48%	412.17	29.92%	0.00%	22.08%	48.00%		
62	-7.0735	33.7324	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Charrate	113.83	20.09	66.36	10	20	20	3.32	33	0	0	2.44	-0.11	46.31	0.04	0.10%	230.51%	0.06%	113.83	20.09	66.36	200.28	48%	385.15	29.55%	5.22%	17.23%	48.00%		
63	-7.1566	33.7071	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Bouzouika (Mun.)	100.83	29.86	128.24	10	20	20	6.41	33	0	0	1.11	-0.1	98.34	-0.04	0.10%	329.34%	0.03%	100.83	29.86	128.24	258.93	30%	369.90	27.26%	8.07%	34.67%	30.00%		
64	-7.1467	33.7194	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Bouzouika (Mun.)	154.83	43.97	74.76	10	20	20	3.74	33	0	0	3.56	0.05	30.83	0.04	0.03%	70.12%	0.05%	154.83	43.97	74.76	273.56	48%	526.08	29.43%	8.36%	14.21%	48.00%		
65	-7.2731	33.7669	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	El Mansouria (Mun.)	119.83	0	86.86	10	20	20	4.34	33	0	0	2.32	0.13	86.8	-0.06	0.11%	NS	0.07%	119.83	0	86.86	206.69	48%	397.48	30.15%	0.00%	21.85%	48.00%		
66	-7.2791	33.7615	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	El Mansouria (Mun.)	89.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	2.72	-0.07	0	0	0.08%	0.00%	0.00%	89.83	0	0	89.83	54%	195.28	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%		
67	-7.304	33.7497	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	El Mansouria (Mun.)	71.33	59.71	0	10	20	20	2.99	33	0	0	1.26	0.15	0.09	59.8	0.21%	0.15%	NS	71.33	59.71	0	131.04	48%	252.00	28.31%	23.69%	0.00%	48.00%		
68	-7.3071	33.7429	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	El Mansouria (Mun.)	68.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	2.09	0.14	0	0	0.20%	0.00%	0.00%	68.83	0	0	68.83	54%	149.63	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%		
69	-7.3265	33.7358	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	El Mansouria (Mun.)	83.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	2.54	-0.01	0	0	0.01%	0.00%	0.00%	83.83	0	0	83.83	54%	182.24	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%		
70	-7.3342	33.7281	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	El Mansouria (Mun.)	81.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	2.46	-0.15	0	0	0.18%	0.00%	0.00%	81.33	0	0	81.33	54%	176.80	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%		
71	-7.2551	33.7072	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	El Mansouria (Mun.)	151.33	100.7	0	10	20	20	5.04	33	0	0	3.06	0.05	0.1	100.8	0.03%	0.10%	NS	151.33	100.7	0	252.03	55%	560.07	27.02%	17.98%	0.00%	55.00%		
72	-7.2525	33.6959	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	El Mansouria (Mun.)	38.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	1.18	0.11	0	0	0.28%	0.00%	0.00%	38.83	0	0	38.83	54%	84.41	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%		
73	-7.3033	33.6918	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	El Mansouria (Mun.)	121.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.68	0.11	0	0	0.09%	0.00%	0.00%	121.33	0	0	121.33	54%	263.76	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%		
74	-7.2834	33.6889	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	El Mansouria (Mun.)	137.83	71.66	0	10	20	20	3.58	33	0	0	3.09	-0.06	-0.06	71.6	0.04%	0.08%	NS	137.83	71.66	0	209.49	55%	465.53	29.61%	15.39%	0.00%	55.00%		
75	-7.2827	33.6818	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	El Mansouria (Mun.)	129.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.93	-0.14	0	0	0.11%	0.00%	0.00%	129.83	0	0	129.83	54%	282.24	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%		
76	-7.3296	33.6818	Grand Casablanca-Settat	Mohammadia	Bni Yakhlef	155.33	49.94	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	155.33	49.94	0	205.27	66%	603.74	25.73%	8.27%	0.00%	66.00%			
77	-7.3564	33.6727	Grand Casablanca-Settat	Mohammadia	Bni Yakhlef	89.83	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	89.83	0	0	89.83	54%	195.28	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%		
78	-7.3207	33.6701	Grand Casablanca-Settat	Mohammadia	Bni Yakhlef	166.33	0	18.76	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	166.33	0	18.76	185.09	72%	661.04	25.16%	0.00%	2.84%	72.00%		
79	-7.3499	33.6607	Grand Casablanca-Settat	Mohammadia	Bni Yakhlef	151.33	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	151.33	0	0	151.33	54%	328.98	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%		
80	-7.3063	33.6668	Grand Casablanca-Settat	Mohammadia	Bni Yakhlef	144.33	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	144.33	0	0	144.33	54%	313.76	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%		
81	-7.2869	33.6581	Grand Casablanca-Settat	Mohammadia	Bni Yakhlef	143.33	97.44	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	143.33	97.44	0	240.77	48%	463.02	30.96%	21.04%	0.00%	48.00%		
82	-7.2991	33.6565	Grand Casablanca-Settat	Mohammadia	Bni Yakhlef	156.33	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	156.33	0	0	156.33	54%	339.85	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%		
83	-7.307	33.6012	Grand Casablanca-Settat	Mohammadia	Bni Yakhlef	117.33	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	117.33	0	0	117.33	54%	255.07	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%		
84	-7.3634	33.6555	Grand Casablanca-Settat	Mohammadia	Sidi Moussa Majdoub	139.83	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	139.83	0	0	139.83	54%	303.98	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%		
85	-7.3629	33.6452	Grand Casablanca-Settat	Mohammadia	Sidi Moussa Majdoub	124.33	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	124.33	0	0	124.33	54%	270.28	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%		
86	-7.3682	33.6338	Grand Casablanca-Settat	Mohammadia	Sidi Moussa Majdoub	160.33	51.03	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	160.33	51.03	0	211.36	66%	621.65	25.79%	8.21%	0.00%	66.00%		
87	-7.3641	33.6254	Grand Casablanca-Settat	Mohammadia	Sidi Moussa Majdoub	126.33	92.01	3.08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	126.33	92.01	3.08	221.42	48%	425.81	29.67%	21.61%	0.72%	48.00%		
88	-7.3763	33.6224	Grand Casablanca-Settat	Mohammadia	Sidi Moussa Majdoub	92.83	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	92.83	0	0	92.83	54%	201.80	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%		
89	-7.3473	33.6207	Grand Casablanca-Settat	Mohammadia	Sidi Moussa Majdoub	127.83	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	127.83	0	0	127.83	54%	277.89	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%		
90	-7.3536	33.6167	Grand Casablanca-Settat	Mohammadia	Sidi Moussa Majdoub	145.83	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	145.83	0	0	145.83	54%	317.02	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%		
91	-7.3661	33.6087	Grand Casablanca-Settat	Mohammadia	Sidi Moussa Majdoub	118.83	101.24	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	118.83	101.24	0	220.07	48%	423.21	28.08%	23.92%	0.00%	48.00%		
92																																		

No. Need	Geographical data					Exact NPK Requirements (Kg/Ha)			Fertimap Recommendations					The deviations from the exact requirements (Kg/ha)						Converting the quantities (Kg/ha) to percent formulas (%)												
	Geographical coordinates		Region	Prefecture/Province	District	N	P	K	Regional Fertilizer Formula 1			Regional Fertilizer Formula 2			Absolute deviation			Relative deviation			Exact NPK Requirements (Kg/Ha)			Total quantity of N,P and K	Filler %	Demand (Dj) (Kg/ha)	The nutritional specifications (β_{ij})					
	Longitude	Latitude							%N	%P	%K	%N	%P	%K	N	P	K	N	P	K	N	P	K				%N	%P	%K	%Filler		
	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha
201	-7.1674	33.4311	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Oulad Ali Toualaa	105.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.21	0.1	0	0	0.09%	0.00%	0.00%	105.83	0	0	105.83	54%	230.07	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
202	-7.1921	33.427	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Oulad Ali Toualaa	125.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.81	-0.1	0	0	0.08%	0.00%	0.00%	125.83	0	0	125.83	54%	273.54	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
203	-7.21	33.426	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Oulad Ali Toualaa	34.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	1.04	-0.01	0	0	0.03%	0.00%	0.00%	34.33	0	0	34.33	54%	74.63	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
204	-7.2009	33.4195	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Oulad Ali Toualaa	85.83	57.54	0	10	20	20	2.88	33	0	0	1.73	0.06	0.06	57.6	0.07%	0.10%	NS	85.83	57.54	0	143.37	48%	275.71	31.13%	20.87%	0.00%	48.00%
205	-7.1822	33.4128	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Oulad Ali Toualaa	128.83	22.26	0	10	20	20	1.11	33	0	0	3.57	0.08	-0.06	22.2	0.06%	0.27%	NS	128.83	22.26	0	151.09	72%	539.61	23.87%	4.13%	0.00%	72.00%
206	-7.1659	33.4011	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Oulad Ali Toualaa	97.33	26.06	0	10	20	20	1.3	33	0	0	2.55	-0.18	-0.06	26	0.18%	0.23%	NS	97.33	26.06	0	123.39	66%	362.91	26.82%	7.18%	0.00%	66.00%
207	-7.2784	33.5121	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mouline El Oued	58.33	24.43	0	10	20	20	1.22	33	0	0	1.4	0.07	-0.03	24.4	0.12%	0.12%	NS	58.33	24.43	0	82.76	66%	243.41	23.96%	10.04%	0.00%	66.00%
208	-7.3014	33.5031	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mouline El Oued	18.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	0.57	-0.02	0	0	0.11%	0.00%	0.00%	18.83	0	0	18.83	54%	40.93	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
209	-7.2804	33.5045	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mouline El Oued	40.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	1.22	-0.07	0	0	0.17%	0.00%	0.00%	40.33	0	0	40.33	54%	87.67	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
210	-7.2636	33.5051	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mouline El Oued	101.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.07	-0.02	0	0	0.02%	0.00%	0.00%	101.33	0	0	101.33	54%	220.28	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
211	-7.2403	33.4818	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mouline El Oued	144.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	4.39	0.04	0	0	0.03%	0.00%	0.00%	144.83	0	0	144.83	54%	314.85	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
212	-7.2458	33.4745	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mouline El Oued	143.83	38.54	0	10	20	20	1.93	33	0	0	3.77	-0.12	0.06	38.6	0.08%	0.16%	NS	143.83	38.54	0	182.37	66%	536.38	26.81%	7.19%	0.00%	66.00%
213	-7.2705	33.4788	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mouline El Oued	40.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	1.22	-0.07	0	0	0.07%	0.00%	0.00%	40.33	0	0	40.33	54%	87.67	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
214	-7.2403	33.4639	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mouline El Oued	128.83	54.83	0	10	20	20	2.74	33	0	0	3.07	-0.12	-0.03	54.8	0.09%	0.05%	NS	128.83	54.83	0	183.66	66%	540.18	23.85%	10.15%	0.00%	66.00%
215	-7.232	33.4597	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mouline El Oued	127.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.87	-0.12	0	0	0.09%	0.00%	0.00%	127.83	0	0	127.83	54%	277.89	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
216	-7.2394	33.4534	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mouline El Oued	60.83	46.69	0	10	20	20	2.33	33	0	0	1.14	0.09	-0.09	46.6	0.15%	0.19%	NS	60.83	46.69	0	107.52	48%	206.77	29.42%	22.58%	0.00%	48.00%
217	-7.347	33.4826	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mouline El Oued	85.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	2.59	0.14	0	0	0.16%	0.00%	0.00%	85.33	0	0	85.33	54%	185.50	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
218	-7.3833	33.4786	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mouline El Oued	46.83	0	171.86	10	20	20	8.59	33	0	0	0	39.07	171.8	-0.06	83.43%	NS	0.03%	46.83	0	171.86	218.69	64%	607.47	7.71%	0.00%	28.29%	64.00%
219	-7.3972	33.4723	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mouline El Oued	117.33	0	147	10	20	20	7.35	33	0	0	1.33	0.06	147	0	0.05%	NS	0.00%	117.33	0	147	264.33	54%	574.63	20.42%	0.00%	25.58%	54.00%
220	-7.3632	33.4727	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mouline El Oued	49.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	1.51	0	0	0	0.00%	0.00%	0.00%	49.83	0	0	49.83	54%	108.33	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
221	-7.3294	33.4683	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mouline El Oued	129.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.92	0.03	0	0	0.02%	0.00%	0.00%	129.33	0	0	129.33	54%	281.15	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
222	-7.3101	33.4627	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mouline El Oued	138.83	60.26	0	10	20	20	3.01	33	0	0	3.29	-0.16	-0.06	60.2	0.12%	0.10%	NS	138.83	60.26	0	199.09	55%	442.42	31.38%	13.62%	0.00%	55.00%
223	-7.3558	33.4619	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mouline El Oued	125.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.8	0.07	0	0	0.06%	0.00%	0.00%	125.33	0	0	125.33	54%	272.46	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
224	-7.3846	33.4534	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mouline El Oued	137.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	4.16	-0.05	0	0	0.04%	0.00%	0.00%	137.33	0	0	137.33	54%	298.54	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
225	-7.3546	33.452	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mouline El Oued	109.33	31.49	0	10	20	20	1.57	33	0	0	2.84	0.09	-0.09	31.4	0.08%	0.29%	NS	109.33	31.49	0	140.82	66%	414.18	26.40%	7.60%	0.00%	66.00%
226	-7.3127	33.4528	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mouline El Oued	140.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	4.25	-0.08	0	0	0.06%	0.00%	0.00%	140.33	0	0	140.33	54%	305.07	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
227	-7.386	33.444	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mouline El Oued	141.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	4.3	0.07	0	0	0.05%	0.00%	0.00%	141.83	0	0	141.83	54%	308.33	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
228	-7.3683	33.4488	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mouline El Oued	127.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.87	-0.12	0	0	0.09%	0.00%	0.00%	127.83	0	0	127.83	54%	277.89	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
229	-7.3405	33.4388	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mouline El Oued	130.83	71.11	0	10	20	20	3.56	33	0	0	2.89	0.14	0.09	71.2	0.11%	0.13%	NS	130.83	71.11	0	201.94	55%	448.76	29.15%	15.85%	0.00%	55.00%
230	-7.3493	33.4289	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mouline El Oued	121.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.69	-0.06	0	0	0.05%	0.00%	0.00%	121.83	0	0	121.83	54%	264.85	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
231	-7.3254	33.4248	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mouline El Oued	140.83	2.71	0	10	20	20	0.14	33	0	0	4.23	0.16	0.09	2.8	0.11%	3.32%	NS	140.83	2.71	0	143.54	58%	341.76	41.21%	0.79%	0.00%	58.00%
232	-7.3851	33.4159	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mouline El Oued	132.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	4.03	0.16	0	0	0.12%	0.00%	0.00%	132.83	0	0	132.83	54%	288.76	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
233	-7.3603	33.4159	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mouline El Oued	110.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.36	0.05	0	0	0.05%	0.00%	0.00%	110.83	0	0	110.83	54%	240.93	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
234	-7.3434	33.4162	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mouline El Oued	125.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.81	-0.1	0	0	0.08%	0.00%	0.00%	125.83	0	0	125.83	54%	273.54	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
235	-7.3742	33.4043	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mouline El Oued	51.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	1.57	-0.02	0	0	0.04%	0.00%	0.00%	51.83	0	0	51.83	54%	112.67	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
236	-7.2417	33.4256	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mouline El Oued	134.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	4.09	0.14	0	0	0.10%	0.00%	0.00%	134.83	0	0	134.83	54%	293.11	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
237	-7.2634	33.4126	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mouline El Oued	109.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.31	-0.1	0	0	0.09%	0.00%	0.00%	109.33	0	0	109.33	54%	237.67	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
238	-7.2574	33.401	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mouline El Oued	142.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	4.31	-0.1	0	0	0.17%	0.00%	0.00%	142.33	0	0	142.33	54%	309.41	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
239	-7.2783	33.3891	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mouline El Oued	103.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.15	0.12	0	0	0.02%	0.00%	0.00%	103.83	0	0	103.83	54%	225.72	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
240	-7.0886	33.4377	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mellila	116.33	95.27	0	10	20	20	4.76	33	0	0	2.08	-0.09	-0.07	95.2	0.08%	0.07%	NS	116.33	95.27	0	211.60	48%	406.92	28.59%	23.41%	0.00%	48.00%
241	-7.12																															

No. Need	Geographical data					Exact NPK Requirements (Kg/Ha)			Fertimap Recommendations					The deviations from the exact requirements (Kg/ha)						Converting the quantities (Kg/ha) to percent formulas (%)												
	Geographical coordinates		Region	Prefecture/Province	District	N	P	K	Regional Fertilizer Formula 1			Regional Fertilizer Formula 2			Absolute deviation			Relative deviation			Exact NPK Requirements (Kg/Ha)			Total quantity of N,P and K	Filler %	Demand (D _f) (Kg/Ha)	The nutritional specifications (β _{ij})					
	Longitude	Latitude							%N	%P	%K	%N	%P	%K	N	P	K	N	P	K	N	P	K				%N	%P	%K	%Filler		
	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K	%N	%P	%K	%Filler					
251	-7.1031	33.3836	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mellila	97.33	95.27	0	10	20	20	4.76	33	0	0	1.51	0.1	-0.07	95.2	0.10%	0.07%	NS	97.33	95.27	0	192.60	48%	370.38	26.28%	25.72%	0.00%	48.00%
252	-7.1153	33.3827	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mellila	143.33	85.77	0	10	20	20	4.29	33	0	0	3.04	-0.11	0.03	85.8	0.08%	0.03%	NS	143.33	85.77	0	229.10	55%	509.11	28.15%	16.85%	0.00%	55.00%
253	-7.1438	33.3805	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mellila	94.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	2.87	-0.12	0	0	0.13%	0.00%	0.00%	94.83	0	0	94.83	54%	206.15	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
254	-7.0365	33.3939	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mellila	91.33	109.11	0	10	20	20	5.46	33	0	0	1.11	-0.1	0.09	109.2	0.11%	0.08%	NS	91.33	109.11	0	200.44	54%	435.74	20.96%	25.04%	0.00%	54.00%
255	-7.1797	33.3583	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mellila	110.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.36	0.05	0	0	0.05%	0.00%	0.00%	110.83	0	0	110.83	54%	240.93	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
256	-7.1702	33.3586	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mellila	110.83	80.89	0	10	20	20	4.04	33	0	0	2.13	-0.14	-0.09	80.8	0.13%	0.11%	NS	110.83	80.89	0	191.72	48%	368.69	30.06%	21.94%	0.00%	48.00%
257	-7.1618	33.347	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mellila	42.33	27.14	0	10	20	20	1.36	33	0	0	0.87	-0.02	0.06	27.2	0.05%	0.22%	NS	42.33	27.14	0	69.47	55%	154.38	27.42%	17.58%	0.00%	55.00%
258	-7.1889	33.3453	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mellila	58.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	1.77	0.08	0	0	0.14%	0.00%	0.00%	58.33	0	0	58.33	54%	126.80	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
259	-7.2123	33.3436	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mellila	70.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	2.13	-0.04	0	0	0.06%	0.00%	0.00%	70.33	0	0	70.33	54%	152.89	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
260	-7.22	33.3368	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mellila	101.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.09	0.14	0	0	0.14%	0.00%	0.00%	101.83	0	0	101.83	54%	221.37	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
261	-7.1883	33.3345	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mellila	92.83	77.63	0	10	20	20	3.88	33	0	0	1.64	0.09	-0.03	77.6	0.10%	0.04%	NS	92.83	77.63	0	170.46	48%	327.81	28.32%	23.68%	0.00%	48.00%
262	-7.1987	33.3291	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mellila	126.33	85.5	0	10	20	20	4.28	33	0	0	2.53	-0.04	0.1	85.6	0.03%	0.12%	NS	126.33	85.5	0	211.83	48%	407.37	31.01%	20.99%	0.00%	48.00%
263	-7.2011	33.3216	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mellila	104.33	46.14	0	10	20	20	2.31	33	0	0	2.46	-0.05	0.06	46.2	0.05%	0.13%	NS	104.33	46.14	0	150.47	55%	334.38	31.20%	13.80%	0.00%	55.00%
264	-7.1773	33.3195	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mellila	60.83	89.3	0	10	20	20	4.47	33	0	0	0.49	0.04	0.1	89.4	0.07%	0.11%	NS	60.83	89.3	0	150.13	54%	326.37	18.64%	27.36%	0.00%	54.00%
265	-7.2192	33.3189	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mellila	70.33	31.49	0	10	20	20	1.57	33	0	0	1.65	-0.18	-0.09	31.4	0.26%	0.29%	NS	70.33	31.49	0	101.82	55%	226.27	31.08%	13.92%	0.00%	55.00%
266	-7.2205	33.3126	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mellila	133.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	4.04	-0.01	0	0	0.01%	0.00%	0.00%	133.33	0	0	133.33	54%	289.85	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
267	-7.2015	33.3125	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mellila	97.83	50.49	0	10	20	20	2.52	33	0	0	2.2	-0.03	-0.09	50.4	0.03%	0.18%	NS	97.83	50.49	0	148.32	55%	329.60	29.68%	15.32%	0.00%	55.00%
268	-7.1716	33.3155	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mellila	106.33	86.86	0	10	20	20	4.34	33	0	0	1.91	0.1	-0.06	86.8	0.09%	0.07%	NS	106.33	86.86	0	193.19	48%	371.52	28.62%	23.38%	0.00%	48.00%
269	-7.2281	33.2928	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Mellila	122.83	51.57	0	10	20	20	2.58	33	0	0	2.94	-0.01	0.03	51.6	0.01%	0.06%	NS	122.83	51.57	0	174.40	66%	512.94	23.95%	10.05%	0.00%	66.00%
270	-7.2277	33.4086	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Rdadna Oulad Malek	155.33	11.4	0	10	20	20	0.57	33	0	0	4.53	-0.14	0	11.4	0.09%	0.00%	NS	155.33	11.4	0	166.73	78%	757.86	20.50%	1.50%	0.00%	78.00%
271	-7.2208	33.399	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Rdadna Oulad Malek	136.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	4.15	0.12	0	0	0.09%	0.00%	0.00%	136.83	0	0	136.83	54%	297.46	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
272	-7.2593	33.3915	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Rdadna Oulad Malek	130.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.96	-0.15	0	0	0.11%	0.00%	0.00%	130.83	0	0	130.83	54%	284.41	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
273	-7.2399	33.3908	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Rdadna Oulad Malek	143.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	4.34	-0.11	0	0	0.08%	0.00%	0.00%	143.33	0	0	143.33	54%	311.59	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
274	-7.2445	33.3838	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Rdadna Oulad Malek	114.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.48	0.01	0	0	0.01%	0.00%	0.00%	114.83	0	0	114.83	54%	249.63	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
275	-7.2442	33.3838	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Rdadna Oulad Malek	113.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.45	0.02	0	0	0.02%	0.00%	0.00%	113.83	0	0	113.83	54%	247.46	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
276	-7.2274	33.3819	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Rdadna Oulad Malek	168.83	37.46	0	10	20	20	1.87	33	0	0	4.55	0.02	-0.06	37.4	0.01%	0.16%	NS	168.83	37.46	0	206.29	72%	736.75	22.92%	5.08%	0.00%	72.00%
277	-7.284	33.3818	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Rdadna Oulad Malek	146.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	4.45	0.02	0	0	0.01%	0.00%	0.00%	146.83	0	0	146.83	54%	319.20	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
278	-7.267	33.3814	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Rdadna Oulad Malek	132.83	44.51	0	10	20	20	2.23	33	0	0	3.35	0.02	0.09	44.6	0.02%	0.20%	NS	132.83	44.51	0	177.34	66%	521.59	25.47%	8.53%	0.00%	66.00%
279	-7.2639	33.3728	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Rdadna Oulad Malek	140.83	54.29	0	10	20	20	2.71	33	0	0	3.45	0.12	-0.09	54.2	0.09%	0.17%	NS	140.83	54.29	0	195.12	66%	573.88	24.54%	9.46%	0.00%	66.00%
280	-7.2826	33.3716	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Rdadna Oulad Malek	127.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.87	-0.12	0	0	0.09%	0.00%	0.00%	127.83	0	0	127.83	54%	277.89	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
281	-7.2924	33.3673	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Rdadna Oulad Malek	142.33	27.69	0	10	20	20	1.38	33	0	0	3.89	-0.16	-0.09	27.6	0.11%	0.33%	NS	142.33	27.69	0	170.02	72%	607.21	23.44%	4.56%	0.00%	72.00%
282	-7.2059	33.3646	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Rdadna Oulad Malek	140.83	67.86	0	10	20	20	3.39	33	0	0	3.24	-0.01	-0.06	67.8	0.01%	0.09%	NS	140.83	67.86	0	208.69	55%	463.76	30.37%	14.63%	0.00%	55.00%
283	-7.209	33.3604	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Rdadna Oulad Malek	131.83	68.4	0	10	20	20	3.42	33	0	0	2.96	0.05	0	68.4	0.04%	0.00%	NS	131.83	68.4	0	200.23	55%	444.96	29.63%	15.37%	0.00%	55.00%
284	-7.2183	33.358	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Rdadna Oulad Malek	140.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	4.25	-0.08	0	0	0.06%	0.00%	0.00%	140.33	0	0	140.33	54%	305.07	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
285	-7.2849	33.355	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Rdadna Oulad Malek	129.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.92	0.03	0	0	0.02%	0.00%	0.00%	129.33	0	0	129.33	54%	281.15	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
286	-7.2998	33.3468	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Rdadna Oulad Malek	66.33	97.71	0	10	20	20	4.89	33	0	0	0.53	0.06	0.09	97.8	0.09%	0.09%	NS	66.33	97.71	0	164.04	54%	356.61	18.60%	27.40%	0.00%	54.00%
287	-7.2269	33.3447	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Rdadna Oulad Malek	108.83	20.09	0	10	20	20	1	33	0	0	2.99	-0.16	-0.09	20	0.15%	0.45%	NS	108.83	20.09	0	128.92	72%	460.43	23.64%	4.36%	0.00%	72.00%
288	-7.2993	33.3376	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Rdadna Oulad Malek	113.33	75.46	0	10	20	20	3.77	33	0	0	2.29	-0.06	-0.06	75.4	0.05%	0.08%	NS	113.33	75.46	0	188.79	55%	419.53	27.01%	17.99%	0.00%	55.00%
289	-7.285	33.3352	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Rdadna Oulad Malek	76.33	79.8	0	10	20	20	3.99	33	0	0	1.1	-0.13	0	79.8	0.17%	0.00%	NS	76.33	79.8	0	156.13	54%	339.41	22.49%	23.51%	0.00%	54.00%
290	-7.2684	33.3381	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Rdadna Oulad Malek	93.83	84.96	0	10	20	20	4.25	33	0	0	1.56	0.15	0.04	85	0.16%	0.05%	NS	93.83	84.96	0	178.79	48%	343.83	27.29%	24.71%	0.00%	48.00%
291	-7.3008																															

No. Need	Geographical data					Exact NPK Requirements (Kg/Ha)			Fertimap Recommendations				The deviations from the exact requirements (Kg/ha)						Converting the quantities (Kg/ha) to percent formulas (%)													
	Geographical coordinates		Region	Prefecture/Province	District	N	P	K	Regional Fertilizer Formula 1		Regional Fertilizer Formula 2		Absolute deviation			Relative deviation			Exact NPK Requirements (Kg/Ha)			Total quantity of NPK and K	Filler %	Demand (Dj) (Kg/ha)	The nutritional specifications (β_{ij})							
	Longitude	Latitude							%N	%P	%K	%N	%P	%K	N	P	K	N	P	K	N				P	K	%N	%P	%K	%Filler		
301	-7.1814	33.3014	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Ahlf	52.33	86.04	0	10	20	20	4.3	33	0	0	0.28	-0.09	-0.04	86	0.17%	0.05%	NS	52.33	86.04	0	138.37	54%	300.80	17.40%	28.60%	0.00%	54.00%
302	-7.168	33.2911	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Ahlf	78.83	53.74	0	10	20	20	2.69	33	0	0	1.57	-0.12	0.06	53.8	0.15%	0.11%	NS	78.83	53.74	0	132.57	48%	254.94	30.92%	21.08%	0.00%	48.00%
303	-7.2037	33.29	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Ahlf	31.33	11.4	0	10	20	20	0.57	33	0	0	0.78	0.11	0	11.4	0.35%	0.00%	NS	31.33	11.4	0	42.73	66%	125.68	24.93%	9.07%	0.00%	66.00%
304	-7.1794	33.287	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Ahlf	27.83	40.71	0	10	20	20	2.04	33	0	0	0.23	0.16	0.09	40.8	0.57%	0.22%	NS	27.83	40.71	0	68.54	54%	149.00	18.68%	27.32%	0.00%	54.00%
305	-7.1653		Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Ahlf	69.83	47.77	0	10	20	20	2.39	33	0	0	1.39	-0.06	0.03	47.8	0.09%	0.06%	NS	69.83	47.77	0	117.60	48%	226.15	30.88%	21.12%	0.00%	48.00%
306	-7.183	33.2683	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Ahlf	29.33	32.57	0	10	20	20	1.63	33	0	0	0.4	0.17	0.03	32.6	0.58%	0.09%	NS	29.33	32.57	0	61.90	54%	134.57	21.80%	24.20%	0.00%	54.00%
307	-7.149	33.2683	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Ahlf	46.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	1.42	0.03	0	0	0.06%	0.00%	0.00%	46.83	0	0	46.83	54%	101.80	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
308	-7.1941	33.2613	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Ahlf	55.83	59.17	0	10	20	20	2.96	33	0	0	0.8	0.17	0.03	59.2	0.30%	0.05%	NS	55.83	59.17	0	115.00	54%	250.00	22.33%	23.67%	0.00%	54.00%
309	-7.1658	33.2614	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Ahlf	74.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	2.25	-0.08	0	0	0.11%	0.00%	0.00%	74.33	0	0	74.33	54%	161.59	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
310	-7.1486	33.2577	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Ahlf	72.83	12.49	0	10	20	20	0.62	33	0	0	2.02	0.03	-0.09	12.4	0.04%	0.72%	NS	72.83	12.49	0	85.32	72%	304.71	23.90%	4.10%	0.00%	72.00%
311	-7.1531	33.2552	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Ahlf	49.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	1.49	-0.16	0	0	0.32%	0.00%	0.00%	49.33	0	0	49.33	54%	107.24	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
312	-7.1516	33.2479	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Ahlf	69.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	2.1	-0.03	0	0	0.04%	0.00%	0.00%	69.33	0	0	69.33	54%	150.72	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
313	-7.207	33.2491	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Ahlf	115.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.49	-0.16	0	0	0.14%	0.00%	0.00%	115.33	0	0	115.33	54%	250.72	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
314	-7.1521	33.2476	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Ahlf	67.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	2.04	-0.01	0	0	0.01%	0.00%	0.00%	67.33	0	0	67.33	54%	146.37	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
315	-7.22	33.2446	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Ahlf	109.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.33	0.06	0	0	0.05%	0.00%	0.00%	109.83	0	0	109.83	54%	238.76	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
316	-7.1811	33.2409	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Ahlf	79.33	0.54	0	10	20	20	0.03	33	0	0	2.4	0.17	0.06	0.6	0.21%	11.11%	NS	79.33	0.54	0	79.87	78%	363.05	21.85%	0.15%	0.00%	78.00%
317	-7.2221	33.2373	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Ahlf	103.83	84.69	0	10	20	20	4.23	33	0	0	1.86	-0.15	-0.09	84.6	0.14%	0.11%	NS	103.83	84.69	0	188.52	48%	362.54	28.64%	23.36%	0.00%	48.00%
318	-7.1946	33.2376	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Ahlf	113.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.45	0.02	0	0	0.02%	0.00%	0.00%	113.83	0	0	113.83	54%	247.46	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
319	-7.1813	33.232	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Ahlf	101.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.07	-0.02	0	0	0.02%	0.00%	0.00%	101.33	0	0	101.33	54%	220.28	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
320	-7.2432	33.2232	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Ahlf	74.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	2.25	-0.08	0	0	0.11%	0.00%	0.00%	74.33	0	0	74.33	54%	161.59	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
321	-7.19	33.2232	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Ahlf	77.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	2.34	-0.11	0	0	0.14%	0.00%	0.00%	77.33	0	0	77.33	54%	168.11	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
322	-7.2137	33.2183	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Ahlf	117.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.56	0.15	0	0	0.13%	0.00%	0.00%	117.33	0	0	117.33	54%	255.07	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
323	-7.2072	33.2152	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Ahlf	80.33	93.1	0	10	20	20	4.66	33	0	0	1.02	-0.07	0.1	93.2	0.09%	0.11%	NS	80.33	93.1	0	173.43	54%	370.02	21.31%	24.69%	0.00%	54.00%
324	-7.2437	33.2129	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Ahlf	38.83	8.14	0	10	20	20	0.41	33	0	0	1.05	-0.08	0.06	8.2	0.21%	0.74%	NS	38.83	8.14	0	46.97	72%	167.75	23.15%	4.85%	0.00%	72.00%
325	-7.184	33.2045	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Ahlf	59.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	1.81	-0.1	0	0	0.17%	0.00%	0.00%	59.83	0	0	59.83	54%	130.07	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
326	-7.1698	33.2089	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Ahlf	95.83	52.66	0	10	20	20	2.63	33	0	0	2.11	0.1	-0.06	52.6	0.10%	0.11%	NS	95.83	52.66	0	148.49	55%	329.98	29.04%	15.96%	0.00%	55.00%
327	-7.1565	33.209	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Ahlf	93.83	92.29	0	10	20	20	4.61	33	0	0	1.45	0.12	-0.09	92.2	0.13%	0.10%	NS	93.83	92.29	0	186.12	48%	357.92	26.22%	25.78%	0.00%	48.00%
328	-7.1534	33.1998	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Ahlf	115.83	57.54	0	10	20	20	2.88	33	0	0	2.64	0.09	0.06	57.6	0.08%	0.10%	NS	115.83	57.54	0	173.37	55%	385.27	30.06%	14.94%	0.00%	55.00%
329	-7.1244	33.2044	Grand Casablanca-Settat	Benslimane	Ahlf	116.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.54	-0.01	0	0	0.01%	0.00%	0.00%	116.83	0	0	116.83	54%	253.98	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
330	-6.4293	34.0194	Rabat-Salé-Kénitra	Khémisset	Sidi Aït El Bahraoui (Dfouf)	146.83	3.8	0	9	23	30	0.17	33	0	0	4.4	-0.1	0.11	5.1	0.07%	2.89%	NS	146.83	3.8	0	150.63	78%	684.68	21.44%	0.56%	0.00%	78.00%
331	-6.402	33.8953	Rabat-Salé-Kénitra	Khémisset	Am Jolra Sidi Bouchaljel	59.33	0	0	9	23	30	0	33	0	0	1.8	0.07	0	0	0.12%	0.00%	0.00%	59.33	0	0	59.33	54%	128.98	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
332	-6.4075	33.8927	Rabat-Salé-Kénitra	Khémisset	Am Jolra Sidi Bouchaljel	68.33	0	0	9	23	30	0	33	0	0	2.07	-0.02	0	0	0.03%	0.00%	0.00%	68.33	0	0	68.33	54%	148.54	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
333	-6.4305	33.8903	Rabat-Salé-Kénitra	Khémisset	Am Jolra Sidi Bouchaljel	87.33	96.63	0	9	23	30	4.2	33	0	0	1.5	-0.03	-0.03	126	0.03%	0.03%	NS	87.33	96.63	0	183.96	54%	399.91	21.84%	24.16%	0.00%	54.00%
334	-6.3019	33.9298	Rabat-Salé-Kénitra	Khémisset	M'qam Tolba	85.33	59.71	0	9	23	30	2.6	33	0	0	1.88	0.11	0.09	78	0.13%	0.15%	NS	85.33	59.71	0	145.04	48%	278.92	30.59%	21.41%	0.00%	48.00%
335	-6.2854	33.8964	Rabat-Salé-Kénitra	Khémisset	Ait Buyalya El Hajjama	133.33	87.4	19.04	9	23	30	3.8	33	0	0	3	-0.13	0	94.96	0.10%	0.00%	498.74%	133.33	87.4	19.04	239.77	48%	461.10	28.92%	18.95%	4.13%	48.00%
336	-6.2722	33.8957	Rabat-Salé-Kénitra	Khémisset	Ait Buyalya El Hajjama	131.33	100.97	26.6	9	23	30	4.39	33	0	0	2.78	-0.08	0	105.1	0.06%	0.00%	395.11%	131.33	100.97	26.6	258.90	48%	497.88	26.38%	20.28%	5.34%	48.00%
337	-6.2854	33.8864	Rabat-Salé-Kénitra	Khémisset	Ait Buyalya El Hajjama	127.33	0	146.78	9	23	30	4.89	33	0																		

No. Need	Geographical data					Exact NPK Requirements (Kg/Ha)			Fertimap Recommendations						The deviations from the exact requirements (Kg/ha)						Converting the quantities (Kg/ha) to percent formulas (%)											
	Geographical coordinates		Region	Prefecture/Province	District	N	P	K	Regional Fertilizer Formula 1			Regional Fertilizer Formula 2			Absolute deviation			Relative deviation			Exact NPK Requirements (Kg/ha)			Total quantity of N,P and K	Filler %	Demand (D _f) (Kg/ha)	The nutritional specifications (β _{ij})					
	Longitude	Latitude							%N	%P	%K	%N	%P	%K	N	P	K	N	P	K	N	P	K				%N	%P	%K	%Filler		
404	-4.9717	34.7157	Fès-Meknès	Taoumate	Sidi Haj M'hamed	115.33	91.74	144.7	10	20	20	7.24	33	0	0	1.3	-0.03	53.06	0.1	0.03%	57.84%	0.07%	115.33	91.74	144.7	351.77	30%	502.53	22.95%	18.26%	28.79%	30.00%
405	-4.9713	34.7585	Fès-Meknès	Taoumate	Ratba	69.33	97.17	77.28	10	20	20	4.86	33	0	0	0.63	0.06	0.03	19.92	0.09%	0.03%	25.78%	69.33	97.17	77.28	243.78	30%	348.26	19.91%	27.90%	22.19%	30.00%
406	-4.8672	34.8151	Fès-Meknès	Taoumate	Ratba	100.33	92.56	150.25	10	20	20	7.51	33	0	0	0.76	-0.15	57.64	-0.05	0.15%	62.27%	0.03%	100.33	92.56	150.25	343.14	30%	490.20	20.47%	18.88%	30.65%	30.00%
407	-4.8676	34.8007	Fès-Meknès	Taoumate	Ratba	98.83	85.77	0	10	20	20	4.29	33	0	0	1.7	0.17	0.03	85.8	0.17%	0.03%	NS	98.83	85.77	0	184.60	48%	355.00	27.84%	24.16%	0.00%	48.00%
408	-4.8677	34.7863	Fès-Meknès	Taoumate	Ratba	107.83	34.74	8.12	10	20	20	1.74	33	0	0	2.74	-0.01	0.06	26.68	0.01%	0.17%	328.57%	107.83	34.74	8.12	150.69	66%	443.21	24.33%	7.84%	1.83%	66.00%
409	-4.85	34.8006	Fès-Meknès	Taoumate	Ratba	63.83	86.04	148.96	10	20	20	7.45	33	0	0	0	10.67	62.96	0.04	16.72%	73.18%	0.03%	63.83	86.04	148.96	298.83	30%	426.90	14.95%	20.15%	34.89%	30.00%
410	-4.8506	34.7722	Fès-Meknès	Taoumate	Ratba	99.33	57.54	145.54	10	20	20	7.28	33	0	0	0.8	-0.13	88.06	0.06	0.13%	153.04%	0.04%	99.33	57.54	145.54	302.41	30%	432.01	22.99%	18.32%	33.69%	30.00%
411	-4.8324	34.801	Fès-Meknès	Taoumate	Ratba	88.83	96.36	23.24	10	20	20	4.82	33	0	0	1.23	-0.04	0.04	73.16	0.05%	0.04%	314.80%	88.83	96.36	23.24	208.43	30%	297.76	29.83%	32.36%	7.81%	30.00%
412	-4.8327	34.7863	Fès-Meknès	Taoumate	Ratba	91.83	0	14.28	10	20	20	0.71	33	0	0	2.57	0.08	14.2	-0.08	0.09%	NS	0.56%	91.83	0	14.28	106.11	72%	378.96	24.23%	0.00%	3.77%	72.00%
413	-4.8329	34.7721	Fès-Meknès	Taoumate	Ratba	95.33	101.79	0	10	20	20	5.09	33	0	0	1.35	0.12	0.01	101.8	0.13%	0.01%	NS	95.33	101.79	0	197.12	54%	428.52	22.25%	23.75%	0.00%	54.00%
414	-4.8154	34.8145	Fès-Meknès	Taoumate	Ratba	80.33	71.66	116.76	10	20	20	5.84	33	0	0	0.67	0.18	45.14	0.04	0.22%	62.99%	0.03%	80.33	71.66	116.76	268.75	30%	383.93	20.92%	18.66%	30.41%	30.00%
415	-4.8155	34.8006	Fès-Meknès	Taoumate	Ratba	62.83	72.74	5.04	10	20	20	3.64	33	0	0	0.8	-0.03	0.06	67.76	0.05%	0.08%	1344.44%	62.83	72.74	5.04	140.61	44%	251.09	25.02%	28.97%	2.01%	44.00%
416	-4.8157	34.7863	Fès-Meknès	Taoumate	Ratba	108.33	99.61	0	10	20	20	4.98	33	0	0	1.77	-0.12	-0.01	99.6	0.11%	0.01%	NS	108.33	99.61	0	207.94	48%	399.88	27.09%	24.91%	0.00%	48.00%
417	-4.8152	34.7722	Fès-Meknès	Taoumate	Ratba	85.33	96.9	0	10	20	20	4.85	33	0	0	1.12	0.13	0.1	97	0.15%	0.10%	NS	85.33	96.9	0	182.23	54%	396.15	21.54%	24.46%	0.00%	54.00%
418	-4.7984	34.8148	Fès-Meknès	Taoumate	Ratba	110.33	103.96	0	10	20	20	5.2	33	0	0	1.77	0.08	0.04	104	0.07%	0.04%	NS	110.33	103.96	0	214.29	48%	412.10	26.77%	25.23%	0.00%	48.00%
419	-4.7984	34.7865	Fès-Meknès	Taoumate	Ratba	57.83	96.9	0	10	20	20	4.85	33	0	0	0.28	-0.09	0.1	97	0.16%	0.10%	NS	57.83	96.9	0	154.73	54%	336.37	17.19%	23.81%	0.00%	54.00%
420	-4.7985	34.7716	Fès-Meknès	Taoumate	Ratba	105.83	105.59	156.46	10	20	20	7.82	33	0	0	0.84	0.09	50.81	-0.06	0.09%	48.12%	0.04%	105.83	105.59	156.46	367.88	30%	525.54	20.14%	20.09%	29.77%	30.00%
421	-4.7987	34.7577	Fès-Meknès	Taoumate	Ratba	77.33	103.69	0	10	20	20	5.18	33	0	0	0.77	-0.12	-0.09	103.6	0.16%	0.09%	NS	77.33	103.69	0	181.02	54%	393.52	19.65%	26.35%	0.00%	54.00%
422	-4.781	34.7574	Fès-Meknès	Taoumate	Ratba	86.83	103.41	6.16	10	20	20	5.17	33	0	0	1.06	-0.15	-0.01	101.8	0.17%	0.01%	1578.57%	86.83	103.41	6.16	196.40	48%	377.69	22.99%	23.75%	0.00%	48.00%
423	-4.7809	34.7863	Fès-Meknès	Taoumate	Al Hoceima	103.83	98.53	150.14	10	20	20	7.51	33	0	0	0.87	-0.02	51.67	0.06	0.02%	52.44%	0.04%	103.83	98.53	150.14	352.50	30%	503.57	20.62%	19.57%	29.82%	30.00%
424	-5.179	34.6592	Fès-Meknès	Taoumate	Tafraut	82.33	12.49	0	10	20	20	0.62	33	0	0	2.31	0.1	-0.09	12.4	0.12%	0.72%	NS	82.33	12.49	0	94.82	72%	338.64	24.31%	3.69%	0.00%	72.00%
425	-5.1618	34.6443	Fès-Meknès	Taoumate	Tafraut	94.83	91.2	0	10	20	20	4.56	33	0	0	1.49	-0.06	0	91.2	0.06%	0.00%	NS	94.83	91.2	0	186.03	48%	357.75	26.51%	25.49%	0.00%	48.00%
426	-5.1618	34.6307	Fès-Meknès	Taoumate	Tafraut	91.33	0	112.84	10	20	20	5.64	33	0	0	1.06	0.05	112.8	-0.04	0.05%	NS	0.04%	91.33	0	112.84	204.17	72%	378.96	24.10%	0.00%	29.78%	72.00%
427	-5.1796	34.6019	Fès-Meknès	Taoumate	Tafraut	99.33	48.31	136.92	10	20	20	6.85	33	0	0	0.94	0.19	88.69	0.08	0.19%	183.59%	0.06%	99.33	48.31	136.92	284.56	30%	406.51	24.43%	11.88%	33.68%	30.00%
428	-5.1618	34.6019	Fès-Meknès	Taoumate	Tafraut	84.33	76.54	0	10	20	20	3.83	33	0	0	1.4	0.17	0.06	76.6	0.20%	0.08%	NS	84.33	76.54	0	160.87	48%	309.37	27.26%	24.74%	0.00%	48.00%
429	-5.1443	34.6169	Fès-Meknès	Taoumate	Tafraut	90.33	81.97	144.82	10	20	20	7.24	33	0	0	0.54	-0.11	62.83	-0.02	0.12%	76.65%	0.01%	90.33	81.97	144.82	317.12	30%	453.03	19.94%	18.09%	31.97%	30.00%
430	-5.1439	34.6022	Fès-Meknès	Taoumate	Tafraut	93.33	21.71	0	10	20	20	1.09	33	0	0	2.5	0.07	0.09	21.8	0.08%	0.41%	NS	93.33	21.71	0	115.04	72%	410.86	22.72%	5.28%	0.00%	72.00%
431	-5.1271	34.6595	Fès-Meknès	Taoumate	Tafraut	99.33	81.97	0	10	20	20	4.1	33	0	0	1.77	0.08	0.03	82	0.08%	0.04%	NS	99.33	81.97	0	181.30	48%	348.65	28.49%	23.51%	0.00%	48.00%
432	-5.1264	34.6307	Fès-Meknès	Taoumate	Tafraut	107.83	14.66	56.28	10	20	20	2.81	33	0	0	2.41	-0.2	41.54	-0.08	0.19%	283.36%	0.14%	107.83	14.66	56.28	178.77	55%	397.27	27.14%	3.69%	14.17%	55.00%
433	-5.1096	34.6304	Fès-Meknès	Taoumate	Tafraut	70.83	11.4	0	10	20	20	0.57	33	0	0	1.97	-0.12	0	11.4	0.17%	0.00%	NS	70.83	11.4	0	82.23	72%	293.68	24.12%	3.88%	0.00%	72.00%
434	-5.1282	34.6163	Fès-Meknès	Taoumate	Tafraut	82.33	62.97	148.79	10	20	20	7.44	33	0	0	0.24	-0.01	85.83	0.01	0.01%	136.30%	0.01%	82.33	62.97	148.79	294.09	43%	515.95	15.96%	12.20%	28.84%	43.00%
435	-5.1264	34.6166	Fès-Meknès	Taoumate	Tafraut	81.33	62.97	156.18	10	20	20	7.81	33	0	0	0.1	0.07	93.23	0.02	0.09%	148.05%	0.01%	81.33	62.97	156.18	300.48	43%	527.16	15.43%	11.95%	29.63%	43.00%
436	-5.1103	34.6878	Fès-Meknès	Taoumate	Tafraut	78.83	32.03	161.67	10	20	20	8.08	33	0	0	0	1.97	129.57	-0.07	2.50%	404.53%	0.04%	78.83	32.03	161.67	272.53	43%	478.12	16.49%	6.70%	33.81%	43.00%
437	-5.11	34.6728	Fès-Meknès	Taoumate	Tafraut	94.33	33.66	67.48	10	20	20	3.37	33	0	0	1.84	0.09	33.74	-0.08	0.10%	100.24%	0.12%	94.33	33.66	67.48	195.47	43%	342.93	27.51%	9.82%	19.68%	43.00%
438	-5.0406	34.6739	Fès-Meknès	Taoumate	Tafraut	101.83	90.93	171.42	10	20	20	8.57	33	0	0	0.49	0.04	80.47	-0.02	0.04%	88.50%	0.01%	101.83	90.93	171.42	364.18	43%	638.91	15.94%	14.23%		

No. Need	Geographical data					Exact NPK Requirements (Kg/Ha)			Fertimap Recommendations				The deviations from the exact requirements (Kg/ha)						Converting the quantities (Kg/ha) to percent formulas (%)															
	Geographical coordinates		Region	Prefecture/Province	District	N	P	K	Regional Fertilizer Formula 1			Regional Fertilizer Formula 2			Absolute deviation			Relative deviation			Exact NPK Requirements (Kg/ha)			Total quantity of N,P and K	Filler %	Demand (D _j) (Kg/ha)	The nutritional specifications (β _{ij})							
	Longitude	Latitude							%N	%P	%K	%N	%P	%K	N	P	K	N	P	K	N	P	K				%N	%P	%K	%Filler				
	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	N	P	K	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha
451	-4.8513	34.716	Fès-Meknès	Taouate	Oudka	97.33	21.71	28.28	10	20	20	1.41	33	0	0	2.52	-0.07	6.49	-0.08	0.07%	29.89%	0.28%	97.33	21.71	28.28	147.32	55%	327.38	29.73%	6.63%	8.64%	55.00%		
452	-4.7136	34.6003	Fès-Meknès	Taouate	Timezgana	90.83	100.16	45.64	10	20	20	5.01	33	0	0	1.23	-0.14	0.04	54.56	0.15%	0.04%	119.54%	90.83	100.16	45.64	236.63	30%	338.04	26.87%	29.63%	13.50%	30.00%		
453	-4.714	34.5864	Fès-Meknès	Taouate	Timezgana	105.33	103.14	0	10	20	20	5.16	33	0	0	1.63	0.06	0.06	103.2	0.06%	0.06%	NS	105.33	103.14	0	208.47	48%	400.90	26.27%	25.73%	0.00%	48.00%		
454	-4.7483	34.5873	Fès-Meknès	Taouate	Timezgana	97.33	98.26	0	10	20	20	4.91	33	0	0	1.46	-0.05	-0.06	98.2	0.05%	0.06%	NS	97.33	98.26	0	195.59	54%	425.20	22.89%	23.11%	0.00%	54.00%		
455	-4.558	34.6705	Fès-Meknès	Taouate	Bouhouda	92.83	85.77	0	10	20	20	4.29	33	0	0	1.51	-0.1	0.03	85.8	0.11%	0.03%	NS	92.83	85.77	0	178.60	48%	343.46	27.03%	24.97%	0.00%	48.00%		
456	-4.5752	34.5857	Fès-Meknès	Taouate	Bouhouda	89.33	81.43	0	10	20	20	4.07	33	0	0	1.47	-0.12	-0.03	81.4	0.13%	0.04%	NS	89.33	81.43	0	170.76	48%	328.38	27.20%	24.80%	0.00%	48.00%		
457	-4.5586	34.5853	Fès-Meknès	Taouate	Bouhouda	92.83	99.61	172.48	10	20	20	8.62	33	0	0	0.2	-0.03	72.79	-0.08	0.03%	73.07%	0.05%	92.83	99.61	172.48	364.92	30%	521.31	17.81%	16.91%	33.09%	30.00%		
458	-4.472	34.5993	Fès-Meknès	Taouate	Bouhouda	94.83	34.74	0	10	20	20	1.74	33	0	0	2.35	0.12	0.06	34.8	0.13%	0.17%	NS	94.83	34.74	0	129.57	66%	381.09	24.88%	9.12%	0.00%	66.00%		
459	-4.4376	34.5986	Fès-Meknès	Taouate	Fenassa Bab El Hit	81.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	2.48	0.01	0	0	0.01%	0.00%	0.00%	81.83	0	0	81.83	54%	177.89	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%		
460	-4.2468	34.7106	Fès-Meknès	Taouate	Bni Ounjel Tafraout	110.83	100.97	0	10	20	20	5.05	33	0	0	1.83	0.06	0.03	101	0.05%	0.03%	NS	110.83	100.97	0	211.80	48%	407.31	27.21%	24.79%	0.00%	48.00%		
461	-4.2282	34.7117	Fès-Meknès	Taouate	Tamedit	81.33	76	0	10	20	20	3.8	33	0	0	1.31	-0.1	0	76	0.12%	0.00%	NS	81.33	76	0	157.33	48%	302.56	26.88%	25.12%	0.00%	48.00%		
462	-4.1264	34.6817	Fès-Meknès	Taouate	Tamedit	87.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	2.66	-0.05	0	0	0.06%	0.00%	0.00%	87.83	0	0	87.83	54%	190.93	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%		
463	-4.1264	34.6676	Fès-Meknès	Taouate	Tamedit	93.83	83.33	0	10	20	20	4.17	33	0	0	1.58	0.03	0.07	83.4	0.01%	0.08%	NS	93.83	83.33	0	177.16	48%	340.69	27.54%	24.46%	0.00%	48.00%		
464	-4.1261	34.6529	Fès-Meknès	Taouate	Tamedit	100.83	48.31	0	10	20	20	2.42	33	0	0	2.32	-0.07	0.09	48.4	0.07%	0.19%	NS	100.83	48.31	0	149.14	55%	331.42	30.42%	14.58%	0.00%	55.00%		
465	-4.1438	34.6388	Fès-Meknès	Taouate	Tamedit	115.33	39.63	0	10	20	20	1.98	33	0	0	2.89	-0.16	-0.03	39.6	0.14%	0.08%	NS	115.33	39.63	0	154.96	66%	455.76	25.30%	8.70%	0.00%	66.00%		
466	-4.1441	34.6245	Fès-Meknès	Taouate	Tamedit	60.83	85.77	0	10	20	20	4.29	33	0	0	0.54	-0.11	0.03	85.8	0.18%	0.03%	NS	60.83	85.77	0	146.60	54%	318.70	19.09%	16.91%	33.09%	30.00%		
467	-4.0931	34.6097	Fès-Meknès	Taouate	Tamedit	116.33	98.26	0	10	20	20	4.91	33	0	0	2.04	0.09	-0.06	98.2	0.08%	0.06%	NS	116.33	98.26	0	214.59	48%	412.67	28.19%	23.81%	0.00%	48.00%		
468	-4.2475	34.6395	Fès-Meknès	Taouate	Tamedit	97.33	106.13	164.58	10	20	20	8.23	33	0	0	0.46	0.15	58.47	0.02	0.15%	55.09%	0.01%	97.33	106.13	164.58	368.04	30%	525.77	18.51%	20.19%	31.30%	30.00%		
469	-4.2303	34.6396	Fès-Meknès	Taouate	Tamedit	77.33	5.43	41.16	10	20	20	2.06	33	0	0	1.72	0.03	35.77	0.04	0.04%	658.75%	0.10%	77.33	5.43	41.16	123.92	55%	275.38	28.08%	1.97%	14.95%	55.00%		
470	-4.2133	34.6399	Fès-Meknès	Taouate	Tamedit	73.83	75.46	0	10	20	20	3.77	33	0	0	1.09	-0.16	-0.06	75.4	0.22%	0.08%	NS	73.83	75.46	0	149.29	54%	324.54	22.75%	23.25%	0.00%	54.00%		
471	-4.1956	34.6392	Fès-Meknès	Taouate	Tamedit	70.33	14.66	0	10	20	20	0.73	33	0	0	1.91	0	-0.06	14.6	0.00%	0.41%	NS	70.33	14.66	0	84.99	72%	303.54	23.17%	4.83%	0.00%	72.00%		
472	-4.2135	34.6252	Fès-Meknès	Taouate	Tamedit	91.33	65.69	173.15	10	20	20	8.66	33	0	0	0.14	-0.11	107.51	0.05	0.12%	163.66%	0.03%	91.33	65.69	173.15	330.17	54%	717.76	12.72%	9.15%	24.12%	54.00%		
473	-4.2306	34.6258	Fès-Meknès	Taouate	Tamedit	96.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	2.92	0.03	0	0	0.03%	0.00%	0.00%	96.33	0	0	96.33	54%	209.41	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%		
474	-4.2818	34.6546	Fès-Meknès	Taouate	Thar Es-souk (Mun.)	71.33	47.77	0	10	20	20	2.39	33	0	0	1.44	0.09	0.03	47.8	0.13%	0.06%	NS	71.33	47.77	0	119.10	48%	229.04	31.14%	20.86%	0.00%	48.00%		
475	-5.0932	34.6165	Fès-Meknès	Taouate	Kissane	77.83	94.46	0	10	20	20	4.72	33	0	0	0.93	0.06	-0.06	94.4	0.08%	0.06%	NS	77.83	94.46	0	172.29	54%	374.54	20.78%	25.22%	0.00%	54.00%		
476	-5.1103	34.6024	Fès-Meknès	Taouate	Kissane	76.83	84.96	0	10	20	20	4.25	33	0	0	1.04	-0.01	0.04	85	0.01%	0.05%	NS	76.83	84.96	0	161.79	54%	351.72	21.84%	24.16%	0.00%	54.00%		
477	-5.1271	34.6018	Fès-Meknès	Taouate	Kissane	99.33	95.54	0	10	20	20	4.78	33	0	0	1.56	-0.05	0.06	95.6	0.05%	0.06%	NS	99.33	95.54	0	194.87	48%	374.75	26.51%	25.49%	0.00%	48.00%		
478	-5.0932	34.5878	Fès-Meknès	Taouate	Kissane	99.83	96.9	0	10	20	20	4.85	33	0	0	1.56	0.15	0.1	97	0.15%	0.10%	NS	99.83	96.9	0	196.73	48%	378.33	26.39%	25.61%	0.00%	48.00%		
479	-5.11	34.5878	Fès-Meknès	Taouate	Kissane	106.83	97.99	0	10	20	20	4.9	33	0	0	1.75	-0.08	0.01	98	0.07%	0.01%	NS	106.83	97.99	0	204.82	48%	393.88	27.12%	24.88%	0.00%	48.00%		
480	-5.1277	34.5881	Fès-Meknès	Taouate	Kissane	74.33	43.43	0	10	20	20	2.17	33	0	0	1.59	-0.16	-0.03	43.4	0.22%	0.07%	NS	74.33	43.43	0	117.76	55%	261.69	28.40%	16.60%	0.00%	55.00%		
481	-5.1103	34.5734	Fès-Meknès	Taouate	Kissane	85.83	90.39	0	10	20	20	4.52	33	0	0	1.23	-0.04	0.01	90.4	0.05%	0.01%	NS	85.83	90.39	0	176.22	54%	383.09	22.40%	23.60%	0.00%	54.00%		
482	-5.0925	34.5732	Fès-Meknès	Taouate	Kissane	92.83	93.37	134.68	10	20	20	6.73	33	0	0	0.77	-0.12	41.23	-0.08	0.13%	44.16%	0.06%	92.83	93.37	134.68	320.88	54%	697.57	13.31%	13.39%	19.31%	54.00%		
483	-5.0756	34.5734	Fès-Meknès	Taouate	Kissane	95.33	49.94	47.32	10	20	20	2.5	33	0	0	2.13	-0.04	0.06	2.68	0.04%	0.12%	5.66%	95.33	49.94	47.32	192.59	54%	418.67	22.77%	11.93%	11.30%	54.00%		
484	-5.0411	34.5735	Fès-Meknès	Taouate	Kissane	90.83	73.29	3.64	10	20	20	3.66	33	0	0	1.64	-0.11	-0.09	69.56	0.12%	0.12%	1910.99%	90.83	73.29	3.64	167.76	43%	294.32	30.86%	24.90%	1.24%	43.00%		
485	-5.0932	34.5595	Fès-Meknès	Taouate	Kissane	102.83	73.29	0	10	20	20	3.66	33	0	0	2.01	0.1	-0.09	73.2	0.10%	0.12%													

No. Need	Geographical data					Exact NPK Requirements (Kg/Ha)			Fertimapp Recommendations						The deviations from the exact requirements (Kg/ha)						Converting the quantities (Kg/ha) to percent formulas (%)											
	Geographical coordinates		Region	Prefecture/Province	District	N	P	K	Regional Fertilizer Formula 1			Regional Fertilizer Formula 2			Absolute deviation			Relative deviation			Exact NPK Requirements (Kg/Ha)			Total quantity of N,P and K	Filler %	Demand (Dj) (Kg/ha)	The nutritional specifications (β_{ij})					
	Longitude	Latitude							%N	%P	%K	Required quantity q/Ha	%N	%P	%K	Required quantity q/Ha	N	P	K	N	P	K	N				P	K	%N	%P	%K	%Filler
501	-4.783	34.5583	Fès-Meknès	Taouate	Galaz	86.83	92.29	0	10	20	20	4.61	33	0	0	1.23	-0.14	-0.09	92.2	0.16%	0.10%	NS	86.83	92.29	0	179.12	54%	389.39	22.30%	23.70%	0.00%	54.00%
502	-4.7828	34.544	Fès-Meknès	Taouate	Galaz	110.83	92.56	0	10	20	20	4.63	33	0	0	1.96	0.15	0.04	92.6	0.14%	0.04%	NS	110.83	92.56	0	203.39	48%	391.13	28.34%	23.66%	0.00%	48.00%
503	-4.731	34.5582	Fès-Meknès	Taouate	Mezraoua	72.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	2.19	-0.06	0	0	0.08%	0.00%	0.00%	72.33	0	0	72.33	54%	157.24	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
504	-4.7138	34.5576	Fès-Meknès	Taouate	Mezraoua	93.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	2.84	-0.11	0	0	0.12%	0.00%	0.00%	93.83	0	0	93.83	54%	203.98	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
505	-4.7653	34.5432	Fès-Meknès	Taouate	Mezraoua	82.83	83.87	0	10	20	20	4.19	33	0	0	1.24	-0.01	-0.07	83.8	0.01%	0.08%	NS	82.83	83.87	0	166.70	54%	362.39	22.86%	23.14%	0.00%	54.00%
506	-4.7485	34.5432	Fès-Meknès	Taouate	Mezraoua	86.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	2.63	-0.04	0	0	0.05%	0.00%	0.00%	86.83	0	0	86.83	54%	188.76	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
507	-4.731	34.5432	Fès-Meknès	Taouate	Mezraoua	79.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	2.42	0.03	0	0	0.04%	0.00%	0.00%	79.83	0	0	79.83	54%	173.54	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
508	-4.7142	34.5436	Fès-Meknès	Taouate	Mezraoua	96.33	19	0	10	20	20	0.95	33	0	0	2.63	-0.04	0	19	0.04%	0.00%	NS	96.33	19	0	115.33	72%	411.89	23.39%	4.61%	0.00%	72.00%
509	-4.7657	34.5296	Fès-Meknès	Taouate	Mezraoua	118.83	86.31	0	10	20	20	4.32	33	0	0	2.29	-0.06	0.09	86.4	0.05%	0.10%	NS	118.83	86.31	0	205.14	48%	394.50	30.12%	21.88%	0.00%	48.00%
510	-4.749	34.5291	Fès-Meknès	Taouate	Mezraoua	81.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	2.48	0.01	0	0	0.01%	0.00%	0.00%	81.83	0	0	81.83	54%	177.89	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
511	-4.7312	34.5295	Fès-Meknès	Taouate	Mezraoua	142.83	59.17	0	10	20	20	2.96	33	0	0	3.43	-0.04	0.03	59.2	0.03%	0.05%	NS	142.83	59.17	0	202.00	66%	594.12	24.04%	9.96%	0.00%	66.00%
512	-4.7143	34.5291	Fès-Meknès	Taouate	Mezraoua	93.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	2.83	0.06	0	0	0.06%	0.00%	0.00%	93.33	0	0	93.33	54%	202.89	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
513	-4.6968	34.5289	Fès-Meknès	Taouate	Mezraoua	94.33	56.46	0	10	20	20	2.82	33	0	0	2	-0.13	-0.06	56.4	0.14%	0.11%	NS	94.33	56.46	0	150.79	55%	335.09	28.15%	16.85%	0.00%	55.00%
514	-4.7653	34.5152	Fès-Meknès	Taouate	Mezraoua	104.83	44.51	0	10	20	20	2.23	33	0	0	2.5	-0.03	0.09	44.6	0.03%	0.20%	NS	104.83	44.51	0	149.34	66%	439.24	23.87%	10.13%	0.00%	66.00%
515	-4.7495	34.5154	Fès-Meknès	Taouate	Mezraoua	86.33	75.46	0	10	20	20	3.77	33	0	0	1.47	-0.12	-0.06	75.4	0.14%	0.08%	NS	86.33	75.46	0	161.79	48%	311.13	27.75%	24.25%	0.00%	48.00%
516	-4.7315	34.5148	Fès-Meknès	Taouate	Mezraoua	99.33	84.69	0	10	20	20	4.23	33	0	0	1.73	0.06	-0.09	84.6	0.06%	0.11%	NS	99.33	84.69	0	184.02	48%	353.88	28.07%	23.93%	0.00%	48.00%
517	-4.7142	34.5148	Fès-Meknès	Taouate	Mezraoua	75.33	42.89	0	10	20	20	2.14	33	0	0	1.63	-0.14	-0.09	42.8	0.19%	0.21%	NS	75.33	42.89	0	118.22	55%	262.71	28.67%	16.33%	0.00%	55.00%
518	-4.6968	34.5145	Fès-Meknès	Taouate	Mezraoua	109.33	0	105.28	10	20	20	5.26	33	0	0	1.72	0.03	105.2	-0.08	0.03%	NS	109.33	0	105.28	214.61	48%	412.71	26.49%	0.00%	25.51%	48.00%	
519	-4.7315	34.5005	Fès-Meknès	Taouate	Mezraoua	62.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	1.89	0.04	0	0	0.06%	0.00%	0.00%	62.33	0	0	62.33	54%	135.50	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
520	-4.7317	34.5006	Fès-Meknès	Taouate	Mezraoua	63.83	1.09	0	10	20	20	0.05	33	0	0	1.92	0.03	-0.09	1	0.05%	8.26%	NS	63.83	1.09	0	64.92	61%	166.46	38.35%	0.65%	0.00%	61.00%
521	-4.6967	34.5009	Fès-Meknès	Taouate	Mezraoua	83.33	18.46	0	10	20	20	0.92	33	0	0	2.25	0.12	-0.06	18.4	0.14%	0.33%	NS	83.33	18.46	0	101.79	72%	363.54	22.92%	5.08%	0.00%	72.00%
522	-4.6797	34.4864	Fès-Meknès	Taouate	Mezraoua	112.33	18.46	0	10	20	20	0.92	33	0	0	3.12	-0.17	-0.06	18.4	0.15%	0.33%	NS	112.33	18.46	0	130.79	72%	467.11	24.05%	3.95%	0.00%	72.00%
523	-4.8176	34.5154	Fès-Meknès	Taouate	Mezraoua	96.33	7.6	0	10	20	20	0.38	33	0	0	2.8	-0.13	0	7.6	0.13%	0.00%	NS	96.33	7.6	0	103.93	78%	472.41	20.39%	1.61%	0.00%	78.00%
524	-4.7999	34.5011	Fès-Meknès	Taouate	Mezraoua	91.33	2.17	0	10	20	20	0.11	33	0	0	2.73	-0.14	0.03	2.2	0.15%	1.38%	NS	91.33	2.17	0	93.50	78%	425.00	21.49%	0.51%	0.00%	78.00%
525	-4.6966	34.5861	Fès-Meknès	Taouate	Zrizer	73.83	86.31	0	10	20	20	4.32	33	0	0	0.93	0.06	0.09	86.4	0.08%	0.10%	NS	73.83	86.31	0	160.14	54%	348.13	21.21%	24.79%	0.00%	54.00%
526	-4.6794	34.5861	Fès-Meknès	Taouate	Zrizer	82.33	77.09	0	10	20	20	3.85	33	0	0	1.33	0.06	-0.09	77	0.07%	0.12%	NS	82.33	77.09	0	159.42	48%	306.58	26.85%	25.15%	0.00%	48.00%
527	-4.6102	34.5857	Fès-Meknès	Taouate	Zrizer	101.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.09	0.14	0	0	0.14%	0.00%	0.00%	101.83	0	0	101.83	54%	221.37	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
528	-4.6102	34.5281	Fès-Meknès	Taouate	Rghious	75.33	7.6	151.59	10	20	20	7.58	33	0	0	0	0.47	144	0.01	0.62%	1894.74%	0.01%	75.33	7.6	151.59	234.52	54%	509.83	14.78%	1.49%	29.73%	54.00%
529	-4.5934	34.5428	Fès-Meknès	Taouate	Rghious	121.33	60.8	0	10	20	20	3.04	33	0	0	2.76	0.15	0	60.8	0.12%	0.00%	NS	121.33	60.8	0	182.13	55%	404.73	29.98%	15.02%	0.00%	55.00%
530	-4.5931	34.5713	Fès-Meknès	Taouate	Rghious	77.83	81.43	0	10	20	20	4.07	33	0	0	1.12	-0.17	-0.03	81.4	0.22%	0.04%	NS	77.83	81.43	0	159.26	54%	346.22	22.48%	23.52%	0.00%	54.00%
531	-4.5762	34.5719	Fès-Meknès	Taouate	Rghious	100.83	76	0	10	20	20	3.8	33	0	0	1.9	-0.13	0	76	0.13%	0.00%	NS	100.83	76	0	176.83	48%	340.06	29.65%	22.35%	0.00%	48.00%
532	-4.5412	34.5713	Fès-Meknès	Taouate	Bouadel	92.83	67.31	43.96	10	20	20	3.37	33	0	0	1.79	-0.06	0.09	23.44	0.06%	0.13%	53.32%	92.83	67.31	43.96	204.10	54%	443.70	20.92%	15.17%	9.91%	54.00%
533	-4.5244	34.5713	Fès-Meknès	Taouate	Bouadel	94.33	84.14	0	10	20	20	4.21	33	0	0	1.58	-0.09	0.06	84.2	0.10%	0.07%	NS	94.33	84.14	0	178.47	48%	343.21	27.48%	24.52%	0.00%	48.00%
534	-4.5416	34.5713	Fès-Meknès	Taouate	Bouadel	92.83	66.23	42.56	10	20	20	3.31	33	0	0	1.81	0	-0.03	23.64	0.00%	0.05%	55.55%	92.83	66.23	42.56	201.62	54%	438.30	21.18%	15.11%	9.71%	54.00%
535	-4.4205	34.5988	Fès-Meknès	Taouate	Bni oulid	86.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	2.62	0.13	0	0	0.15%	0.00%	0.00%	86.33	0	0	86.33	54%	187.67	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
536	-4.4212	34.5985	Fès-Meknès	Taouate	Bni oulid	86.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	2.62	0.13	0	0	0.15%	0.00%	0.00%	86.33	0	0	86.33	54%	187.67	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
537	-4.4037																															

No. Need	Geographical data					Exact NPK Requirements (Kg/Ha)			Fertirmap Recommendations						The deviations from the exact requirements (Kg/ha)						Converting the quantities (Kg/ha) to percent formulas (%)											
	Geographical coordinates		Region	Prefecture/Province	District	N	P	K	Regional Fertilizer Formula 1			Regional Fertilizer Formula 2			Absolute deviation			Relative deviation			Exact NPK Requirements (Kg/ha)			Total quantity of N,P and K	Filler %	Demand (Dj) (Kg/ha)	The nutritional specifications (β_{ij})					
	Longitude	Latitude							%N	%P	%K	%N	%P	%K	N	P	K	N	P	K	N	P	K				%N	%P	%K	%Filler		
	Required quantity q/Ha	Required quantity q/Ha	N	P	K	Required quantity q/Ha	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K	%N	%P	%K	%Filler	
551	-5.0242	34.5445	Fès-Meknès	Taouate	Ouartzagh	82.33	77.09	0	10	20	20	3.85	33	0	0	1.33	0.06	-0.09	77	0.07%	0.12%	NS	82.33	77.09	0	159.42	48%	306.58	26.85%	25.15%	0.00%	48.00%
552	-5.0408	34.5299	Fès-Meknès	Taouate	Ouartzagh	95.83	87.94	0	10	20	20	4.4	33	0	0	1.57	-0.02	0.06	88	0.02%	0.07%	NS	95.83	87.94	0	183.77	48%	353.40	27.12%	24.88%	0.00%	48.00%
553	-5.007	34.545	Fès-Meknès	Taouate	Ouartzagh	85.83	54.29	0	10	20	20	2.71	33	0	0	1.78	0.01	-0.09	54.2	0.01%	0.17%	NS	85.83	54.29	0	140.12	55%	311.38	27.56%	17.44%	0.00%	55.00%
554	-5.0072	34.5445	Fès-Meknès	Taouate	Ouartzagh	85.33	56.46	0	10	20	20	2.82	33	0	0	1.73	-0.04	-0.06	56.4	0.05%	0.11%	NS	85.33	56.46	0	141.79	55%	315.09	27.08%	17.92%	0.00%	55.00%
555	-4.9893	34.545	Fès-Meknès	Taouate	Ouartzagh	89.33	8.69	0	10	20	20	0.43	33	0	0	2.58	0.11	-0.09	8.6	0.12%	1.04%	NS	89.33	8.69	0	98.02	78%	445.55	20.05%	1.95%	0.00%	78.00%
556	-4.9548	34.5448	Fès-Meknès	Taouate	Ouartzagh	83.83	58.63	0	10	20	20	2.93	33	0	0	1.65	-0.08	-0.03	58.6	0.10%	0.05%	NS	83.83	58.63	0	142.46	48%	273.96	30.60%	21.40%	0.00%	48.00%
557	-5.0242	34.5298	Fès-Meknès	Taouate	Ouartzagh	78.33	65.14	0	10	20	20	3.26	33	0	0	1.39	0.14	0.06	65.2	0.18%	0.09%	NS	78.33	65.14	0	143.47	48%	275.90	28.39%	23.61%	0.00%	48.00%
558	-5.041	34.5162	Fès-Meknès	Taouate	Ouartzagh	91.83	53.2	0	10	20	20	2.66	33	0	0	1.98	0.11	0	53.2	0.12%	0.00%	NS	91.83	53.2	0	145.03	55%	322.29	28.49%	16.51%	0.00%	55.00%
559	-4.9723	34.5303	Fès-Meknès	Taouate	Ouartzagh	140.83	74.37	0	10	20	20	3.72	33	0	0	3.14	-0.01	0.03	74.4	0.01%	0.04%	NS	140.83	74.37	0	215.20	55%	478.22	29.45%	15.55%	0.00%	55.00%
560	-4.9723	34.5156	Fès-Meknès	Taouate	Ouartzagh	90.83	58.09	0	10	20	20	2.9	33	0	0	1.87	-0.12	-0.09	58	0.13%	0.15%	NS	90.83	58.09	0	148.92	55%	330.93	27.45%	17.55%	0.00%	55.00%
561	-4.973	34.5013	Fès-Meknès	Taouate	Ouartzagh	75.83	58.09	0	10	20	20	2.9	33	0	0	1.42	0.03	-0.09	58	0.04%	0.15%	NS	75.83	58.09	0	133.92	48%	257.54	29.44%	22.56%	0.00%	48.00%
562	-4.9727	34.4875	Fès-Meknès	Taouate	Ouartzagh	87.33	71.11	0	10	20	20	3.56	33	0	0	1.57	0.08	0.09	71.2	0.09%	0.13%	NS	87.33	71.11	0	158.44	48%	304.69	28.66%	23.34%	0.00%	48.00%
563	-4.9727	34.4873	Fès-Meknès	Taouate	Ouartzagh	87.83	71.11	0	10	20	20	3.56	33	0	0	1.58	-0.09	0.09	71.2	0.10%	0.13%	NS	87.83	71.11	0	158.94	48%	305.65	28.74%	23.26%	0.00%	48.00%
564	-5.0244	34.5016	Fès-Meknès	Taouate	Ouartzagh	94.33	41.8	0	10	20	20	2.09	33	0	0	2.23	0.16	0	41.8	0.17%	0.00%	NS	94.33	41.8	0	136.13	55%	302.51	31.18%	13.82%	0.00%	55.00%
565	-5.0067	34.5019	Fès-Meknès	Taouate	Ouartzagh	71.83	83.06	0	10	20	20	4.15	33	0	0	0.92	0.03	-0.06	83	0.04%	0.07%	NS	71.83	83.06	0	154.89	54%	336.72	21.33%	24.67%	0.00%	54.00%
566	-4.99	34.502	Fès-Meknès	Taouate	Ouartzagh	86.33	82.79	0	10	20	20	4.14	33	0	0	1.36	-0.05	0.01	82.8	0.06%	0.01%	NS	86.33	82.79	0	169.12	48%	325.23	26.54%	25.46%	0.00%	48.00%
567	-4.9902	34.502	Fès-Meknès	Taouate	Ouartzagh	86.33	82.24	0	10	20	20	4.11	33	0	0	1.37	-0.02	-0.04	82.2	0.02%	0.05%	NS	86.33	82.24	0	168.57	48%	324.17	26.63%	25.37%	0.00%	48.00%
568	-4.9727	34.5013	Fès-Meknès	Taouate	Ouartzagh	74.33	58.09	0	10	20	20	2.9	33	0	0	1.37	-0.12	-0.09	58	0.16%	0.15%	NS	74.33	58.09	0	132.42	48%	254.65	29.19%	22.81%	0.00%	48.00%
569	-4.9384	34.4729	Fès-Meknès	Taouate	Ouartzagh	96.83	69.49	0	10	20	20	3.47	33	0	0	1.88	-0.09	-0.09	69.4	0.09%	0.13%	NS	96.83	69.49	0	166.32	48%	319.85	30.27%	21.73%	0.00%	48.00%
570	-4.8692	34.5013	Fès-Meknès	Taouate	Ouartzagh	92.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	2.8	0.07	0	0	0.08%	0.00%	0.00%	92.33	0	0	92.33	54%	200.72	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
571	-4.8692	34.502	Fès-Meknès	Taouate	Ouartzagh	91.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	2.78	-0.09	0	0	0.10%	0.00%	0.00%	91.83	0	0	91.83	54%	199.63	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
572	-4.8864	34.5011	Fès-Meknès	Taouate	Ouartzagh	67.83	23.34	140	10	20	20	7	33	0	0	0	2.17	116.66	0	3.20%	499.83%	0.00%	67.83	23.34	140	231.17	54%	502.54	13.50%	4.64%	27.86%	54.00%
573	-4.4404	34.4132	Fès-Meknès	Taza	Bni Frassen	126.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.83	0.06	0	0	0.05%	0.00%	0.00%	126.33	0	0	126.33	54%	274.63	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
574	-4.4224	34.4131	Fès-Meknès	Taza	Bni Frassen	125.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.8	0.07	0	0	0.06%	0.00%	0.00%	125.33	0	0	125.33	54%	272.46	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
575	-4.3879	34.4271	Fès-Meknès	Taza	Bni Frassen	51.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	1.56	0.15	0	0	0.29%	0.00%	0.00%	51.33	0	0	51.33	54%	111.59	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
576	-4.4058	34.3987	Fès-Meknès	Taza	Bni Frassen	99.33	48.86	0	10	20	20	2.44	33	0	0	2.27	-0.02	-0.06	48.8	0.02%	0.12%	NS	99.33	48.86	0	148.19	55%	329.31	30.16%	14.84%	0.00%	55.00%
577	-4.3538	34.3983	Fès-Meknès	Taza	Bni Frassen	10.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	0.33	0.06	0	0	0.55%	0.00%	0.00%	10.83	0	0	10.83	54%	23.54	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
578	-4.4406	34.3847	Fès-Meknès	Taza	Bni Frassen	116.33	0	159.88	10	20	20	7.99	33	0	0	1.1	-0.13	159.8	-0.08	0.11%	NS	0.05%	116.33	0	159.88	276.21	54%	600.00	19.39%	0.00%	26.65%	54.00%
579	-4.4228	34.3845	Fès-Meknès	Taza	Bni Frassen	84.83	58.63	0	10	20	20	2.93	33	0	0	1.68	-0.09	-0.03	58.6	0.11%	0.05%	NS	84.83	58.63	0	143.46	48%	275.88	30.75%	21.25%	0.00%	48.00%
580	-4.3883	34.3843	Fès-Meknès	Taza	Bni Frassen	137.83	42.34	0	10	20	20	2.12	33	0	0	3.54	0.19	0.06	42.4	0.14%	0.14%	NS	137.83	42.34	0	180.17	66%	529.91	26.01%	7.99%	0.00%	66.00%
581	-4.3713	34.3842	Fès-Meknès	Taza	Bni Frassen	98.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	2.98	0.01	0	0	0.01%	0.00%	0.00%	98.33	0	0	98.33	54%	213.76	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
582	-4.3368	34.3839	Fès-Meknès	Taza	Bni Frassen	145.83	46.69	0	10	20	20	2.33	33	0	0	3.71	-0.1	-0.09	46.6	0.07%	0.19%	NS	145.83	46.69	0	192.52	66%	566.24	25.75%	8.25%	0.00%	66.00%
583	-4.4402	34.3704	Fès-Meknès	Taza	Bni Frassen	102.33	30.94	0	10	20	20	1.55	33	0	0	2.63	-0.04	0.06	31	0.04%	0.19%	NS	102.33	30.94	0	133.27	66%	391.97	26.11%	7.89%	0.00%	66.00%
584	-4.4229	34.3704	Fès-Meknès	Taza	Bni Frassen	101.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.07	-0.02	0	0	0.02%	0.00%	0.00%	101.33	0	0	101.33	54%	220.28	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
585	-4.4402	34.3562	Fès-Meknès	Taza	Bni Frassen	128.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.9	-0.13	0	0	0.10%	0.00%	0.00%	128.83	0	0	128.83	54%	280.07	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
586	-4.4231	34.3561	Fès-Meknès	Taza	Bni Frassen	159.33	64.6	0	10	20	20	3.23	33	0	0	3.85	0.02	0	64.6	0.01%	0.00%	NS	159.33	64.6	0	223.93	66%	658.62	24.19%	9.81%	0.00%	66.00%
587	-4.4059	34.3559	Fès-Meknès	Taza	Bni Frassen	138.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	4.19	-0.06	0	0	0.04%	0.00%	0.00%	138.33	0	0	138.33	54%	300.72	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
588	-4.4405	34.3421	Fès-Meknès	Taza	Bni Frassen	103.83	42.34	0	10	20	20	2.12	33	0	0	2.5	-0.13	0.06	42.4	0.13%	0.14%	NS	103.83	42.34	0	146.17	66%	429.91	24.15%	9.85%	0.00%	66.00%
589	-4.4232	34.3419	Fès-Meknès	Taza	Bni Frassen	91.83	40.17	0	10	20	20	2.01	33	0	0	2.17	-0.12	0.03	40.2	0.13%	0.07%	NS	91.83	40.17	0	132.00	55%	293.33	31.31%	13.69%	0.00%	55.00%
590	-4.4062	34.3419	Fès-Meknès	Taza	Bni Frassen	94.83	48.31	0	10	20	20	2.42	33	0	0	2.14	-0.01	0.09	48.4	0.01%	0.19%	NS	94.83	48.31	0	143.14	55%	318.09	29.81%	15.19%	0.00%	55.00%
591	-4.389	34.3417	Fès-Meknès	Taza	Bni Frassen	78.33	24.97	0	10	20	20	1.25	33																			

No. Need	Geographical data					Exact NPK Requirements (Kg/Ha)			Fertimap Recommendations						The deviations from the exact requirements (Kg/ha)						Converting the quantities (Kg/ha) to percent formulas (%)											
	Geographical coordinates		Region	Prefecture/Province	District	N	P	K	Regional Fertilizer Formula 1			Regional Fertilizer Formula 2			Absolute deviation			Relative deviation			Exact NPK Requirements (Kg/ha)			Total quantity of N,P and K	Filler %	Demand (D _f)	The nutritional specifications (β _{ij})					
	Longitude	Latitude							%N	%P	%K	%N	%P	%K	N	P	K	N	P	K	N	P	K				%N	%P	%K	%Filler		
601	-4.458	34.3136	Fès-Meklaès	Taza	Bni Frassen	127.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.86	0.05	0	0	0.04%	0.00%	0.00%	127.33	0	0	127.33	54%	276.80	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
602	-4.3895	34.2846	Fès-Meklaès	Taza	Bni Frassen	95.83	83.33	0	10	20	20	4.17	33	0	0	1.64	-0.01	0.07	83.4	0.01%	0.08%	NS	95.83	83.33	0	179.16	48%	344.54	27.81%	24.19%	0.00%	48.00%
603	-4.3721	34.2986	Fès-Meklaès	Taza	Bni Frassen	125.33	6.51	0	10	20	20	0.33	33	0	0	3.7	0.07	0.09	6.6	0.06%	1.38%	NS	125.33	6.51	0	131.84	78%	599.27	20.91%	1.09%	0.00%	78.00%
604	-4.3549	34.2986	Fès-Meklaès	Taza	Bni Frassen	120.33	41.8	0	10	20	20	2.09	33	0	0	3.01	-0.1	0	41.8	0.08%	0.00%	NS	120.33	41.8	0	162.13	66%	476.85	25.23%	8.77%	0.00%	66.00%
605	-4.3725	34.2845	Fès-Meklaès	Taza	Bni Frassen	113.83	19.54	0	10	20	20	0.98	33	0	0	3.15	-0.08	0.06	19.6	0.07%	0.31%	NS	113.83	19.54	0	133.37	72%	476.32	23.90%	4.10%	0.00%	72.00%
606	-4.2852	34.4121	Fès-Meklaès	Taza	Rbaa El Fouki	77.83	109.39	23.24	10	20	20	5.47	33	0	0	0.7	-0.03	0.01	86.16	0.04%	0.01%	370.74%	77.83	109.39	23.24	210.46	54%	457.52	17.01%	23.91%	5.08%	54.00%
607	-4.3196	34.3838	Fès-Meklaès	Taza	Rbaa El Fouki	120.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.66	-0.05	0	0	0.04%	0.00%	0.00%	120.83	0	0	120.83	54%	262.67	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
608	-4.3025	34.3838	Fès-Meklaès	Taza	Rbaa El Fouki	27.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	0.83	0.06	0	0	0.22%	0.00%	0.00%	27.33	0	0	27.33	54%	59.41	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
609	-4.2853	34.3835	Fès-Meklaès	Taza	Rbaa El Fouki	140.33	47.77	41.72	10	20	20	2.39	33	0	0	3.53	0.06	0.03	6.08	0.04%	0.06%	14.57%	140.33	47.77	41.72	229.82	55%	510.71	27.48%	9.35%	8.17%	55.00%
610	-4.2682	34.3835	Fès-Meklaès	Taza	Rbaa El Fouki	148.33	93.91	0	10	20	20	4.7	33	0	0	3.07	-0.02	0.09	94	0.01%	0.10%	NS	148.33	93.91	0	242.24	55%	538.31	27.55%	17.45%	0.00%	55.00%
611	-4.2337	34.3828	Fès-Meklaès	Taza	Rbaa El Fouki	115.33	92.56	165.37	10	20	20	8.27	33	0	0	0.99	0.04	72.84	0.03	0.03%	78.69%	0.02%	115.33	92.56	165.37	373.26	30%	533.23	21.63%	17.36%	31.01%	30.00%
612	-4.3206	34.3123	Fès-Meklaès	Taza	Oulad Zbair	140.33	8.14	0	10	20	20	0.41	33	0	0	4.13	0.06	0.06	8.2	0.04%	0.74%	NS	140.33	8.14	0	148.47	78%	674.86	20.79%	1.21%	0.00%	78.00%
613	-4.3034	34.3128	Fès-Meklaès	Taza	Oulad Zbair	125.83	43.97	0	10	20	20	2.2	33	0	0	3.24	0.09	0.03	44	0.07%	0.07%	NS	125.83	43.97	0	172.80	66%	508.24	25.35%	8.65%	0.00%	66.00%
614	-4.3379	34.2985	Fès-Meklaès	Taza	Oulad Zbair	170.33	76.54	0	10	20	20	3.83	33	0	0	4	-0.03	0.06	76.6	0.02%	0.08%	NS	170.33	76.54	0	246.87	55%	548.60	31.05%	13.95%	0.00%	55.00%
615	-4.3208	34.2985	Fès-Meklaès	Taza	Oulad Zbair	149.33	87.94	0	10	20	20	4.4	33	0	0	3.19	-0.06	0.06	88	0.04%	0.07%	NS	149.33	87.94	0	237.27	55%	527.27	28.32%	16.68%	0.00%	55.00%
616	-4.3379	34.2841	Fès-Meklaès	Taza	Oulad Zbair	131.33	45.6	0	10	20	20	2.28	33	0	0	3.29	0.04	0	45.6	0.03%	0.00%	NS	131.33	45.6	0	176.93	66%	520.38	25.24%	8.76%	0.00%	66.00%
617	-4.3209	34.2838	Fès-Meklaès	Taza	Oulad Zbair	133.33	25.51	0	10	20	20	1.28	33	0	0	3.65	-0.08	0.09	25.6	0.06%	0.35%	NS	133.33	25.51	0	158.84	72%	567.29	23.50%	4.50%	0.00%	72.00%
618	-4.3385	34.2696	Fès-Meklaès	Taza	Oulad Zbair	0	54.29	0	10	20	20	2.71	33	0	0	0	27.1	-0.09	54.2	NS	0.17%	NS	0	54.29	0	54.29	54%	118.02	0.00%	46.00%	0.00%	54.00%
619	-4.3215	34.2696	Fès-Meklaès	Taza	Oulad Zbair	54.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	1.65	0.12	0	0	0.22%	0.00%	0.00%	54.33	0	0	54.33	54%	118.11	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
620	-4.2873	34.2554	Fès-Meklaès	Taza	Oulad Zbair	118.83	14.11	0	10	20	20	0.71	33	0	0	3.39	0.14	0.09	14.2	0.12%	0.64%	NS	118.83	14.11	0	132.94	72%	474.79	25.03%	2.97%	0.00%	72.00%
621	-4.27	34.2551	Fès-Meklaès	Taza	Oulad Zbair	84.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	2.57	-0.02	0	0	0.02%	0.00%	0.00%	84.83	0	0	84.83	54%	184.41	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
622	-4.2526	34.2693	Fès-Meklaès	Taza	Oulad Zbair	86.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	2.63	-0.04	0	0	0.05%	0.00%	0.00%	86.83	0	0	86.83	54%	188.76	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
623	-4.2694	34.2696	Fès-Meklaès	Taza	Oulad Zbair	145.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	4.4	-0.13	0	0	0.09%	0.00%	0.00%	145.33	0	0	145.33	54%	315.93	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
624	-4.2866	34.2693	Fès-Meklaès	Taza	Oulad Zbair	110.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.36	0.05	0	0	0.05%	0.00%	0.00%	110.83	0	0	110.83	54%	240.93	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
625	-4.3043	34.2699	Fès-Meklaès	Taza	Oulad Zbair	84.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	2.96	0.15	0	0	0.18%	0.00%	0.00%	84.33	0	0	84.33	54%	183.33	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
626	-4.2693	34.3265	Fès-Meklaès	Taza	Oulad Zbair	157.33	87.13	62.44	10	20	20	4.36	33	0	0	3.45	0.12	0.07	24.76	0.08%	0.08%	39.65%	157.33	87.13	62.44	306.90	48%	590.19	29.66%	14.76%	10.58%	48.00%
627	-4.2879	34.1838	Fès-Meklaès	Taza	Oued Amllil (Mun.)	154.83	77.63	0	10	20	20	3.88	33	0	0	3.52	0.13	-0.03	77.6	0.08%	0.04%	NS	154.83	77.63	0	232.46	55%	516.58	29.97%	15.03%	0.00%	55.00%
628	-4.2705	34.1836	Fès-Meklaès	Taza	Oued Amllil (Mun.)	169.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	5.15	0.12	0	0	0.07%	0.00%	0.00%	169.83	0	0	169.83	54%	369.20	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
629	-4.3049	34.2417	Fès-Meklaès	Taza	Ghiata Al Gharbia	79.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	2.42	0.03	0	0	0.04%	0.00%	0.00%	79.83	0	0	79.83	54%	173.54	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
630	-4.2872	34.2411	Fès-Meklaès	Taza	Ghiata Al Gharbia	122.33	53.2	0	10	20	20	2.66	33	0	0	2.9	-0.03	0	53.2	0.02%	0.00%	NS	122.33	53.2	0	175.53	55%	390.07	31.36%	13.64%	0.00%	55.00%
631	-4.3216	34.2274	Fès-Meklaès	Taza	Ghiata Al Gharbia	79.33	57	0	10	20	20	2.85	33	0	0	1.54	-0.01	0	57	0.01%	0.00%	NS	79.33	57	0	136.33	48%	262.17	30.26%	21.74%	0.00%	48.00%
632	-4.2533	34.2405	Fès-Meklaès	Taza	Ghiata Al Gharbia	109.83	36.37	0	10	20	20	1.82	33	0	0	2.78	0.11	0.03	36.4	0.10%	0.08%	NS	109.83	36.37	0	146.20	66%	430.00	25.54%	8.46%	0.00%	66.00%
633	-4.3563	34.2141	Fès-Meklaès	Taza	Ghiata Al Gharbia	86.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	2.63	-0.04	0	0	0.05%	0.00%	0.00%	86.83	0	0	86.83	54%	188.76	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
634	-4.322	34.213	Fès-Meklaès	Taza	Ghiata Al Gharbia	68.83	13.03	0	10	20	20	0.65	33	0	0	1.89	0.04	-0.03	13	0.06%	0.23%	NS	68.83	13.03	0	81.86	72%	292.36	23.54%	4.46%	0.00%	72.00%
635	-4.2875	34.2125	Fès-Meklaès	Taza	Ghiata Al Gharbia	124.33	29.31	0	10	20	20	1.47	33	0	0	3.32	-0.07	0.09	29.4	0.06%	0.31%	NS	124.33	29.31	0	153.64	72%	548.71	22.66%	5.34%	0.00%	72.00%
636	-4.2533	34.2122	Fès-Meklaès	Taza	Ghiata Al Gharbia	99.33	33.66	0	10	20	20	1.68	33	0	0	2.5	-0.03	-0.06	33.6	0.03%	0.18%	NS	99.33	33.66	0	132.99	66%	391.15	25.39%	8.61%	0.00%	66.00%
637	-4.2009	34.2402	Fès-Meklaès	Taza	Ghiata Al Gharbia	115.83	74.91	0	10	20	20	3.75	33	0	0	2.38	0.21	0.09	75	0.18%	0.12%	NS	115.83	74.91	0	190.74	55%	423.87	27.33%	17.67%	0.00%	55.00%
638	-4.2185	34.226	Fès-Meklaès	Taza	Ghiata Al Gharbia	119.33	73.83	0	10	20	20	3.69	33	0	0	2.5	0.07	-0.03	73.8	0.06%	0.04%	NS	119.33	73.83	0	193.16	55%	429.24	27.80%	17.20%	0.00%	55.00%
639	-4.2188	34.2118	Fès-Meklaès	Taza	Ghiata Al Gharbia	127.83	7.06	0	10	20	20	0.35	33	0	0	3.77	0.08	-0.06	7	0.06%	0.85%	NS	127.83	7.06	0	134.89	78%	613.14	20.85%	1.15%	0.00%	78.00%
640	-4.2016	34.1973	Fès-Meklaès	Taza	Ghiata Al Gharbia	140.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	4.27	0.08	0	0	0.06%	0.00%	0.00%	140.83	0	0	140.83	54%	306.15	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
641	-4.219	34.1978	Fès-Meklaès	Taza	Ghiata Al Gharbia	113.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.43	-0.14	0	0	0.12%	0.00%	0.00%	113.33	0								

No. Need	Geographical data					Exact NPK Requirements (Kg/ha)			Fertimap Recommendations					The deviations from the exact requirements (Kg/ha)						Converting the quantities (Kg/ha) to percent formulas (%)												
	Geographical coordinates		Region	Prefecture/Province	District	N	P	K	Regional Fertilizer Formula 1			Regional Fertilizer Formula 2			Absolute deviation			Relative deviation			Exact NPK Requirements (Kg/ha)			Total quantity of N,P and K	Filler %	Demand (Dj) (Kg/ha)	The nutritional specifications (β_{ij})					
	Longitude	Latitude							%N	%P	%K	Required quantity q/ha	%N	%P	%K	Required quantity q/ha	N	P	K	N	P	K	N				P	K	%N	%P	%K	%Filler
651	-4.3391	34.1838	Fès-Meklaès	Taza	Ghiata Al Gharbia	93.83	51.57	0	10	20	20	2.58	33	0	0	2.06	-0.05	0.03	51.6	0.05%	0.06%	NS	93.83	51.57	0	145.40	55%	323.11	29.04%	15.96%	0.00%	55.00%
652	-4.3392	34.1987	Fès-Meklaès	Taza	Ghiata Al Gharbia	64.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	1.96	-0.15	0	0	0.23%	0.00%	0.00%	64.83	0	0	64.83	54%	140.93	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
653	-4.3049	34.1984	Fès-Meklaès	Taza	Ghiata Al Gharbia	94.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	2.86	0.05	0	0	0.05%	0.00%	0.00%	94.33	0	0	94.33	54%	205.07	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
654	-4.2877	34.198	Fès-Meklaès	Taza	Ghiata Al Gharbia	95.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	2.89	0.04	0	0	0.04%	0.00%	0.00%	95.33	0	0	95.33	54%	207.24	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
655	-4.1327	34.2393	Fès-Meklaès	Taza	Bab Marzouka	90.83	73.29	0	10	20	20	3.66	33	0	0	1.64	-0.11	-0.09	73.2	0.12%	0.12%	NS	90.83	73.29	0	164.12	48%	315.62	28.78%	23.22%	0.00%	48.00%
656	-4.1162	34.2393	Fès-Meklaès	Taza	Bab Marzouka	126.83	8.69	0	10	20	20	0.43	33	0	0	3.71	-0.1	-0.09	8.6	0.08%	1.04%	NS	126.83	8.69	0	135.52	78%	616.00	20.59%	1.41%	0.00%	78.00%
657	-4.0812	34.2387	Fès-Meklaès	Taza	Bab Marzouka	163.83	84.41	0	10	20	20	4.22	33	0	0	3.69	0.14	-0.01	84.4	0.09%	0.01%	NS	163.83	84.41	0	248.24	55%	551.64	29.70%	15.30%	0.00%	55.00%
658	-4.0642	34.2387	Fès-Meklaès	Taza	Bab Marzouka	97.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	2.95	0.02	0	0	0.02%	0.00%	0.00%	97.33	0	0	97.33	54%	211.59	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
659	-4.0469	34.2389	Fès-Meklaès	Taza	Bab Marzouka	106.33	68.94	0	10	20	20	3.45	33	0	0	2.18	0.11	0.06	69	0.10%	0.09%	NS	106.33	68.94	0	175.27	55%	389.49	27.30%	17.70%	0.00%	55.00%
660	-4.0126	34.2525	Fès-Meklaès	Taza	Bab Marzouka	111.83	33.66	0	10	20	20	1.68	33	0	0	2.88	0.01	-0.06	33.6	0.01%	0.18%	NS	111.83	33.66	0	145.49	66%	427.91	26.13%	7.87%	0.00%	66.00%
661	-4.0119	34.2671	Fès-Meklaès	Taza	Bab Marzouka	18.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	0.57	-0.02	0	0	0.11%	0.00%	0.00%	18.83	0	0	18.83	54%	40.93	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
662	-3.9947	34.2809	Fès-Meklaès	Taza	Bab Marzouka	72.83	28.77	0	10	20	20	1.44	33	0	0	1.77	-0.02	0.03	28.8	0.03%	0.10%	NS	72.83	28.77	0	101.60	66%	298.82	24.37%	9.63%	0.00%	66.00%
663	-4.1161	34.2248	Fès-Meklaès	Taza	Bab Marzouka	136.33	15.74	0	10	20	20	0.79	33	0	0	3.89	-0.06	0.06	15.8	0.04%	0.38%	NS	136.33	15.74	0	152.07	72%	543.11	25.10%	2.90%	0.00%	72.00%
664	-4.0984	34.2253	Fès-Meklaès	Taza	Bab Marzouka	132.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	4.01	0	0	0	0.00%	0.00%	0.00%	132.33	0	0	132.33	54%	287.67	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
665	-4.0814	34.2253	Fès-Meklaès	Taza	Bab Marzouka	133.33	47.23	0	10	20	20	2.36	33	0	0	3.32	-0.17	-0.03	47.2	0.13%	0.06%	NS	133.33	47.23	0	180.56	66%	531.06	25.11%	8.89%	0.00%	66.00%
666	-4.0644	34.2246	Fès-Meklaès	Taza	Bab Marzouka	67.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	2.04	-0.01	0	0	0.01%	0.00%	0.00%	67.33	0	0	67.33	54%	146.37	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
667	-4.0472	34.2243	Fès-Meklaès	Taza	Bab Marzouka	102.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.12	0.13	0	0	0.13%	0.00%	0.00%	102.83	0	0	102.83	54%	223.54	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
668	-4.1501	34.2112	Fès-Meklaès	Taza	Bab Marzouka	145.83	95.81	0	10	20	20	4.79	33	0	0	2.97	0.08	-0.01	95.8	0.05%	0.01%	NS	145.83	95.81	0	241.64	55%	536.98	27.16%	17.84%	0.00%	55.00%
669	-4.1332	34.2112	Fès-Meklaès	Taza	Bab Marzouka	105.83	47.77	0	10	20	20	2.39	33	0	0	2.48	-0.09	0.03	47.8	0.09%	0.06%	NS	105.83	47.77	0	153.60	55%	341.33	31.00%	14.00%	0.00%	55.00%
670	-4.1161	34.2111	Fès-Meklaès	Taza	Bab Marzouka	125.33	21.17	0	10	20	20	1.06	33	0	0	3.48	0.11	0.03	21.2	0.09%	0.14%	NS	125.33	21.17	0	146.50	72%	523.21	23.95%	4.05%	0.00%	72.00%
671	-4.0817	34.2106	Fès-Meklaès	Taza	Bab Marzouka	146.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	4.43	-0.14	0	0	0.10%	0.00%	0.00%	146.33	0	0	146.33	54%	318.11	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
672	-4.0819	34.1962	Fès-Meklaès	Taza	Bab Marzouka	56.83	51.57	0	10	20	20	2.58	33	0	0	0.94	-0.01	0.03	51.6	0.02%	0.06%	NS	56.83	51.57	0	108.40	48%	208.46	27.26%	24.74%	0.00%	48.00%
673	-4.0821	34.1818	Fès-Meklaès	Taza	Bab Marzouka	141.33	77.09	84.56	10	20	20	4.23	33	0	0	3	-0.03	7.51	0.04	0.02%	9.74%	0.05%	141.33	77.09	84.56	302.98	30%	432.83	32.65%	17.81%	19.54%	30.00%
674	-4.0301	34.2383	Fès-Meklaès	Taza	Taza (Mun.)	129.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.93	-0.14	0	0	0.11%	0.00%	0.00%	129.83	0	0	129.83	54%	282.24	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
675	-3.9952	34.2382	Fès-Meklaès	Taza	Taza (Mun.)	109.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.31	-0.1	0	0	0.09%	0.00%	0.00%	109.33	0	0	109.33	54%	237.67	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
676	-3.9786	34.2378	Fès-Meklaès	Taza	Taza (Mun.)	147.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	4.46	-0.15	0	0	0.10%	0.00%	0.00%	147.33	0	0	147.33	54%	320.28	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
677	-3.9957	34.2241	Fès-Meklaès	Taza	Taza (Mun.)	118.33	45.6	0	10	20	20	2.28	33	0	0	2.89	-0.16	0	45.6	0.14%	0.00%	NS	118.33	45.6	0	163.93	66%	482.15	24.54%	9.46%	0.00%	66.00%
678	-4.408	34.1567	Fès-Meklaès	Taza	Bouhliou	105.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.21	0.1	0	0	0.09%	0.00%	0.00%	105.83	0	0	105.83	54%	230.07	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
679	-4.3913	34.1563	Fès-Meklaès	Taza	Bouhliou	88.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	2.69	-0.06	0	0	0.07%	0.00%	0.00%	88.83	0	0	88.83	54%	193.11	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
680	-4.3742	34.156	Fès-Meklaès	Taza	Bouhliou	97.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	2.96	-0.15	0	0	0.15%	0.00%	0.00%	97.83	0	0	97.83	54%	212.67	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
681	-4.357	34.1561	Fès-Meklaès	Taza	Bouhliou	124.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.78	-0.09	0	0	0.07%	0.00%	0.00%	124.83	0	0	124.83	54%	271.37	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
682	-4.4427	34.1428	Fès-Meklaès	Taza	Bouhliou	101.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.09	0.14	0	0	0.14%	0.00%	0.00%	101.83	0	0	101.83	54%	221.37	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
683	-4.4253	34.1426	Fès-Meklaès	Taza	Bouhliou	86.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	2.62	0.13	0	0	0.15%	0.00%	0.00%	86.33	0	0	86.33	54%	187.67	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
684	-4.4083	34.1424	Fès-Meklaès	Taza	Bouhliou	77.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	2.34	-0.11	0	0	0.14%	0.00%	0.00%	77.33	0	0	77.33	54%	168.11	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
685	-4.3915	34.1422	Fès-Meklaès	Taza	Bouhliou	115.83	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.51	0	0	0	0.07%	0.00%	0.00%	115.83	0	0	115.83	54%	251.80	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
686	-4.374	34.1419	Fès-Meklaès	Taza	Bouhliou	123.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.74	0.09	0	0	0.07%	0.00%	0.00%	123.33	0	0	123.33	54%	268.11	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
687	-4.3567	34.1416	Fès-Meklaès	Taza	Bouhliou	132.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	4.01	0	0	0	0.00%	0.00%	0.00%	132.33	0	0	132.33	54%	287.67	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
688	-4.4427	34.1284	Fès-Meklaès	Taza	Bouhliou	110.83	49.94	0	10	20	20	2.5	33	0	0	2.6	-0.03	0.06	50	0.03%	0.12%	NS	110.83	49.94	0	160.77	55%	357.27	31.02%	13.98%	0.00%	55.00%
689	-4.426	34.1279	Fès-Meklaès	Taza	Bouhliou	109.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	3.31	-0.1	0	0	0.09%	0.00%	0.00%	109.33	0	0	109.33	54%	237.67	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
690	-4.4088	34.1284	Fès-Meklaès	Taza	Bouhliou	157.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	4.77	0.08	0	0	0.05%	0.00%	0.00%	157.33	0	0	157.33	54%	342.02	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
691	-4.2543	34.1266	Fès-Meklaès	Taza	Bouchfaa	169.33	0	0	10	20	20	0	33	0	0	5.13	-0.04	0	0	0.02%	0.00%	0.00%	169.33	0	0	169.33	54%	368.11	46.00%	0.00%	0.00%	54.00%
692	-4.2889	34.1125	Fès-Meklaès	Taza	Bouchfaa</																											

	filler								$\sum_i x_{ij}$	D_j		filler								$\sum_i x_{ij}$	D_j		filler								$\sum_i x_{ij}$	D_j			
	CBI 1	CBI 2	CBI 3	CBI 4	CBI 5	CBI 6	CBI 7					CBI 1	CBI 2	CBI 3	CBI 4	CBI 5	CBI 6	CBI 7					CBI 1	CBI 2	CBI 3	CBI 4	CBI 5	CBI 6	CBI 7						
<i>j</i> =301	0,00	0,00	114,20	44,53	142,08	0,00	0,00	0,00	300,80	=	300,80	<i>j</i> =351	136,16	179,50	0,00	0,00	0,00	0,00	74,38	115,38	505,42	=	505,42	<i>j</i> =401	69,42	0,00	115,72	0,00	0,00	0,00	94,94	210,52	490,60	=	490,60
<i>j</i> =302	0,00	20,59	0,00	5,98	228,38	0,00	0,00	0,00	254,94	=	254,94	<i>j</i> =352	104,26	151,38	0,00	0,00	0,00	344,49	0,00	0,00	600,13	=	600,13	<i>j</i> =402	131,54	102,13	0,00	0,00	0,00	0,00	20,87	194,21	448,75	=	448,75
<i>j</i> =303	0,00	0,00	1,26	78,94	45,48	0,00	0,00	0,00	125,68	=	125,68	<i>j</i> =353	199,67	0,00	24,28	0,00	0,00	0,00	233,94	10,91	468,79	=	468,79	<i>j</i> =403	0,00	0,00	99,79	62,38	199,05	0,00	0,00	0,00	361,22	=	361,22
<i>j</i> =304	0,00	0,00	49,77	23,68	75,55	0,00	0,00	0,00	149,00	=	149,00	<i>j</i> =354	0,00	12,76	0,00	124,80	333,64	0,00	0,00	0,00	471,20	=	471,20	<i>j</i> =404	99,42	0,00	63,64	0,00	0,00	0,00	145,41	194,05	502,53	=	502,53
<i>j</i> =305	0,00	17,76	0,00	5,42	202,97	0,00	0,00	0,00	226,15	=	226,15	<i>j</i> =355	0,00	0,00	63,80	67,06	213,99	0,00	0,00	0,00	344,85	=	344,85	<i>j</i> =405	27,17	0,00	125,00	0,00	0,00	0,00	92,53	103,55	348,26	=	348,26
<i>j</i> =306	0,00	0,00	29,98	24,96	79,63	0,00	0,00	0,00	134,57	=	134,57	<i>j</i> =356	41,83	0,00	24,33	491,89	0,00	0,00	0,00	0,00	558,05	=	558,05	<i>j</i> =406	80,28	0,00	94,45	0,00	0,00	0,00	113,70	201,77	490,20	=	490,20
<i>j</i> =307	0,00	101,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	101,80	=	101,80	<i>j</i> =357	0,00	0,00	4,98	106,31	284,98	0,00	0,00	0,00	396,27	=	396,27	<i>j</i> =407	0,00	0,00	20,62	10,24	324,14	0,00	0,00	0,00	355,00	=	355,00
<i>j</i> =308	0,00	0,00	50,97	47,49	151,54	0,00	0,00	0,00	250,00	=	250,00	<i>j</i> =358	41,01	159,68	0,00	0,00	0,00	0,00	73,41	194,72	468,83	=	468,83	<i>j</i> =408	214,03	136,79	0,00	0,00	0,00	0,00	81,99	10,39	443,21	=	443,21
<i>j</i> =309	0,00	161,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	161,59	=	161,59	<i>j</i> =359	74,58	59,58	0,00	0,00	0,00	0,00	156,48	109,55	400,20	=	400,20	<i>j</i> =409	37,99	0,00	144,19	0,00	0,00	0,00	44,24	200,49	426,90	=	426,90
<i>j</i> =310	3,05	4,77	0,00	245,39	51,51	0,00	0,00	0,00	304,71	=	304,71	<i>j</i> =360	82,24	5,58	3,30	0,00	0,00	0,00	154,49	84,28	329,89	=	329,89	<i>j</i> =410	104,43	0,00	17,95	0,00	0,00	0,00	114,20	195,43	432,01	=	432,01
<i>j</i> =311	0,00	107,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	107,24	=	107,24	<i>j</i> =361	134,40	218,92	0,00	0,00	0,00	74,94	0,00	0,00	428,26	=	428,26	<i>j</i> =411	45,63	0,00	63,46	0,00	0,00	0,00	158,37	30,30	297,76	=	297,76
<i>j</i> =312	0,00	150,72	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	150,72	=	150,72	<i>j</i> =362	154,75	166,41	0,00	0,00	0,00	0,00	59,80	150,56	531,52	=	531,52	<i>j</i> =412	157,47	191,15	0,00	0,00	0,00	30,34	0,00	0,00	378,96	=	378,96
<i>j</i> =313	0,00	250,72	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	250,72	=	250,72	<i>j</i> =363	156,84	38,20	0,00	0,00	0,00	0,00	260,52	215,31	670,89	=	670,89	<i>j</i> =413	0,00	0,00	88,60	81,11	258,81	0,00	0,00	0,00	428,52	=	428,52
<i>j</i> =314	0,00	146,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	146,37	=	146,37	<i>j</i> =364	0,00	0,00	18,07	10,52	318,83	0,00	0,00	0,00	347,42	=	347,42	<i>j</i> =414	65,63	0,00	68,66	0,00	0,00	0,00	92,86	156,78	383,93	=	383,93
<i>j</i> =315	0,00	238,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	238,76	=	238,76	<i>j</i> =365	0,00	33,98	0,00	11,06	403,67	0,00	0,00	0,00	448,71	=	448,71	<i>j</i> =415	77,54	0,00	49,51	0,00	0,00	0,00	118,01	6,03	251,09	=	251,09
<i>j</i> =316	10,97	0,00	0,00	352,08	0,00	0,00	0,00	0,00	363,05	=	363,05	<i>j</i> =366	118,31	95,18	0,00	0,00	0,00	0,00	187,13	235,51	636,13	=	636,13	<i>j</i> =416	0,00	0,00	33,92	8,98	356,99	0,00	0,00	0,00	399,88	=	399,88
<i>j</i> =317	0,00	0,00	10,72	12,92	338,90	0,00	0,00	0,00	362,54	=	362,54	<i>j</i> =367	0,00	15,71	0,00	13,00	363,27	0,00	0,00	0,00	391,98	=	391,98	<i>j</i> =417	0,00	0,00	91,93	72,59	231,63	0,00	0,00	0,00	396,15	=	396,15
<i>j</i> =318	0,00	247,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	247,46	=	247,46	<i>j</i> =368	0,00	0,00	107,08	94,71	302,21	0,00	0,00	0,00	504,00	=	504,00	<i>j</i> =418	0,00	0,00	39,66	8,13	364,31	0,00	0,00	0,00	412,10	=	412,10
<i>j</i> =319	0,00	220,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	220,28	=	220,28	<i>j</i> =369	0,00	130,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	130,07	=	130,07	<i>j</i> =419	0,00	0,00	130,22	49,19	156,96	0,00	0,00	0,00	336,37	=	336,37
<i>j</i> =320	0,00	161,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	161,59	=	161,59	<i>j</i> =370	0,00	29,22	0,00	92,13	243,92	0,00	0,00	0,00	365,27	=	365,27	<i>j</i> =420	78,48	0,00	115,98	0,00	0,00	0,00	121,00	210,09	525,54	=	525,54
<i>j</i> =321	0,00	168,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	168,11	=	168,11	<i>j</i> =371	0,00	21,61	0,00	217,32	113,92	0,00	0,00	0,00	352,85	=	352,85	<i>j</i> =421	0,00	0,00	117,84	65,78	209,90	0,00	0,00	0,00	393,52	=	393,52
<i>j</i> =322	0,00	255,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	255,07	=	255,07	<i>j</i> =372	0,00	9,64	0,00	189,27	104,92	0,00	0,00	0,00	303,82	=	303,82	<i>j</i> =422	132,64	0,00	74,29	0,00	0,00	0,00	163,54	7,22	377,69	=	377,69
<i>j</i> =323	0,00	0,00	90,58	68,35	218,09	0,00	0,00	0,00	377,02	=	377,02	<i>j</i> =373	0,00	4,84	0,00	11,67	283,68	0,00	0,00	0,00	300,19	=	300,19	<i>j</i> =423	80,27	0,00	101,27	0,00	0,00	0,00	120,44	201,59	503,57	=	503,57
<i>j</i> =324	0,00	0,00	3,82	137,72	26,21	0,00	0,00	0,00	167,75	=	167,75	<i>j</i> =374	106,15	83,82	0,00	0,00	0,00	0,00	177,30	200,45	567,73	=	567,73	<i>j</i> =424	0,00	9,80	0,00	277,53	51,31	0,00	0,00	0,00	338,64	=	338,64
<i>j</i> =325	0,00	130,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	130,07	=	130,07	<i>j</i> =375	18,21	213,08	0,00	0,00	0,00	0,00	37,27	218,27	486,83	=	486,83	<i>j</i> =425	0,00	0,00	37,74	6,27	313,74	0,00	0,00	0,00	357,75	=	357,75
<i>j</i> =326	0,00	22,54	0,00	84,15	223,29	0,00	0,00	0,00	329,98	=	329,98	<i>j</i> =376	61,60	48,80	0,00	0,00	0,00	0,00	115,52	103,77	329,70	=	329,70	<i>j</i> =426	157,47	191,15	0,00	0,00	0,00	30,34	0,00	0,00	378,96	=	378,96
<i>j</i> =327	0,00	0,00	41,46	5,39	311,07	0,00	0,00	0,00	357,92	=	357,92	<i>j</i> =377	158,29	78,66	0,00	0,00	0,00	0,00	158,55	43,85	439,35	=	439,35	<i>j</i> =427	103,06	7,62	0,00	0,00	0,00	0,00	112,01	183,83	406,51	=	406,51
<i>j</i> =328	0,00	48,21	0,00	93,02	244,04	0,00	0,00	0,00	385,27	=	385,27	<i>j</i> =378	109,94	65,74	0,00	0,00	0,00	0,00	159,14	211,73	546,56	=	546,56	<i>j</i> =428	0,00	0,00	24,37	7,39	277,61	0,00	0,00	0,00	309,37	=	309,37
<i>j</i> =329	0,00	253,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	253,98	=	253,98	<i>j</i> =379	166,48	192,14	0,00	0,00	0,00	0,00	80,37	147,76	586,75	=	586,75	<i>j</i> =429	74,57	0,00	86,56	0,00	0,00	0,00	97,32	194,58	453,03	=	453,03
<i>j</i> =330	37,07	0,00	0,00	635,43	12,18	0,00	0,00	0,00	684,68	=	684,68	<i>j</i> =380	100,42	232,06	0,00	0,00	0,00	331,80	0,00	0,00	664,28	=	664,28	<i>j</i> =430	0,00	0,00	15,66	335,80	59,40	0,00	0,00	0,00	410,86	=	410,86
<i>j</i> =331	0,00	128,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	128,98	=	128,98	<i>j</i> =381	304,62	0,00	115,12	0,00	0,00	0,00	66,60	219,29	705,63	=	705,63	<i>j</i> =431	0,00	0,00	12,17	11,98	324,50	0,00	0,00	0,00	348,65	=	348,65
<i>j</i> =332	0,00	148,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	148,54	=	148,54	<i>j</i> =382	211,31	6,29	0,00	0,00	0,00	0,00	143,08	55,30	415,98	=	415,98	<i>j</i> =432	125,19	162,66	0,00	0,00	0,00	0,00	33,76	75,65	397,27	=	397,27
<i>j</i> =333	0,00	0,00	88,53	74,30	237,08	0,00	0,00	0,00	399,91	=	399,91	<i>j</i> =383	0,00	0,00	15,38	11,56	329,83	0,00	0,00	0,00	356,77	=	356,77	<i>j</i> =433	0,00	5,39	0,00	241,42	46,86	0,00	0,00	0,00	293,68	=	293,68
<i>j</i> =334	0,00	17,40	0,00	7,77	253,76	0,00	0,00	0,00	278,92	=	278,92	<i>j</i> =384	0,00	0,00	100,35	72,15	230,23	0,00																	

	Inputs								$\sum_j x_{ij}$	D_j		Outputs								$\sum_j x_{ij}$	D_j														
	filler	CBI 1	CBI 2	CBI 3	CBI 4	CBI 5	CBI 6	CBI 7				filler	CBI 1	CBI 2	CBI 3	CBI 4	CBI 5	CBI 6	CBI 7																
$j=451$	101,54	137,19	0,00	0,00	0,00	0,00	50,85	37,79	327,38	=	327,38	$j=501$	0,00	0,00	79,81	73,87	235,71	0,00	0,00	0,00	389,39	=	389,39	$j=551$	0,00	0,00	28,63	6,26	271,69	0,00	0,00	0,00	306,58	=	306,58
$j=452$	48,37	0,00	78,69	0,00	0,00	0,00	150,46	60,52	338,04	=	338,04	$j=502$	0,00	0,00	15,75	12,94	362,45	0,00	0,00	0,00	391,13	=	391,13	$j=552$	0,00	0,00	29,60	8,02	315,78	0,00	0,00	0,00	353,40	=	353,40
$j=453$	0,00	0,00	45,73	6,20	348,97	0,00	0,00	0,00	400,90	=	400,90	$j=503$	0,00	157,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	157,24	=	157,24	$j=553$	0,00	3,11	4,80	82,58	220,89	0,00	0,00	0,00	311,38	=	311,38	
$j=454$	0,00	0,00	78,21	82,80	264,19	0,00	0,00	0,00	425,20	=	425,20	$j=504$	0,00	203,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	203,98	=	203,98	$j=554$	0,00	0,00	8,23	83,51	223,35	0,00	0,00	0,00	315,09	=	315,09	
$j=455$	0,00	0,00	29,87	7,54	306,06	0,00	0,00	0,00	343,46	=	343,46	$j=505$	0,00	0,00	67,04	70,47	224,87	0,00	0,00	0,00	362,39	=	362,39	$j=555$	31,49	0,00	17,57	396,48	0,00	0,00	0,00	0,00	445,55	=	445,55
$j=456$	0,00	0,00	26,57	7,68	294,14	0,00	0,00	0,00	328,38	=	328,38	$j=506$	0,00	188,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	188,76	=	188,76	$j=556$	0,00	17,24	0,00	7,59	249,13	0,00	0,00	0,00	273,96	=	273,96	
$j=457$	68,31	0,00	133,51	0,00	0,00	0,00	0,00	87,58	521,31	=	521,31	$j=507$	0,00	173,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	173,54	=	173,54	$j=557$	0,00	0,00	10,62	9,25	256,04	0,00	0,00	0,00	275,90	=	275,90	
$j=458$	0,00	0,00	4,47	239,20	137,42	0,00	0,00	0,00	381,09	=	381,09	$j=508$	0,00	0,00	5,86	338,99	67,04	0,00	0,00	0,00	411,89	=	411,89	$j=558$	0,00	12,14	0,00	84,54	225,61	0,00	0,00	0,00	322,29	=	322,29
$j=459$	0,00	177,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	177,89	=	177,89	$j=509$	0,00	14,27	0,00	13,45	366,78	0,00	0,00	0,00	394,50	=	394,50	$j=559$	0,00	43,59	0,00	119,34	315,29	0,00	0,00	0,00	478,22	=	478,22
$j=460$	0,00	0,00	32,81	9,56	364,94	0,00	0,00	0,00	407,31	=	407,31	$j=510$	0,00	177,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	177,89	=	177,89	$j=560$	0,00	0,00	4,28	88,75	237,90	0,00	0,00	0,00	330,93	=	330,93	
$j=461$	0,00	0,00	27,93	6,25	268,38	0,00	0,00	0,00	302,56	=	302,56	$j=511$	0,00	0,00	24,77	368,67	200,69	0,00	0,00	0,00	594,12	=	594,12	$j=561$	3,13	2,58	0,00	4,93	246,90	0,00	0,00	0,00	257,54	=	257,54
$j=462$	0,00	190,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	190,93	=	190,93	$j=512$	0,00	202,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	202,89	=	202,89	$j=562$	0,00	0,00	8,79	10,91	284,99	0,00	0,00	0,00	304,69	=	304,69	
$j=463$	0,00	0,00	23,43	8,95	308,31	0,00	0,00	0,00	340,69	=	340,69	$j=513$	0,00	6,28	0,00	89,42	239,40	0,00	0,00	0,00	335,09	=	335,09	$j=563$	0,00	0,00	7,95	11,15	286,55	0,00	0,00	0,00	305,65	=	305,65
$j=464$	0,00	48,12	0,00	78,44	204,87	0,00	0,00	0,00	331,42	=	331,42	$j=514$	0,00	0,00	20,97	271,92	146,34	0,00	0,00	0,00	439,24	=	439,24	$j=564$	0,00	56,73	0,00	68,54	177,25	0,00	0,00	0,00	302,51	=	302,51
$j=465$	4,56	6,63	0,00	277,85	166,73	0,00	0,00	0,00	455,76	=	455,76	$j=515$	0,00	0,00	19,07	8,73	283,33	0,00	0,00	0,00	311,13	=	311,13	$j=565$	0,00	0,00	80,66	61,10	194,96	0,00	0,00	0,00	336,72	=	336,72
$j=466$	0,00	0,00	101,79	51,76	165,15	0,00	0,00	0,00	318,70	=	318,70	$j=516$	0,00	0,00	17,65	10,90	325,33	0,00	0,00	0,00	353,88	=	353,88	$j=566$	0,00	0,00	33,96	5,78	285,49	0,00	0,00	0,00	325,23	=	325,23
$j=467$	0,00	0,00	18,82	13,13	380,72	0,00	0,00	0,00	412,67	=	412,67	$j=517$	0,00	12,53	0,00	68,29	181,89	0,00	0,00	0,00	262,71	=	262,71	$j=567$	0,00	0,00	32,81	6,01	285,35	0,00	0,00	0,00	324,17	=	324,17
$j=468$	68,17	0,00	136,09	0,00	0,00	0,00	100,36	221,16	525,77	=	525,77	$j=518$	13,83	175,29	0,00	0,00	0,00	223,59	0,00	0,00	412,71	=	412,71	$j=568$	0,00	0,00	2,55	10,27	241,83	0,00	0,00	0,00	254,65	=	254,65
$j=469$	77,98	129,81	0,00	0,00	0,00	0,00	12,18	55,41	275,38	=	275,38	$j=519$	0,00	135,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	135,50	=	135,50	$j=569$	0,00	14,25	0,00	10,27	295,33	0,00	0,00	0,00	319,85	=	319,85	
$j=470$	0,00	0,00	61,31	62,81	200,42	0,00	0,00	0,00	324,54	=	324,54	$j=520$	0,00	110,87	0,00	51,32	4,27	0,00	0,00	0,00	166,46	=	166,46	$j=570$	0,00	200,72	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	200,72	=	200,72
$j=471$	0,00	0,00	6,70	249,24	47,59	0,00	0,00	0,00	303,54	=	303,54	$j=521$	0,00	0,00	11,27	297,74	54,53	0,00	0,00	0,00	363,54	=	363,54	$j=571$	0,00	199,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	199,63	=	199,63
$j=472$	337,89	0,00	62,75	0,00	0,00	0,00	84,30	232,82	717,76	=	717,76	$j=522$	0,00	6,75	0,00	384,43	75,93	0,00	0,00	0,00	467,11	=	467,11	$j=572$	251,24	10,41	5,03	0,00	0,00	0,00	47,46	188,40	502,54	=	502,54
$j=473$	0,00	209,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	209,41	=	209,41	$j=523$	29,77	0,00	15,12	427,52	0,00	0,00	0,00	0,00	472,41	=	472,41	$j=573$	0,00	274,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	274,63	=	274,63
$j=474$	0,00	21,30	0,00	4,70	203,03	0,00	0,00	0,00	229,04	=	229,04	$j=524$	21,77	0,00	0,00	396,59	6,64	0,00	0,00	0,00	425,00	=	425,00	$j=574$	0,00	272,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	272,46	=	272,46
$j=475$	0,00	0,00	97,06	66,21	211,27	0,00	0,00	0,00	374,54	=	374,54	$j=525$	0,00	0,00	84,88	62,81	200,43	0,00	0,00	0,00	348,13	=	348,13	$j=575$	0,00	111,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	111,59	=	111,59
$j=476$	0,00	0,00	77,86	65,35	208,51	0,00	0,00	0,00	351,72	=	351,72	$j=526$	0,00	0,00	28,63	6,26	271,69	0,00	0,00	0,00	306,58	=	306,58	$j=576$	0,00	43,04	0,00	79,07	207,20	0,00	0,00	0,00	329,31	=	329,31
$j=477$	0,00	0,00	39,54	6,56	328,65	0,00	0,00	0,00	374,75	=	374,75	$j=527$	0,00	221,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	221,37	=	221,37	$j=577$	0,00	23,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	23,54	=	23,54	
$j=478$	0,00	0,00	41,53	6,24	330,55	0,00	0,00	0,00	378,33	=	378,33	$j=528$	234,12	55,93	0,00	0,00	0,00	0,00	15,58	204,20	509,83	=	509,83	$j=578$	102,85	157,32	0,00	0,00	0,00	339,83	0,00	0,00	600,00	=	600,00
$j=479$	0,00	0,00	32,99	8,94	351,95	0,00	0,00	0,00	393,88	=	393,88	$j=529$	0,00	48,84	0,00	98,15	257,74	0,00	0,00	0,00	404,73	=	404,73	$j=579$	0,00	19,66	0,00	7,09	249,13	0,00	0,00	0,00	275,88	=	275,88
$j=480$	0,00	8,55	0,00	68,96	184,18	0,00	0,00	0,00	261,69	=	261,69	$j=530$	0,00	0,00	68,74	66,21	211,27	0,00	0,00	0,00	346,22	=	346,22	$j=580$	0,00	23,60	0,00	328,49	177,82	0,00	0,00	0,00	529,91	=	529,91
$j=481$	0,00	0,00	77,15	73,00	232,93	0,00	0,00	0,00	383,09	=	383,09	$j=531$	0,00	3,40	0,00	13,72	322,94	0,00	0,00	0,00	340,06	=	340,06	$j=581$	0,00	213,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	213,76	=	213,76
$j=482$	307,02	0,00	102,24	0,00	0,00	0,00	107,46	180,84	697,57	=	697,57	$j=532$	223,04	0,00	4,72	4,44	0,00	0,00	153,24	58,26	443,70	=	443,70	$j=582$	0,00	17,02	0,00	352,96	196,26	0,00	0,00	0,00	566,24	=	566,24
$j=483$	192,06	46,31	0,00	0,00	0,00	0,00	117,30	63,00	418,67	=	418,67	$j=533$	0,00	0,00	24,34	8,84	310,03	0,00	0,00	0,00	343,21	=	343,21	$j=583$	0,00	19,64	0,00	242,46	129,87	0,00	0,00	0,00	391,97	=	391,97
$j=484$	114,69	2,94	2,95	0,00	0,00	0,00	169,93	3,80	294,32	=	294,32	$j=534$	220,99	5,47	4,38	0,00	0,00	0,00	151,09	56,37	438,30	=	438,30	$j=584$	0,00	220,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	220,28	=	220,28
$j=485$	0,00	16,78	0,00	10,47	311,																														

	<i>filler</i>	CBI 1	CBI 2	CBI 3	CBI 4	CBI 5	CBI 6	CBI 7	$\sum_j x_{ij}$	D_j		<i>filler</i>	CBI 1	CBI 2	CBI 3	CBI 4	CBI 5	CBI 6	CBI 7	$\sum_j x_{ij}$	D_j				
Outputs	j=601	0,00	276,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	276,80	=	276,80	j=651	0,00	22,07	0,00	82,40	218,64	0,00	0,00	0,00	323,11	=	323,11		
	j=602	0,00	0,00	20,38	9,85	314,31	0,00	0,00	0,00	344,54	=	344,54	j=652	0,00	140,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	140,93	=	140,93	
	j=603	30,76	0,00	12,36	556,16	0,00	0,00	0,00	0,00	599,27	=	599,27	j=653	0,00	205,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	205,07	=	205,07
	j=604	0,00	7,97	4,77	297,62	166,49	0,00	0,00	0,00	476,85	=	476,85	j=654	0,00	207,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	207,24	=	207,24
	j=605	4,76	7,46	0,00	383,58	80,52	0,00	0,00	0,00	476,32	=	476,32	j=655	0,00	0,00	7,76	11,62	296,24	0,00	0,00	0,00	0,00	315,62	=	315,62
	j=606	178,62	0,00	111,22	0,00	0,00	0,00	0,00	137,26	30,43	=	457,52	j=656	36,05	0,00	17,01	562,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	616,00	=	616,00
	j=607	0,00	262,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	262,67	=	262,67	j=657	0,00	57,96	0,00	135,84	357,85	0,00	0,00	0,00	0,00	551,64	=	551,64
	j=608	0,00	59,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	59,41	=	59,41	j=658	0,00	211,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	211,59	=	211,59
	j=609	189,74	153,26	0,00	0,00	0,00	0,00	112,20	55,50	510,71	=	510,71	j=659	0,00	0,00	7,12	103,96	278,41	0,00	0,00	0,00	0,00	389,49	=	389,49
	j=610	0,00	5,38	8,49	142,72	381,72	0,00	0,00	0,00	538,31	=	538,31	j=660	0,00	21,92	0,00	264,58	141,42	0,00	0,00	0,00	0,00	427,91	=	427,91
	j=611	101,59	0,00	75,09	0,00	0,00	0,00	134,55	221,99	533,23	=	533,23	j=661	0,00	40,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	40,93	=	40,93
	j=612	36,46	0,00	15,69	622,71	0,00	0,00	0,00	0,00	674,86	=	674,86	j=662	0,00	0,00	8,94	186,27	103,62	0,00	0,00	0,00	0,00	298,82	=	298,82
	j=613	5,08	8,81	0,00	309,50	184,84	0,00	0,00	0,00	508,24	=	508,24	j=663	0,00	39,62	0,00	439,40	64,09	0,00	0,00	0,00	0,00	543,11	=	543,11
	j=614	0,00	98,90	0,00	125,24	324,46	0,00	0,00	0,00	548,60	=	548,60	j=664	0,00	287,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	287,67	=	287,67
	j=615	0,00	14,87	0,00	139,51	372,89	0,00	0,00	0,00	527,27	=	527,27	j=665	8,63	5,31	0,00	318,53	198,59	0,00	0,00	0,00	0,00	531,06	=	531,06
	j=616	0,00	8,99	5,20	324,72	181,47	0,00	0,00	0,00	520,38	=	520,38	j=666	0,00	146,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	146,37	=	146,37
	j=617	0,00	0,00	5,85	467,41	94,03	0,00	0,00	0,00	567,29	=	567,29	j=667	0,00	223,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	223,54	=	223,54
	j=618	0,00	0,00	118,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	118,02	=	118,02	j=668	0,00	0,00	12,49	142,69	381,80	0,00	0,00	0,00	0,00	536,98	=	536,98
	j=619	0,00	118,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	118,11	=	118,11	j=669	0,00	60,58	0,00	78,15	202,60	0,00	0,00	0,00	0,00	341,33	=	341,33
	j=620	0,00	32,78	0,00	384,56	57,44	0,00	0,00	0,00	474,79	=	474,79	j=670	0,00	5,23	0,00	430,78	87,20	0,00	0,00	0,00	0,00	523,21	=	523,21
	j=621	0,00	184,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	184,41	=	184,41	j=671	0,00	318,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	318,11	=	318,11
	j=622	0,00	188,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	188,76	=	188,76	j=672	0,00	0,00	16,42	4,98	187,06	0,00	0,00	0,00	0,00	208,46	=	208,46
	j=623	0,00	315,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	315,93	=	315,93	j=673	87,00	52,16	0,00	0,00	0,00	0,00	180,86	112,81	432,83	=	432,83	
	j=624	0,00	240,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	240,93	=	240,93	j=674	0,00	282,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	282,24	=	282,24
	j=625	0,00	183,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	183,33	=	183,33	j=675	0,00	237,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	237,67	=	237,67
	j=626	229,50	72,97	0,00	0,00	0,00	0,00	204,90	82,82	590,19	=	590,19	j=676	0,00	320,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	320,28	=	320,28
	j=627	0,00	62,05	0,00	125,35	329,18	0,00	0,00	0,00	516,58	=	516,58	j=677	0,00	0,00	11,50	301,24	169,41	0,00	0,00	0,00	0,00	482,15	=	482,15
	j=628	0,00	369,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	369,20	=	369,20	j=678	0,00	230,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	230,07	=	230,07
	j=629	0,00	173,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	173,54	=	173,54	j=679	0,00	193,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	193,11	=	193,11
	j=630	0,00	77,06	0,00	87,44	225,57	0,00	0,00	0,00	390,07	=	390,07	j=680	0,00	212,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	212,67	=	212,67
	j=631	0,00	11,53	0,00	8,45	242,19	0,00	0,00	0,00	262,17	=	262,17	j=681	0,00	271,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	271,37	=	271,37
	j=632	0,00	7,89	0,00	269,24	152,87	0,00	0,00	0,00	430,00	=	430,00	j=682	0,00	221,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	221,37	=	221,37
	j=633	0,00	188,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	188,76	=	188,76	j=683	0,00	187,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	187,67	=	187,67
	j=634	0,00	2,92	4,47	239,84	45,12	0,00	0,00	0,00	292,36	=	292,36	j=684	0,00	168,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	168,11	=	168,11
	j=635	0,00	0,00	22,09	448,19	78,44	0,00	0,00	0,00	548,71	=	548,71	j=685	0,00	251,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	251,80	=	251,80
	j=636	0,00	3,91	0,00	245,69	141,54	0,00	0,00	0,00	391,15	=	391,15	j=686	0,00	268,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	268,11	=	268,11
	j=637	0,00	0,00	7,29	113,24	303,33	0,00	0,00	0,00	423,87	=	423,87	j=687	0,00	287,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	287,67	=	287,67
	j=638	0,00	0,00	0,00	116,30	312,95	0,00	0,00	0,00	429,24	=	429,24	j=688	0,00	63,81	0,00	81,70	211,75	0,00	0,00	0,00	0,00	357,27	=	357,27
	j=639	32,30	0,00	13,45	567,39	0,00	0,00	0,00	0,00	613,14	=	613,14	j=689	0,00	237,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	237,67	=	237,67
	j=640	0,00	306,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	306,15	=	306,15	j=690	0,00	342,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	342,02	=	342,02
	j=641	0,00	246,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	246,37	=	246,37	j=691	0,00	368,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	368,11	=	368,11
	j=642	0,00	313,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	313,76	=	313,76	j=692	0,00	150,72	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	150,72	=	150,72
	j=643	0,00	237,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	237,67	=	237,67	j=693	0,00	42,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	42,02	=	42,02
	j=644	0,00	135,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	135,50	=	135,50	j=694	0,00	190,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	190,93	=	190,93
	j=645	0,00	170,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	170,28	=	170,28	j=695	198,42	57,64	0,00	0,00	0,00	0,00	217,76	30,30	504,12	=	504,12	
	j=646	0,00	293,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	293,11	=	293,11	j=696	0,00	137,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	137,67	=	137,67
	j=647	0,00	200,12	0,00	190,54	7,92	0,00	0,00	0,00	398,57	=	398,57	j=697	5,37	132,46	0,00	0,00	0,00	135,58	0,00	0,00	0,00	273,40	=	273,40
	j=648	362,19	308,55	0,00	0,00	0,00	14,85	0,00	0,00	685,59	=	685,59	j=698	0,00	233,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	233,33	=	233,33
	j=649	3,31	5,12	0,00	82,73	239,49	0,00	0,00	0,00	330,64	=	330,64	j=699	0,00	247,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	247,46	=	247,46
	j=650	0,00	8,70	0,00	86,95	232,48	0,00	0,00	0,00	328,13	=	328,13	j=700	158,54	246,25	0,00	0,00	0,00	93,95	0,00	0,00	0,00	498,74	=	498,74

Annexes - Tableau 2. Quantités optimales à prélever des CBC proposés par la version standard du RB pour répondre aux 700 besoins NPK

Annexe 3. Données et résultats relatifs à l'étude de cas utilisant le modèle UBC sur un échantillon de 50 engrais

		%N (c=1)	%P (c=2)	%K (c=3)	%filler (c=4)			%N (c=1)	%P (c=2)	%K (c=3)	%filler (c=4)
Les 50 engrais	Eng.1	20,52%	8,94%	0,00%	70,54%	Eng.26	5,59%	8,68%	20,51%	65,22%	
	Eng.2	30,30%	9,07%	27,26%	33,38%	Eng.27	26,49%	12,14%	0,00%	61,37%	
	Eng.3	20,64%	27,15%	0,00%	52,21%	Eng.28	22,18%	7,06%	4,77%	65,99%	
	Eng.4	12,26%	11,23%	27,50%	49,02%	Eng.29	5,30%	6,24%	18,63%	69,82%	
	Eng.5	24,28%	8,24%	7,16%	60,32%	Eng.30	22,46%	15,34%	0,00%	62,20%	
	Eng.6	8,44%	34,04%	0,00%	57,52%	Eng.31	15,60%	24,78%	0,00%	59,63%	
	Eng.7	5,39%	18,36%	18,14%	58,11%	Eng.32	30,24%	13,21%	14,28%	42,27%	
	Eng.8	27,90%	12,00%	21,79%	38,31%	Eng.33	15,20%	5,73%	16,16%	62,91%	
	Eng.9	23,67%	16,95%	0,00%	59,38%	Eng.34	25,22%	0,00%	14,69%	60,08%	
	Eng.10	22,44%	14,07%	0,00%	63,49%	Eng.35	22,73%	9,75%	21,60%	45,92%	
	Eng.11	5,65%	0,00%	20,72%	73,63%	Eng.36	9,91%	0,00%	5,61%	84,49%	
	Eng.12	38,27%	20,94%	3,86%	36,93%	Eng.37	11,88%	23,22%	0,00%	64,90%	
	Eng.13	4,61%	23,77%	16,82%	54,80%	Eng.38	12,22%	5,76%	10,04%	71,97%	
	Eng.14	34,44%	9,67%	0,00%	55,89%	Eng.39	19,58%	15,59%	25,46%	39,37%	
	Eng.15	5,68%	16,72%	20,74%	56,86%	Eng.40	23,86%	6,58%	41,18%	28,37%	
	Eng.16	23,62%	13,11%	26,44%	36,83%	Eng.41	24,12%	10,48%	12,39%	53,00%	
	Eng.17	11,00%	12,87%	16,92%	59,21%	Eng.42	7,67%	0,00%	18,50%	73,82%	
	Eng.18	17,59%	5,97%	10,74%	65,70%	Eng.43	27,89%	2,36%	22,28%	47,46%	
	Eng.19	8,43%	0,00%	30,93%	60,64%	Eng.44	33,29%	10,41%	0,00%	56,30%	
	Eng.20	9,47%	12,24%	0,00%	78,29%	Eng.45	25,67%	15,61%	23,72%	34,99%	
	Eng.21	30,02%	6,59%	9,80%	53,59%	Eng.46	29,40%	6,14%	8,42%	56,04%	
	Eng.22	29,77%	20,83%	14,37%	35,03%	Eng.47	10,64%	13,18%	6,50%	69,67%	
	Eng.23	8,47%	3,68%	4,75%	83,09%	Eng.48	8,27%	15,93%	0,00%	75,80%	
	Eng.24	29,39%	18,08%	19,93%	32,61%	Eng.49	21,13%	19,50%	12,22%	47,15%	
	Eng.25	12,35%	0,00%	7,43%	80,21%	Eng.50	13,19%	6,70%	47,98%	32,13%	

Annexes - Tableau 3. Spécifications chimiques d'un échantillon de 50 engrais à produire à partir d'une base canonique préalablement définie

		<i>filler</i>	CBC 1	CBC 2	CBC 3	CBC 4	CBC 5	CBC 6	CBC 7	$\sum_i x_i$	D												<i>filler</i>	CBC 1	CBC 2	CBC 3	CBC 4	CBC 5	CBC 6	CBC 7	$\sum_i x_i$	D																																																																																																																																																																																																																																																																																								
Outputs	Eng.1	42,00	20,00	0,00	0,00	38,00	0,00	0,00	0,00	100,00	=	100,00	Outputs	Eng.26	37,58	0,00	18,87	0,00	0,00	43,55	0,00	0,00	100,00	=	100,00	Eng.27	21,63	21,72	0,00	5,08	51,57	0,00	0,00	100,00	=	100,00	Eng.28	33,38	25,49	0,00	1,00	30,00	10,13	0,00	0,00	100,00	=	100,00	Eng.29	45,87	0,00	13,57	1,00	0,00	39,57	0,00	0,00	100,00	=	100,00	Eng.30	16,16	47,22	33,33	3,28	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	=	100,00	Eng.31	9,54	31,31	53,85	5,31	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	=	100,00	Eng.32	15,26	20,46	0,00	3,07	0,00	30,00	31,20	0,00	100,00	=	100,00	Eng.33	29,76	23,46	12,45	0,00	0,00	34,33	0,00	0,00	100,00	=	100,00	Eng.34	22,66	46,13	0,00	0,00	0,00	31,21	0,00	0,00	100,00	=	100,00	Eng.35	13,46	36,55	20,88	0,00	0,00	0,00	0,00	29,12	100,00	=	100,00	Eng.36	69,88	18,22	0,00	0,00	0,00	11,90	0,00	0,00	100,00	=	100,00	Eng.37	21,17	23,40	50,46	4,97	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	=	100,00	Eng.38	43,29	18,46	12,51	4,41	0,00	21,33	0,00	0,00	100,00	=	100,00	Eng.39	4,75	27,41	33,53	0,00	0,00	0,00	0,00	34,31	100,00	=	100,00	Eng.40	7,67	9,99	0,00	0,00	26,83	0,00	0,00	55,51	100,00	=	100,00	Eng.41	12,87	16,25	0,00	0,00	44,56	26,32	0,00	0,00	100,00	=	100,00	Eng.42	54,99	5,71	0,00	0,00	0,00	39,30	0,00	0,00	100,00	=	100,00	Eng.43	23,33	41,43	0,00	0,00	0,00	0,00	5,24	30,00	100,00	=	100,00	Eng.44	11,72	44,99	1,00	0,00	42,29	0,00	0,00	0,00	100,00	=	100,00	Eng.45	13,11	0,00	0,00	0,00	0,00	50,00	36,89	0,00	100,00	=	100,00	Eng.46	6,77	35,15	0,00	14,22	25,99	17,88	0,00	0,00	100,00	=	100,00	Eng.47	23,48	0,00	28,44	39,32	0,00	0,00	0,00	8,77	100,00	=	100,00	Eng.48	29,82	1,00	34,52	34,66	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	=	100,00	Eng.49	2,66	38,65	42,22	0,00	0,00	0,00	0,00	16,47	100,00	=	100,00	Eng.50	21,45	0,00	13,88	0,00	0,00	0,00	0,00	64,68	100,00	=	100,00

Annexes - Tableau 4. Quantités optimales à prélever des composites d'une BC préalablement définie pour produire 50 nouveaux engrais (solution du modèle UBC)

Annexe 4. Résultats relatifs à l'étude de cas utilisant le modèle RD sur les 142 engrais vendus par les dix plus grands producteurs d'engrais

		Constructeur	i=1	i=4	i=5	i=14	i=37	i=38	i=40	i=47	i=48	i=57	i=58	i=59	i=62	i=64	i=65	i=80	i=84	i=87	i=93	i=95	i=100	i=102	i=109	i=113	i=115	i=120	i=124	i=127	i=129	i=132	i=133	i=137	i=138	$\sum_i x_{ij}$	D_j							
Output j	j=1	AGRIUM	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100					
	j=2		16,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	83,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100			
	j=3		40,0	31,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	28,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100		
	j=4		0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100		
	j=5		0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100		
	j=6		76,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,8	0,0	4,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	13,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100	
	j=7		53,4	16,8	0,0	26,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100		
	j=8		52,7	0,0	0,0	32,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100	
	j=9		10,8	27,0	2,7	59,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100		
	j=10		33,1	34,2	0,0	29,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100		
	j=11		0,0	34,8	38,3	23,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100		
	j=12		61,9	0,0	0,0	20,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100	
	j=13		16,7	0,0	0,0	73,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100	
	j=14		0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100		
	j=15		45,9	0,0	0,0	41,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100	
	j=16		37,6	0,0	0,0	43,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100
	j=17		27,6	39,9	0,0	24,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100	
	j=18		50,0	36,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,3	9,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100	
	j=19		60,0	21,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100	
	j=20		24,0	51,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	23,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100		
	j=21		40,0	10,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	38,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100	
	j=22		7,7	0,0	0,0	42,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	43,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100	
	j=23		30,0	0,0	0,0	60,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100		
	j=24		10,5	0,0	0,0	61,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	21,4	0,0	0,0	0,0	0,0	6,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100	
	j=25		16,1	0,0	0,0	51,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	25,3	0,0	0,0	0,0	0,0	7,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100	
	j=26		36,0	47,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	13,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100	
	j=27		47,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	33,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	18,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100	
	j=28		39,8	0,0	0,0	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	15,0	0,0	0,0	0,0	0,0	43,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100	
	j=29		10,6	24,2	0,0	53,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100		
	j=30		48,0	33,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	17,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100	
	j=31		29,7	0,0	0,0	23,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	14,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	32,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100	
	j=32		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	38,7	0,0	10,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	34,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100	
	j=33		53,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,4	0,0	19,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	21,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100	
	j=34		47,5	0,0	0,0	25,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	19,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100	
	j=35		17,7	40,3	0,0	22,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	19,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100		
	j=36		8,7																																									

		Constructeur	i=1	i=4	i=5	i=14	i=37	i=38	i=40	i=47	i=48	i=57	i=58	i=59	i=62	i=64	i=65	i=80	i=84	i=87	i=93	i=95	i=100	i=102	i=109	i=113	i=115	i=120	i=124	i=127	i=129	i=132	i=133	i=137	i=138	$\sum_i X_{ij}$	D_j			
Output <i>j</i>	AGRIUM	j=41	26,0	33,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	28,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100		
		j=42	23,9	8,8	0,0	41,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	25,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100	
		j=43	24,1	0,0	0,0	38,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	26,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100
		j=44	15,6	12,8	0,0	43,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	27,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100
		j=45	32,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	59,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100
		j=46	10,1	0,0	0,0	59,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	28,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100
		j=47	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100	
		j=48	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100
		j=49	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	98,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100
		j=50	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	96,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100
		j=51	42,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	22,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	36,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100
		j=52	13,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	23,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,7	0,0	0,0	0,0	35,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	21,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100
		j=53	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	81,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	18,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100
		j=54	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	73,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	26,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100
		j=55	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	46,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	53,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100
		j=56	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	92,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100
	j=57	K+S	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100	
	j=58		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100	
	j=59		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100
	j=60		10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	40,0	0,0	0,0	50,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100
	j=61		15,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	20,2	14,8	0,7	0,0	49,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100
	j=62		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100
	j=63		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	50,0	50,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100
	j=64		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100
	j=65	MOSAIC	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100	
	j=66		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	22,2	73,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100	
	j=67	BELARUSKALI	0,0	3,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	54,8	0,0	8,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	33,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100		
	j=68		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	48,4	7,0	8,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	36,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100	
	j=69		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	58,1	18,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,3	15,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100	
	j=70		26,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,4	0,0	29,7	33,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100	
	j=71		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	48,4	16,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,3	28,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100	
	j=72		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	48,4	26,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,1	0,0	14,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100	
	j=73		17,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,4	0,0	0,0	0,0	0,0	31,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,8	43,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100	
	j=74		24,2	2,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	17,8	0,0	0,0	0,0	0,0	28,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	26,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100	
	j=75		12,2	9,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	17,8	0,0	0,0	0,0	0,0	32,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	28,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100	
	j=76		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,4	29,1	60,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100	

		Constructeur	i=1	i=4	i=5	i=14	i=37	i=38	i=40	i=47	i=48	i=57	i=58	i=59	i=62	i=64	i=65	i=80	i=84	i=87	i=93	i=95	i=100	i=102	i=109	i=113	i=115	i=120	i=124	i=127	i=129	i=132	i=133	i=137	i=138	$\sum_i x_{ij}$	D_j			
Output j	j=115	Groupe OCP	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100		
	j=116		0,0	2,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	22,6	0,0	26,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	48,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100	
	j=117		0,0	4,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	19,4	0,0	26,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	50,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100	
	j=118		24,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	28,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	23,8	16,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100
	j=119		9,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,9	0,0	0,0	7,7	14,4	0,0	0,0	0,0	0,0	59,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100
	j=120		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100
	j=121		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	22,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	30,3	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	23,8	0,0	0,0	0,0	0,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100
	j=122		0,0	0,0	0,0	0,0	5,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,8	0,0	0,0	15,3	0,0	74,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100	
	j=123		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	28,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	18,5	45,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100	
	j=124		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100
	j=125		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	40,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	40,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100
	j=126		0,0	0,0	0,0	0,0	7,4	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,8	0,0	0,0	0,0	85,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100
	j=127		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100
	j=128		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	40,0	0,0	0,0	4,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	54,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100
j=129	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100		
j=130	29,0	0,0	0,0	10,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	29,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100		
j=131	6,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	14,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	22,2	0,0	0,0	24,3	0,0	0,0	0,0	0,0	32,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100		
j=132	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100		
j=133	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100		
j=134	28,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	49,3	11,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100		
j=135	0,0	41,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	34,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	23,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100		
j=136	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	54,5	31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100		
j=137	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	100	=	100		
j=138	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	100	=	100		
j=139	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	61,1	17,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	21,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100		
j=140	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	34,3	0,0	0,0	7,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	48,3	10,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100		
j=141	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	30,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	52,2	8,1	0,0	0,0	0,0	9,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100		
j=142	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	32,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,6	0,0	0,0	0,0	0,0	46,9	11,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	=	100		

Annexes - Tableau 5. Quantités optimales à prélever des 33 inputs utilisés pour satisfaire les 142 engrais (solution du modèle RD)

Annexe 6. Résultats relatifs à l'étude de cas utilisant le modèle RB sur les 142 engrais vendus par les dix plus grands producteurs d'engrais

Output j	Constructeur	filler	CBC 1	CBC 2	CBC 3	CBC 4	CBC 5	CBC 6	CBC 7	CBC 8	CBC 9	CBC 10	CBC 11	CBC 12	CBC 13	CBC 14	CBC 15	$\sum_i x_{ij}$	D_j	
$j=1$	AGRIUM	21,74	0,00	0,00	0,00	78,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00	
$j=2$		6,09	0,00	0,00	0,00	93,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00	
$j=3$		25,22	0,00	43,48	0,00	31,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00	
$j=4$		52,17	0,00	47,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=5$		40,63	0,00	2,45	0,00	30,13	26,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=6$		0,00	0,00	1,00	0,00	49,27	41,75	7,97	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=7$		3,25	1,26	1,00	0,00	29,61	64,88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=8$		0,00	0,00	0,00	0,00	22,59	71,29	6,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=9$		24,61	1,30	9,78	0,00	0,00	64,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=10$		1,72	0,00	7,34	0,00	10,57	80,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=11$		18,35	0,00	7,31	2,89	0,00	71,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=12$		0,00	3,21	0,00	0,00	31,93	59,21	5,66	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=13$		8,17	1,74	4,35	0,00	0,00	85,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=14$		50,87	7,97	5,43	0,00	0,00	35,72	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=15$		0,00	5,07	0,00	0,00	23,48	71,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=16$		0,00	3,45	0,00	0,00	8,61	80,79	7,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=17$		0,00	2,05	0,00	4,16	0,00	89,60	4,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=18$		0,00	3,19	0,00	0,00	9,48	72,27	15,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=19$		0,00	3,81	0,00	0,00	17,57	61,21	17,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=20$		0,00	2,51	6,16	5,60	0,00	85,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=21$		0,00	0,00	3,57	13,59	0,00	64,01	18,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=22$		8,43	7,39	41,30	0,00	0,00	42,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=23$		28,78	9,56	0,00	0,00	18,78	42,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=24$		2,38	6,62	1,00	0,00	10,83	79,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=25$		0,00	6,67	0,00	0,00	15,90	75,18	2,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=26$		0,00	4,02	0,00	4,57	0,00	79,74	11,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=27$		0,00	1,00	1,89	17,86	0,00	50,33	28,92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=28$		0,00	3,85	0,00	16,43	0,00	59,91	19,81	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=29$		21,39	12,75	8,70	0,00	0,00	57,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=30$		0,00	10,85	0,00	0,00	13,68	64,94	10,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=31$		0,00	7,15	0,00	13,45	0,00	68,46	10,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=32$		0,00	7,96	0,00	5,41	0,00	60,02	26,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=33$		0,00	13,18	0,00	0,00	17,86	48,93	20,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=34$		0,00	16,79	0,00	0,00	23,84	56,10	3,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=35$		1,74	15,94	10,87	0,00	0,00	71,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=36$		0,00	17,47	0,00	10,33	0,00	67,95	4,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=37$		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,04	33,93	29,40	0,00	34,63	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=38$		0,00	0,00	25,46	29,52	0,00	0,00	0,00	0,00	13,64	31,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=39$		5,10	3,06	0,00	91,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=40$		49,83	28,26	0,00	0,00	21,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00

Output j	Constructeur	filler	CBC 1	CBC 2	CBC 3	CBC 4	CBC 5	CBC 6	CBC 7	CBC 8	CBC 9	CBC 10	CBC 11	CBC 12	CBC 13	CBC 14	CBC 15	$\sum_i x_{ij}$	D_j		
$j=41$	AGRIUM	0,00	19,58	0,00	11,02	0,00	62,04	7,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	=	100,00	
$j=42$		7,65	25,80	0,00	0,00	9,39	57,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	=	100,00
$j=43$		0,00	24,32	1,00	0,00	2,06	66,97	5,64	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	=	100,00
$j=44$		1,74	26,81	0,00	0,00	0,00	71,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	=	100,00
$j=45$		40,17	34,78	0,00	0,00	25,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	=	100,00
$j=46$		12,70	30,14	0,00	0,00	0,00	57,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	=	100,00
$j=47$		3,37	21,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	40,00	0,00	34,63	0,00	0,00	0,00	100,00	=	100,00
$j=48$		56,09	43,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	=	100,00
$j=49$		55,43	44,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	=	100,00
$j=50$		54,35	45,65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	=	100,00
$j=51$		21,48	45,65	0,00	0,00	32,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	=	100,00
$j=52$		21,30	40,86	0,00	11,37	0,00	11,37	8,43	6,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	=	100,00
$j=53$		45,65	54,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	=	100,00
$j=54$		41,30	58,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	=	100,00
$j=55$		26,09	73,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	=	100,00
$j=56$		4,35	95,65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	=	100,00
$j=57$	K+S	5,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	94,02	0,00	0,00	100,00	=	100,00	
$j=58$		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,22	0,00	0,00	97,78	0,00	0,00	100,00	=	100,00	
$j=59$		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	100,00	=	100,00	
$j=60$		6,13	0,00	0,00	0,00	6,26	0,00	0,00	50,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	37,61	0,00	0,00	0,00	100,00	=	100,00
$j=61$		5,14	0,00	0,00	0,00	59,15	0,00	0,00	1,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,78	14,81	0,00	0,00	100,00	=	100,00
$j=62$		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	96,15	0,00	0,00	3,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	=	100,00
$j=63$		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	98,08	0,00	0,00	1,92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	=	100,00
$j=64$		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	=	100,00
$j=65$	MOSAIC	2,96	0,00	0,00	0,00	97,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	=	100,00	
$j=66$		11,33	0,00	1,98	86,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	=	100,00
$j=67$	BELARUSKALI	0,00	0,00	1,20	0,00	8,76	54,64	35,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	=	100,00	
$j=68$		0,00	1,00	3,49	3,61	0,00	53,50	38,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	=	100,00
$j=69$		0,00	1,00	1,61	0,00	0,00	47,28	50,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	=	100,00
$j=70$		0,00	4,18	0,00	22,98	35,12	22,98	10,29	4,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	=	100,00
$j=71$		0,00	1,00	2,19	15,07	0,00	40,16	41,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	=	100,00
$j=72$		0,00	5,34	0,00	25,82	27,69	25,82	10,88	4,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	=	100,00
$j=73$		0,00	7,59	0,00	28,48	10,05	28,48	20,95	4,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	=	100,00
$j=74$		5,95	21,48	0,00	20,43	13,92	20,43	0,00	17,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	=	100,00
$j=75$		6,44	24,78	0,00	23,58	3,84	23,58	0,00	17,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	=	100,00
$j=76$		0,00	45,17	0,00	0,00	27,94	14,82	12,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	=	100,00

Output j	Constructeur	filler	CBC 1	CBC 2	CBC 3	CBC 4	CBC 5	CBC 6	CBC 7	CBC 8	CBC 9	CBC 10	CBC 11	CBC 12	CBC 13	CBC 14	CBC 15	$\sum_i x_{ij}$	D_j	
$j=77$	POTASHCROP	33,27	6,68	0,00	60,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00	
$j=78$		27,13	7,53	0,00	65,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=79$		7,28	1,00	0,00	91,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,11	= 100,00
$j=80$		0,00	18,76	0,00	81,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=81$		39,13	60,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=82$		34,78	65,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=83$		30,43	69,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=84$	CF INDUSTRIES	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00	
$j=85$	YARA	17,11	25,13	0,00	9,43	12,23	9,43	0,00	26,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00	
$j=86$		16,04	28,26	21,74	0,00	2,85	0,00	0,00	31,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=87$		0,00	29,57	0,00	0,00	70,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=88$		0,00	10,19	0,00	0,00	39,13	0,00	0,00	0,00	22,87	0,00	20,29	0,00	0,00	7,52	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=89$		10,52	25,22	0,00	15,72	6,16	15,72	0,00	26,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=90$		12,56	30,43	34,78	0,00	0,00	0,00	0,00	19,23	0,00	0,00	2,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=91$		1,00	14,87	0,00	0,00	35,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	48,92	100,00	= 100,00
$j=92$		0,00	23,79	0,00	12,40	0,00	50,21	13,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=93$		1,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	98,96	100,00	= 100,00
$j=94$		0,00	30,75	32,61	0,00	0,00	0,00	0,00	19,23	4,55	0,00	12,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=95$		0,00	27,84	36,96	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,29	0,00	24,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=96$		21,26	43,48	13,04	0,00	0,00	0,00	0,00	17,31	0,00	0,00	4,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=97$		12,56	43,48	21,74	0,00	0,00	0,00	0,00	19,23	0,00	0,00	2,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=98$		0,00	36,54	28,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,29	0,00	24,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=99$		12,78	52,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20,00	0,00	0,00	15,04	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=100$		8,96	51,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	38,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=101$		30,54	34,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,55	0,00	0,00	0,00	0,00	15,04	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=102$		1,21	54,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	44,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=103$		21,26	56,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,54	0,00	0,00	10,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=104$		14,64	58,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	26,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=105$		10,43	58,70	10,87	0,00	0,00	0,00	0,00	9,62	0,00	0,00	10,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=106$		1,00	58,23	10,57	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,02	28,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=107$		19,23	65,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=108$	27,17	72,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00	
$j=109$	OCP GROUP	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00	
$j=110$		0,00	12,56	0,00	26,19	15,43	26,19	4,07	15,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=111$		0,00	9,86	0,00	26,34	0,00	61,39	2,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=112$		16,65	21,74	43,48	0,00	4,80	0,00	0,00	13,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=113$		4,63	0,00	0,00	95,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=114$		0,00	0,00	21,74	0,00	25,47	0,00	0,00	7,17	29,46	0,00	4,88	0,00	0,00	11,28	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00

Output j	Constructeur	filler	CBC 1	CBC 2	CBC 3	CBC 4	CBC 5	CBC 6	CBC 7	CBC 8	CBC 9	CBC 10	CBC 11	CBC 12	CBC 13	CBC 14	CBC 15	$\sum_i x_{ij}$	D_j	
$j=115$	Groupe OCP	0,00	1,56	0,00	0,00	19,63	6,75	7,69	0,00	0,00	0,00	0,00	64,36	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00	
$j=116$		0,00	13,94	0,00	27,45	0,00	45,62	12,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00	
$j=117$		0,00	13,39	0,00	31,20	0,00	45,89	9,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00	
$j=118$		0,00	16,44	11,56	28,40	0,00	28,40	1,86	13,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=119$		0,00	19,71	35,88	16,11	0,00	0,00	19,41	8,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=120$		0,00	10,70	44,79	27,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	17,32	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=121$		0,00	12,11	32,97	35,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,97	0,00	0,00	3,46	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=122$		0,00	5,24	25,91	35,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,97	0,00	0,00	17,32	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=123$		0,00	5,73	30,85	53,20	0,00	0,00	0,00	0,00	7,21	3,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=124$		0,00	0,00	7,94	48,73	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,19	0,00	32,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=125$		0,00	2,85	29,84	53,15	0,00	0,00	0,00	0,00	10,27	3,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=126$		0,00	0,00	3,26	60,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,18	7,77	0,00	17,32	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=127$		0,00	1,84	15,77	49,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,97	0,00	0,00	17,32	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=128$		0,00	2,31	23,21	58,89	0,00	0,00	0,00	0,00	8,48	7,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=129$		3,62	3,64	0,00	0,00	26,61	0,00	0,00	0,00	1,78	0,00	0,00	64,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=130$		0,00	21,44	0,00	12,45	0,00	53,23	12,88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=131$		8,02	23,78	4,89	20,05	1,00	20,05	0,00	22,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=132$		0,00	5,45	0,00	0,00	25,38	0,00	3,05	0,00	1,78	0,00	0,00	64,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=133$		0,00	3,08	0,00	0,00	4,92	9,66	16,21	0,00	1,78	0,00	0,00	64,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=134$		0,00	16,93	0,00	36,06	0,00	30,39	16,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=135$		38,75	25,93	0,00	35,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=136$		0,00	29,21	43,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,29	0,00	21,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=137$		0,00	3,55	0,00	18,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,16	0,00	20,59	38,10	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=138$		0,00	21,21	5,59	35,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	17,09	0,00	20,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=139$		8,41	24,48	0,00	67,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=140$		0,00	19,01	16,05	54,07	0,00	0,00	0,00	0,00	9,86	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=141$		0,00	17,10	17,85	52,61	0,00	0,00	0,00	0,00	12,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00
$j=142$		7,83	21,56	43,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	24,75	0,00	2,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	= 100,00

Annexes - Tableau 6. Quantités optimales à prélever des CBC pour produire les 142 engrais vendus dans le marché international des engrais (solution du RB)

	Adapted Pooling										Reverse Blending		$\sum_i x_{ij}$	D_j	Adapted Pooling										Reverse Blending		$\sum_i x_{ij}$	D_j			
	filler	CBI 1	CBI 2	CBI 3	CBI 4	CBI 5	CBI 6	CBI 7	CBI 8	CBI 9	CBI 10					filler	CBI 1	CBI 2	CBI 3	CBI 4	CBI 5	CBI 6	CBI 7	CBI 8	CBI 9	CBI 10					
$j=301$	75,37	28,04	0,00	179,69	17,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	300,80	=	300,80	$j=351$	173,30	0,00	23,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	139,83	168,31	505,42	=	505,42
$j=302$	13,83	117,80	0,00	112,25	11,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	254,94	=	254,94	$j=352$	99,66	48,57	0,00	0,00	0,00	451,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	600,13	=	600,13
$j=303$	42,77	56,75	0,00	23,81	2,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	125,68	=	125,68	$j=353$	40,51	170,34	0,00	236,29	0,00	0,00	0,00	0,00	21,64	0,00	0,00	0,00	0,00	468,79	=	468,79
$j=304$	35,66	19,94	0,00	85,02	8,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	149,00	=	149,00	$j=354$	79,19	211,46	0,00	164,36	16,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	471,20	=	471,20
$j=305$	12,35	104,21	0,00	99,76	9,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	226,15	=	226,15	$j=355$	69,91	91,84	0,00	166,67	16,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	344,85	=	344,85
$j=306$	28,53	31,32	0,00	68,02	6,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	134,57	=	134,57	$j=356$	301,62	230,69	0,00	25,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	558,05	=	558,05
$j=307$	0,00	101,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	101,80	=	101,80	$j=357$	69,51	167,28	0,00	145,17	14,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	396,27	=	396,27
$j=308$	51,84	62,38	0,00	123,60	12,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	250,00	=	250,00	$j=358$	47,77	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	47,52	0,00	0,00	0,00	0,00	218,54	155,00	468,83	=	468,83
$j=309$	0,00	161,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	161,59	=	161,59	$j=359$	12,53	0,00	101,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	135,56	151,08	400,20	=	400,20
$j=310$	130,18	145,55	0,00	25,94	3,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	304,71	=	304,71	$j=360$	0,00	0,00	101,17	10,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	105,46	112,42	329,89	=	329,89	
$j=311$	0,00	107,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	107,24	=	107,24	$j=361$	133,40	196,55	0,00	0,00	0,00	98,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	428,26	=	428,26
$j=312$	0,00	150,72	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	150,72	=	150,72	$j=362$	22,29	141,11	0,00	56,13	0,00	311,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	531,52	=	531,52
$j=313$	0,00	250,72	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	250,72	=	250,72	$j=363$	22,61	0,00	151,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	284,54	212,59	670,89	=	670,89	
$j=314$	0,00	146,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	146,37	=	146,37	$j=364$	27,71	128,48	0,00	174,08	17,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	347,42	=	347,42
$j=315$	0,00	238,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	238,76	=	238,76	$j=365$	24,70	219,29	0,00	204,72	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	448,71	=	448,71
$j=316$	189,89	169,52	0,00	0,00	3,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	363,05	=	363,05	$j=366$	48,12	0,00	73,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	318,31	195,94	636,13	=	636,13	
$j=317$	26,91	141,31	0,00	176,88	17,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	362,54	=	362,54	$j=367$	23,77	172,05	0,00	178,56	17,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	391,98	=	391,98
$j=318$	0,00	247,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	247,46	=	247,46	$j=368$	105,58	121,93	0,00	251,69	24,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	504,00	=	504,00	
$j=319$	0,00	220,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	220,28	=	220,28	$j=369$	0,00	130,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	130,07	=	130,07	
$j=320$	0,00	161,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	161,59	=	161,59	$j=370$	58,34	174,92	0,00	120,16	11,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	365,27	=	365,27
$j=321$	0,00	168,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	168,11	=	168,11	$j=371$	115,82	174,77	0,00	56,67	5,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	352,85	=	352,85
$j=322$	0,00	255,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	255,07	=	255,07	$j=372$	101,14	145,38	0,00	52,16	5,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	303,82	=	303,82
$j=323$	81,56	81,88	0,00	194,42	19,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	377,02	=	377,02	$j=373$	19,34	128,24	0,00	139,71	12,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	300,19	=	300,19
$j=324$	72,77	76,31	0,00	16,99	1,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	167,75	=	167,75	$j=374$	38,23	0,00	80,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	267,85	181,59	567,73	=	567,73	
$j=325$	0,00	130,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	130,07	=	130,07	$j=375$	17,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	195,98	0,00	0,00	0,00	110,60	163,11	486,83	=	486,83	
$j=326$	53,31	155,83	0,00	110,00	10,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	329,98	=	329,98	$j=376$	16,47	0,00	64,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	134,36	114,61	329,70	=	329,70	
$j=327$	34,16	112,05	0,00	192,72	18,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	357,92	=	357,92	$j=377$	20,06	200,62	0,00	140,62	0,00	0,00	0,00	0,00	78,05	0,00	0,00	439,35	=	439,35		
$j=328$	58,80	194,40	0,00	120,22	11,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	385,27	=	385,27	$j=378$	42,32	0,00	56,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	290,33	156,93	546,56	=	546,56		
$j=329$	0,00	253,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	253,98	=	253,98	$j=379$	21,49	183,91	0,00	74,86	0,00	306,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	586,75	=	586,75	
$j=330$	360,58	315,83	0,00	8,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	684,68	=	684,68	$j=380$	95,99	133,04	0,00	0,00	0,00	435,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	664,28	=	664,28
$j=331$	0,00	128,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	128,98	=	128,98	$j=381$	254,37	0,00	78,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	324,93	48,11	705,63	=	705,63	
$j=332$	0,00	148,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	148,54	=	148,54	$j=382$	76,33	0,00	0,00	69,91	171,95	0,00	0,00	0,00	97,78	0,00	0,00	415,98	=	415,98		
$j=333$	84,65	93,58	0,00	201,80	19,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	399,91	=	399,91	$j=383$	27,67	134,77	0,00	176,90	17,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	356,77	=	356,77	
$j=334$	15,94	125,97	0,00	124,73	12,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	278,92	=	278,92	$j=384$	88,00	84,28	0,00	209,79	20,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	402,74	=	402,74	
$j=335$	21,91	126,38	0,00	109,96	0,00	0,00	0,00	158,22	44,63	0,00	0,00	461,10	=	461,10	$j=385$	20,99	137,43	0,00	150,82	14,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	324,10	=	324,10	
$j=336$	38,21	183,30	0,00	214,06	0,00	0,00	0,00	0,00	62,31	0,00	0,00	497,88	=	497,88	$j=386$	28,08	135,93	0,00	179,11	17,65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	360,77	=	360,77	
$j=337$	90,17	96,85	0,00	0,00	0,00	408,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	595,89	=	595,89	$j=387$	117,12	0,00	0,00	155,75	165,91	145,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	583,87	=	583,87	
$j=338$	0,00	224,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	224,63	=	224,63	$j=388$	128,02	0,00	193,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	29,19	123,94	474,30	=	474,30		
$j=339$	285,82	222,07	0,00	0,00	0,00	28,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	535,95																			

	Adapted Pooling										Reverse Blending		$\sum_i x_{ij}$	D_j	Adapted Pooling										Reverse Blending		$\sum_i x_{ij}$	D_j							
	filler	CBI 1	CBI 2	CBI 3	CBI 4	CBI 5	CBI 6	CBI 7	CBI 8	CBI 9	CBI 10					filler	CBI 1	CBI 2	CBI 3	CBI 4	CBI 5	CBI 6	CBI 7	CBI 8	CBI 9	CBI 10									
<i>j=601</i>	0,00	276,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	276,80	=	276,80	<i>j=651</i>	52,20	152,58	0,00	107,71	10,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	323,11	323,11
<i>j=602</i>	28,08	125,23	0,00	174,08	17,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	344,54	=	344,54	<i>j=652</i>	0,00	140,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	140,93	140,93	
<i>j=603</i>	318,39	266,81	0,00	14,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	599,27	=	599,27	<i>j=653</i>	0,00	205,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	205,07	205,07	
<i>j=604</i>	161,04	219,86	0,00	87,35	8,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	476,85	=	476,85	<i>j=654</i>	0,00	207,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	207,24	207,24	
<i>j=605</i>	203,50	227,51	0,00	40,55	4,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	476,32	=	476,32	<i>j=655</i>	23,04	124,42	0,00	153,07	15,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	315,62	315,62		
<i>j=606</i>	69,36	0,00	82,41	58,67	0,00	0,00	0,00	0,00	192,61	54,47	0,00	457,52	=	457,52	<i>j=656</i>	329,00	268,28	0,00	18,72	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	616,00	616,00	
<i>j=607</i>	0,00	262,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	262,67	=	262,67	<i>j=657</i>	85,94	272,05	0,00	176,28	17,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	551,64	551,64		
<i>j=608</i>	0,00	59,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	59,41	=	59,41	<i>j=658</i>	0,00	211,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	211,59	211,59		
<i>j=609</i>	78,06	5,11	0,00	0,00	314,94	93,29	0,00	0,00	19,30	0,00	0,00	510,71	=	510,71	<i>j=659</i>	68,87	162,44	0,00	143,99	14,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	389,49	389,49		
<i>j=610</i>	94,00	228,78	0,00	196,20	19,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	538,31	=	538,31	<i>j=660</i>	141,13	209,79	0,00	70,47	6,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	427,91	427,91		
<i>j=611</i>	37,22	0,00	0,00	99,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	324,49	71,91	=	533,23	<i>j=661</i>	0,00	40,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	40,93	40,93		
<i>j=612</i>	359,26	298,01	0,00	17,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	674,86	=	674,86	<i>j=662</i>	103,17	129,63	0,00	60,10	5,92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	298,82	298,82		
<i>j=613</i>	171,10	236,27	0,00	91,82	9,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	508,24	=	508,24	<i>j=663</i>	226,32	279,17	0,00	32,19	5,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	543,11	543,11		
<i>j=614</i>	78,98	294,03	0,00	159,84	15,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	548,60	=	548,60	<i>j=664</i>	0,00	287,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	287,67	287,67		
<i>j=615</i>	88,52	236,96	0,00	183,69	18,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	527,27	=	527,27	<i>j=665</i>	179,90	249,41	0,00	101,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	531,06	531,06		
<i>j=616</i>	175,69	240,10	0,00	95,21	9,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	520,38	=	520,38	<i>j=666</i>	0,00	146,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	146,37	146,37		
<i>j=617</i>	244,35	264,08	0,00	53,18	5,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	567,29	=	567,29	<i>j=667</i>	0,00	223,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	223,54	223,54		
<i>j=618</i>	0,00	0,00	118,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	118,02	=	118,02	<i>j=668</i>	95,60	221,57	0,00	200,08	19,72	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	536,98	536,98		
<i>j=619</i>	0,00	118,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	118,11	=	118,11	<i>j=669</i>	49,29	182,40	0,00	99,81	9,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	341,33	341,33		
<i>j=620</i>	198,14	243,04	0,00	28,86	4,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	474,79	=	474,79	<i>j=670</i>	223,30	250,70	0,00	43,98	5,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	523,21	523,21		
<i>j=621</i>	0,00	184,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	184,41	=	184,41	<i>j=671</i>	0,00	318,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	318,11	318,11		
<i>j=622</i>	0,00	188,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	188,76	=	188,76	<i>j=672</i>	17,99	79,32	0,00	111,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	208,46	208,46		
<i>j=623</i>	0,00	315,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	315,93	=	315,93	<i>j=673</i>	8,38	0,00	122,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	137,93	163,95	432,83	432,83				
<i>j=624</i>	0,00	240,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	240,93	=	240,93	<i>j=674</i>	0,00	282,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	282,24	282,24		
<i>j=625</i>	0,00	183,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	183,33	=	183,33	<i>j=675</i>	0,00	237,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	237,67	237,67		
<i>j=626</i>	37,70	0,00	0,00	96,60	281,94	173,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	590,19	=	590,19	<i>j=676</i>	0,00	320,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	320,28	320,28		
<i>j=627</i>	79,25	259,18	0,00	162,17	15,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	516,58	=	516,58	<i>j=677</i>	165,74	211,76	0,00	95,27	9,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	482,15	482,15		
<i>j=628</i>	0,00	369,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	369,20	=	369,20	<i>j=678</i>	0,00	230,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	230,07	230,07		
<i>j=629</i>	0,00	173,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	173,54	=	173,54	<i>j=679</i>	0,00	193,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	193,11	193,11		
<i>j=630</i>	55,09	212,90	0,00	111,13	10,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	390,07	=	390,07	<i>j=680</i>	0,00	212,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	212,67	212,67		
<i>j=631</i>	15,74	115,66	0,00	119,04	11,73	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	262,17	=	262,17	<i>j=681</i>	0,00	271,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	271,37	271,37		
<i>j=632</i>	144,05	202,49	0,00	75,98	7,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	430,00	=	430,00	<i>j=682</i>	0,00	221,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	221,37	221,37		
<i>j=633</i>	0,00	188,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	188,76	=	188,76	<i>j=683</i>	0,00	187,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	187,67	187,67		
<i>j=634</i>	125,82	136,45	0,00	27,16	2,92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	292,36	=	292,36	<i>j=684</i>	0,00	168,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	168,11	168,11		
<i>j=635</i>	240,39	241,10	0,00	61,20	6,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	548,71	=	548,71	<i>j=685</i>	0,00	251,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	251,80	251,80		
<i>j=636</i>	131,54	182,33	0,00	70,34	6,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	39																							

Annexe 8. Résultats relatifs à l'étude de cas testant le modèle du RB sur le programme mensuel de production de l'OCP en 2019

Mois	Référence de l'engrais	filler	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	Volume produit (tonnes)
Janvier	Engr. 1	0,00	21582,71	98477,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	120060
	Engr. 7	893,36	0,00	11381,64	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	12275
	Engr. 9	824,58	0,00	10505,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11330
	Engr. 23	142,10	84,70	0,00	618,39	400,62	241,63	2,56	0,00	0,00	1490
	Engr. 27	3124,93	2965,21	8,51	6395,27	5919,95	3573,45	32,69	0,00	0,00	22020
	Engr. 13	2261,65	4841,78	0,00	37595,33	21187,20	12778,60	135,44	0,00	0,00	78800
	Engr. 17	1747,27	0,00	10731,06	0,15	8507,99	0,00	0,76	0,00	3092,76	24080
Engr. 21	1,72	15125,92	6391,38	0,00	0,00	0,06	4532,55	5993,50	12619,86	44665	
Février	Engr. 1	0,00	309,20	1410,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1720
	Engr. 4	0,00	12061,40	55033,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	67095
	Engr. 9	5386,72	0,00	68628,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	74015
	Engr. 20	0,00	3424,10	758,92	0,00	45013,15	0,00	5553,84	0,00	0,00	54750
	Engr. 23	3806,15	2268,73	0,00	16563,72	10730,80	6472,04	68,56	0,00	0,00	39910
	Engr. 27	823,10	781,03	2,24	1684,49	1559,30	941,24	8,61	0,00	0,00	5800
	Engr. 13	821,28	1758,22	0,00	13652,16	7693,80	4640,35	49,18	0,00	0,00	28615
	Engr. 14	415,16	888,79	0,00	6901,22	3889,25	2345,72	24,86	0,00	0,00	14465
	Engr. 17	1190,36	0,00	7310,76	0,10	5796,25	0,00	0,52	0,00	2107,01	16405
Engr. 21	0,38	3335,73	1409,49	0,00	0,00	0,01	999,57	1321,75	2783,07	9850	
Mars	Engr. 1	0,00	21854,15	99715,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	121570
	Engr. 8	2306,00	0,00	29379,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	31685
	Engr. 9	2494,86	0,00	31785,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	34280
	Engr. 26	0,00	338,60	0,00	4571,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4910
	Engr. 18	58,98	561,43	1596,42	0,00	14143,96	0,00	0,00	0,00	0,00	16361
	Engr. 27	3950,86	3748,94	10,75	8085,57	7484,62	4517,93	41,33	0,00	0,00	27840
	Engr. 13	1670,12	3575,42	0,00	27762,34	15645,72	9436,38	100,01	0,00	0,00	58190
	Engr. 17	1322,43	0,00	8121,83	0,11	6439,29	0,00	0,58	0,00	2340,76	18225
	Engr. 21	1,06	9340,04	3946,58	0,00	0,00	0,04	2798,79	3700,90	7792,58	27580
Engr. 15	850,45	0,00	6024,17	0,15	12527,44	0,00	4322,78	3539,70	0,30	27265	
Avril	Engr. 1	0,00	16105,24	73484,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	89590
	Engr. 8	7511,50	0,00	95698,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	103210
	Engr. 9	4299,04	0,00	54770,96	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	59070
	Engr. 10	872,25	0,00	11112,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11985
	Engr. 20	0,00	1314,60	291,37	0,00	17281,76	0,00	2132,27	0,00	0,00	21020
	Engr. 13	640,61	1371,43	0,00	10648,83	6001,25	3619,52	38,36	0,00	0,00	22320
Mai	Engr. 3	0,00	314,59	1435,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1750
	Engr. 4	0,00	18297,48	83487,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	101785
	Engr. 9	6253,15	0,00	79666,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	85920
	Engr. 8	5525,37	0,00	70394,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	75920
	Engr. 26	0,00	1681,64	0,00	22703,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	24385
	Engr. 22	86,91	0,00	451,50	1571,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2110
	Engr. 19	0,00	0,00	0,00	0,00	49995,00	0,00	0,00	0,00	0,00	49995
	Engr. 20	0,00	2158,28	478,36	0,00	28372,67	0,00	3500,69	0,00	0,00	34510
	Engr. 24	85,54	295,27	0,00	1896,57	1286,74	512,34	433,54	0,00	0,00	4510
Engr. 25	0,00	390,79	12,61	10410,70	2289,11	2007,16	1299,62	0,00	0,00	16410	
Juin	Engr. 3	0,00	9584,22	43730,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	53315
	Engr. 4	0,00	9870,95	45039,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	54910
	Engr. 6	0,00	9986,90	45568,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	55555
	Engr. 8	1867,14	0,00	23787,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	25655
	Engr. 9	10717,41	0,00	136542,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	147260
	Engr. 26	0,00	1507,85	0,00	20357,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	21865
	Engr. 22	558,12	0,00	2899,43	10092,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	13550
	Engr. 27	1629,16	1545,90	4,43	3334,14	3086,33	1863,00	17,04	0,00	0,00	11480
	Engr. 14	72,33	154,84	0,00	1202,29	677,56	408,66	4,33	0,00	0,00	2520
	Engr. 16	0,00	957,65	703,68	0,00	0,00	0,00	0,00	3136,96	126,56	4925
Engr. 17	778,22	0,00	4779,51	0,07	3789,38	0,00	0,34	0,00	1377,49	10725	

Mois	Référence de l'engrais	filler	i =1	i =2	i =3	i =4	i =5	i =6	i =7	i =8	Volume produit (tonnes)
Juillet	Engr. 2	0,00	2296,51	10478,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	12775
	Engr. 6	0,00	18291,19	83458,81	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	101750
	Engr. 8	8477,64	0,00	108007,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	116485
	Engr. 9	5471,51	0,00	69708,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	75180
	Engr. 26	0,00	1849,91	0,00	24975,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	26825
	Engr. 22	1513,92	0,00	7864,84	27376,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	36755
Engr. 17	749,56	0,00	4603,48	0,06	3649,82	0,00	0,33	0,00	1326,75	10330	
Août	Engr. 6	0,00	37124,38	169390,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	206515
	Engr. 8	1527,63	0,00	19462,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20990
	Engr. 9	8378,30	0,00	106741,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	115120
	Engr. 26	0,00	4973,54	0,00	67146,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	72120
	Engr. 22	210,07	0,00	1091,30	3798,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5100
	Engr. 13	426,64	913,36	0,00	7092,06	3996,80	2410,58	25,55	0,00	0,00	14865
Engr. 15	595,77	0,00	4220,12	0,10	8775,87	0,00	3028,25	2479,68	0,21	19100	
Septembre	Engr. 3	0,00	13769,18	62825,82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	76595
	Engr. 5	0,00	1802,15	8222,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10025
	Engr. 6	0,00	21540,46	98284,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	119825
	Engr. 9	8454,71	0,00	107715,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	116170
	Engr. 26	0,00	338,26	0,00	4566,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4905
	Engr. 22	455,15	0,00	2364,48	8230,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11050
	Engr. 18	94,23	266,93	759,02	0,00	6724,81	0,00	0,00	0,00	0,00	7845
	Engr. 28	6031,74	0,00	5351,29	18626,97	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	30010
Engr. 17	709,65	0,00	4358,38	0,06	3455,49	0,00	0,31	0,00	1256,11	9780	
Engr. 15	55,05	0,00	389,97	0,01	810,96	0,00	279,84	229,14	0,02	1765	
Octobre	Engr. 3	0,00	18011,65	82183,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100195
	Engr. 6	0,00	22646,92	103333,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	125980
	Engr. 9	8826,61	0,00	112453,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	121280
	Engr. 26	0,00	687,21	0,00	9277,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9965
	Engr. 22	158,37	0,00	822,75	2863,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3845
Engr. 12	1060,22	2269,74	0,00	17624,00	9932,17	5990,38	63,49	0,00	0,00	36940	
Novembre	Engr. 1	0,00	11411,55	52068,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	63480
	Engr. 6	0,00	19109,13	87190,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	106300
	Engr. 9	9038,76	0,00	115156,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	124195
	Engr. 26	0,00	2493,67	0,00	33666,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	36160
	Engr. 27	342,72	325,20	0,93	701,39	649,26	391,91	3,58	0,00	0,00	2415
	Engr. 12	128,44	274,96	0,00	2135,01	1203,21	725,69	7,69	0,00	0,00	4475
	Engr. 14	88,40	189,25	0,00	1469,46	828,13	499,47	5,29	0,00	0,00	3080
Engr. 17	777,85	0,00	4777,28	0,07	3787,61	0,00	0,34	0,00	1376,84	10720	
Décembre	Engr. 1	0,00	59,32	270,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	330
	Engr. 6	0,00	18461,07	84233,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	102695
	Engr. 9	6504,61	0,00	82870,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	89375
	Engr. 11	411,20	0,00	5238,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5650
	Engr. 26	0,00	426,87	0,00	5763,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6190
	Engr. 20	0,00	5096,43	1129,58	0,00	66997,64	0,00	8266,34	0,00	0,00	81490
	Engr. 27	2114,50	2006,43	5,76	4327,41	4005,78	2418,00	22,12	0,00	0,00	14900
	Engr. 14	804,21	1721,66	0,00	13368,29	7533,82	4543,86	48,16	0,00	0,00	28020
Engr. 17	1014,77	0,00	6232,30	0,09	4941,21	0,00	0,44	0,00	1796,19	13985	

Annexes - Tableau 8. Quantités optimales à prélever de chaque CBC pour satisfaire le programme mensuel de production de l'OCP en 2019

Annexe 9. Application possible du Reverse Blending pour obtenir une différenciation retardée des cosmétiques

Afin d'étendre le champ d'application du Reverse Blending et de montrer son intérêt possible dans la différenciation retardée d'une grande diversité de produits chimiques autres que les engrais, une étude de cas théorique portant sur une diversité commerciale, celle des cosmétiques, a été réalisée. Le jeu de données et les résultats de cette étude de cas peuvent être consultés dans le lien Mendeley : <https://data.mendeley.com/datasets/xdp7m4m9v6/1>

1 Revue de littérature

Pour un marketing efficace, il est nécessaire de joindre le marketing relationnel (se concentrer sur les relations à long terme avec les clients) au marketing personnalisé (tenir compte de l'hétérogénéité des clients). Consciente de cela, l'industrie cosmétique est l'une des rares, en production continue, qui vise aujourd'hui à fidéliser ses clients et à en gagner de nouveaux en leur offrant une grande variété de produits cosmétiques individuellement personnalisés. Les cosmétiques - faisant référence à toute substance ou mélange destiné à être mis en contact avec les parties externes du corps humain (épiderme, système pileux, ongles, lèvres et organes génitaux externes) en vue exclusivement ou principalement de les nettoyer, de les parfumer, de modifier leur apparence, de les protéger, de les maintenir en bon état ou de corriger les odeurs corporelles - jouent un rôle essentiel dans la société actuelle (Bom et al., 2019). Ils sont aujourd'hui produits sur-mesure pour accompagner la volonté de plus en plus forte des consommateurs quant à l'expression de leur individualité (Moreau, 2018).

En effet, plusieurs marques de cosmétiques se sont lancées dans la personnalisation de leurs produits (Raphael, 2016) : par exemple, « Finding Ferdinand », une marque américaine spécialisée dans la personnalisation des rouges à lèvres et des palettes, propose des teintes de rouge à lèvres sur-mesure avec jusqu'à 65 000 combinaisons de couleurs. « Lancôme », maison de cosmétiques et de produits de luxe créée en 1935, a aussi lancé un fond de teint sur-mesure, appelé « Le teint particulier », qui peut être décliné en 72 000 combinaisons différentes ; « Function of Beauty », une entreprise spécialisée dans les soins capillaires personnalisés, propose également des shampooings et des après-shampooings customisés à choisir parmi plus de 12 milliards de formules possibles. Ces combinaisons, résultant du produit cartésien de tous les choix existants, ne représentent toutefois pas une personnalisation pure, car elle n'est généralement liée qu'aux systèmes de coloration cosmétique (i.e. des produits cosmétiques

personnalisés dont les couleurs correspondent à la partie du corps concernée du consommateur) (Igarashi, 2017).

Toutefois, il est important de savoir que la personnalisation doit porter sur des caractéristiques supplémentaires autres que la coloration de la peau (ex. l'hydratation, l'aspect gras, la texture, la sensibilité aux irritations, l'éclat, les dommages cutanés, les taches de vieillesse, les pores dilatés, l'acné, la pigmentation irrégulière, les marques autour des yeux fatigués (cernes), les taches de naissance désagréables, les ecchymoses post-opératoires, cicatrices, tatouages, etc.) (Flynn et al., 1999). Certains fabricants de cosmétiques sont d'ailleurs parvenus à développer des produits personnalisés qui prennent en compte, outre la couleur, d'autres propriétés, comme c'est le cas de « Function of Beauty », dont les produits sur-mesure dépendent, entre autres, du type de cheveux (gras, secs, abîmés...) ou « Lancôme », qui, en plus d'offrir un fond de teint personnalisé qui s'accorde parfaitement à la couleur de la peau, prend en considération d'autres propriétés telles que le type de peau (grasse, mixte ou sèche). Néanmoins, malgré cela, cette personnalisation reste incomplète car, par exemple, pour le type de peau, en réalité, nous ne distinguons pas seulement 3 types de peau (Tarlayan, 2018). Il existe en effet une multitude de types de peau qui peuvent varier en fonction de la pollution, de la fatigue, de l'alimentation, de l'âge, du stress, etc. (Tarlayan, 2018). À cet effet, dans le but d'aboutir à une personnalisation pure répondant aux besoins dermocosmétiques de chaque client, un ensemble d'indicateurs, dont la mesure de chacun reflète le besoin précis en termes d'une certaine propriété cosmétique (ex. la couvrance requise dépend du taux de sébum), doivent être mesurés (Bennett, 2017). C'est le cas de « Biologique Recherche », une référence dans le secteur du soin, dont les clients sont examinés par plusieurs spécialistes avant d'être soumis à plusieurs tests évaluant entre autres, l'hydratation, le sébum, la perte insensible en eau, l'élasticité, la profondeur des rides, etc. À l'issue de ces tests, un coffret sur-mesure, composé de plusieurs sérums et crèmes, est remis au client pour 15.000€ (Moreau, 2018). Bien que complète, cette personnalisation est une forme de luxe, très coûteuse, qui ne peut être accessible au grand public. Ceci s'explique en grande partie par le fait que la personnalisation est effectuée dès les phases de conception et que cette personnalisation se base sur plusieurs facteurs variant d'un client à l'autre, ce qui conduit à une très grande variété de produits.

Pour remédier à cette situation, il est nécessaire de trouver une solution qui permettrait d'offrir à chaque client un produit 100 % personnalisé en prenant en considération toutes les propriétés dermocosmétiques sans avoir à payer des prix très élevés. Pour que cela soit possible, des milliers de produits doivent être fabriqués à des coûts rentables pour l'entreprise. Autrement dit,

il faut trouver un moyen de minimiser la diversité à produire sans pour autant réduire la diversité de l'offre. Cela est impossible si la personnalisation intervient dès les premières étapes de la production, il est en effet nécessaire d'utiliser un processus d'assemblage flexible qui permettrait de différencier les produits en montant différents composants alternatifs sur une plateforme commune. Étant une industrie de process, l'assemblage des cosmétiques serait assuré par un processus de blending et le RB peut constituer une solution originale et pertinente pour trouver le nombre minimum requis de composants communs (c'est-à-dire les CBC) dont les combinaisons de mélange peuvent répondre à une grande variété de produits cosmétiques personnalisés. Cette revue de littérature nous a d'ailleurs permis de constater que le terme "blending", dans l'industrie cosmétique, fait généralement référence à des techniques de mélange du maquillage sur la peau (Berry & Bennett, 1987; Davis, 1990; Kuang et al., 2019) ou simplement à une étape intermédiaire que l'on trouve souvent juste mentionnée dans les brevets d'invention cosmétiques (Swaab, 1999; Markowitz & Markowitz, 2001; Igarashi, 2017; Balooch et al., 2017...); dans les deux cas, ces travaux, n'évoquant pas des modèles de blending visant à optimiser des mélanges selon un critère d'optimisation précis, portent implicitement sur des inputs connus.

L'industrie des cosmétiques est alors un secteur intéressant qui pourrait utiliser le RB pour assurer une différenciation retardée efficace pourtant sur un nombre réduit de composants communs. Il faut souligner en plus que pour certains produits cosmétiques, la personnalisation est déjà réalisée, en quelques minutes, dans des points de ventes situés à proximité des clients à travers des centrifugeuses qui comprennent une série de distributeurs contenant diverses couleurs monochromatiques qui sont injectées suivant des doses précises dans une base cosmétique avant que le produit obtenu soit mis en flacon (Flynn et al., 1999). Ces machines peuvent être utilisées par le RB et ses distributeurs contiendraient les différents CBC, au lieu des pigments colorés, qui seront mélangés pour construire un produit qui serait, cette fois-ci, personnalisé en termes de toutes les propriétés cosmétiques requises et non pas seulement en termes de la teinte de peau.

2 Étude de cas

L'application potentielle du RB a été analysée pour la chaîne logistique de l'industrie des engrais. La différenciation retardée présente un intérêt dans d'autres industries chimiques souhaitant accroître leur diversité en offrant à leurs clients des produits personnalisés. L'objectif de cet exemple simplifié est de prouver que le RB peut être une réponse efficace, non seulement

pour le secteur des engrais (secteur pour lequel la solution du RB a été proposée), mais pour toute industrie chimique adoptant une stratégie de personnalisation de ses produits, que ce soit pour des raisons commerciales (ex. industrie cosmétique) ou pour des raisons sanitaires et/ou écologiques (ex. industrie pharmaceutique).

Le RB peut en fait être appliqué pour la fabrication de produits miscibles (granule, crème, pâte, poudre, liquide...) en mélangeant les inputs, à condition que ces inputs ainsi que les outputs soient caractérisés par le même ensemble de composants chimiques, dont la composition peut être définie par les pourcentages en poids de ces composants dans leur poids total. C'est le cas des produits cosmétiques, dont certains sont individuellement adaptés pour correspondre parfaitement à toute couleur de peau que l'on choisit dans un nuancier de plusieurs centaines de teintes et que l'on fabrique à partir d'une formule de base et de quelques colorants (nomenclature prédéterminée). En plus de la personnalisation des teintes, le RB pourrait être utilisé pour proposer un réel sur-mesure, permettant ainsi d'offrir une plus grande diversité basée sur une différenciation retardée, au comptoir des magasins, qui au lieu de porter sur une nomenclature existante \rightarrow solution déjà utilisée par plusieurs marques pour personnaliser la teinte de leurs produits (par exemple, Lancôme) (Raphael, 2016) \rightarrow s'appuie sur une nomenclature non-prédéterminée, à créer de manière optimale par le moyen du RB. Pour illustrer cela, nous avons décidé de créer une étude de cas sur les fonds de teint poudrés (poudres faciales) vu que ce sont des produits dont la composition interne peut être entièrement personnalisée en fonction des types et des besoins de la peau.

Comme nous cherchons à tester la capacité du RB à réduire la diversité des produits cosmétiques, le modèle que nous utilisons ici est celui du RB standard. Le jeu de données et les résultats de cette étude de cas sont présentés respectivement dans les sous-sections (§2.1) et (§2.2).

2.1 Jeu de données

Pour un sur-mesure complet, il est nécessaire de partir d'une assez grande variété de poudres personnalisées en termes de plusieurs propriétés dermocosmétiques, à savoir : la couvrance, l'absorption, l'hydratation et l'adhésivité. D'après Bennett (2017), la couvrance d'une poudre se réfère à sa capacité de couvrir visuellement la peau de telle sorte à réduire la brillance et à cacher toutes les imperfections (par exemple, les pores dilatés, l'acné, la pigmentation irrégulière...). Les composants chimiques qui peuvent être utilisés à des doses différentes, selon le degré de gravité des imperfections de la peau, sont TiO_2 , ZnO , MgSiO_4 ou $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$,

$C_{36}H_{70}O_4Z_n$ et $CaCO_3$ ou $MgCO_3$. L'absorption, quant à elle, se rapporte à la capacité de la poudre à absorber la transpiration et l'excès de sébum afin que le visage ne soit plus brillant. Elle dépend des éléments chimiques suivants : $MgCO_3$, Fumée de silice et Kaolin. Concernant l'hydratation, elle joue un rôle essentiel dans le déroulement du renouvellement cutané et le travail des cellules de l'épiderme et la prévention du vieillissement prématuré. Les différents niveaux d'hydratation peuvent être assurés par les composants chimiques $(C_{14}H_{20}NO_{11}Na)_n$ et $C_3H_8O_3$ et $C_{30}H_{50}$ (Bennett 2017). Enfin, la propriété de l'adhésivité désigne l'aptitude de la poudre à adhérer et à coller à la peau et dépend du complexe : $C_{36}H_{70}MgO_4$. Au final, en fonction du niveau requis de chaque propriété dont dépend la dose d'un ou plusieurs composants, les poudres sur-mesure seraient personnalisées en termes de 12 composants chimiques. Ces composants sont présentés dans (§Annexes - Tableau 9).

		Désignation	Molécule	Propriété
Composant <i>c</i>	<i>c</i> = 1	Dioxyde de titane	TiO_2	Couvrance
	<i>c</i> = 2	Oxyde de zinc	Z_nO	
	<i>c</i> = 3	Talc	$MgSiO_4$	
	<i>c</i> = 4	Stéarate de zinc	$C_{36}H_{70}O_4Z_n$	
	<i>c</i> = 5	Craie préparée	$CaCO_3$	
	<i>c</i> = 6	Fumée de silice	-	Absorption
	<i>c</i> = 7	Carbonate de magnésium	$MgCO_3$	
	<i>c</i> = 8	Kaolin	Al_2SiO_5	
	<i>c</i> = 9	Hyaluronate de sodium	$(C_{14}H_{20}NO_{11}Na)_n$	Hydratation
	<i>c</i> = 10	Glycérol	$C_3H_8O_3$	
	<i>c</i> = 11	Squalène	$C_{30}H_{50}$	
	<i>c</i> = 12	Stéarate de magnésium	$C_{36}H_{70}MgO_4$	Adhésivité

Annexes - Tableau 9. Composants considérés dans la personnalisation des poudres faciales

Pour définir les besoins exacts de chaque peau en ces 12 éléments, un diagnostic complet, portant sur une série de tests dermatologiques, doit être mené afin d'identifier la formule optimale (i.e. pourcentage optimal de chaque ingrédient dans le produit final indiqué par le paramètre (β_{c_j}) dans le modèle du RB standard présenté dans (Chap.3/§3.2)) pour chaque cliente. Pour notre étude de cas, nous avons opté pour un échantillon théorique portant sur la peau de 100 femmes se traduisant par 100 formules chimiques différentes (cf. (§Annexes - Tableau 10)).

Output /	Composant c												j	Composant c											
	TiO ₂	ZnO	MgSiO ₃	C ₁₀ H ₁₆ O ₂	CaCO ₃	FS	MgCO ₃	Al ₂ SiO ₅	(C ₁₂ H ₂₂ N)	C ₁₂ H ₂₂ O	C ₁₀ H ₁₆	C ₁₂ H ₂₂ Mg		TiO ₂	ZnO	MgSiO ₃	C ₁₀ H ₁₆ O ₂	CaCO ₃	FS	MgCO ₃	Al ₂ SiO ₅	(C ₁₂ H ₂₂ N)	C ₁₂ H ₂₂ O	C ₁₀ H ₁₆	C ₁₂ H ₂₂ Mg
	c=1	c=2	c=3	c=4	c=5	c=6	c=7	c=8	c=9	c=10	c=11	c=12		c=1	c=2	c=3	c=4	c=5	c=6	c=7	c=8	c=9	c=10	c=11	c=12
j=1	7,97%	11,37%	33,23%	8,89%	3,83%	0,47%	5,34%	7,70%	7,48%	5,34%	4,36%	4,00%	j=51	18,17%	1,80%	52,42%	0,00%	6,98%	0,00%	1,45%	6,08%	7,42%	0,00%	3,60%	2,08%
j=2	11,94%	12,84%	49,77%	3,75%	0,00%	2,95%	3,53%	1,86%	6,76%	2,87%	1,03%	2,70%	j=52	7,72%	12,69%	29,87%	0,00%	14,61%	2,85%	0,00%	12,73%	7,73%	0,71%	7,54%	3,54%
j=3	18,73%	3,17%	41,87%	4,23%	8,30%	0,34%	1,74%	9,34%	2,72%	0,87%	6,03%	2,66%	j=53	10,87%	2,34%	31,88%	12,10%	9,06%	1,13%	0,00%	14,82%	5,65%	0,00%	10,41%	1,75%
j=4	4,87%	20,05%	21,84%	2,80%	12,58%	3,49%	1,13%	11,27%	5,68%	5,12%	6,49%	4,66%	j=54	16,44%	4,45%	38,91%	6,05%	8,23%	1,31%	1,44%	10,64%	2,72%	0,19%	7,12%	2,50%
j=5	10,63%	2,65%	37,11%	18,39%	0,00%	1,64%	2,27%	10,40%	4,42%	2,51%	8,36%	1,62%	j=55	10,83%	2,85%	26,62%	12,62%	11,04%	1,17%	0,00%	16,86%	4,18%	0,00%	11,69%	2,14%
j=6	7,72%	12,99%	28,75%	9,46%	5,27%	2,36%	4,13%	9,61%	4,56%	4,78%	6,18%	4,18%	j=56	10,72%	6,62%	23,59%	7,99%	14,22%	1,69%	0,21%	16,97%	3,54%	0,24%	11,13%	3,09%
j=7	13,10%	1,99%	40,25%	14,62%	0,00%	1,34%	3,20%	8,26%	3,61%	4,17%	6,84%	2,63%	j=57	14,68%	7,77%	33,27%	10,65%	5,90%	0,68%	1,24%	9,31%	1,83%	5,29%	6,50%	2,89%
j=8	19,71%	4,14%	31,55%	0,00%	16,03%	0,00%	1,81%	13,96%	0,54%	0,00%	8,27%	4,01%	j=58	9,95%	3,50%	29,20%	14,69%	8,06%	1,82%	0,00%	15,45%	4,42%	0,11%	11,13%	1,67%
j=9	13,74%	3,00%	32,00%	11,69%	8,41%	1,05%	0,94%	13,87%	2,84%	0,55%	9,71%	2,19%	j=59	9,70%	3,69%	45,06%	14,52%	0,00%	1,17%	0,00%	7,19%	8,95%	3,12%	5,95%	0,66%
j=10	19,03%	4,20%	44,93%	1,03%	8,32%	0,00%	2,01%	7,25%	3,96%	1,94%	4,30%	3,04%	j=60	14,49%	0,86%	54,01%	5,18%	3,34%	0,48%	0,70%	5,88%	9,87%	0,00%	4,18%	1,00%
j=11	10,00%	2,45%	31,50%	17,06%	5,52%	1,76%	0,22%	14,56%	4,54%	0,27%	10,87%	1,25%	j=61	9,89%	3,47%	48,65%	11,15%	0,00%	0,92%	1,78%	6,15%	10,43%	1,78%	4,68%	1,09%
j=12	3,91%	18,83%	31,09%	11,35%	0,00%	3,37%	5,55%	5,78%	6,22%	6,26%	3,53%	4,98%	j=62	19,23%	0,97%	63,48%	0,00%	0,00%	0,00%	3,27%	0,00%	8,50%	2,33%	0,00%	2,22%
j=13	13,02%	4,67%	22,52%	7,24%	13,99%	0,67%	2,12%	16,34%	1,81%	2,54%	10,66%	4,40%	j=63	18,97%	2,27%	45,48%	3,04%	7,84%	0,36%	1,73%	8,57%	3,81%	0,02%	5,49%	2,40%
j=14	15,08%	1,22%	39,35%	12,82%	4,72%	1,19%	1,01%	11,46%	3,21%	0,00%	8,52%	1,42%	j=64	17,76%	6,31%	30,68%	0,00%	15,72%	0,72%	1,61%	13,69%	1,17%	0,18%	8,11%	4,03%
j=15	13,07%	18,14%	23,38%	8,82%	6,83%	0,00%	1,44%	5,95%	0,00%	13,86%	3,53%	4,98%	j=65	22,25%	3,17%	39,21%	0,00%	12,30%	0,00%	2,41%	10,71%	0,00%	0,00%	6,35%	3,59%
j=16	10,58%	4,20%	21,90%	12,71%	12,66%	1,14%	0,00%	18,03%	3,06%	0,79%	12,32%	2,62%	j=66	18,36%	2,02%	39,78%	7,20%	7,81%	0,67%	1,65%	10,93%	1,80%	0,00%	7,44%	2,34%
j=17	7,89%	14,81%	7,54%	8,23%	15,33%	0,39%	5,58%	17,31%	1,05%	5,58%	9,91%	6,38%	j=67	16,88%	0,00%	48,14%	13,72%	0,00%	1,28%	1,45%	7,87%	3,44%	0,00%	6,51%	0,72%
j=18	9,02%	12,09%	34,34%	10,19%	0,00%	0,56%	7,54%	5,06%	5,50%	7,90%	2,86%	4,95%	j=68	16,43%	1,41%	40,25%	10,85%	5,44%	1,01%	1,28%	10,96%	2,72%	0,00%	7,96%	1,69%
j=19	10,55%	1,83%	30,10%	16,51%	6,87%	1,54%	0,11%	15,45%	4,14%	0,13%	11,38%	1,41%	j=69	15,37%	4,70%	29,67%	7,80%	11,45%	0,64%	1,07%	13,90%	1,72%	1,47%	9,16%	3,06%
j=20	11,68%	0,00%	50,08%	13,45%	0,00%	1,25%	0,22%	7,71%	9,13%	0,00%	6,38%	0,11%	j=70	15,04%	3,75%	26,84%	6,33%	14,55%	0,59%	0,85%	16,30%	2,00%	0,00%	10,51%	3,24%
j=21	12,08%	13,14%	44,01%	0,00%	6,75%	3,65%	1,31%	5,88%	5,93%	0,91%	3,48%	2,87%	j=71	8,72%	13,73%	11,31%	10,03%	14,09%	0,49%	2,29%	15,92%	1,33%	7,14%	9,79%	5,17%
j=22	15,74%	1,27%	39,97%	11,94%	4,94%	1,11%	1,14%	11,15%	2,99%	0,00%	8,21%	1,53%	j=72	16,52%	1,17%	48,54%	9,96%	0,00%	0,93%	3,18%	5,71%	4,16%	2,81%	4,73%	2,29%
j=23	8,19%	12,91%	17,21%	0,95%	20,01%	2,57%	0,00%	17,98%	4,27%	0,62%	10,78%	4,49%	j=73	8,37%	7,48%	29,15%	13,85%	6,23%	2,18%	1,44%	13,18%	4,81%	1,68%	9,30%	2,33%
j=24	19,34%	2,27%	39,82%	5,47%	8,80%	0,51%	1,85%	10,81%	1,37%	0,00%	7,14%	2,63%	j=74	12,10%	2,97%	28,98%	12,26%	8,52%	1,14%	1,55%	14,45%	3,07%	1,86%	10,21%	2,89%
j=25	17,03%	2,93%	36,36%	4,38%	11,36%	0,41%	1,28%	12,40%	3,08%	0,00%	7,94%	2,84%	j=75	15,18%	3,40%	50,40%	3,54%	5,06%	1,00%	1,06%	6,44%	7,79%	0,17%	4,29%	1,68%
j=26	10,37%	0,58%	39,36%	17,51%	2,24%	1,63%	0,00%	11,99%	6,43%	0,00%	9,46%	0,43%	j=76	11,44%	5,76%	10,80%	6,02%	22,32%	0,56%	0,00%	22,89%	1,51%	0,00%	14,38%	4,32%
j=27	14,04%	3,84%	24,34%	7,70%	14,88%	0,72%	0,65%	17,38%	1,93%	0,00%	11,33%	3,20%	j=77	19,01%	1,60%	44,42%	6,39%	6,20%	0,59%	1,79%	9,07%	2,59%	0,00%	6,23%	2,10%
j=28	14,49%	3,98%	41,28%	9,86%	4,75%	1,80%	1,11%	9,79%	3,90%	0,22%	7,13%	1,70%	j=78	3,38%	17,11%	49,87%	4,41%	0,00%	5,88%	0,00%	2,53%	11,99%	1,37%	2,09%	1,37%
j=29	9,76%	6,42%	22,59%	9,43%	13,89%	1,78%	0,00%	17,50%	3,84%	0,23%	11,64%	2,91%	j=79	11,72%	0,00%	40,97%	19,56%	0,00%	1,82%	0,36%	11,22%	4,90%	0,00%	9,28%	0,18%
j=30	15,21%	0,94%	56,73%	2,77%	3,63%	0,26%	0,82%	4,75%	10,59%	0,00%	3,19%	1,11%	j=80	20,45%	2,04%	53,04%	8,31%	0,00%	0,95%	2,33%	4,36%	2,29%	1,16%	3,61%	1,46%
j=31	11,57%	4,48%	24,00%	4,62%	17,38%	0,43%	0,00%	17,79%	5,20%	0,00%	11,16%	3,36%	j=81	2,19%	28,91%	13,98%	18,79%	0,00%	1,32%	0,00%	2,70%	2,62%	22,34%	2,23%	4,91%
j=32	10,92%	0,00%	53,10%	11,56%	0,00%	1,08%	0,00%	6,63%	11,22%	0,00%	5,49%	0,00%	j=82	3,60%	23,05%	16,05%	13,93%	0,00%	0,50%	11,86%	6,37%	3,00%	11,86%	2,54%	7,25%
j=33	9,68%	15,18%	37,70%	6,46%	4,11%	3,04%	0,89%	5,55%	5,28%	5,44%	3,75%	2,93%	j=83	10,98%	4,19%	21,57%	9,79%	14,88%	0,90%	0,18%	18,55%	3,51%	0,18%	12,26%	2,99%
j=34	7,08%	8,38%	38,10%	16,82%	0,00%	3,14%	0,00%	8,72%	6,62%	2,95%	7,22%	0,97%	j=84	10,76%	0,00%	42,30%	18,86%	0,00%	1,75%	0,12%	10,81%	6,40%	0,00%	8,95%	0,06%
j=35	14,49%	11,68%	54,91%	1,36%	0,00%	2,74%	2,79%	0,28%	6,67%	2,68%	0,00%	2,40%	j=85	9,20%	2,75%	37,42%	18,30%	1,77%	2,44%	0,00%	12,04%	5,78%	0,18%	9,60%	0,53%
j=36	10,37%	11,17%	11,56%	6,13%	16,72%	0,35%	4,13%	17,54%	0,93%	4,68%	10,39%	6,04%	j=86	17,16%	2,47%	45,14%	9,12%	3,69%	1,33%	1,58%	8,45%	3,07%	0,12%	6,23%	1,63%
j=37	12,81%	11,09%	14,73%	1,96%	16,17%	0,00%	5,99%	14,84%	0,00%	6,65%	8,35%	7,41%	j=87	9,12%	2,33%	40,37%	19,00%	0,00%	2,51%	0,00%	10,90%	6,39%	0,19%	9,01%	0,19%
j=38	10,89%	5,82%	35,22%	7,42%	8,05%	1,68%	1,32%	11,26%	5,98%	1,83%	7,67%	2,86%	j=88	10,75%	3,08%	28,07%	12,33%	10,42%	1,13%	0,00%	16,02%	4,66%	0,33%	11,13%	2,09%
j=39	10,87%	1,53%	35,84%	14,59%	5,37%	1,36%	0,28%	13,05%	5,82%	0,33%	9,70%	1,26%	j=89	15,13%	2,86%	45,68%	7,52%	4,60%	0,62%	1,00%	7,80%	6,16%	1,42%	5,51%	1,69%
j=40	10,56%	3,05%	25,39%	14,36%	10,29%	1,32%	0,00%	17,08%	3,55%	0,33%	12,02%	2,06%	j=90	4,78%	20,74%	45,70%	1,17%	2,31%	5,71%	0,69%	2,06%	9,82%	3,24%	1,19%	2,58%
j=41	13,80%	5,30%	34,38%	7,02%	9,75%	1,54%	0,89%	12,52%	3,65%	0,22%	8,36%	2,56%	j=91	13,17%	7,54%	32,68%	12,21%	4,46%	0,87%	2,80%	9,73%	2,35%	4,41%	6,75%	3,03%
j=42	10,36%	3,18%	26,29%	14,95%	9,16%	1,36%	0,42%	16,49%	3,67%	0,42%	11,68%	2,03%	j=92	5,66%	24,70%	15,84%	16,32%	0,00%	0,39%	3,81%	2,92%	1,04%	21,09%	1,97%	6,27%
j=43	15,77%	2,80%	35,37%	9,59%	7,99%	0,86%	1,32%	12,26%	2,32%	0,81%	8,51%	2,39%	j=93	11,09%	7,72%	49,34%	4,25%	0,00%	0,43%	5,14%	2,02%	9,84%	5,61%	0,97%	3,59%
j=44	17,06%	2,37%	39,94%	8,49%	6,80%	0,99%	1,45%	10,79%	2,45%	0,05%	7,54%	2,09%	j=94	18,32%	4,89%	39,54%	4,93%	5,21%	0,36%	4,38%	6,78%	0,98%	5,55%	4,54%	4,52%
j=45	9,84%	7,62%	21,16%	9,09%	12,99%	0,70%	2,20%	16,23%	3,86%	2,20%	10,26%	3,86%	j=95	14,72%	0,76%	62,57%	0,00%	2,93%	0,00%	0,64%	2,56%	13,42%	0,00%	1,51%	0,89%
j=46	11,91%	5,20%	15,63%	6,96%	18,80%	0,65%	0,70%	20,36%	1,74%	0,84%	13,00%	4,20%	j=96	10,58%	11,09%	0,50%	1,41%	27,34%	0,08%	1,95%	24,35%	0,13%	1,97%	14,11%	6,50%
j=47	10,14%	16,41%	24,09%	14,38%	3,67%	0,56%	0,81%	6,67%	1,52%	13,09%	4,77%	3,89%	j=97	18,93%	3,46%	40,14%	4,94%	6,64%	0,42%	3,47%	8,40%	1,14%	3,09%	5,59%	3,77%
j=48	9,81%	3,27%	46,61%	12																					

En utilisant la notation du modèle RB (Chap.3/§3.2), J (nombre des outputs) étant égal à 100 et C (nombre de composants) étant égal à 12. Il est supposé qu'un CBC doit représenter au moins $\kappa=1\%$ du poids de 100 grammes de poudre ($D_j = 100, \forall j$). Pour la déviation absolue tolérée, nous optons pour une structure exacte $\eta_{cj} = 0, \forall c, j$.

2.2 Résultats et commentaires

En appliquant le modèle RB au jeu de données ci-dessus, le problème obtenu contient 896 variables et 2116 contraintes, dont 1200 sont quadratiques non-convexes. La résolution de ce problème, sous le solveur Xpress, montre que seulement 8 CBC sont nécessaires pour satisfaire les $J = 100$ outputs. La composition optimale de ces CBC est fournie dans (§Annexes - Tableau 11). Il faut admettre que, contrairement au cas des engrais où il a été prouvé avec l'aide d'un chimiste qu'une BC chimiquement faisable pourrait être obtenue, la BC trouvée ici ne tient pas compte de la faisabilité chimique de ses composites. Cela ne remet pourtant pas en cause notre approche, une fois que les contraintes liées à cette faisabilité chimique seront connues, elles pourront facilement être intégrées dans le modèle.

		CBC i							
		$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$	$i=6$	$i=7$	$i=8$
Composant c	$c = 1$	10,0%	20,0%	0,0%	0%	29,0%	12,0%	0%	12,0%
	$c = 2$	0%	5,0%	25,0%	35,0%	0%	8,0%	39,0%	0%
	$c = 3$	38,6%	45,0%	50,0%	0%	65,0%	0%	0%	70,0%
	$c = 4$	21,5%	0%	0%	13,0%	0%	0%	21,0%	0%
	$c = 5$	0%	0%	0%	0%	0%	31,0%	0%	0%
	$c = 6$	2,0%	0%	8,0%	0%	0%	0%	0%	0%
	$c = 7$	0%	10,0%	0%	18,0%	4,0%	0%	0%	0%
	$c = 8$	12,3%	0%	0%	5,0%	0%	27,0%	0%	0%
	$c = 9$	5,4%	0%	13,0%	0%	0%	0%	0%	18,0%
	$c = 10$	0%	12,0%	2,0%	18,0%	0%	0%	33,0%	0%
	$c = 11$	10,2%	0%	0%	0%	0%	16,0%	0%	0%
	$c = 12$	0%	8,0%	2,0%	11,0%	2,0%	6,0%	7,0%	0%

Annexes - Tableau 11. Composition optimale des 8 CBC nécessaires pour produire 100 poudres faciales

Les quantités optimales, indiquées dans (§Annexes - Tableau 12), montrent que les CBC ont été utilisées en quantités minimales de $0.01 \times D_j$ grammes, ce qui équivaut à un minimum de 1 gramme puisque toutes les demandes ont été conventionnellement fixées à 100 grammes. La

déviante absolue par rapport aux valeurs cible étant fixée à zéro pour l'ensemble des composants et outputs, la solution proposée permet de répondre de manière exacte aux spécifications chimiques de toutes les poudres faciales considérées. Au-dessous de $I = 8$ CBC, le solveur n'arrive plus à trouver une solution satisfaisant toutes ces spécifications.

	filler	CBC 1	CBC 2	CBC 3	CBC 4	CBC 5	CBC 6	CBC 15	$\sum_i X_{ij}$	D_j		filler	CBC 1	CBC 2	CBC 3	CBC 4	CBC 5	CBC 6	CBC 15	$\sum_i X_{ij}$	D_j		
j=1	23,43	0,00	0,00	29,67	0,00	12,34	0,00	34,56	100,00	=	100	j=51	0,00	0,00	0,00	0,00	36,28	22,52	0,00	41,20	100,00	=	100
j=2	10,13	0,00	34,40	12,12	33,70	0,00	0,00	9,65	100,00	=	100	j=52	0,00	0,00	35,66	0,00	0,00	47,14	0,00	17,20	100,00	=	100
j=3	17,12	0,00	0,00	0,00	43,49	26,76	2,63	10,00	100,00	=	100	j=53	56,26	0,00	0,00	0,00	0,00	29,21	0,00	14,53	100,00	=	100
j=4	0,00	0,00	43,67	6,29	0,00	40,59	9,45	0,00	100,00	=	100	j=54	28,15	0,00	9,29	0,00	36,00	26,56	0,00	0,00	100,00	=	100
j=5	82,00	12,16	0,00	5,84	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	=	100	j=55	58,71	0,00	0,00	0,00	0,00	35,62	0,00	5,67	100,00	=	100
j=6	33,94	11,45	21,00	16,61	0,00	17,00	0,00	0,00	100,00	=	100	j=56	37,17	0,00	11,79	0,00	5,17	45,87	0,00	0,00	100,00	=	100
j=7	67,01	31,99	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	100,00	=	100	j=57	33,87	0,00	0,00	0,00	31,08	19,02	16,03	0,00	100,00	=	100
j=8	0,00	0,00	0,00	0,00	45,33	51,70	0,00	2,98	100,00	=	100	j=58	68,33	0,00	5,67	0,00	0,00	26,00	0,00	0,00	100,00	=	100
j=9	52,63	0,00	0,00	1,25	18,00	27,13	1,00	0,00	100,00	=	100	j=59	58,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,45	32,23	100,00	=	100
j=10	0,00	2,60	0,00	0,00	43,63	26,85	4,92	22,00	100,00	=	100	j=60	24,11	0,00	0,00	0,00	17,51	10,77	0,00	47,61	100,00	=	100
j=11	78,61	0,00	2,35	1,25	0,00	17,80	0,00	0,00	100,00	=	100	j=61	45,88	0,00	0,00	9,91	0,00	0,00	0,00	44,21	100,00	=	100
j=12	34,84	2,11	33,40	29,65	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	=	100	j=62	0,00	19,38	0,00	0,00	33,41	0,00	0,00	47,21	100,00	=	100
j=13	33,66	21,19	0,00	0,00	0,00	45,14	0,00	0,00	100,00	=	100	j=63	14,16	0,00	1,00	0,00	43,34	25,29	0,00	16,21	100,00	=	100
j=14	59,63	0,00	0,00	0,00	25,14	15,22	0,00	0,00	100,00	=	100	j=64	0,00	0,00	9,02	0,00	40,27	50,72	0,00	0,00	100,00	=	100
j=15	0,00	0,00	0,00	0,00	35,97	22,03	42,00	0,00	100,00	=	100	j=65	0,00	0,00	0,00	0,00	60,32	39,68	0,00	0,00	100,00	=	100
j=16	56,76	0,00	0,00	0,00	0,00	40,84	2,40	0,00	100,00	=	100	j=66	33,47	0,00	0,00	0,00	41,34	25,19	0,00	0,00	100,00	=	100
j=17	19,55	0,00	0,00	31,00	0,00	49,45	0,00	0,00	100,00	=	100	j=67	63,80	0,00	0,00	0,00	36,20	0,00	0,00	0,00	100,00	=	100
j=18	28,03	17,80	0,00	32,01	0,00	0,00	0,00	22,16	100,00	=	100	j=68	50,46	0,00	0,00	0,00	31,98	17,56	0,00	0,00	100,00	=	100
j=19	76,78	1,06	0,00	0,00	0,00	22,16	0,00	0,00	100,00	=	100	j=69	31,90	0,00	0,00	0,00	26,71	36,92	4,47	0,00	100,00	=	100
j=20	62,54	0,00	0,00	0,00	5,46	0,00	0,00	32,00	100,00	=	100	j=70	29,43	0,00	0,00	0,00	21,34	46,93	0,00	2,30	100,00	=	100
j=21	0,00	0,00	45,60	0,00	32,63	21,77	0,00	0,00	100,00	=	100	j=71	24,66	0,00	0,00	12,13	2,77	45,44	15,01	0,00	100,00	=	100
j=22	55,52	0,00	0,00	0,00	28,54	15,94	0,00	0,00	100,00	=	100	j=72	46,33	23,42	0,00	0,00	21,04	0,00	0,00	9,21	100,00	=	100
j=23	4,44	0,00	31,00	0,00	0,00	64,56	0,00	0,00	100,00	=	100	j=73	59,60	0,00	12,31	7,99	0,00	20,10	0,00	0,00	100,00	=	100
j=24	25,45	0,00	0,00	0,00	46,15	28,40	0,00	0,00	100,00	=	100	j=74	57,02	15,51	0,00	0,00	0,00	27,48	0,00	0,00	100,00	=	100
j=25	20,36	0,00	0,00	0,00	31,99	36,64	0,00	11,01	100,00	=	100	j=75	16,45	0,00	8,37	0,00	26,53	16,33	0,00	32,32	100,00	=	100
j=26	81,45	0,00	0,00	0,00	0,00	7,21	0,00	11,35	100,00	=	100	j=76	28,00	0,00	0,00	0,00	0,00	72,00	0,00	0,00	100,00	=	100
j=27	35,82	0,00	0,00	0,00	16,19	48,00	0,00	0,00	100,00	=	100	j=77	29,73	0,00	0,00	0,00	44,76	20,00	0,00	5,51	100,00	=	100
j=28	45,86	0,00	11,01	0,00	27,82	15,31	0,00	0,00	100,00	=	100	j=78	20,51	0,00	68,43	0,00	0,00	0,00	0,00	11,06	100,00	=	100
j=29	43,86	0,00	11,35	0,00	0,00	44,80	0,00	0,00	100,00	=	100	j=79	90,96	0,00	0,00	0,00	9,04	0,00	0,00	0,00	100,00	=	100
j=30	12,87	0,00	0,00	0,00	20,41	11,72	0,00	55,00	100,00	=	100	j=80	35,39	0,00	2,97	0,00	58,31	0,00	3,33	0,00	100,00	=	100
j=31	21,51	0,00	0,00	0,00	0,00	56,06	0,00	22,43	100,00	=	100	j=81	21,91	0,00	11,06	0,00	0,00	0,00	67,03	0,00	100,00	=	100
j=32	53,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	46,21	100,00	=	100	j=82	24,95	0,00	0,00	65,87	0,00	0,00	0,00	9,18	100,00	=	100
j=33	15,95	0,00	34,00	0,00	22,37	13,27	14,41	0,00	100,00	=	100	j=83	44,93	0,00	0,00	1,00	0,00	48,01	0,00	6,06	100,00	=	100
j=34	70,76	0,00	21,61	0,00	0,00	0,00	7,64	0,00	100,00	=	100	j=84	87,70	0,00	0,00	0,00	3,00	0,00	0,00	9,30	100,00	=	100
j=35	0,00	0,00	34,23	5,54	44,85	0,00	3,04	12,34	100,00	=	100	j=85	85,10	0,00	9,18	0,00	0,00	5,72	0,00	0,00	100,00	=	100
j=36	17,28	10,87	0,00	16,93	0,00	53,92	1,00	0,00	100,00	=	100	j=86	42,42	0,00	6,06	0,00	39,61	11,91	0,00	0,00	100,00	=	100
j=37	0,00	32,74	0,00	15,10	0,00	52,16	0,00	0,00	100,00	=	100	j=87	88,38	0,00	9,30	0,00	0,00	0,00	0,00	2,32	100,00	=	100
j=38	34,50	13,20	12,34	0,00	0,00	25,96	0,00	14,00	100,00	=	100	j=88	56,38	0,00	0,00	0,00	0,00	33,60	1,00	9,02	100,00	=	100
j=39	67,88	2,79	0,00	0,00	0,00	17,33	0,00	12,00	100,00	=	100	j=89	30,77	0,00	0,00	0,00	25,09	14,85	4,29	25,00	100,00	=	100
j=40	65,80	0,00	0,00	0,00	0,00	33,20	1,00	0,00	100,00	=	100	j=90	0,00	0,00	71,41	1,12	12,15	7,44	4,88	3,00	100,00	=	100
j=41	32,66	0,00	11,12	0,00	22,31	31,46	0,00	2,45	100,00	=	100	j=91	43,56	1,48	0,00	9,52	23,40	14,40	7,64	0,00	100,00	=	100
j=42	68,14	0,00	0,00	2,32	0,00	29,54	0,00	0,00	100,00	=	100	j=92	19,31	18,65	0,00	10,82	0,00	0,00	51,22	0,00	100,00	=	100
j=43	43,02	2,30	0,00	0,00	27,30	25,78	1,61	0,00	100,00	=	100	j=93	9,51	20,89	3,00	16,93	0,00	0,00	0,00	49,67	100,00	=	100
j=44	39,47	0,00	2,45	0,00	36,14	21,94	0,00	0,00	100,00	=	100	j=94	18,18	32,85	0,00	0,00	27,30	16,80	4,88	0,00	100,00	=	100
j=45	34,89	0,00	0,00	12,20	0,00	41,91	0,00	11,00	100,00	=	100	j=95	0,00	0,00	0,00	0,00	15,99	9,47	0,00	74,54	100,00	=	100
j=46	32,36	7,00	0,00	0,00	0,00	60,64	0,00	0,00	100,00	=	100	j=96	0,00	0,00	1,00	10,81	0,00	88,19	0,00	0,00	100,00	=	100
j=47	28,14	0,00	0,00	0,00	20,36	11,85	39,65	0,00	100,00	=	100	j=97	21,23	20,74	0,00	0,00	34,80	21,42	1,81	0,00	100,00	=	100
j=48	53,66	0,00	0,00	9,33	0,00	0,00	0,00	37,01	100,00	=	100	j=98	12,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	87,40	0,00	100,00	=	100
j=49	76,04	18,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,66	100,00	=	100	j=99	28,16	0,00	0,00	4,02	18,31	0,00	47,30	2,21	100,00	=	100
j=50	15,93	19,30	0,00	0,00	11,90	44,86	0,00	8,01	100,00	=	100	j=100	27,12	7,88	0,00	23,00	0,00	0,00	42,00	0,00	100,00	=	100

Annexes - Tableau 12. Quantités optimales à prélever des 8 CBC pour satisfaire les J = 00 formules cosmétiques (solution du RB)

Les résultats ci-dessus montrent que le RB peut permettre une énorme massification des flux en les réduisant de 100 % à seulement 8 %. Cela entraînerait une série de simplifications logistiques permettant entre autre la baisse des prix de vente. La personnalisation ne serait donc plus considérée comme une forme de luxe très coûteuse, mais deviendrait accessible au grand public qui serait ainsi satisfait et disposerait de produits parfaitement adaptés non seulement à ses besoins en termes de teinte (couleur de peau, de cheveux...) mais à tous ses besoins dermocosmétiques.