

Université Paris II- Panthéon-Assas
École doctorale d'économie, gestion, information
et communication (EGIC) (ED 455)



Thèse de doctorat en Sciences de Gestion
soutenue le 29 novembre 2021

Construction de modèles d'aide à la décision pour une planification intégrée des activités de la Supply Chain minière

Auteur : Asma Rakiz,

Laboratoire de Recherche en Sciences de Gestion Panthéon-Assas (LARGEPA) ;
EMINES School of Industrial Management - Université Mohammed VI
Polytechnique

Sous la direction du Professeur Pierre Féliès

Membres du jury :

Pr. Blandine Ageron, Grenoble-Alpes Université, Rapporteur

Pr. Frédéric Gautier, IAE de Paris, Paris I Panthéon-Sorbonne, Rapporteur

Pr. Nabil Absi, LIMOS, Ecole des mines de Saint Etienne, Suffragant

Pr. Véronique Chanut, Directrice du LARGEPA, Paris II Panthéon Assas,
Suffragant

Pr. Nicolas Cheimanoff, Directeur de l'EMINES, Université Mohammed VI
Polytechnique, Suffragant

Pr. Nikolay Tchernev, LIMOS, IAE Clermont Ferrand, , Suffragant

M. Pascal Zammit, Professeur Associé Paris II Panthéon Assas, Coheziv Group,
Suffragant



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.

A maman, Wafa, A ma fille, Ghita, je dédie ce travail de thèse...

Remerciements

Mes premiers remerciements vont naturellement à mon directeur de thèse, le Professeur Pierre Féliès. Je le remercie pour son support, ses orientations, et sa sympathie. Son soutien inconditionnel au cours de ce long chemin m'a donné la force pour avancer.

J'adresse également ma gratitude au Professeur Nicolas Cheimanoff, de m'avoir donné l'opportunité de mener ma thèse au sein du laboratoire de l'EMINES. Je leur remercie également de m'avoir octroyé la bourse de l'EMINES. Les années passées à l'EMINES m'ont offert un environnement stimulant et propice à la recherche.

Je souhaite également remercier le Professeur Veronique Chanut, directrice du LARGEPA, d'avoir accepté mon inscription en doctorat au sein de son établissement.

Je remercie les Professeurs Blandine Ageron et Frédéric Gautier, rapporteurs de mon travail doctoral, pour le temps et l'effort qu'ils ont consacré et l'évaluation de ma thèse.

Et puis la thèse nous permet également de rencontrer des personnes qui nous marquent à vie, tant sur le plan scientifique qu'humain. Je m'adresse ici aux Professeurs Nikolay Tchernev et Nabil Absi :

Je remercie le Professeur Nikolay Tchernev pour sa disponibilité, sa bienveillance et son implication sans faille dans mon travail depuis son départ. Ses conseils m'ont orienté vers la bonne voie.

Ma reconnaissance et ma gratitude les plus profondes vont au Professeur Nabil Absi. Je le remercie pour son soutien, son humanité, et sa gentillesse. Je le remercie également d'avoir accepté de travailler avec moi et de m'avoir gentiment accueillie au sein de son équipe de recherche à Gardanne.

Je remercie les collaborateurs de l'entité gestion des flux du gisement Gantour à l'OCP, pour leur réceptivité et collaboration tout le long de mes années de thèse.

Mes remerciements vont également aux doctorants qui m'ont porté compagnie durant cette aventure. Les doctorantes (Najat, Latifa, Mouna et Meryem) avec lesquelles j'ai partagé plusieurs souvenirs au sein de mon laboratoire à l'EMINES. Les doctorants de LARGEPA (Meer et Tom) avec lesquels j'ai partagé les deux dernières années de thèse.

Mes derniers, mais aussi mes plus affectueux remerciements, vont à ma maman Wafa, qui m'a inculqué les vraies valeurs de travail, de persévérance et de courage.

Résumé

Depuis quelques années, nous assistons au développement des recherches en sciences de gestion vers les approches globalisantes et intégrées. La notion du Supply Chain Management (SCM) est née durant les années 1990 comme une approche de management favorisant la coordination et l'intégration des entités organisationnelles internes et externes à l'entreprise.

L'approche que nous adoptons s'inscrit dans cette mouvance. Notre objectif majeur est d'étendre le découplage des décisions de planification du flux physique dans le contexte de l'industrie minière. Pour cela, nous faisons appel aux techniques de la modélisation mathématique comme outils permettant de saisir la complexité de notre terrain de recherche. Notre thèse se positionne donc dans le cadre de deux thématiques se rattachant au SCM à savoir, **le management logistique et l'aide à la décision**.

Par ailleurs, notre thèse se déroule dans le cadre de la chaire OCP-SA d'optimisation industrielle, rattachée à l'EMINES School of Industrial Management - Université Mohammed VI Polytechnique mais également aussi au Laboratoire de Recherche en Gestion de Paris II (LARGEPA). L'objectif industriel qui lui est associé consiste en la conception d'un outil d'aide à la décision dédié au processus logistique multi-sites de Youssoufia (un des sites de l'axe centre de l'OCP), l'enjeu étant de maximiser la satisfaction de la demande tout en minimisant les coûts opérationnels totaux, en respectant bien entendu, les contraintes et caractéristiques structurelles des ressources logistiques.

Partant de cet objectif industriel, la problématique industrielle a été ramenée au problème théorique du lot sizing (LSP). Ensuite, la réalisation d'une revue de littérature portant sur le LSP a révélé l'absence de la prise en compte des contraintes et caractéristiques relatives au champ industriel minier. Notre objectif scientifique consiste donc à contribuer, modestement, à l'exploration de cette piste non encore creusée. En d'autres termes notre premier objectif scientifique porte sur le couplage d'un problème de lot sizing multi-niveaux,

multi-produits, multi périodes, avec un problème de transport par trains conditionnés par des fenêtres de temps. De l'autre côté, le second objectif scientifique est d'adapter ce problème théorique aux caractéristiques et spécificités industrielles minières.

Au-delà de ces objectifs théoriques, les travaux de recherche présentés dans ce manuscrit proposent un environnement de planification intégrée dans lequel sont couplés systèmes de production et stockage avec celui du transport. Cette démarche est facilement transposable à d'autres contextes industriels telles que d'autres industries minières, métallurgiques, ou chimiques. De plus, l'optimisation globale des décisions de la Supply Chain permet des apports managériaux indéniablement importants, telle que la minimisation du coût total et l'amélioration de la performance globale du système. Ces améliorations sont possibles grâce à la mutualisation des ressources logistiques et la meilleure prise en compte de la propagation en amont et en aval des décisions. Également, cette démarche est facilement extensible à d'autres domaines industriels.

Descripteurs : Supply Chain Management, Lot sizing, Outils d'aide à la décision, Intégration des décisions, Industrie minière, Planification, Flux physique, Transport ferroviaire.

Title and Abstract

Proposition of decision support models for an integrated planning of mining activities

In recent years, research in management sciences has been oriented towards the development of global and integrated approaches. The concept of supply chain management (SCM) emerged in the 1990s as a management approach that promotes the coordination and integration of a company's internal and external organizational entities.

The approach we take in this thesis is in line with this trend. Our major objective is to extend the integration of physical flow planning decisions in the context of the mining industry. To do so, we use mathematical modeling techniques as an operational research tool to capture the complexity of our research field. Our thesis is therefore positioned within the framework of two themes related to SCM, namely logistics and decision support.

Furthermore, our thesis is conducted within the framework of the OCP-SA Chair of Industrial Optimization, attached to the EMINES School of Industrial Management - Mohammed VI Polytechnic University. More precisely, it focuses on the multi-site logistics system of Youssoufia located in the central axis of OCP. The associated industrial objective is the design of a decision support tool dedicated to this logistic process, the challenge being to maximize demand satisfaction while minimizing total operational costs, while respecting, of course, the constraints and structural characteristics of logistic resources.

Starting from this industrial objective, the industrial problem was returned to the theoretical problem of lot sizing (LSP). Then, the literature review conducted on the LSP revealed that the constraints and characteristics of the industrial mining domain were not taken into account in previous research. Our scientific objective is therefore to contribute, modestly, to the exploration of this still unexplored path. In other words, this research focuses, on the one hand, on the coupling of a multi-level, multi-product, multi-period lot sizing problem with a problem of transport by trains conditioned by time windows. On the other hand, the second

scientific objective is to adapt this theoretical problem to the characteristics and specificities of mining industry.

Beyond these theoretical objectives, the research work presented in this manuscript proposes an integrated planning environment in which the production and storage system are coupled with that of transport. This approach is easily transposable to other industrial contexts such as other mining, metallurgical or chemical industries. In addition, the global optimization of supply chain decisions leads to undeniably significant improvements. Indeed, the use of the global approach allows, due to the mutualization of the logistic resources, a minimization of the total cost. Moreover, it allows a good integration of the sub-systems of the logistic chain and thus a better consideration of the propagation upstream and downstream of the decisions. Also, this approach is easily extensible to other industrial fields.

Keywords: Logistic, Supply Chain Management, Engineering research, Decision Support System, Decision integration, Mining Industry, Planning, Physical flow, Train transport, Time windows, Lot sizing, Modeling, Optimization.

Sommaire

<i>Introduction générale</i>	12
<i>Chapitre I : Contextualisation industrielle et scientifique de la recherche</i>	29
1. Introduction	30
2. Contexte industriel	31
3. Rapport avec le terrain de recherche	44
4. Contexte scientifique : la planification dans la supply chain minière	49
5. Définition de la problématique industrielle	55
6. Définition de la problématique scientifique	57
7. Facteurs de complexité	58
8. Conclusion	60
<i>Chapitre II : Revue de la littérature - le lot sizing associé au problème du transport</i>	61
1. Introduction	62
2. Problème classique du Lot Sizing -	63
3. Le lot sizing mono-niveau	70
4. Le lot sizing multi-niveaux avec capacité finie (MLCLSP)	74
5. Le problème du MLLSP intégré au problème de transport	77
6. Le problème du lot sizing multi-niveaux - Méthodes de résolution	82
7. Le lot sizing – applications industrielles	89
8. Synthèse de l'état de l'art	91
9. Conclusion	96
<i>Chapitre III : Modélisation du problème MLLSP-TTW</i>	99
1. Introduction	100
2. Description détaillée de la Supply Chain Minière de l'OCP	101

3. Modélisation du problème	101
4. Formalisation des contraintes industrielles	108
5. Applications industrielles	126
6. Conclusion	145
<i>Chapitre IV Approches de planification intégrée vs par décomposition pour le problème du MLLSP-TTW</i>	147
1. Introduction	148
2. Approches de résolution	149
3. Expérimentations	170
4. Conclusion	187
<i>Conclusion générale</i>	189
Bibliographie	201
Table des matières	221
Liste des figures	224
Liste des tableaux	226
Liste des algorithmes	227

Introduction générale

Contexte des travaux : L'aide à la décision pour la logistique

Force est de constater que la quête du profit a progressivement migré d'une approche locale et individualiste vers une approche globale et intégrée qui repose sur le décloisonnement des entités et sur la prise en compte de leurs interdépendances mutuelles. Elle ne passe plus uniquement par la maîtrise de ses propres outils de production, mais nécessite désormais la maîtrise de l'ensemble des acteurs organisationnels faisant partie de l'environnement industriel plus ou moins proche de l'entreprise. Une telle migration permet ainsi de tirer de la valeur de la coordination des différentes décisions prises dans le cadre du processus logistique (Fenies et al 2010). Ce profit se justifie, entre autres, par la mutualisation des ressources logistiques, une meilleure négociation des contraintes entre les différents acteurs, ainsi qu'une meilleure propagation des décisions dans les maillons de la chaîne de valeur d'un bien ou d'un service (Fenies et Tchernev 2012).

La logistique a pour but de concevoir, de gérer, et de piloter le système logistique de l'entreprise. Le système logistique, quant à lui, est composé de *l'ensemble de moyens ordonnés de manière à transformer des flux de matières premières en flux de produits finis* (Tchernev 1997). Dans ce contexte, le Supply Chain management (SCM) voit le jour. Ce concept se définit comme *une démarche permettant l'intégration d'unités organisationnelles qui utilisent des ressources restreintes et qui coordonnent leur action par un processus logistique intégré afin d'améliorer prioritairement leur performance collective mais aussi à terme leur performance individuelle* (Stadtler 2005 ; Fénies 2006). Cette notion débouche sur un nouveau courant de recherche regroupant les sciences pour l'ingénieur et le management logistique. Parmi les champs de recherche se rattachant à ces disciplines, notre recherche se situe sur deux thèmes du SCM, à savoir, **l'aide à la décision et le management logistique**.

Les systèmes logistiques sont des systèmes complexes, leur conception et leur exploitation posent de nombreux problèmes managériaux, industriels, et

environnementaux. Parmi les enjeux majeurs des industriels, la planification des systèmes logistiques est au cœur de leurs préoccupations. La compétitivité et la performance d'un système logistique passe obligatoirement par sa capacité à livrer aux clients des produits en quantité demandée, au moment voulu, et au coût de revient le plus bas (Féniès 2006). Autrement dit, l'enjeu est de trouver un équilibre entre le taux de satisfaction de la demande (évalué par le rapport « demande satisfaite / demande reçue ») et les différents coûts engendrés par la fabrication effective de la demande (production, stockage, transport, etc.). L'ambition est donc de déterminer, à tout moment, les quantités de flux de physique (matières premières, produits intermédiaire, produits finis) qui circulent dans chaque unité du système logistique afin d'arriver à satisfaire le maximum de la demande en minimisant le coût. Pour que ce programme de production soit réalisable, il devrait prendre en considération l'ensemble des caractéristiques et contraintes structurelles du système logistique considéré. Or, ces systèmes ne peuvent être performants que si l'on dispose d'outils permettant de capturer et traduire leurs propriétés structurelles et leur complexité systémique. La planification se fait toujours au moyen d'un modèle. Pour cela, on fait appel dans nos travaux de recherche aux techniques de modélisation basées sur les méthodes de la recherche opérationnelle.

La planification des systèmes industriels dans le cadre d'un processus logistique intégré assure les conditions nécessaires pour produire en amont les besoins de la demande aval, et uniquement celle-ci. L'approche intégrée de planification permet donc de fournir une solution globale qui offre d'un côté une augmentation de la réactivité du système logistique, et de l'autre côté une minimisation des coûts opérationnels totaux (Lambert et Cooper 2000). En d'autres termes, l'intégration de la notion de SCM et la maîtrise du processus logistique, permettent une planification cohérente et synchronisée des moyens constituant le système logistique (opérations de production, de stockage, de transport...)

Cette thèse adopte une approche intégrée de la planification. Nous avons choisi de mener une réflexion sur le système logistique dans sa globalité, en intégrant l'ensemble des maillons et en optimisant simultanément l'ensemble des décisions relatives au flux physique à savoir la production, le stockage et le transport. Notre objectif principal est de concevoir un outil, unique, permettant la planification intégrée des sous-systèmes appartenant au système logistique. Un sous-système étant défini par (Kolb 1972) comme « *un ensemble d'opérations élémentaires nécessaires à la réalisation d'une ou plusieurs*

des fonctions du système logistique, à savoir, l'approvisionnement, la production et la distribution ».

La problématique de cette thèse est née dans le cadre d'une recherche action menée au sein du Groupe OCP dont la complexité est décrite dans la partie suivante.

Complexité induite par l'environnement industriel de la Supply Chain du groupe OCP

En tant que leader mondial dans le marché mondial du Phosphate, le groupe OCP est confronté à une demande internationale qui ne cesse d'augmenter, à cause, entre autres raisons, de la croissance démographique et donc de l'évolution des besoins alimentaires mondiaux. Devant des enjeux de telles envergures, la maîtrise des maillons de sa chaîne logistique s'avère incontournable afin de pérenniser son leadership sur la scène mondiale. Cette thèse voit donc le jour dans ce cadre et a pour but de concevoir un outil de planification intégrée des décisions de production, stockage et transport dans un horizon opérationnel / tactique. Plus précisément, elle s'intéresse au système logistique multi-sites de Youssoufia de l'axe centre de l'OCP. Ainsi, l'objectif industriel qui lui est associé consiste en la mise en œuvre d'un outil d'aide à la décision dédié à ce processus logistique, l'enjeu étant de maximiser la satisfaction de la demande tout en minimisant les coûts opérationnels totaux, en respectant, bien entendu, les contraintes et les caractéristiques structurelles des ressources logistiques. De plus, notre objectif industriel s'étend également sur la planification du transport des produits finis par voie ferroviaire avec prise en compte des fenêtres de temps. Autrement dit, l'objectif est de réaliser une intégration des processus de production et de stockage, avec celui du transport par train dans le système logistique minier étudié.

L'industrie de process en général, et l'industrie minière en particulier, a été longuement négligée par la littérature de planification de la *Supply Chain* (Jans et Degraeve 2008a; Crama, Pochet, et Wera 2001). En effet, à cause de sa complexité intrinsèque, ce domaine industriel pose plusieurs défis pour les chercheurs. Parmi ces défis nous pouvons citer (notons que ces facteurs de complexité seront détaillés plus amplement dans la section 7 du Chapitre I) :

- L'originalité des caractéristiques structurelles des systèmes de production, de stockage et de transport en comparaison avec les systèmes manufacturiers classiques (par exemple l'industrie agroalimentaire ou automobile).
- La nature hybride des flux physiques dans le système logistique étudié (Azzamouri 2018; Retmi 2018), continus en ce qui concerne le système de production et le transport par convoyeurs, et discrets au niveau du transport par trains.
- L'impossibilité de prédéfinir des recettes de production figées dans les différents niveaux de production. Les recettes et les délais de production sont fortement influencés par la composition chimique des minerais extraits de la mine, d'un côté, et des spécifications chimiques des produits finis vendus aux clients de l'autre côté.
- Des installations lourdes, dans lesquelles les changements de produits dans les lignes de production et dans les unités de stockage nécessiter des temps importants. Il est donc crucial de tenir compte de la propagation en amont et en aval des décisions prises dans un point donné du système logistique.
- Une forte intensité capitalistique en raison de l'importance des ressources matérielles investies (installations d'extraction du minerai, tailles des unités de fabrication...). En conséquence, le coût d'acquisition élevé des installations et des équipements impose aux managers de garder des taux d'utilisation élevés des ressources, ce qui revient à programmer des lots de production de taille relativement grande, contrairement aux pratiques actuelles de production des systèmes industriels classiques

Le récit de ces facteurs de complexité du champ de recherche minier montre l'originalité de celui-ci d'une part, et écarte la possibilité d'appliquer les outils de planification existant dans la littérature d'autre part (Azzamouri 2018). D'où la nécessité de concevoir un environnement de planification intégré dédié au processus logistique minier.

Questions de recherche

Partant de l'objectif industriel, la problématique scientifique associée à ce doctorat a été ramenée au problème théorique du *lot sizing* (LSP). Initié en 1958 par (Wagner et Whitin 1958a), ce problème occupe depuis une place centrale dans les recherches en planification de la production. Il répond essentiellement aux questions suivantes : « Quels sont les produits à fabriquer à chaque période ? », « Quelle est la quantité à produire pour chaque produit ? », « Sur quelle ressource produire chaque produit ? ». Bien entendu, pour répondre à ces questions, les décisions sont prises dans la perspective de trouver le meilleur équilibre entre les objectifs financiers et ceux de la satisfaction de la demande. Bien que ce problème ait fait l'objet d'un nombre important de recherches et de publications (cf. chapitre 2 du présent manuscrit) son adaptation à l'industrie minière demeure une piste peu explorée par les chercheurs.

En effet, la réalisation d'un état de l'art portant sur la littérature du LSP montre l'absence de la prise en compte des contraintes et caractéristiques relatives à ce champ industriel. De plus, le couplage du problème de production-stockage avec celui du transport ferroviaire avec fenêtre de temps n'a pas été considéré auparavant dans le cadre des recherches sur le LSP. Notre impératif dans le cadre de cette thèse consiste à ajouter des contraintes additionnelles liées au transport et donc de contribuer, modestement, à l'exploration de cette piste non encore creusée. En d'autres termes, l'objectif scientifique de cette recherche porte sur le couplage d'un problème de *lot sizing* multi-niveaux, multi-produits, multi périodes, avec un problème de transport par trains conditionnés par des fenêtres de temps. Nous nommons ce problème MLLSP-TTW (*Multi Level Lot Sizing Problem integrated with train transport with time windows*).

Ainsi le contexte de nos travaux, qui se déroule dans le cadre de l'aide à la décision pour la logistique dans le contexte minier, amène directement les questions de recherche suivantes :

1. Dans quelle mesure les outils de planification existants dans la littérature sont-ils applicables à la planification des flux physiques dans le contexte logistique minier ?

2. En quoi l'intégration des décisions de planification des entités d'un système logistique minier à l'aide du MLLSP-TTW est-elle créatrice de facteurs clés de succès pour les acteurs du Supply Chain Management ?

Les travaux de recherche présentés dans ce manuscrit proposent un environnement de planification intégrée dans lequel sont couplés le système de production avec celui du transport. Cette démarche, initialement mise en œuvre dans le cadre du système logistique de l'OCP, est facilement transposable à d'autres contextes et champs industriels tels que d'autres industries minières, métallurgiques, ou chimiques. De plus, l'optimisation globale des décisions de la *Supply Chain* dans le cadre d'une chaîne logistique interconnectée permet des améliorations indéniablement importantes. En effet, le recours à l'approche globale permet, grâce à la mutualisation des ressources logistiques, une minimisation du coût total. De plus, elle permet également une bonne intégration des sous-systèmes de la chaîne et donc une meilleure prise en compte de la propagation en amont et en aval des décisions. Également, cette démarche est facilement extensible à d'autres domaines industriels.

Positionnement scientifique

Cette recherche se positionne en sciences de gestion et tout particulièrement dans le domaine du Supply Chain Management. Dans cette thèse, le chercheur rencontre l'industriel autour d'une problématique, contribuant à la fois à la création de savoir actionnable sur le plan pratique, mais également à la création de connaissances nécessaires au progrès scientifique. C'est donc une recherche action adoptant des démarches de type *ingénierique*.

L'*Action research*, courant de recherche développé en 1947 par le psychologue Lewin dans son célèbre papier (Lewin 1947), a pour vocation principale celle de rapprocher la recherche du terrain, dans le temps et dans l'espace. Son point de départ s'articule autour de la rencontre du praticien et du chercheur autour d'un besoin identifié de changement, ou bien d'un problème dont ils pensent que la recherche apportera des éléments de solution comme le schématise la Figure 1.

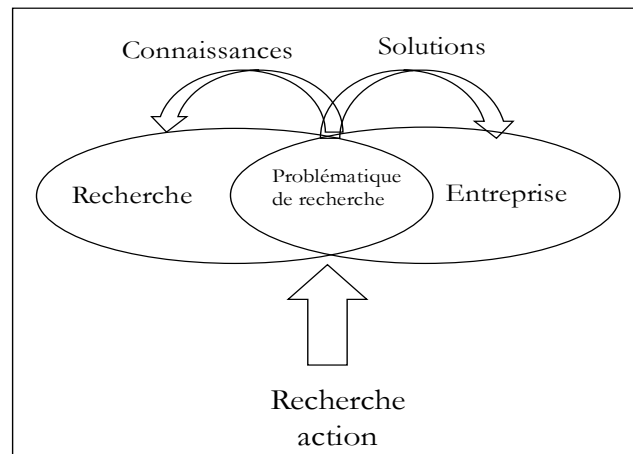


Figure 1: Démarche de recherche de type recherche action

La recherche ingénierique s'intéresse principalement à des processus de changement organisationnel et implique les acteurs affectés par le changement dans la démarche de recherche. Selon (Chanal, Lesca, et Martinet 1997), la recherche ingénierique se distingue par l'émergence d'un nouveau statut de « *chercheur-ingénieur qui conçoit l'outil support de sa recherche, le construit, et agit à la fois comme animateur et évaluateur de sa mise en œuvre dans les organisations, contribuant ce faisant à l'émergence de représentations et de connaissances scientifiques nouvelles* ». Cette démarche est illustrée par la Figure 2.

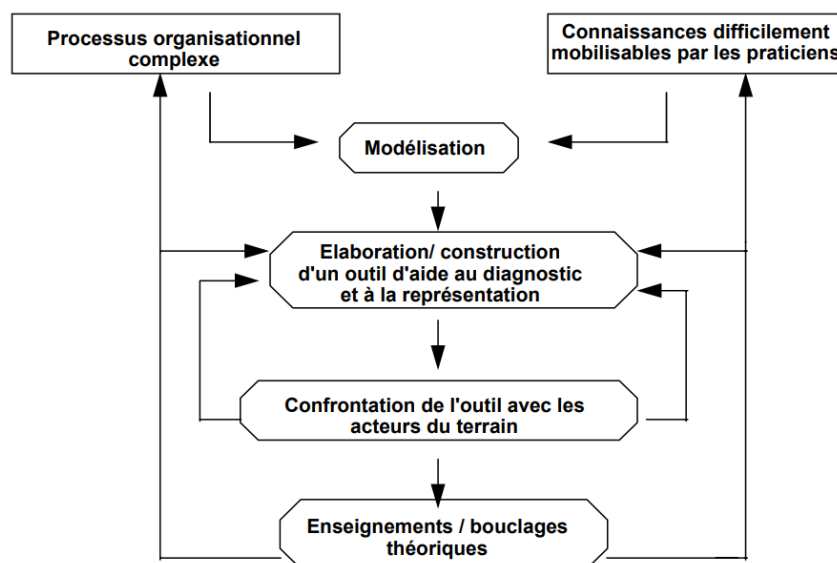


Figure 2: Processus de recherche ingénierique tel que décrit par (Chanal, Lesca, et Martinet 1997)

Selon (Martinet 1996), la démarche de recherche ingénierique représente l'un des genres possibles des sciences de gestion perçue plutôt sous l'angle de l'ingénierie, de la conception ou de ce qui est aussi appelé les sciences de l'artificiel. Pour lui, ce genre de recherche débouche sur « *une connaissance procédurale, une pensée-méthode susceptible d'aider l'acteur à bien conduire sa raison, à se saisir des situations complexes qu'il doit affronter et à instruire des choix en meilleure connaissance de cause comme de finalité et de conséquences* ». Il s'agit donc de contribuer à la mise en œuvre de conception organisationnelle nouvelle en construisant « *des sciences de l'action, de l'ingénierie organisationnelle sur la base de paradigmes et de corpus théoriques largement originaux par rapport aux courants dominants* » (Bréchet et Desreumaux 1998).

De ce fait, cette thèse s'inscrit pleinement dans cette démarche de recherche action ingénierique dans laquelle chercheur et praticien sont engagés afin de rapprocher la recherche du terrain d'un côté, mais aussi afin de résoudre un problème industriel en concevant des outils scientifiques adaptés. Son point de départ est un problème complexe sur le terrain avec un état des lieux des connaissances et des outils disponibles dans la littérature. Nous avons donc procédé à une compréhension et analyse approfondies du système logistique étudié pour proposer ensuite un ensemble d'outils et de méthodes permettant de résoudre le problème sous différents angles de vue.

Enfin, cette thèse se positionne à l'interface entre les sciences de gestion et le génie industriel. Cette filiation duale se manifeste à travers :

- La mise en œuvre d'un outil d'aide à la décision permettant une gestion intégrée des flux au niveau du système logistique étudié ;
- Les outils et méthodes mobilisés qui sont issus de la recherche opérationnelle (RO), qui appartient historiquement au corpus des Sciences de Gestion ; cette thèse s'inscrit dans une démarche cumulative de la recherche et reprend ainsi une démarche et des construits issus de (Giard, 2003), (Fenies, 2005, 2006), (Retmi, 2018) , (Azzamouri, 2018), (Bara, 2020).

Cadre méthodologique

L'objectif premier de ce travail de thèse a été de répondre à la problématique industrielle posée par notre partenaire industriel OCP. Cette problématique industrielle a donné ensuite naissance à une problématique scientifique originale et unique. La résolution de la problématique industrielle n'a pas constitué l'intégralité de nos travaux de recherche réalisés, mais plutôt une base de départ. Aussi, les travaux effectués sont transposables à d'autres industries ayant un système logistique avec des caractéristiques similaires (autre industrie minière, industrie métallurgique, ...). Pour répondre à cette problématique, nous avons suivi la méthodologie de modélisation pour l'aide à la décision proposée par (Féniès 2006; Tchernev 1997). Dans ce contexte, l'objectif de l'approche de modélisation est de construire un modèle fiable d'un système complexe existant ou non (Tchernev 1997). Cette méthodologie cherche donc à trouver des solutions satisfaisantes aux problèmes posés dans le cadre de systèmes de complexités différentes. Ce processus de modélisation repose sur la construction consécutive et itérative de trois modèles (Féniès 2006; Tchernev 1997), à savoir :

- **Modèle de connaissance** : Il a pour objectif la description du fonctionnement et de la structure du système, il constitue la phase du recueil et de la formalisation de la connaissance. (Le Moigne 1991) définit la modélisation de la connaissance comme une représentation intelligible d'un processus complexe pour permettre aux acteurs organisationnels d'agir plus efficacement. Au cours de cette phase, le chercheur se met dans la posture de l'observateur qui traduit les phénomènes observés dans le terrain en représentation faciles à interpréter dans le monde scientifique. Ce modèle peut être effectué dans un langage naturel ou bien graphique réalisé à l'aide de méthodes et outils. Il peut également exister dans l'esprit des acteurs du système sous la forme d'un modèle mental, ou bien prendre forme sur un support (dessins, supports informatiques, ...).
- **Modèle(s) d'actions** : C'est la traduction partielle (dérivation) ou complète (traduction) du modèle de connaissance en un ou plusieurs modèles exploitables dans un environnement informatique. Ces modèles peuvent être : des modèles mathématiques, heuristiques, métaheuristiques, modèles de simulation, ... Une

démarche de résolution peut être basée sur le couplage ou bien le chaînage de plusieurs modèles.

- **Modèle de résultats** : Consécutif à la mise en œuvre du modèle d'action, il a pour objectif d'évaluer et interpréter les résultats de l'étude afin de déduire des actions sur le système réel. Cette étape comprend (1) la conception des expériences (en fonction des conclusions à mettre en évidence, un ensemble d'expériences appropriés est conçu), (2) la validation du modèle d'action (étape suite à laquelle des modifications sur les modèles d'action sont éventuellement réalisées) (3) l'exécution des expériences et, à la fin, (4) la construction du modèle des résultats. Le modèle de résultats permet ensuite de faire des bouclages cruciaux dans la démarche méthodologique. D'un côté, le modèle de résultats permet d'effectuer des bouclages avec le terrain industriel en proposant des solutions au problème initialement posé. De l'autre côté, il permet de réaliser des bouclages avec la littérature scientifique en proposant une contribution scientifique originale et généralisable à d'autres contextes industriels.

La Figure 3 détaille les étapes méthodologiques suivies lors de cette thèse, ainsi que notre contribution à chacune de ces étapes.

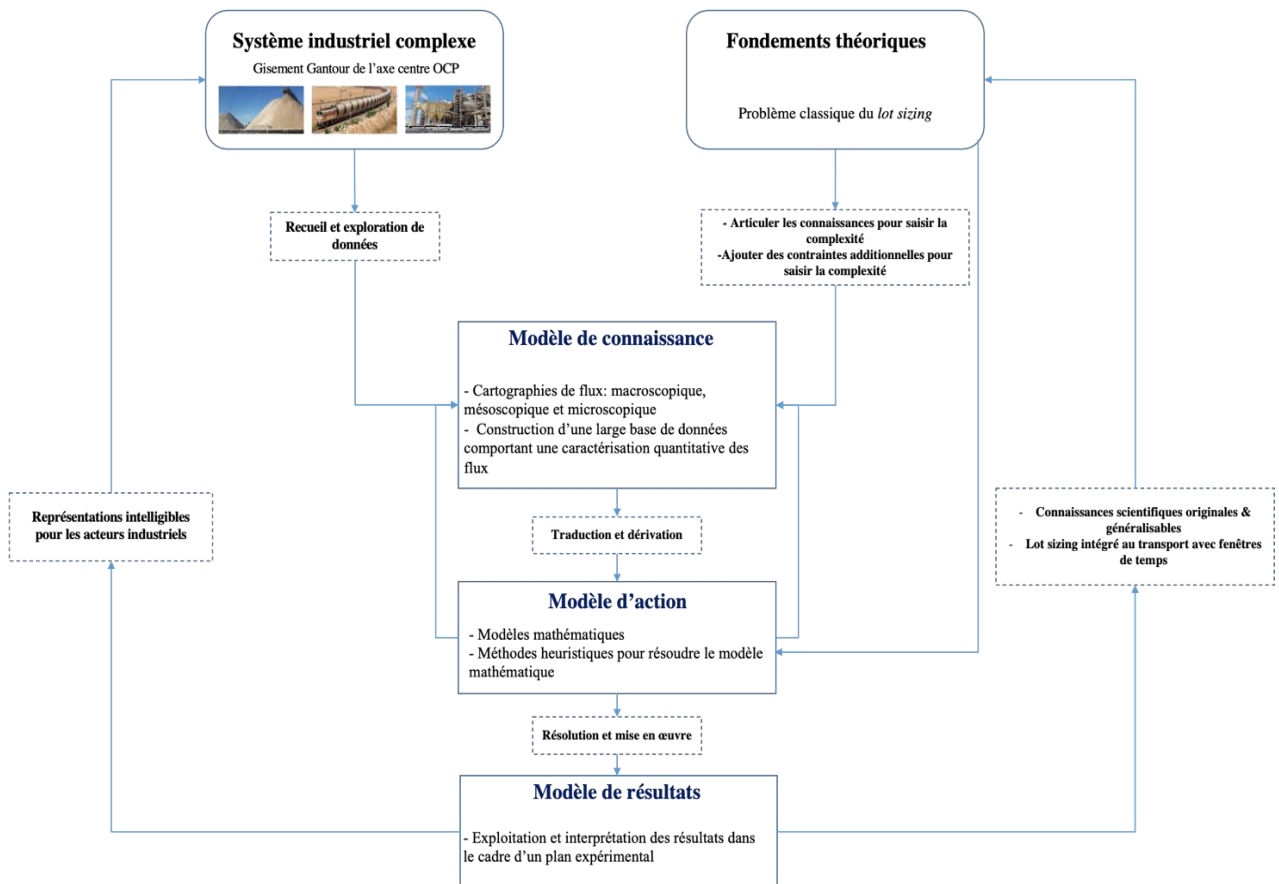


Figure 3: Étapes de construction de la recherche

Structure de la thèse

Ce manuscrit est structuré en quatre chapitres :

Le premier chapitre situe le domaine de l'étude. Il commence par positionner cette recherche dans son contexte industriel et scientifique. Ensuite, il détaille les problématiques, industrielles et scientifiques, traitées par cette thèse. La problématique industrielle est définie comme un problème intégré de planification de la production, stockage et transport par voie ferroviaire survenant dans le système logistique du site de Youssoufia. Cette problématique est ramenée à un problème de *lot sizing* multi-niveaux intégré à un problème de transport avec fenêtres de temps. Enfin, ce premier chapitre se termine par la mise en évidence des facteurs de complexité identifiés dans le cadre de notre étude et analyse du terrain.

Le deuxième chapitre est dédié à la réalisation d'un état de l'art portant sur les différentes recherches relatives au problème du *lot sizing*. Celle-ci commence par définir le cadre théorique général de ce problème, sa classification, et les principaux sous-problèmes qui en découlent. Ensuite, ce chapitre présente les principaux problèmes qui résultent du couplage du problème du *lot sizing* avec celui du transport. Ainsi, seront comparées les caractéristiques du problème étudié avec ceux des problèmes préalablement traités dans les recherches antérieures sur le *lot sizing*. Cette revue de littérature ne prétend pas étudier exhaustivement tous les travaux menés sur le *lot sizing*, mais a plutôt pour objectif de prouver l'originalité de la problématique traitée par cette thèse vis-à-vis ce problème théorique. Pour cela, la structure de ce chapitre part du problème générique du *lot sizing*, auquel sont progressivement associées les caractéristiques et contraintes additionnelles afin de déboucher sur le problème spécifique que nous adressons.

Le troisième chapitre introduit le formalisme mathématique avec lequel a été appréhendé le système industriel préalablement décrit. La modélisation des différentes contraintes et paramètres est détaillée, et le problème est ainsi modélisé sous la forme d'un programme linéaire mixte en nombre entier (MILP). Ce programme résout le problème du *lot sizing* multi-niveaux intégré au problème du transport ferroviaire avec fenêtres de temps. Plusieurs expérimentations sont ensuite présentées dans l'objectif de mettre en évidence les apports managériaux de l'outil développé dans le cadre de cette thèse.

Compte tenu du caractère industriel de nos travaux nécessitant quelques fois la résolution d'instances industrielles de grandes tailles, sont proposées dans le quatrième chapitre des approches de résolution complémentaires au modèle d'optimisation intégré. Ce quatrième chapitre détaille trois approches qui reproduisent des stratégies de décomposition du problème global, à savoir : une heuristique *Relax and Fix* pouvant être définie comme une hybridation d'une méthode d'optimisation et d'une stratégie de décomposition de l'horizon de planification, une heuristique *Top Down* qui optimise séquentiellement et hiérarchiquement les décisions de transport puis les décisions de *lot sizing*, et une heuristique *Bottom up* qui optimise, quant à elle, séquentiellement et hiérarchiquement les décisions de *lot sizing* puis de transport. Enfin plusieurs expérimentations sont proposées afin d'analyser et comparer la qualité des heuristiques, analyser différentes approches organisationnelles classiques quant à la planification, et enfin démontrer la capacité de ces heuristiques à résoudre des instances industrielles de grande taille. Afin de faciliter la lecture de ce manuscrit, un synoptique est présenté dans la Figure 4.

Notons que même si nous avons suivi l'approche ASCI (Analyse, Spécification, Conception et Implantation) proposée par (Fenies, 2005, 2006) pour le domaine des Supply Chains afin de construire notre cheminement de recherche, nous n'avons pas structuré notre manuscrit de thèse avec ASCI pour des raisons de commodité de lecture du document. Le lecteur retrouvera ainsi le détail des modèles de connaissance dans les chapitres I et III, les modèles d'action et de résultats dans les chapitres III et IV.

Chapitre I

Contextualisation industrielle et

Facteurs de complexité

Comparaison avec les travaux antérieurs
Originalité de la recherche

Chapitre II

Revue de la littérature

Résolution

Étendue du problème classique du
lot sizing

Chapitre III

Modélisation du problème MLLSP-TTW

Résolution
Décomposition horizontale du problème

Expérimentations

Résolution
Comparaison des approches managériales

Chapitre IV

Approches de planification intégrée vs

planification intégrée et séquentielle

Figure 4: Architecture du manuscrit de thèse

Production scientifique

La publication des travaux parmi la communauté scientifique constitue une partie intégrante du processus de validation scientifique des travaux de recherches. Au cours de notre thèse, nous avons veillé à participer régulièrement à des conférences internationales. Le retour des relecteurs ainsi que le partage et la discussion de nos travaux nous ont permis d'évaluer nos travaux, de les confronter aux autres recherches venant d'autres contextes et d'explorer des nouvelles pistes non envisagées au départ. A la fin de notre thèse nous avons soumis deux articles à deux revues internationales. Ci-dessous la liste des publications scientifiques effectuées au cours de notre thèse :

- Publications dans des revues internationales à comité de lecture :
 1. A.Rakiz, N.Absi, P.Fenies (2021). "An Integrated Production and Direct Shipment Problem in a Mining Industry" acceptée en octobre 2021 à International Journal of Production Research (IJPR, rang 2 FNEGE).
 2. A.Rakiz, N.Absi, P.Fenies (2021). "Math-heuristics for an integrated planning problem" soumise à Computers & Industrial Engineering (Rang 3 FNEGE).

- Chapitres de livres
 1. A.Rakiz, P.Fenies (2020) "Production-storage and transport integrated planning for a multi-site mining industry". Publié dans IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol 592. Springer
 2. S.Belil, A.Rakiz, K.Retmi (2019) "An Integrated Approach for Supply Chain Tactical Planning and Cash Flow Valuation". Publié dans IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol 591. Springer

- Conférences et congrès internationaux
 3. A.Rakiz, S.Belil, P.Fenies (2021) "An integrated framework for long term supply chain planning in a multi-site system". *The 6th Edition of the International Conference on Project & Logistics (PROLOG), Nantes, France.*

4. A.Rakiz, M. Abharahman, P.Fenies (2021) “An integrated approach for green Supply Chain Planning”. *The 6th Edition of the International Conference on Project & Logistics (PROLOG)*, Nantes, France.
5. A.Rakiz, N.Absi, P.Fenies (2021) “MIP-based heuristics for a mining multi-site planning problem”. *22^{ème} congrès annuel de la société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision (ROADEF)*, Mulhouse, France.
6. S.Belil, A.Rakiz, P.Fenies, N.Tchernev (2020) “A joint model for optimal capacitated multi-level lot-sizing and financing of the working capital requirement under delays in payments”. *13th International Conference on Modeling, Optimization and Simulation (MOSIM)*, Agadir, Maroc.
7. A.Rakiz, N.Absi, P.Fenies (2020) “Problème intégré de lot-sizing multi-niveau et transport avec fenêtres de temps”. *21^{ème} congrès annuel de la société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision (ROADEF)*, Montpellier, France.
8. A.Rakiz, P.Fenies (2019) “An integrated planning MILP for a global supply chain using one single railway track”. *The 5th Edition of the International Conference on Project & Logistics (PROLOG)*, Metz, France.
9. A.Rakiz, P.Fenies (2019) “Dimensionnement de lot et transport intégré avec acheminement par voie ferroviaire unique ”. *La 13^{ème} Conférence Internationale du Génie Industriel (CIGI)*, Montréal, Canada.

Chapitre I : Contextualisation industrielle et scientifique de la recherche

Résumé. Ce premier chapitre a pour objectif de poser le cadre général de cette thèse de doctorat. Il débute par positionner cette recherche sur les plans industriel et scientifique. Le positionnement industriel est défini dans le cadre de l'industrie minière du Phosphate et tout particulièrement celui de la chaîne logistique du groupe OCP. Le problème étudié est celui de la planification dans le cadre du système logistique intégré. Après avoir positionné la recherche, ce chapitre détaille la problématique industrielle, définie comme une problématique de planification intégrée de la production, stockage et transport. Celle-ci est ensuite ramenée au problème théorique du *lot sizing*, l'un des problèmes classiques les plus étudiés en planification de la production. Elle est formulée comme un problème de lot sizing multi niveaux associé à un problème de transport par trains avec fenêtres de temps que nous nommons MLLSP-TTW (*Multi Level Lot Sizing Problem integrated with Train Transport with Time Windows*). Enfin, nous terminons ce chapitre par les facteurs de complexité induits par notre mix de problématiques industrielles et scientifiques.

1. INTRODUCTION

Nous introduisons dans ce chapitre le groupe OCP comme environnement industriel au sein duquel se sont déroulés les présents travaux, et la planification des systèmes logistiques comme thème scientifique de notre recherche. Au-delà de leur simple présentation, l'objectif second de ce chapitre est de clairement définir la problématique qui a donné naissance à cette thèse. Les rencontres avec les industriels de l'OCP nous ont amené à nous intéresser à la planification intégrée, opérationnelle, des décisions de production, stockage et transport ferroviaire avec fenêtres de temps, dans le contexte d'une *Supply Chain existante*. Cependant étant contextualisé au départ, cet objectif est ramené à un problème plus théorique de *lot sizing* multi-niveaux intégré avec problème de transport avec fenêtres de temps.

Compte tenu de ces éléments, dans un premier temps la section 2 introduit le contexte industriel de notre recherche. Pour cela nous commençons d'abord par positionner le Maroc et le groupe OCP dans le marché international du Phosphate, l'objectif étant de mesurer l'enjeu auquel est confronté la Supply Chain du groupe OCP. Ensuite nous décrivons le système logistique sur lequel porte notre thèse, à savoir du gisement Gantour de l'axe centre OCP. La section 3 décrit notre rapport avec le terrain de recherche qui permis de traduire le système industriel réel en modèle de connaissance. La section 4 introduit le contexte scientifique de la recherche. Nous introduisons l'approche de planification intégrée et donnons une taxonomie des décisions prises dans le cadre de la planification d'un système logistique.

Les sections 5 et 6, quant à elles, justifient respectivement la problématique industrielle sur laquelle a porté notre thèse ainsi que la problématique scientifique qui en a découlée. Enfin, la section 7 détaille les facteurs de complexité induits par notre problématique de recherche.

2. CONTEXTE INDUSTRIEL

2.1. La Supply Chain du Phosphate

Considéré comme une ressource non renouvelable, le Phosphate (P) est un nutriment vital pour la croissance des végétations en plus de l'azote (N) et du potassium(P). Il représente 25% des valeurs nutritives dont les plantes ont besoin pour leur développement. L'agriculture moderne repose en grande partie sur l'utilisation du Phosphate pour la fertilisation des terres agricoles. En plus de son usage agricole, le Phosphate est également utilisé pour d'autres fins tels que l'alimentation du bétail, la fabrication des détergents, ou bien la fabrication des additifs alimentaires. En 2011, sur une production mondiale totale de 191 MT de roche phosphatée (Jasinski 2013) la production d'engrais a constitué 82%, les additifs alimentaires ont constitué 7%, la fabrication des détergents 5%, les additifs alimentaires ont représenté 2 %, et le phosphore technique, destiné à accroître l'efficacité de certaines technologies telles que l'éclairage, 3 % (Scholz et al. 2013; Schröder et al. 2011; Prud'Homme 2010).

La production mondiale de phosphate occupe donc un rôle incontournable dans la fertilisation des terres agricoles et, par conséquent, dans la préservation de la sécurité alimentaire mondiale. Le phosphore utilisé dans les engrais provient des roches phosphatées, une ressource non renouvelable naturellement présente dans le globe terrestre. L'enjeu majeur de la préservation de la sécurité alimentaire mondiale tient essentiellement à l'exploitation efficace et efficiente des réserves naturelles en Phosphate réparties dans le monde.

2.2. Positionnement de l'OCP dans le marché international de Phosphate

Cependant, les réserves mondiales de roche phosphatée ne sont pas équitablement réparties sur le globe terrestre. Les dernières statistiques de L'Institut d'études géologiques des États-Unis (USGS 2021) affirment que le Maroc possède environ 73% des réserves mondiale naturelles en Phosphate totale, qui équivaut à 50 Milliard de tonnes de phosphate

présent dans le sol marocain. OCP SA ((Office Chérifien des Phosphates) est une société anonyme appartenant au Royaume du Maroc et possède l'exclusivité de l'exploitation du Phosphate dans ce pays. Les autres pays présentant des réserves importantes de phosphate sont (dans l'ordre) : la Chine, l'Algérie, la Syrie, l'Afrique du sud, la Jordanie, la Russie, l'Égypte, l'Australie et les États Unis. La Figure 5 présente la répartition des réserves mondiales de Phosphate par pays (USGS 2021).

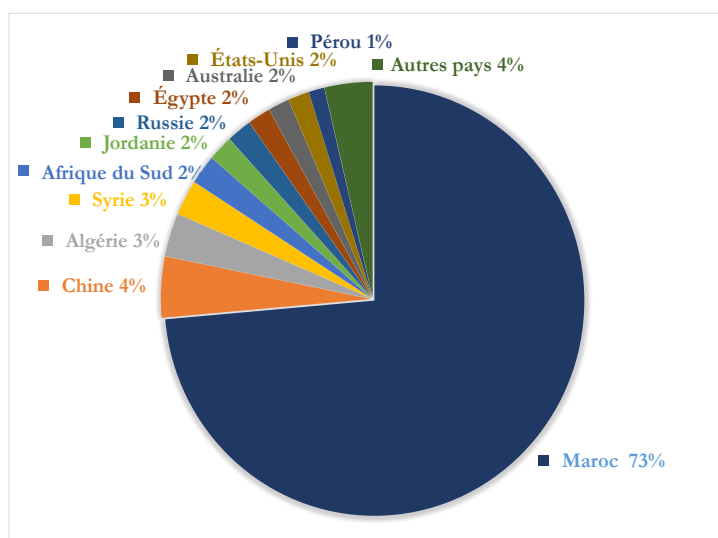


Figure 5: Réserves, parts de marché et production mondiale de phosphate par pays

Ceci confère donc au Maroc un rang privilégié dans le marché international de Phosphate. Il figure à l'heure actuelle parmi les trois premiers producteurs mondiaux du Phosphate à côté des États-Unis et de la Chine (« Planetoscope - Statistiques : Production mondiale de phosphates » 2020). La Figure 6 détaille la répartition des parts mondiales du marché de phosphate par pays (USGS 2021). Au niveau des exportations, le Maroc se classe au premier rang mondial, détenant à lui seul 34 % de part de marché des roches phosphatées, 49% de part de marché d'acide phosphorique et 24% de parts de marché des fertilisants (« OCP sustainability report 2019 »).

Sur le plan national le secteur minier contribue à hauteur de 10% au PIB du Maroc, dont 90 % proviennent de l'industrie du Phosphate (Mehahad et Bounar 2020).

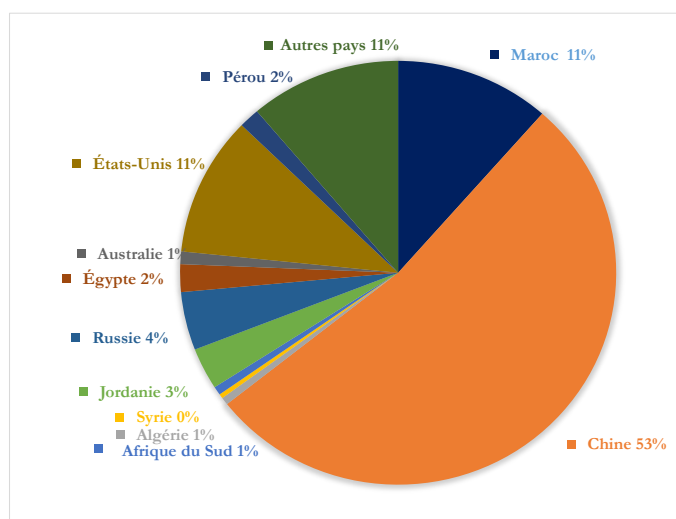


Figure 6 : La répartition des parts mondiales du marché du phosphate.

Conscient de la richesse naturelle qu'il possède, le Maroc fonde en 1920 l'OCP (Office Chérifien du Phosphate) dans l'objectif d'exploiter les gisements de Phosphate présents sous son sol. Dans ce qui suit nous commençons par décrire le groupe OCP et sa chaîne logistique, environnement macroscopique dans lequel s'est déroulée cette recherche. Ensuite, en procédant par une approche descendante, nous décomposons progressivement ladite chaîne logistique par arriver enfin à une description microscopique du système étudié. Nous présentons ainsi l'axe centre, un des trois axes parallèles indépendants composant la chaîne logistique de l'OCP. Nous enchainons avec le site de Youssoufia du gisement Gantour, qui est l'un des sites de l'axe centre dans lequel ont eu lieu nos travaux de recherche. Ce site est lui-même décomposé en trois sous-systèmes, à savoir : le système de production, le système de stockage, et le système de transport.

2.3. Le groupe OCP

Fondé le 17 août 1920 au Maroc et transformé en 2008 en société anonyme, OCP-SA est aujourd'hui l'un des leaders mondiaux en exploitation et vente du phosphate brut, acide phosphorique et engrais phosphatés. Il est l'exploitant exclusif des mines de Phosphate marocaines. Disposant de gisements aux réserves pratiquement inépuisables, il possède de vastes installations d'extraction, de manutention, de séchage, de transport et de stockage qui lui permettent d'assurer des exportations vers tous les continents à l'échelle internationale. Afin de répondre face à la demande mondiale, OCP met en œuvre

une chaîne logistique complexe, composée de trois axes parallèles et indépendants : axe nord, axe centre et axe sud (Figure 7). Chacun de ces trois axes commence par des sites miniers où est effectuée l'extraction du minerai. Ce minerai passe ensuite tout au long de la chaîne logistique par différents processus de transformation, de stockage et de transport pour arriver enfin au port ou est effectué l'export des produits finis vers les clients dispersés à l'échelle internationale. Chaque axe constitue ainsi une supply chain qui structure les processus logistiques, miniers et de transformation chimique.

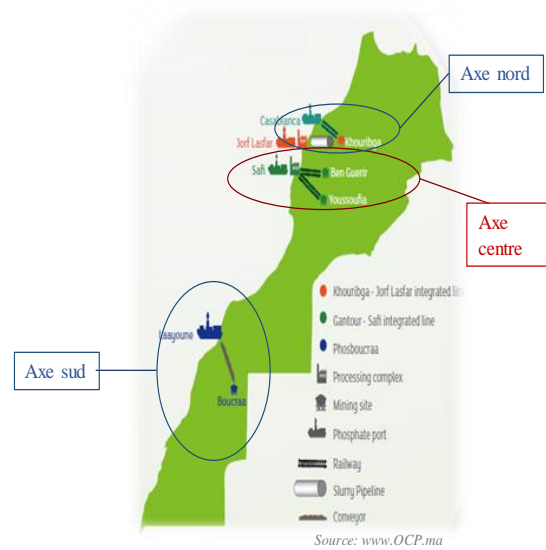


Figure 7: Présence de l'OCP au Maroc.

Le Tableau 1 présente la répartition de la production globale de l'OCP selon les trois axes qui composent son système logistique.

Tableau 1: Répartition de la production par axe

Axe	Nord	Centre	Sud
Sites	Khouribga, Jorf, Casablanca	Ben Guerir, Youssoufia, Safi	Boucraa, Laayoune
Production du site en %	66%	26%	8%

Les produits de l'OCP, quant à eux, peuvent être classés en deux familles :

- Acide Phosphorique : deux types d'acide phosphoriques sont produits par l'OCP: (1) L'acide purifié utilisé principalement dans l'industrie agroalimentaire (huiles, limonades, fromages, conserves, levures, sucre, eau potable...), industrie pharmaceutique, détergents, alimentation animale, traitement des métaux, textiles, pigments, etc. Le deuxième type étant (2) l'acide phosphorique utilisé pour la production d'engrais et pour la fertilisation des plantes et qui est un entrant dans la composition des engrais..
- Engrais : Fertilisants qui peuvent être utilisés directement sur les plantes ou bien qui rentrent dans la composition d'autres fertilisants.

2.4. L'axe centre OCP

La problématique étudiée dans le cadre de cette recherche se situe dans l'axe centre composé des trois sites : Ben Guerir, Youssoufia, Safi. La Figure 8 représente les différents sites composants cet axe.

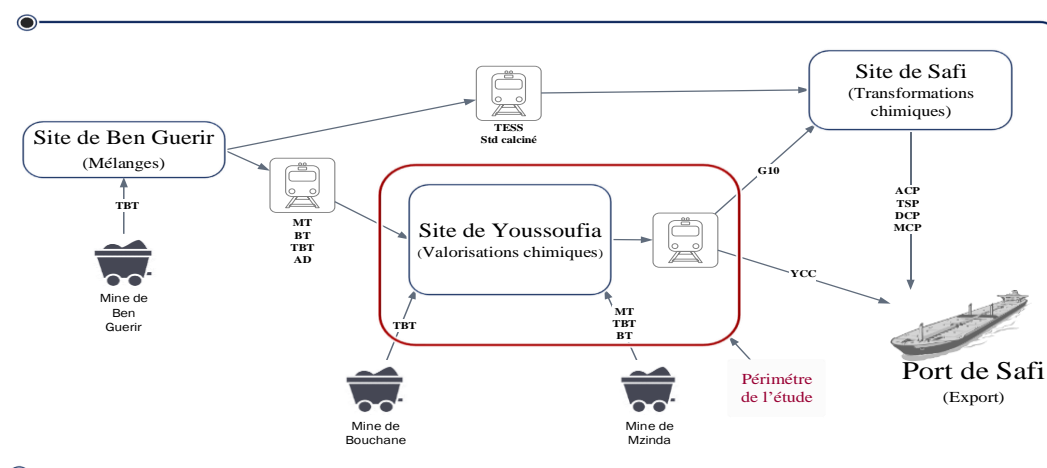


Figure 8: Cartographie macroscopique de l'axe centre.

- Le site de Ben Guerir dans lequel est réalisée l'extraction et le mélange de couches sources avant leur expédition vers les sites de Youssoufia et Safi.
- Le Site de Youssoufia qui reçoit le minerai de Ben Guerir en plus de deux autres mines avoisinantes : Bouchane et Mzinda. Ce site contient des usines

de : séchage, calcination et lavage du minerai qui ont pour objectif de le valoriser chimiquement. Ensuite, ce minerai est expédié par train vers deux destinations : le port de Safi pour l'exporter aux clients internationaux, et le complexe chimique de Safi afin de le transformer en acide phosphorique et engrais.

- Le complexe chimique de Safi : contient une laverie, des lignes de fabrication d'acide phosphorique et d'engrais (TSP, MSP, DCP), en plus des lignes de fabrication d'acide sulfurique.
- Le port de Safi : c'est le port dans lequel sont expédiés les produits finis fabriqués par l'ensemble de l'axe aux clients internationaux.

Tableau 2: Classification des produits de l'axe centre par site producteur.

Sites	Produits	Destination
Ben Guerir	Tess, Standard calciné	Safi
	MT, BT, TBT	Youssoufia
Youssoufia	G10-MP, G10-MC	Safi
	YCC-y, YCC-az	Port de Safi (Export)
Safi	Acide Phosphorique, Engrais	Port de Safi (Export)

Le périmètre industriel de cette étude porte sur le site de Youssoufia composé d'usines de production et de sites de stockage inter-reliés par des convoyeurs. Ce site est alimenté en minerai par trois mines : Ben Guerir, Mzinda et Bouchane. Il livre ces produits finis par train vers les usines de transformation chimiques à Safi qui sont considérées comme étant clients internes, et vers le port de Safi à partir duquel les produits sont exportés aux clients internationaux. Nous avons décomposé le périmètre étudié en trois systèmes : système de production, système de stockage et de transport que nous allons détailler dans ce qui suit.

2.5. Gisement Gantour - Site de Yousseoufia

2.5.1. Système de production

Le système de production étudié est celui du site de Yousseoufia. La Figure 9 fournit une description simplifiée des sous-systèmes composant le système étudié. Une description détaillée du système étudié est mise dans les annexes 1-6.

Nous le définissons comme un réseau de production multi-sites, multi-produits composé d'un système de production et d'un système de stockage, interconnectés par un système de transport.

Sites miniers

Comme précédemment mentionné, le système de production étudié est alimenté en minerai par trois mines à ciel ouvert (nœuds sources) : Ben Guerir, Mzinda et Bouchane dans lesquelles est effectuée l'extraction du minerai. Le Phosphate est extrait à partir de ces mines sous forme de couches souterraines. Le processus extractif à l'OCP est effectué à ciel ouvert (Figure 10), ce qui veut dire les couches phosphatées sont entièrement découvertes en enlevant progressivement les couches se positionnant au-dessus. Généralement, les couches possèdent des caractéristiques physico-chimiques suffisamment proches, ses caractéristiques sont définies par des plages du pourcentage en composition chimiques en termes de : BPL, CO₂, MgO, SiO₂, Cd, parfois aussi en solubilité citrique et formique.

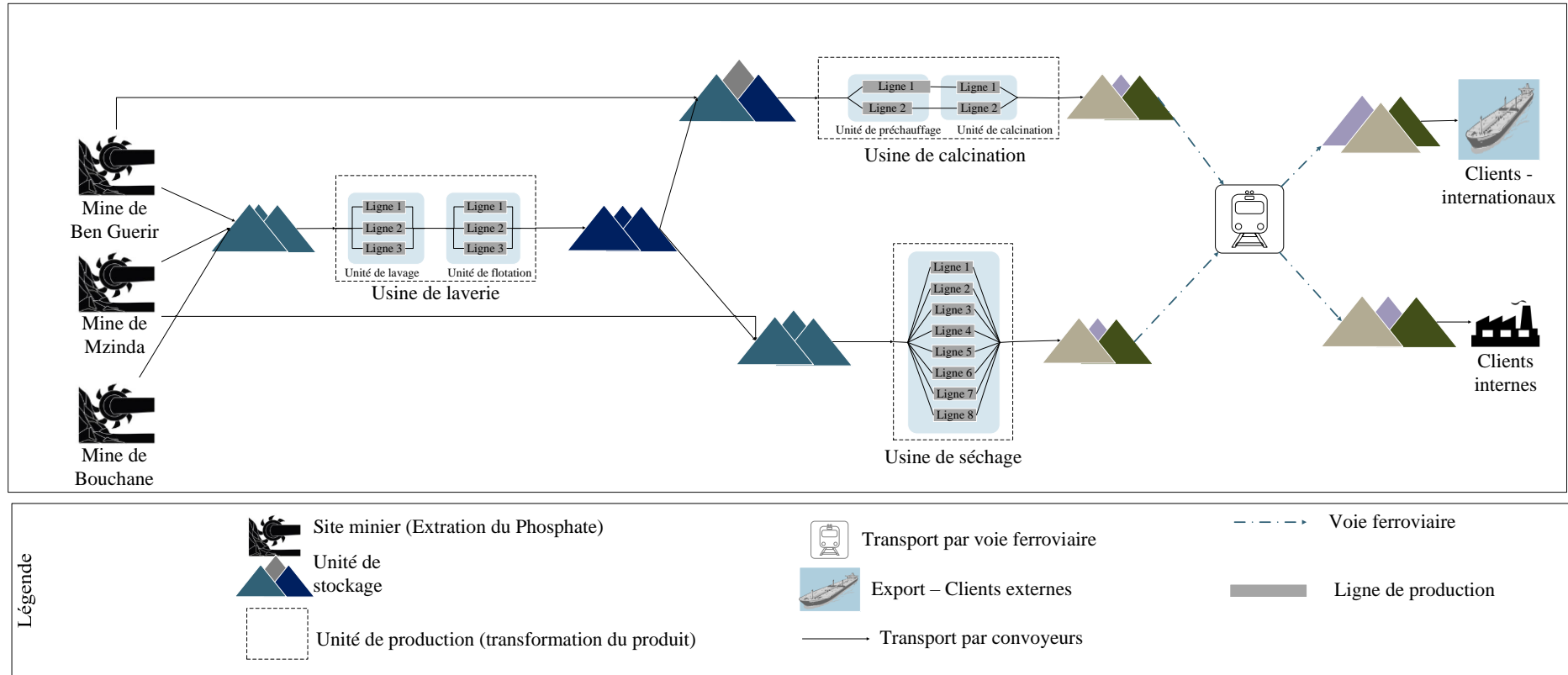


Figure 9: Cartographie simplifiée des flux du système logistique étudié.

Ainsi, chacune des trois mines alimente le système en différents minerais selon des capacités différentes :

- Mine de Ben Guerir: site minier où est effectué l'extraction et le mélange des minerais sources : BT, TBT, MT
- Mine de Mzinda: site minier où est effectué l'extraction des produits TBT
- Mine de Bouchane: site minier qui alimente le réseau en TBT MT, BT.



Figure 10: Mines à ciel ouvert - axe centre

Ensuite ce minerai est transporté vers trois usines de production : laverie, séchage et calcination dans lesquelles est effectuée la transformation du minerai extrait en produit intermédiaire ou bien en produit fini.

Laverie

Unité de traitement équipée de trois lignes de production identiques dont l'objectif est de valoriser chimiquement les minerais en faible teneur en Phosphate, appelés TBT (Très Basse Teneur). La laverie joue principalement deux rôles : (1) Augmenter le BPL (Bone Phosphate Lime = phosphate de chaux des os: $P_2O_5 \times 2,1853 = BPL$, renvoie à la concentration du Phosphate P_2O_5 dans le minerai) du TBT entrant à la laverie, (2) et diminuer le taux des impuretés dans le TBT. Le produit sortant de la laverie est appelé LF (Lavé Flotté). Sa capacité nominale annuelle est de 4 M Tonnes, sa capacité effective est de 3.8 M T/an.

Calcination

Usine de traitement du minerai, dotée de deux unités identiques, dont le rôle est d'augmenter le BPL et réduire principalement le CO_2 présent dans le minerai. Sa capacité effective annuelle est de 1,8 M T. Chacune des unités de calcination est composée d'une unité de préchauffage et de calcination reliées en séries. La Figure 11 représente l'unité de calcination à Youssoufia.



Figure 11: Unité de calcination à Youssoufia - axe centre

La calcination est caractérisée par un mode de fonctionnement est complexe puisqu'elle a pour objectif de modifier la composition chimique du minerai entrant par deux moyens différents : effectuer un mélange des produits à l'entrée et à la sortie de l'usine, et modifier la composition chimique des produits à travers les processus de préchauffage et calcination. Elle opère selon deux modes de production différents : un premier mode dit « mode export » dans lequel les produits pouvant être fabriqués sont : YCC-y, YCC-a, G10-MP, G10-MC, et un deuxième mode appelé « mode standard » dans lequel les produits possibles sont le G10-MP et G10-MC. Chacun de ces produits est caractérisé par une nomenclature (matrice du Gozinto) différente permettant de préciser les quantités de matières premières nécessaires pour sa production. La Figure 12 décrit le fonctionnement de la calcination selon les deux modes standard et export.

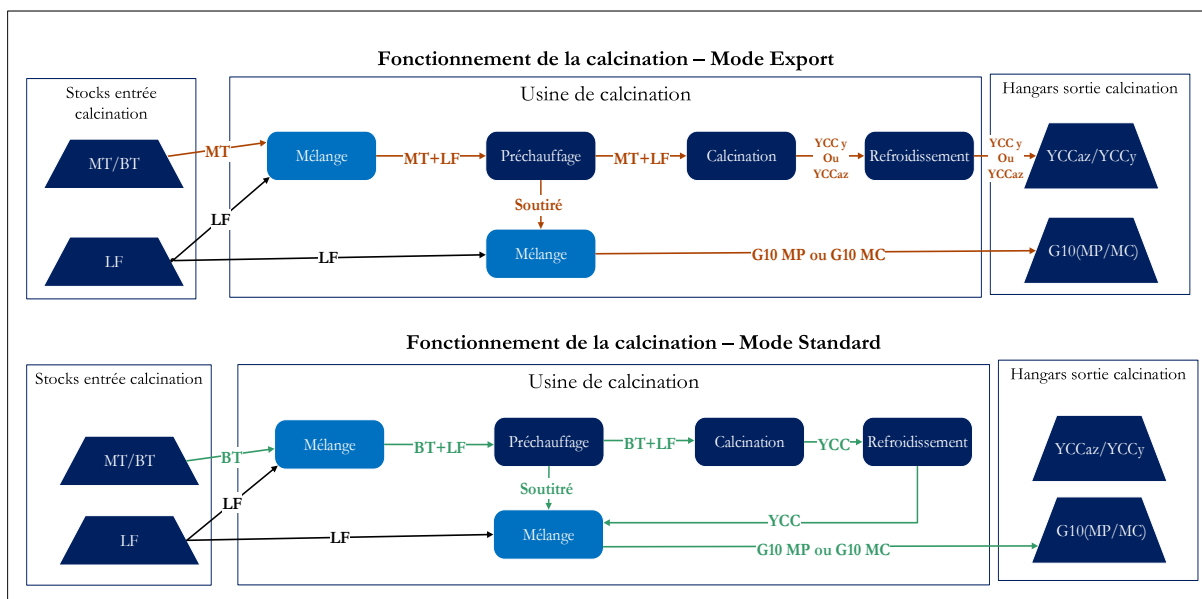


Figure 12: Processus de production à la calcination selon les deux modes de fonctionnement (Standard et Export)

Séchage

C'est une unité de traitement du minerai dont le rôle est de diminuer l'humidité de 17 % à 3,5 % en moyenne. Elle est composée de huit fours pouvant démarrer simultanément ou bien séquentiellement, sa capacité déclarée est de 2,9 M T/an et peut produire les produits : G10-MP, G10-MC à partir du produit LF.

2.5.2. Système de stockage

Le système logistique étudié dispose de plusieurs unités de stockage (Figure 13) permettant le découplage des flux afin de synchroniser les différents processus de production et de transport. Nous distinguons trois types d'unités de stockage selon leur positionnement dans le système logistique et le type des produits qui y sont stockés :

- Stocks amonts : ce sont des stocks situés en amont des différentes unités de production. Ils contiennent les matières premières propres à chaque usine.
- Stocks avals : ce sont des unités de stockage situées en aval des unités de production dans lesquels sont stockés les produits fabriqués au niveau de chaque usine.
- Stocks finaux : situés en aval du transport par train, à la fin du système logistique étudié. Ce sont les stocks de produits finis fabriqués dans l'ensemble du système de production étudié. Parmi les stocks finaux, nous distinguons : (1) Les stocks des produits YCC y et Ycc az présents dans le port de Safi, avant d'être exportés aux clients internationaux, et (2) les stocks des produits G10 MP et G10 MC à l'entrée des complexes chimiques de Safi. Les complexes chimiques de Safi étant considérés des clients internes, ces produits sont utilisés afin de produire l'acide phosphorique et les engrais.

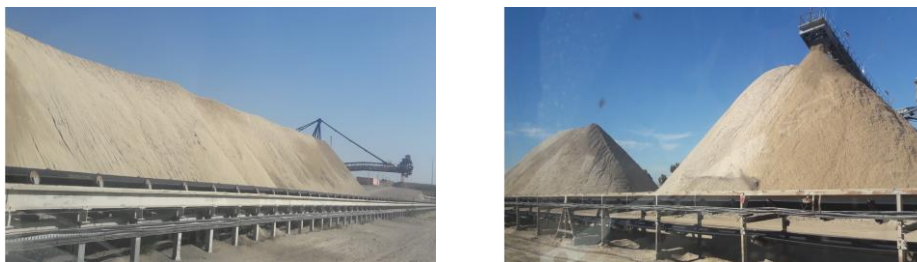


Figure 13: Sites de stockage

2.5.3. Système de transport

L'ensemble des sites de production et de stockage est relié par un système de transport à flux hybride, composé de deux moyens de transport ::

Les convoyeurs

Le premier mode de transport identifié est un système de transport par convoyeurs à flux continu qui interconnectent les différentes unités de production et de stockage appartenant au site de Youssoufia (Figure 14).



Figure 14: Convoyeur assurant le transport intersites dans le gisement Gantour.

Ces convoyeurs occupent des fonctions importantes dans le système logistique étudié, ses fonctions sont les suivantes :

- Acheminement du minerai extrait depuis les sites d'extraction vers les différentes unités de stockage en aval des unités de production.
- Acheminement du produit LF (lavé flotté) fabriqué dans la laverie vers les unités de calcination et séchage.
- Les convoyeurs assurent également les liaisons, au sein du même site de production, entre les stock avals et les usines de production d'un côté, et aussi entre les usines de production et les unités de stockage de l'autre côté.

D'un point de vue de technique, ces convoyeurs sont caractérisés par un débit maximal transporté mesuré par le nombre maximal de tonnes transportées par heure, et par un débit minimal transporté mesuré par le nombre minimal de tonnes transportées par heure. Ces débits diffèrent en fonction du type de convoyeurs et de son emplacement dans le système.

Les trains

Le deuxième type de transport est un système de transport par trains, à flux discret, acheminant les produits finis produits dans l'ensemble du réseau de production vers les stocks finis (Figure 15). Les points de départs des trains sont les sites de chargement situés au niveau de la calcination et du séchage. Leurs points d'arrivée sont les sites de déchargement situés dans le port et dans les complexes chimiques de Safi (MP et MC).



Figure 15 : Train assurant le transport du phosphate entre Youssoufia et Safi

C'est un mode de transport assez particulier puisque cet acheminement est assuré par une voie ferroviaire unique par laquelle transitent la totalité des trains du produit finis. De plus, cette voie ferroviaire assure également le transport des voyageurs entre les différentes villes du circuit faisant partie du gisement Gantour. Ainsi, pour organiser le transport du phosphate et des voyageurs, un contrat est signé annuellement avec l'opérateur national marocain de transport ferroviaire (ONCF, Office National des Chemins de Fer). Ce contrat stipule que le transport du phosphate ne peut être effectué que dans des plages horaires précises, communément appelées des 'sillons'. Il est à noter à ce niveau que cette contrainte spatio-temporelle relative à l'acheminement des produits finis pose un défi majeur en termes de planification en amont et en aval dans le système logistique. La Figure 16 présente un modèle de cartographie des sillons possibles de transport par train. L'axe horizontal inférieur présente les heures de départ possibles des trains ; l'axe horizontal supérieur présente les heures d'arrivée de ces trains et les lignes en couleurs représentent les trains.

En plus des contraintes de fenêtres de temps préalablement expliquées, le transport par train est également caractérisé par des quantités maximales et minimales de produits à transporter par train, un temps d'acheminement entre les différents sites à cause de l'éloignement géographique des sites de départ et de destination, et un nombre maximal de rames disponibles par jour.

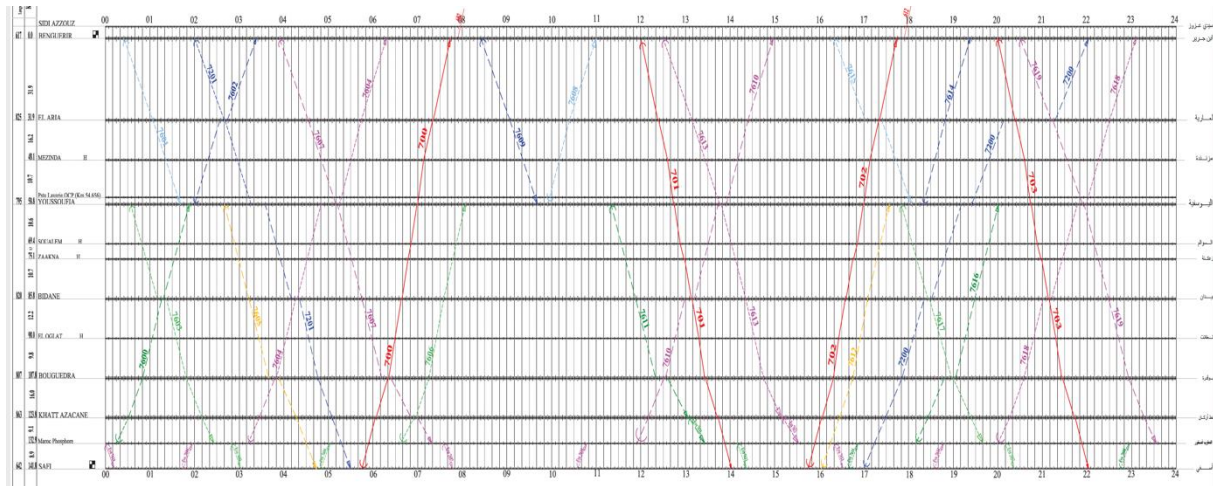


Figure 16: Cartographie des sillons possibles de transport par trains

3. RAPPORT AVEC LE TERRAIN DE RECHERCHE

L'OCP détient un rang privilégié dans le marché international du Phosphate et des fertilisants. Mais il a également l'ambition de conquérir encore plus ce marché, pour mieux répondre à une demande forte dans un contexte de démographie et de besoins alimentaires en continuelle progression. Devant un défi de telle envergure l'OCP est confronté à un double enjeu, d'un côté, appuyer son positionnement sur le marché international afin de conserver son leadership, mais également préserver et exploiter durablement une richesse naturelle finie afin de conserver sa pérennité, de l'autre côté. Conscient du rôle important de la recherche scientifique, plusieurs programmes de recherches sont lancés dans l'objectif de s'engager dans des mutations porteuses au niveau de la gestion de sa chaîne logistique. Notre thèse voit donc le jour dans le cadre d'une chaire d'optimisation industrielle au sein de l'axe centre de la chaîne logistique OCP, elle a pour but de conduire des recherches sur l'harmonisation et l'intégration globale des décisions logistiques dans un objectif d'amélioration globale de la performance, par l'aide à la décision.

Notre interlocuteur industriel est l'entité gestion des flux du gisement Gantour. Elle est localisée au niveau du site de Youssoufia, et a pour mission principale celle de réaliser la planification opérationnelle des flux physiques au niveau des sites de Youssoufia et de Ben Guerir. Pour cela, cette entité reçoit périodiquement des objectifs de production tactique en provenance du siège du groupe. Son rôle donc est de décliner ces objectifs en un ensemble de plans de production, stockage et transport sur un horizon opérationnel et pour l'ensemble des entités faisant partie de son périmètre décisionnel.

La demande initiale faite par notre interlocuteur n'était pas clairement exprimée au départ. Toutefois, deux pistes à explorer étaient fréquemment évoquées, la première était de se pencher sur le mode de gestion des stocks en amont et en aval du mode de transport ferroviaire. La deuxième était de se pencher sur le mode de transport par trains lui-même dont dépendent fortement les capacités des stocks situés en amont et en aval de cette voie ferroviaire reliant le site de Youssoufia avec celui de Safi. En effet, le mode de transport ferroviaire étant un passage obligé de tous les produits transitant du gisement Gantour vers le site de Safi. Il conditionne ainsi le système industriel en amont et en aval, et présente une contrainte forte dont la maîtrise est primordiale pour améliorer la performance globale du système logistique dans sa totalité.

Il est important de noter à ce niveau que le mode de transport ferroviaire n'a pas constitué l'intégralité de nos travaux, mais leur point de départ. Nos travaux ont ensuite évolué au fil de l'approfondissement de notre exploration du terrain, pour enfin aboutir au problème de planification intégrée présenté lors de cette recherche. En effet, le processus décisionnel étant composé d'un chaînage de décisions fortement dépendantes l'une de l'autre, il est donc impératif pour cerner tous les paramètres influant un maillon donné de la chaîne logistique, de s'inscrire dans une démarche globale permettant une prise de décision intégrée en amont et en aval.

Notons également que pour réaliser la planification opérationnelle, l'entité gestion des flux s'appuie sur des méthodes empiriques reposant sur des tableurs Excel et sur le retour d'expérience des collaborateurs.

Une compréhension approfondie de notre terrain industriel est donc incontournable pour cerner les problèmes réels et proposer des solutions adéquates et pertinentes. Pour cela nous avons passé de longs séjours dans les différents sites industriels de l'axe centre,

et particulièrement celui de Youssoufia. En plus des longs séjours, nous avons bénéficié de l'accessibilité et de la proximité géographique des sites de Youssoufia et de Ben Guerir au laboratoire de l'EMINES pour faire de courtes visites répétitives au besoin.

Notre premier contact avec l'OCP a commencé dès l'année propédeutique, au cours du stage de six mois passé à la direction Supply Chain située au siège du groupe. Cette période nous a offert une première immersion dans le monde OCP. Elle nous a permis de rencontrer et discuter avec un ensemble de collaborateurs faisant partie du top management, de collecter un ensemble de données sur la chaîne logistique de l'axe centre, et surtout de connaître et toucher de près les enjeux de la gestion de la Supply Chain au sein du groupe.

Ensuite nous avons réalisé tout au long du parcours de thèse, un ensemble de séjours et visites à l'OCP, allant de séjours de quelques jours passés sur sites jusqu'aux visites d'une journée pour observer un processus particulier ou bien s'entretenir avec un ensemble de collaborateurs sur un sujet donné. Notre rapport avec le terrain industriel peut être résumé dans les points suivants :

- **Observation et exploration du système industriel** : Des visites ont été réalisées au site de Ben Guerir en novembre et décembre 2017, dont l'objectif était d'observer le fonctionnement de la mine et du processus extractif, afin de dresser une image claire des processus amont du site de Youssoufia. Également, une visite au site de Safi été réalisée en décembre 2017 afin d'observer les processus avals du site de Youssoufia et de comprendre la destination des produits qui y sont fabriqués. Cependant, nous avons commencé notre phase d'observation du système industriel par un séjour d'une semaine passée dans le site de Youssoufia en avril 2018. L'objectif de ce séjour a été de passer une à deux journées dans chacune des unités de ce site afin d'observer son fonctionnement et de collecter les données quantitatives qui la caractérisent. Ensuite plusieurs visites et séjours ont eu lieu tout au long de la thèse. Il est à noter que ces visites d'observation n'ont pas concerné uniquement le site de Youssoufia, terrain de notre recherche. Elles se sont également étalées sur l'ensemble de la chaîne logistique de l'axe centre.
- **Collecte des données quantitatives et qualitatives** : En plus de l'observation et de l'assimilation du processus industriel et de la structure décisionnelle, les visites

réalisées sur site ont eu également pour objectif de collecter les données nécessaires pour alimenter le modèle de connaissance.

- **Entretiens :** Tout au long de notre thèse, plusieurs entretiens ont été réalisés avec les opérationnels en vue de comprendre le fonctionnement de chaque unité industrielle (Tableau 3). En fonction de notre avancement, ces entretiens se sont intéressés au choix des méthodes de planification pour chacun des processus relevant du système logistique de Youssoufia. De plus, ces entretiens nous ont permis de discuter du choix contraintes et paramètres qui régissent le système industriel sur lequel nous travaillons
- **Réunions à l'OCP et à l'EMINES :** Des réunions ont été réalisées le long de la thèse en vue de présenter les différents états d'avancement, mais également en vue de recueillir les retours et attentes de notre partenaire industriel. Ces réunions étaient réalisées en présence de la direction de l'Emines, de notre directeur de thèse, mais également des collaborateurs OCP appartenant aux différents niveaux hiérarchiques allant des opérationnels jusqu'au directeur de l'axe centre.

Un récapitulatif des réunions et visites les plus importantes réalisées au cours de notre parcours de thèse est fourni au Tableau 3.

Tableau 3: Récapitulatif des réunions et visites les plus importantes réalisées au cours de notre thèse

Date	Emplacement	Intervenants	Points clés discutés
22/11/2017	Ben Guerir	Visite du terrain	Comprendre le processus de fabrication en détail depuis l'extraction dans les trois mines des sites BG et Youssoufia (en détail avec les différentes étapes de l'extraction) jusqu'à l'envoi des produits « fini » de Youssoufia vers Safi. Au cours de cette visite, une attention particulière a été accordée aux différents stocks mis en place dans les deux sites, et au flux des matières et produits dans les différents processus de transformation.
14/12/2017	Safi	Visite du terrain	Comprendre le fonctionnement de la chaîne aval de notre terrain de recherche. Au cours de cette visite nous avons assisté à la réception des trains provenant de Youssoufia et nous avons récupéré les données concernant les sites de stockage à Safi.
25/01/2018	OCP- Youssoufia	Visite du terrain	Visite pour récupération des données sur la chaîne logistique au niveau du site de Youssoufia
31/01/2018	EMINES	Directeur de l'entité gestion des flux, Directeur de l'EMINES	Présentation de la problématique de recherche
24/04/2018	EMINES	Directeur de l'entité gestion des flux, Directeur de thèse	<ul style="list-style-type: none"> Présentation et discussion de la problématique de recherche Discussion autour du jeu de données nécessaire pour la réalisation du projet
29-30/04/2018	OCP- Youssoufia	Visite du terrain	Construction et collecte d'un jeu de données réelles pour alimenter le modèle de planification des flux à Youssoufia
30/05/2018	EMINES	Directeur des flux de l'axe centre, doctorants, Directeur de l'entité gestion des flux	Présentation de la problématique et des données collectés
05/06/2018	OCP- Youssoufia	Directeur de l'entité gestion des flux	Prise en contact avec le successeur provisoire de mon interlocuteur industriel Présentation du sujet et discussion autour de la problématique
11-15/06/2019	OCP- Youssoufia	Visite du terrain	Séjour sur site pour collecte de données et approfondissement de la compréhension du fonctionnement du système.
19/09/2018	EMINES	Directeur de l'entité gestion des flux, Directeur de thèse	<p>Faire le point sur le modèle d'optimisation du calcul des capacités de stocks en cours de développement.</p> <p>Echange autour des contraintes qui conditionnent le système de production et qui n'est pas contrôlé par l'OCP (mais par l'ONCF). Il faudra se pencher davantage sur les caractéristiques du transport ferroviaire (horaires, quantités, suppression des trains...) pour l'intégrer au maximum dans le modèle.</p> <p>Discussion autour de la traduction de demande dans le modèle</p>
01/10/2019	EMINES	Directeur de l'entité gestion des flux, Directeur de thèse	<ul style="list-style-type: none"> Discussion autour du transport par trains, discussion et correction de quelques capacités de transport. Nécessité d'intégrer plus de contraintes concernant le transport par trains (selon le directeur des flux, le transport par train est la pierre angulaire du problème des flux à Gantour). Discussion autour des horaires fixes dans lesquels il est possible de programmer les expéditions. Ensuite explication des applications possibles (livrables) du modèle Discussion autour de la propagation des décisions dans la chaîne logistique, et explication de la façon avec laquelle le travail actuel peut répondre à ce point. <p>Finalement le directeur des flux a demandé de refaire la même réunion à Youssoufia, cette fois-ci, en présence de l'ensemble de l'équipe du service des flux afin d'avoir directement leurs retours et leurs attentes de ce projet.</p>
11/10/2018	OCP- Youssoufia	Responsable flux et planification de l'axe centre et l'ensemble de son équipe	<ul style="list-style-type: none"> Discussion avec l'équipe des flux des différentes contraintes de la gestion quotidienne des stocks et des flux. Le coordonnateur des flux a exprimé ces attentes du modèle et les différentes questions auxquelles devrait répondre le modèle.
17/10/2018	OCP- Youssoufia	Directeur de l'axe centre, Directeur des flux, Doctorants	Présentation et discussion de la démarche proposée pour répondre à la problématique, et la logique du modèle mathématique en cours de développement.
25/10/2018	OCP- YSS	Directeur de l'axe centre, Directeur de la production à Youssoufia, Responsable production de la calcination et séchage, Directeur de l'extraction, Responsable production - Laverie, Responsable flux et planification – Axe centre	Exposé et discussion de la problématique aux responsables OCP à Youssoufia.
24/01/2019	Youssoufia	Responsable calcination/séchage	<ul style="list-style-type: none"> * Explication détaillée du processus de la calcination. * Récupération des coûts pour compléter le jeu de données * Discussion autour de la demande
05/02/2019	OCP- YSS	Directeur des flux	Exposé et discussion autour de l'avancement du modèle Décision d'aller visiter ONCF et explorer leur méthodes et moyens de gestion des sillons
05/03/2019	OCP-YSS- ONCF	Chef de gare OCP à Youssoufia- Agent OCP	Discussion autour de l'organisation des trains, des différents imprévus susceptibles et de leurs effets sur le planning, et de la méthode de planification quotidienne des trains
20/03/2019	OCP-YSS	Directeur de production à Youssoufia, Directeur de flux et leurs équipes.	Exposé de la problématique et démarche proposée pour répondre à cette problématique. Nécessité de remplir la charte projet
25/04/2019	OCP-YSS	Directeur de production à Youssoufia, Directeur de flux et leurs équipes, Directeur de thèse	Discussion autour de la problématique et proposition d'améliorations
28/08/2019	OCP-YSS	Réunions avec des agents du service planification et du service production	Discussion autour des scénarios de la demande et des expérimentations du modèle
17/10/2019	EMINES	Interlocuteurs en charge des projets de recherche à Youssoufia OCP, Directeur de l'EMINES, doctorants.	Point d'avancement, et présentation des résultats
07/02/2020	EMINES	Interlocuteur en charge des projets de recherche à Youssoufia OCP, Directeur de l'EMINES, doctorants.	Point d'avancement, et présentation des résultats
05/07/2021	A distance	Directeurs de l'EMINES, Responsables de différentes division du site de Youssoufia OCP	Présentation et discussion des résultats des outils développés

4. CONTEXTE SCIENTIFIQUE : LA PLANIFICATION DANS LA SUPPLY CHAIN MINIERE

Comme précédemment mentionné, la thématique de notre recherche relève du Supply Chain Management. Le système industriel (Figure 17) nous apparaît ainsi constitué par un enchainement de processus d'extraction, de transports (par convoyeur, par camion, par train, par bateaux), coordonnés par un processus logistique intégré par une firme pivot (l'OCP), qui va ainsi chercher à piloter des entités de taille diverses lui appartenant ou étant liées contractuellement. Ce système est ainsi un système de la classe des Supply Chains, définie par (Fenies, 2005, 2006) comme une coalition d'organisations autonomes coordonnées par un processus logistique intégré. Les processus particuliers liés au monde minier ont conduit (Azzamouri 2018) à caractériser la Supply Chain de l'OCP comme une supply chain minière. Les problèmes décrits par les industriels concernent les problèmes de coordination d'entité par la planification en contexte de supply chain management. Nous rappelons rapidement dans un premier temps la notion de supply chain management puis mettons un focus sur le mix décisions / approches de planifications.

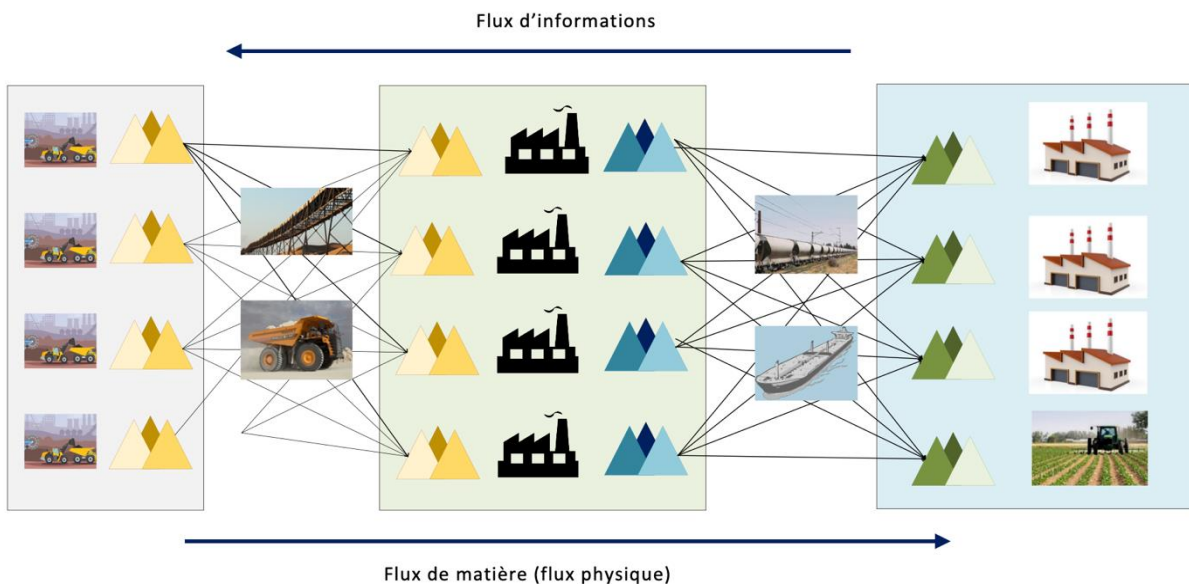


Figure 17 : Schéma d'une Supply Chain Minière

4.1. Le Supply Chain Management

Pour assurer la fonction logistique dans l'entreprise, un ensemble de moyens est mis en œuvre formant ainsi le système logistique de l'entreprise. (Gourgand et Tchernev 1998) définissent le système logistique de l'entreprise comme « *un ensemble de moyens ordonnés, de manière à transformer, à partir des flux de matières premières ou des flux de composants ou produits semi-ouvrés, des flux de produits semi-ouvrés ou produits finis, afin de fournir, au moindre coût, la marchandise demandée, au bon moment, avec la quantité nécessaire, avec la qualité demandée, avec l'information nécessaire, à l'endroit où la demande existe* ». Cette définition s'inscrit ainsi dans une démarche de gestion de la supply chain et du supply chain management. La gestion d'une SC, sa mise en œuvre et son amélioration continue est sans doute un passage obligé pour atteindre la performance et l'efficacité tant recherchées par les managers. Le SCM consiste donc en les « *bonnes pratiques logistiques inter-entreprises et inter-fonctionnelles* » (Fawcett et Magnan 2002).

Pour définir le SCM, nous retenons la définition de *The Global Supply Chain Forum* (GSCF), citée par (Lambert et Cooper 2000) :

“Supply Chain Management is the integration of key business processes from end user through original suppliers that provides products, services, and information that add value for customers and other stakeholders”.

Cette définition montre le caractère transdisciplinaire du SCM, elle intègre en effet l'ensemble des processus clés pouvant contribuer à ajouter de la valeur aux produits afin de mieux correspondre aux attentes des clients et des actionnaires.

D'une manière plus concrète, le SCM peut également être défini comme une démarche permettant l'intégration d'unités organisationnelles qui utilisent des ressources restreintes et qui coordonnent leur action par un processus logistique intégré afin d'améliorer prioritairement leur performance collective mais aussi à terme leur performance individuelle (Féniès 2006; Stadtler 2005).

Deux notions cruciales pour la performance de la *Supply Chain* sont d'ores et déjà distinguées : la performance collective, prioritaire dans le cadre d'un processus logistique intégré, et la performance individuelle qui figure aussi parmi les objectifs des entités, mais

en second lieu après la performance collective. La notion de management intégré de la Supply Chain remplace désormais la notion d'entités isolées face à des acteurs externes. La section 4.2 présente les avantages de l'approche de planification intégrée. Ensuite, la section 4.3 définit les typologies de décisions prises dans la cadre de la planification intégrée de la chaîne logistique.

4.2. Approche de planification intégrée

L'activité d'une chaîne logistique peut se résumer en un séquençement d'activités de production, stockage et transport. Planifier la chaîne logistique pourrait donc être assimiler à la planification d'une sous-partie ou de la totalité de ses composantes à savoir la production, le stockage et le transport. Traditionnellement, l'approche utilisée consiste à traiter séparément ou bien séquentiellement les décisions de planification. Ceci revient à planifier la production et/ou le stockage puis ensuite intégrer ces décisions pour planifier le transport en minimisant les coûts afférents à chacune de ces opérations. Or résoudre localement les problèmes de la chaîne logistique pourrait engendrer une augmentation, et non une diminution, du coût global (Adulyasak, Cordeau, et Jans 2013). De plus, l'intégration des décisions de la chaîne logistique pourrait augmenter considérablement l'efficacité et l'efficience de l'ensemble du système de production (Lambert et Cooper 2000; Kanda et Deshmukh 2008; Arshinder, Kanda, et Deshmukh 2011).

(Fahimnia et al. 2013) résumant les raisons derrière le recours à la planification intégrée de la production et de la distribution en deux points principaux : (1) L'amélioration de la rentabilité totale de la chaîne logistique à travers l'intégration des activités de la production et de la distribution. (2) La réduction des *lead time* et une meilleure réactivité du système face aux fluctuations de la demande ce qui permet de diminuer la propagation des événements imprévus et indésirables à travers le réseau.

Partant de ce constat, plusieurs chercheurs ont adopté une approche intégrée afin de gérer le système industriel global. Ceci revient à planifier et optimiser simultanément l'ensemble ou un sous-ensemble des décisions relatives à la planification de la chaîne logistique. C'est ainsi qu'une chaîne logistique est définie par (Min et Zhou 2002) comme un système intégré qui synchronise une série de processus inter-reliés. Selon (Fenies *et al*, 2004), une chaîne logistique peut être assimilée à un processus intégré ayant pour objectif

prioritaire celui d'améliorer la « performance collective » de l'ensemble du système (satisfaction du client final, optimisation globale du fonctionnement de la Supply Chain...) mais aussi à terme la performance individuelle de chaque entité composant cette chaîne logistique (maximisation du profit d'un sous-système, amélioration de la performance industrielle...). La performance individuelle des processus figure donc en deuxième rang parmi les objectifs des entités, la priorité serait d'améliorer la performance collective, dans le cadre d'un processus logistique intégré.

4.3. Typologie des décisions prises par les modèles intégrés de planification

Parmi les enjeux majeurs des industriels, la planification des systèmes logistiques est au cœur de leurs préoccupations. Son but est de livrer aux clients des produits en quantité demandée et au moment voulu, au coût de revient le plus bas. Autrement dit, l'enjeu est de trouver un équilibre entre le taux de satisfaction de la demande et les différents coûts engendrés par la fabrication effective de la demande (production, stockage, etc.).

La présente section a pour objectif de définir les problèmes classiques de planification intégrée de la chaîne logistique dans un horizon tactique / opérationnel. Pour cela, nous commençons par définir les entités (Approvisionnement, production, transport et stockage) qui composent un système industriel multi-site, nous décrivons aussi les différentes décisions prises dans le cadre de ce type de problèmes.

Autres que les problèmes de planification présentés dans cette section, d'autres problèmes de planification dans le cadre de la chaîne logistique peuvent être rencontrés dans la littérature, tels que: la planification de la demande, planification des canaux de distribution, la localisation des sites de production et stockage... Ces décisions couvrent un horizon décisionnel stratégique et sortent du cadre de la présente recherche. Toutefois les lecteurs intéressés par ces problématiques peuvent consulter (Meixell et Gargeya 2005; Klose et Drexel 2005; Goetschalckx, Vidal, et Dogan 2002; Vidal et Goetschalckx 1997)

Cependant, la chaîne logistique peut être décomposée en quatre sous-systèmes à savoir : des opérations d'approvisionnement, des entités de production, des unités de stockage et des systèmes de transport. Commençons donc par définir ces différentes

entités avant de présenter les principales décisions prises dans la cadre de la planification de chacune de ces entités.

4.3.1. Approvisionnement

C'est l'activité qui consiste à fournir des matières premières, pièces usinées, pièces de rechange ainsi que d'autres fournitures ou services aux sites de production. L'approvisionnement est une activité importante de la chaîne logistique car le coût de matière première constitue un pourcentage non négligeable du coût total de tout produit. Le choix de bons fournisseurs présente donc une réelle opportunité de réduction des coûts. (Krajewski et Ritzman 2001) affirme que le coût d'achat des matières premières, pièces de rechange et composants constitue en moyenne 60% du coût total. De plus la localisation des fournisseurs affecte directement la structure de la chaîne logistique (localisation et dimensionnement des stocks par exemple).

4.3.2. Production

Activité qui consiste à transformer des matières premières en produits finis ou produits semi-finis, elle est généralement composée de plusieurs étapes qui produisent et consomment des produits intermédiaires (Pochet 2001). Chaque étape requiert une ou plusieurs matières premières, et produit un ou plusieurs produits. Les matières premières sont approvisionnées auprès des fournisseurs, les produits finis quant à eux sont vendus aux clients. Les produits intermédiaires peuvent également être vendus. Les matières premières, les produits intermédiaires et les produits finis peuvent être stockés, ce qui permet leur consommation dans différentes périodes et avec des débits différents. Planifier la production consisterait donc à répondre aux questions suivantes (Fahimnia et al. 2013; Park, Choi, et Kang 2007) :

- Quelle unité de production va fabriquer les produits demandés ?
- Combien ces unités de production vont-elles fabriquer afin de satisfaire efficacement (i.e. avec le moindre coût) la demande ?
- Quand (i.e. en quelle période vas-elle fabriquer cette quantité) ?

Autrement, l'objectif principal de la planification de la production est de trouver le meilleur compromis entre les objectifs économiques et les objectifs de satisfaction de la demande, les objectifs financiers sont généralement présentés par les coûts de production, stockage, transport, ... Les objectifs de satisfaction de la demande sont, quant à eux, mesurés par l'habilité du système à livrer le bon produit, en quantité demandée, à la date et à l'endroit promis (Pochet 2001).

4.3.3. Transport

Activité qui consiste à déplacer des entités physiques, en l'occurrence des produits dans notre contexte, d'un endroit à un autre. Cette activité implique l'utilisation d'agents transporteurs qui sont des entités mobiles qui permettent son accomplissement. Planifier la distribution consiste donc à déterminer les quantités ainsi que les canaux de distribution afin de livrer les produits aux clients. Les décisions prises dans le cadre du transport dans les problèmes d'optimisation de la chaîne logistique peuvent être classées en deux grandes catégories : transport par voie directe et routage dans lequel il est question de déterminer le chemin à parcourir afin de transporter les produits vers les clients.

4.3.4. Stockage

Un stock est un ensemble de matières premières, de produits intermédiaires ou de produits finis entreposés en l'attente d'une utilisation antérieure (Giard 2003). Dans une chaîne logistique, les unités de stockage constituent un point de découplage qui a pour objectif d'atténuer ou d'arrêter la propagation des perturbations qui surviennent dans cette chaîne, mais aussi de faire face aux fluctuations de la demande. Selon (Andersson et al. 2010), le stock permet de concilier deux aspects contradictoires : la volatilité du marché, et la production qui tend à fonctionner selon une économie de marche. Ceci dit, les unités de stockages peuvent être localisées dans différents échelons de la chaîne logistique : fournisseurs, unités de production, clients...

En guise de synthèse, la Figure 18 identifie et classe les décisions les plus pertinentes considérées dans le cadre de la planification de la chaîne logistique.

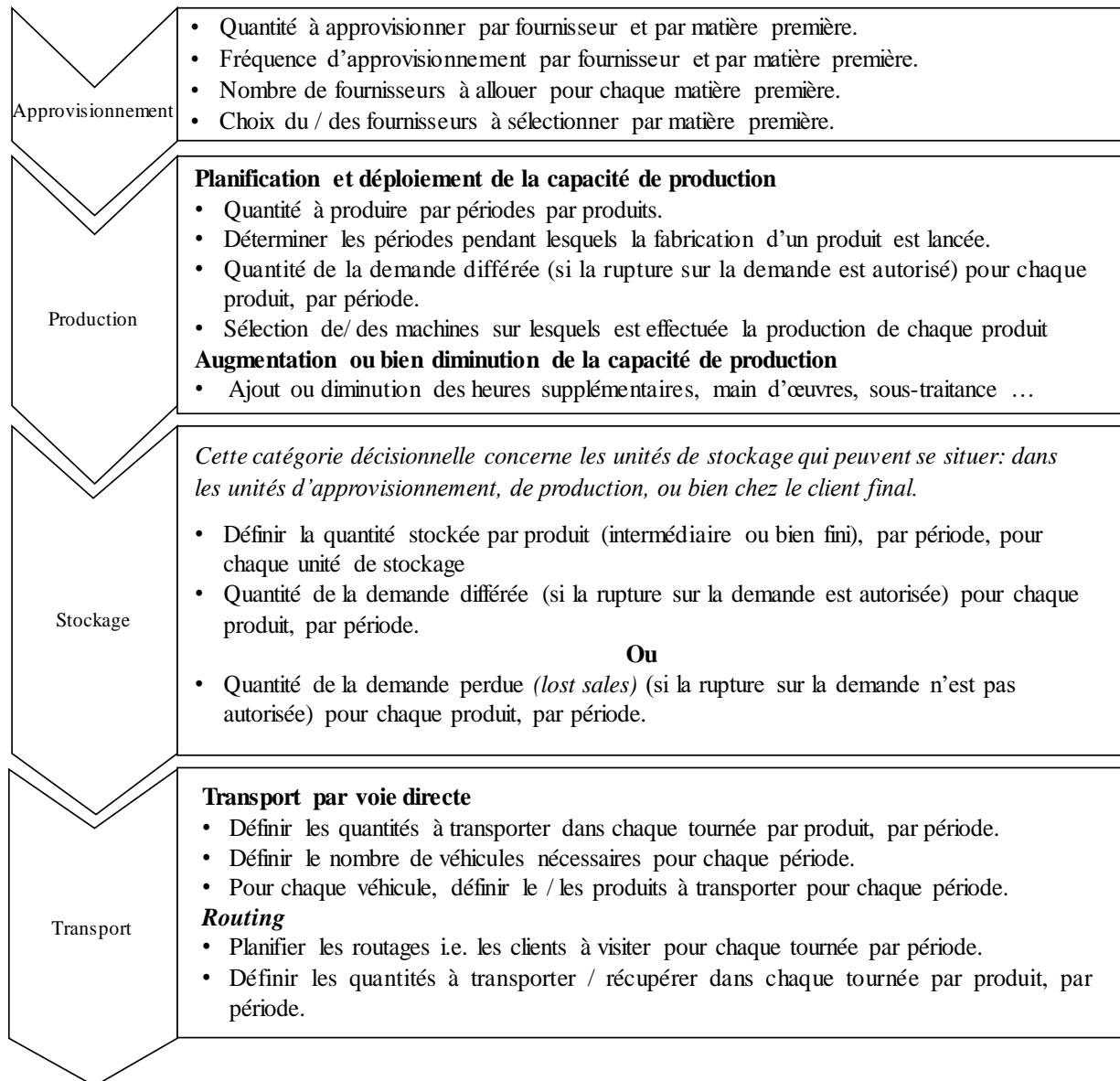


Figure 18: Décisions prises dans le cadre des problèmes de la planification intégrée de la chaîne logistique

Les décisions relatives à l'approvisionnement n'étant pas du ressort du travail actuel, nous nous intéressons dans ce manuscrit uniquement à l'étude de la planification intégrée de la production, stockage et transport.

5. DEFINITION DE LA PROBLEMATIQUE INDUSTRIELLE

Ainsi, et en tenant compte des avantages d'une approche globale, cette étude part d'un problème réel proposé par notre partenaire industriel le groupe OCP. Le système

étudié étant le réseau de production complexe précédemment décrit (Figure 8 ; Figure 9) situé au niveau de l'axe centre, composé de :

- Système de production composée des trois unités de production : lavage, calcination et séchage, et alimenté par les trois sites miniers : Ben Guerir, Bouchane et Mzinda.
- Système de stockage composé de plusieurs sites de stockage situés en amont et en aval des unités de production et en fin du système logistique.
- Système de transport à flux hybride composé de convoyeurs à flux continu qui inter-relient les différentes unités de production et de stockage,
- Système de transport ferroviaire à flux discret, conditionné par des fenêtres de temps, qui relie les unités de production aux stocks finaux.

L'objectif est de partir de ce réseau logistique multi-sites (une supply chain minière), afin de concevoir un outil d'aide à la décision intégré pour la planification simultanée des décisions de production, stockage et transport. Cet outil a pour but de faciliter le processus de planification des flux physiques dans l'ensemble du système logistique étudié, en permettant une évaluation de la solution existante ainsi que la proposition d'alternatives à cette dernière permettant de maximiser la satisfaction de la demande, de minimiser les arrêts de production, et de minimiser les coûts opérationnels associés. De plus, la solution proposée optimise simultanément l'ensemble des décisions relatives au système considéré à savoir la production, le stockage et le transport. Cette approche d'optimisation globale a pour avantage d'améliorer flexibilité industrielle du système et de promouvoir la synergie entre ses différentes composantes. La démarche retenue consiste à mettre en œuvre un modèle intégré de planification des flux qui tient compte de l'ensemble des contraintes et spécifications techniques du système.

D'autre part, ce travail de recherche entend résoudre un problème industriel réel survenant dans le contexte d'un réseau production minier multi niveaux, multi produits. En d'autres termes, l'objectif industriel est de doter le 'gestionnaire des flux' au niveau du site de Youssoufia d'un outil unique, efficace, et ergonomique qui permet de calculer :

- Un plan de production : composé des périodes de production et des quantités à produire pour chaque produit et pour chaque unité de production.

- Un plan de stockage : composé des quantités à stocker par produit, pour chaque période, dans chaque site de stockage.
- Un plan de transport : composé des quantités à transporter entre deux sites interconnectés, et des quantités à transporter par trains pour chaque période en respectant les contraintes liées aux fenêtres de temps.

La Figure 19 schématise la problématique industrielle traitée par la présente recherche.

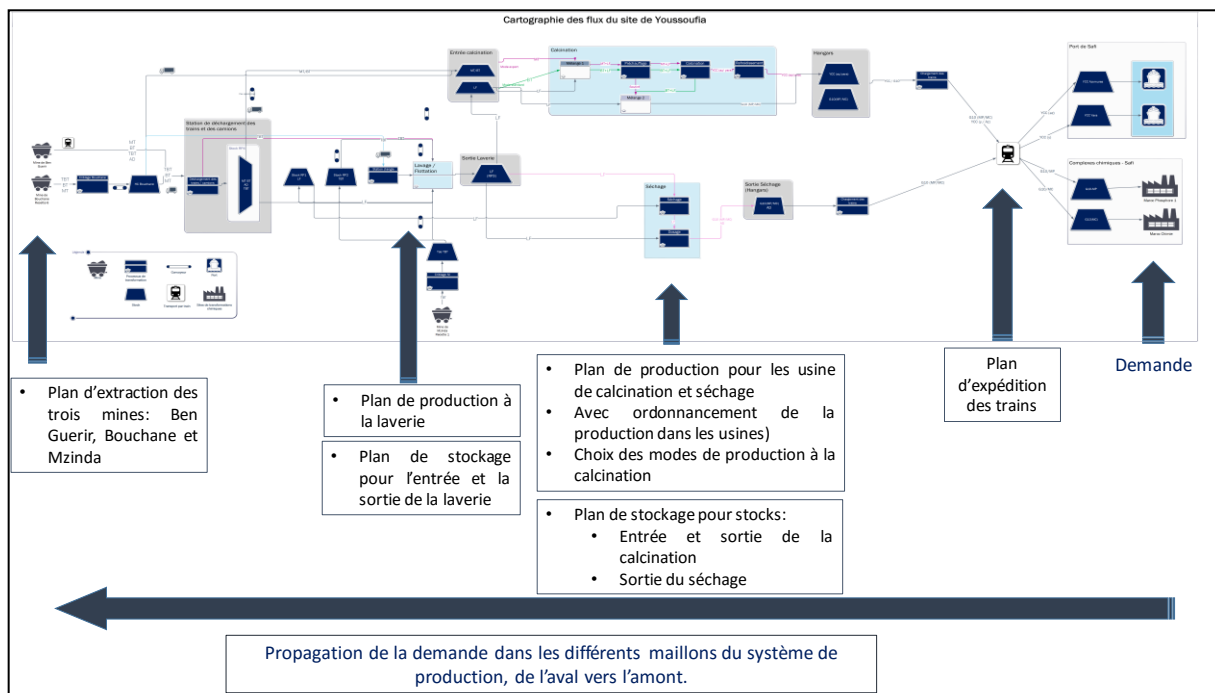


Figure 19: Schéma descriptif de la problématique industrielle

6. DEFINITION DE LA PROBLEMATIQUE SCIENTIFIQUE

Le présent travail propose de résoudre un problème industriel survenant dans un milieu industriel minier, intégrant trois problèmes de décisions classiques de 'Supply Chain Management', à savoir, la planification de production, de stockage et du transport. Partant d'un cas réel, l'originalité de ces travaux de recherche vient de l'ajout de variables opérationnelles telles que le transport des produits finis par voie ferroviaire, les fenêtres de temps de livraison des produits finis ainsi que d'autres caractéristiques du système de production telle que la production multi- modes.

Cet objectif industriel a lui-même été étendu dans le cadre de nos activités de recherche afin de se ramener à une problématique théorique exprimée comme un problème de dimensionnement des lots. Généralement, l'objectif de ce problème est de trouver un plan de production qui minimise les coûts composés des coûts de production, de stockage et de *set up*. Partir de la nécessité d'adapter le modèle classique de *lot sizing* au problème industriel traité par notre partenaire OCP nous amène à proposer un problème, original, de *lot sizing* multi niveaux associé à un problème de transport par trains avec fenêtres de temps que nous nommons MLLSP-TTW (*Multi Level Lot Sizing Problem integrated with train transport with time windows*).

Bien que le point de départ de ce travail de recherche soit un problème industriel réel, sa formalisation semble se traduire par un problème générique applicable à toute structure industrielle similaire. Ainsi, ce travail propose une adaptation du problème classique du *lot sizing* multi niveaux aux spécificités du contexte industriel minier ; il nous faudra confronter la réalité du MLLSP-TW à l'existant de la littérature pour montrer son originalité (Chapitre II).

7. FACTEURS DE COMPLEXITE

L'étude et l'analyse approfondie du terrain nous ont permis de relever les facteurs complexité suivants :

- Originalité des caractéristiques structurelles des systèmes de production, de stockage et de transport en comparaison avec les systèmes industriels classiques. Notons à titre d'exemple que les produits sont stockés sous la forme de tas énormes avec capacité de stockage qui dépend du nombre de produits stockés. Des délais d'attentes post-production sont parfois nécessaires dans ces unités de stockage, où le produit est maintenu au « repos » jusqu'à stabilisation de ces caractéristiques chimiques.
- Nature hybride des flux physiques dans le système logistique étudié, continus en ce qui concerne le système de production et le transport par convoyeurs, et discrets au niveau du transport par trains. En effet, le système de transport est composé de convoyeurs à flux continu dont la capacité dépend du débit des unités amont et aval et de trains à flux discret et contraints par des plages horaires de transport.

Les stocks sont un point de découplage des flux continus caractérisant les processus de production d'un côté, et les flux discrets caractérisant le processus de transport de l'autre côté. En plus de leur fonction de découplage des flux, les stocks permettent aussi de synchroniser les flux dans l'ensemble du système, caractérisés par des débits différents, afin de garantir la fluidité de l'activité tout au long de la supply chain minière.

- Impossibilité de prédéfinir des recettes de production figées dans les différents niveaux de production. En effet, les recettes et les délais de production sont fortement influencés par la composition chimique des minerais extraits d'une part, et des spécifications chimiques des produits finis d'autre part. Cela oblige le système de production à se doter d'un certain degré de flexibilité afin d'adapter continuellement ses recettes à la composition chimique des minerais extraits.
- Les capacités de production sont bien définies dans les lignes de fabrication et ne peuvent varier que dans une plage de valeurs restreinte, avec des temps de démarrage et de changement de produit relativement élevée (peut atteindre quelques jours dans certains cas).
- La propagation en amont et aval des décisions prises dans un point donné du système logistique. La nature de l'activité est caractérisée par des installations lourdes, dans lesquels les changements peuvent nécessiter des temps importants allant parfois jusqu'à 6 jours. Toute décision prise dans un point donné de la supply chain minière impacte les unités en amont et en aval de la chaîne logistique, et pourrait engendrer des pertes non négligeables en termes de coûts et / ou de satisfaction de la demande. Les approches traditionnelles de planification seraient de planifier séquentiellement la production, le stockage et ensuite le transport. Or toute réflexion locale pourrait avoir pour conséquence de négliger les contraintes globales, notamment celles qui inter-relient les sous-systèmes entre eux.
- L'industrie minière est caractérisée par une forte intensité capitalistique en raison de l'importance des ressources matérielles investies (installations d'extraction du minerai, tailles des unités de fabrication ...). En conséquence, les financiers imposent aux managers de garder des taux d'utilisation élevés des ressources, ce

qui revient à programmer des lots de production de taille relativement grande, contrairement aux pratiques de production des systèmes industriels contemporains.

8. CONCLUSION

L'objectif de notre thèse est de proposer aux planificateurs des systèmes industriels un ensemble d'outils et méthodes, adaptés aux spécificités industrielles minières, qui leur permet de planifier leurs sous-systèmes logistiques. Cet ensemble comporte :

- Une approche de planification intégrée qui tient compte des caractéristiques et spécificités du terrain industriel minier.
- Une modélisation mathématique du système logistique qui couple le système multi-sites de production et stockage et le système de transport par voie ferroviaire. L'optimisation de ce modèle permet de trouver la solution globale qui optimise simultanément l'ensemble des décisions du système logistique. Ensuite étant donné le caractère industriel de nos travaux, on peut d'ores et déjà prévoir que des méthodes heuristiques traitant chacune la problématique posée d'un angle de vue différent permettraient de résoudre les instances de grande taille du modèle intégré en des temps de résolution acceptables.

Le modèle et les heuristiques proposées feront l'objet des chapitres Chapitre III et Chapitre IV. Au-delà de la résolution de la problématique initialement posée, la mise en œuvre de l'approche de planification intégrée ainsi que les outils proposés sont facilement transposables à d'autres environnements et contextes industriels.

Nous avons montré que le problème posé par l'OCP se rattache au thème de la planification des systèmes industriels et constitue un problème de la famille du *lot sizing*. Il apparaît donc important de revoir la littérature du *lot sizing* appliqué à des problèmes et des champs industriels similaires au notre ; ceci est donc l'objet du chapitre suivant.

Chapitre II : Revue de la littérature - le *lot sizing* associé au problème du transport

Résumé. La mise en œuvre de ce deuxième chapitre émane de la volonté de positionner la problématique que nous adressons par rapport aux recherches antérieurement menées. Plus précisément, il s'agit de poser le cadre général défini par le problème du *lot sizing*. Plus précisément, est traité dans cette thèse un problème de *lot sizing* multi niveaux intégré à un problème de transport par trains avec fenêtres de (*MLLSP-TTW Multi Level Lot Sizing Problem integrated with train transport with time windows*). Ce chapitre est basé sur une structure arborescente qui commence par définir le problème du *lot sizing*. Lui sera progressivement associés l'ensemble des composantes additionnelles lui permettant de déboucher sur la problématique originale étudié dans le cadre de cette recherche. Évidemment au-delà du récit des travaux antérieurs, cette revue met également en évidence de l'impossibilité d'appliquer les modèles existant dans la littérature à notre contexte industriel.

1. INTRODUCTION

Les travaux effectués dans le cadre de la présente thèse ont été rattachés, lors du chapitre premier, à la problématique de la planification de la *Supply Chain*, et plus précisément à la planification intégrée de la production, stockage et transport ferroviaire dans le contexte minier. De plus, le premier chapitre a souligné l'intérêt de recourir au problème du *lot sizing* (LSP) pour résoudre la problématique industrielle posée. Le LSP a fait l'objet d'un nombre important de recherches dont il est indispensable de donner un aperçu afin de positionner au mieux notre recherche dans son cadre scientifique. Ceci consiste d'abord à définir le problème du LSP dans son contexte général, puis à identifier les principaux problèmes qui en découlent et enfin à étudier les applications industrielles potentiellement similaires. Au-delà du positionnement de notre recherche, ce chapitre a pour second objectif celui de vérifier l'originalité ainsi que les apports scientifiques issus de nos travaux.

Notons que pour des raisons de concision d'un côté, et en raison du nombre important de recherches effectuées sur le *lot sizing* de l'autre côté, nous orientons notre revue vers des recherches sélectionnées selon les trois critères :

- (i) Intégration du problème de *lot sizing* au problème de transport par voie directe.
- (ii) Problèmes ayant abordé une problématique industrielle réelle.
- (iii) Champs industriels traités proches de celui de l'industrie minière.

La section 2 de ce chapitre est consacrée à la définition du problème classique du LSP, ensuite les deux sections 3 et 4 décrivent respectivement ses deux variantes mono-niveau et multi-niveau. Ensuite la section 5 traite les différents problèmes qui découlent de l'intégration des problèmes du LSP et du transport. La section 6, quant à elle, traite les méthodes de résolution du problème du LSP multi-niveaux. La section 7 présente des applications industrielles du LSP aux domaines de l'industrie de process, métallurgique, et minière. Enfin, la section 8 présente la contribution potentielle de cette recherche à la littérature scientifique.

2. PROBLEME CLASSIQUE DU *LOT SIZING* -

2.1. Définition– modèle original de Wagner Whitin

Le problème du *Lot Sizing*¹ (LSP) serait l'un des problèmes les plus étudiés en planification de la production et du stockage. Hormis sa simplicité, il constitue une base initiale à laquelle sont associés d'autres problèmes plus complexes.

Planifier la production constitue le processus de détermination des niveaux de production utilisant efficacement les ressources de production disponibles afin d'anticiper les opportunités de vente durant l'horizon de planification (Brahimi 2004; Karimi, Ghomi, et Wilson 2003). Planifier la production revient donc à déterminer les quantités à produire pour chaque période de temps pendant un horizon limité afin de satisfaire des objectifs commerciaux, économiques... Si on suppose une unité de production dans laquelle peuvent être produits différents items, un plan de production serait donc constitué d'une succession de séries d'*items* sur l'unité de production. Chaque série est définie par la production d'un *item* de même nature sur une ou plusieurs périodes. Ceci nous renvoie vers la notion fondamentale du lot.

Un lot peut être défini comme une séquence continue du même produit, le nombre d'unités d'un *item* dans un lot définit la taille du lot (Brahimi 2004). Un lot est le nombre d'unités du même produit à fabriquer afin de respecter des contraintes physiques éventuelles liées à la production. Par ailleurs chaque lot fabriqué engendre naturellement des coûts de démarrage de production (communément appelés coûts de *set up*) et des coûts variables de production. D'autres coûts sont également envisageables comme le coût de stockage, le coût de transport, ou bien le coût de retard sur la demande. Or, produire des lots de petites tailles serait coûteux car les coûts et les temps de démarrage ne seraient pas amortis ; à l'opposé, produire selon des tailles de lots grandes serait également coûteux à cause des coûts de stockage qui seraient importants. Il serait donc judicieux de dimensionner des tailles de lot optimales afin de trouver un compromis entre les différents coûts, ce qui définit le problème du *lot sizing*.

¹ Lot sizing : dimensionnement de lot.

Le problème initial du LSP considère quant à lui une seule ressource de production qui produit et stock un seul produit afin de satisfaire une demande connue pour un horizon fini. (Wagner et Whitin 1958) ont été les premiers à résoudre ce problème en proposant un modèle qui détermine les quantités à produire par période afin de satisfaire la demande en minimisant les coûts de production, coûts de set up et les coûts de stockage. Cela revient à dimensionner la taille de lot pour chaque période afin de répondre à la demande et minimiser les coûts totaux. Hormis le fait que ce premier travail traite un problème mono-produit avec une ressource à capacité infinie, il est considéré comme la méthode de référence en matière de planification de la production et des stocks (A. Drexel et Kimms 1997). Peu après, (Manne 1958) élargit le problème résolu par (Wagner et Whitin 1958b) pour inclure la multitude de produits et la contrainte de capacité. Ensuite, au fil des années, le nombre de recherches sur le LSP n'a cessé d'augmenter, ce qui a permis d'enrichir le problème initial en lui intégrant plus de paramètres et contraintes et en élargissant son champ d'application.

Nous présentons dans ce qui suit la formulation proposée par Wagner et Whitin afin de résoudre le problème du *lot sizing* à un seul produit, sans contrainte de capacité. L'objectif du modèle est de satisfaire la demande d_t pour chaque période t de l'horizon de planification fini composée de l'ensemble T de périodes discrètes, en minimisant les coûts totaux composés de: α_t le coût de production unitaire, β_t le coût de démarrage de la production² et γ_t : le coût unitaire de stockage. Les retards sur la demande³ n'étant pas autorisé, la demande est satisfaite à partir de la production et / ou à partir des stocks. Les variables de décision sont donc x_t : variable continue positive qui représente la quantité à produire pendant la période t , y_t : variable binaire de *setup* égale à 1 si et seulement si $x_t > 0$, et i_t : variable continue positive qui représente la quantité à stocker pendant la période t . Le problème est donc formulé comme suit :

$$\text{Min} \sum_t (\alpha_t x_t + \beta_t y_t + \gamma_t i_t) \quad (1)$$

Les contraintes du problème sont :

² Démarrage de la production : Setup, sera nommé setup dans la suite du manuscrit.

³ Retard sur la demande : rupture de stock, backlog ou bien backorder.

$$x_t - i_t + i_{t-1} = d_t \quad \forall t \quad (2)$$

$$x_t \leq My_t \quad \forall t \quad (3)$$

$$x_t, i_t \geq 0 \quad \forall t \quad (4)$$

$$y_t \in \{0,1\} \quad \forall t \quad (5)$$

La fonction objectif (1) minimise les coûts totaux de production (variable et de *setup*) et les coûts de stockage. La contrainte (2) exprime la conservation de flot de stock d'une période à une autre, elle garantit aussi la satisfaction de la demande à chaque période t . La contrainte établit la liaison entre la variable de production x_t et la variable de *setup* y_t par le biais du majorant de M (M est un majorant qui représente une capacité « infinie », dans certains cas il est égal à la somme des demandes restantes : $(\sum_{i=t}^T d_i)$, dans les modèles avec capacité il peut être égal à la capacité). La contrainte (4) traduit le fait que les variables x_t et i_t sont continues et positives. Finalement la contrainte (5) traduit le fait la variable y_t est binaire.

Plusieurs revues de littérature ont été réalisées afin de fournir aux lecteurs des bases d'analyse et de comparaison du problème de *lot sizing*. La plus récente revue serait celle proposée par (Brahimi et al. 2017), qui est une extension et mise à jour du papier (Brahimi et al. 2006) ; elle s'est intéressée aux problèmes de *lot sizing* à une seule référence. Après avoir analysé environ 300 papiers, (Brahimi et al. 2017) ont conclu que l'intérêt grandissant pour le *lot sizing* à une seule référence, bien qu'il ne corresponde pas directement à la réalité industrielle, vient du fait qu'il permet ainsi d'assimiler certaines propriétés structurelles de ces problèmes industriels dans des sous-systèmes issus du système réel.

(Karimi, Ghomi, et Wilson 2003) ont également travaillé sur les problèmes de *lot sizing* avec contrainte de capacité. Ils ont souligné le fait que malgré le grand nombre de recherches portant sur ces problèmes, peu de recherches se sont intéressées à des configurations réalistes du problème qui pourraient inclure des *setup* complexes ou bien une prise en charge de la rupture de stocks.

D'autres revues peuvent sur le thème peuvent également être consultées telles que: (Bushuev et al. 2015; G. E. A. Clark, Almada-Lobo, et Almeder 2011; Jans et Degraeve 2008b; A. Drexl et Kimms 1997; Billington, McClain, et Thomas 1983) ; elles ne font que confirmer la revue proposée par (Brahimi et al. 2017).

2.2. Classification des modèles de lot sizing

Nombreux sont les chercheurs qui se sont intéressés à la problématique de la planification de la production et des stocks par le *lot sizing*. La littérature traitant les modèles du lot sizing est donc diverse et variée. Quelques chercheurs tels que (Wörbelauer, Meyr, et Almada-Lobo 2019; Brahimi et al. 2017, 2006; Kuik, Salomon, et Van Wassenhove 1994) ont donc proposé des classifications de ces modèles selon plusieurs critères. Nous présentons dans ce qui suit les principaux critères de classification du problème du *lot sizing*, le Tableau 4 synthétise ces critères.

Tableau 4: Critères de classification des problèmes du *lot sizing*

Critère	Alternatives		
Topologie du système	Mono-niveau	Multi-niveaux	
Nombre de références	Mono-produit	Multi-produits	
Capacité	Finie	Infinie	
Demande	Dynamique	Constante	
Horizon	Fini	Infini	
Type de l'information	Déterministe	Stochastique	
Coûts additionnels considérés	Lancement de la production	Non satisfaction de la demande	Capacité additionnelle
Echelle du temps	Discret		Continu
	Périodes de petites tailles (Small time buckets)	Périodes de grandes tailles (Big time buckets)	Périodes de très grandes tailles (Very big time buckets)

Topologie du système.

Les modèles mono-niveau traitent des problèmes qui ne tiennent pas compte de la nomenclature du produit, l'objectif de la planification est donc de satisfaire la demande finale des produits finis. Tandis que les modèles multi-niveaux tiennent compte de la nomenclature des produits. Celle-ci exprime la relation entre la production d'un produit et la disponibilité de ces composantes. Notons que la classe des problèmes multi-niveaux,

qui prend en compte la nomenclature des produits, sera traité plus en détail dans la section 4.

Nombre de références.

Les modèles mono-produit traitent des problèmes dans lesquels les produits ne sont pas liés par l'utilisation d'une ressource commune ou bien par une relation parent-composant. Inversement, si les produits sont dépendant le problème est dit multi-produit.

Les contraintes de capacité.

Le problème est dit avec contrainte de capacité lorsque des contraintes sur une ou plusieurs ressources sont imposées. Ces contraintes incluent : les capacités de production, les capacités de stockage, les capacités de transport, le budget, le nombre d'employés...

Types de la demande.

La demande est dite variable ou dynamique si l'horizon est discrétisé en plusieurs périodes. Dans le cas d'une demande constante, une seule valeur de la demande est considérée. Il est à noter que la majorité des problèmes rencontrés dans la littérature traitent le cas d'une demande dynamique.

Horizon considéré.

L'horizon considéré peut-être fini ou infini. Généralement, l'horizon infini est considéré dans les problèmes continus comme pour le cas de (Friedman et Winter 1978).

Échelle du temps.

L'horizon de la planification peut être discrétisé en des périodes de petites tailles (minutes, heures, jours...) appelées *small time buckets*, ou en des périodes de grandes tailles (jours, semaines, mois...) appelées *big time buckets*, ou bien en des périodes de très grandes tailles (mois, trimestres, années...) appelées *very big time buckets*. L'horizon peut aussi être continu. Le modèle *Economic Order Quantity* (EOQ) établi par (Harris 1913) est un des premiers modèles continus ; ensuite sont venus les modèles (Rogers 1958; Elmaghraby 1978) qui ont étendu le modèle de Harris en considérant plusieurs produits et une capacité finie. Dans ce même contexte, (Glock, Grosse, et Ries 2014) présentent une étude de la littérature du *lot sizing* dont l'objectif est d'analyser et de classer les modèles qui ont émergé à partir du modèle fondateur de Harris.

Coûts additionnels considérés.

En plus des coûts basiques cités dans le modèle de Wagner et Whitin, d'autres coûts peuvent être considérés afin de rendre le modèle plus réaliste tels que:

- Les coûts liés au lancement, à la préparation ou au changement d'un produit sur une ligne de production. Des temps et des coûts de changement ou d'arrêt sont parfois subits lors du changement ou de l'arrêt de la production. Ces coûts peuvent dépendre de la séquence de passage de produits sur la ressource. (Belvaux et Wolsey 2001; Sox et Gao 1999)
- Les coûts liés à la non satisfaction de la demande tels que : la rupture de stocks, la demande différée, ou bien la demande perdue (Brahimi et al. 2006), ces coûts interviennent lorsque le système n'arrive pas à satisfaire toute ou partie de la demande dans une période donnée.
- Les coûts liés à la capacité, ces coûts sont liés à l'utilisation d'une capacité supplémentaire, citons par exemple, les coûts des heures supplémentaires ou bien les frais de location d'un entrepôt. supplémentaire.

Type de l'information.

Nous pouvons distinguer des modèles déterministes, dont les valeurs des paramètres sont déterministes, et des modèles stochastiques pour lesquels certains paramètres sont représentés par des variables aléatoires ou bien par des scénarios (Tarim et Kingsman 2004).

Dans le but d'offrir au lecteur une vue globale des différentes typologies et classifications du problème de *lot sizing*, nous proposons dans la Figure 20 une arborescence qui reprend les critères de classifications les plus importants, les éventualités liées à chaque critère, et les classes de problèmes résultantes. De plus, pour illustrer cette classification, le Tableau 5 associe les recherches menées à notre classification.

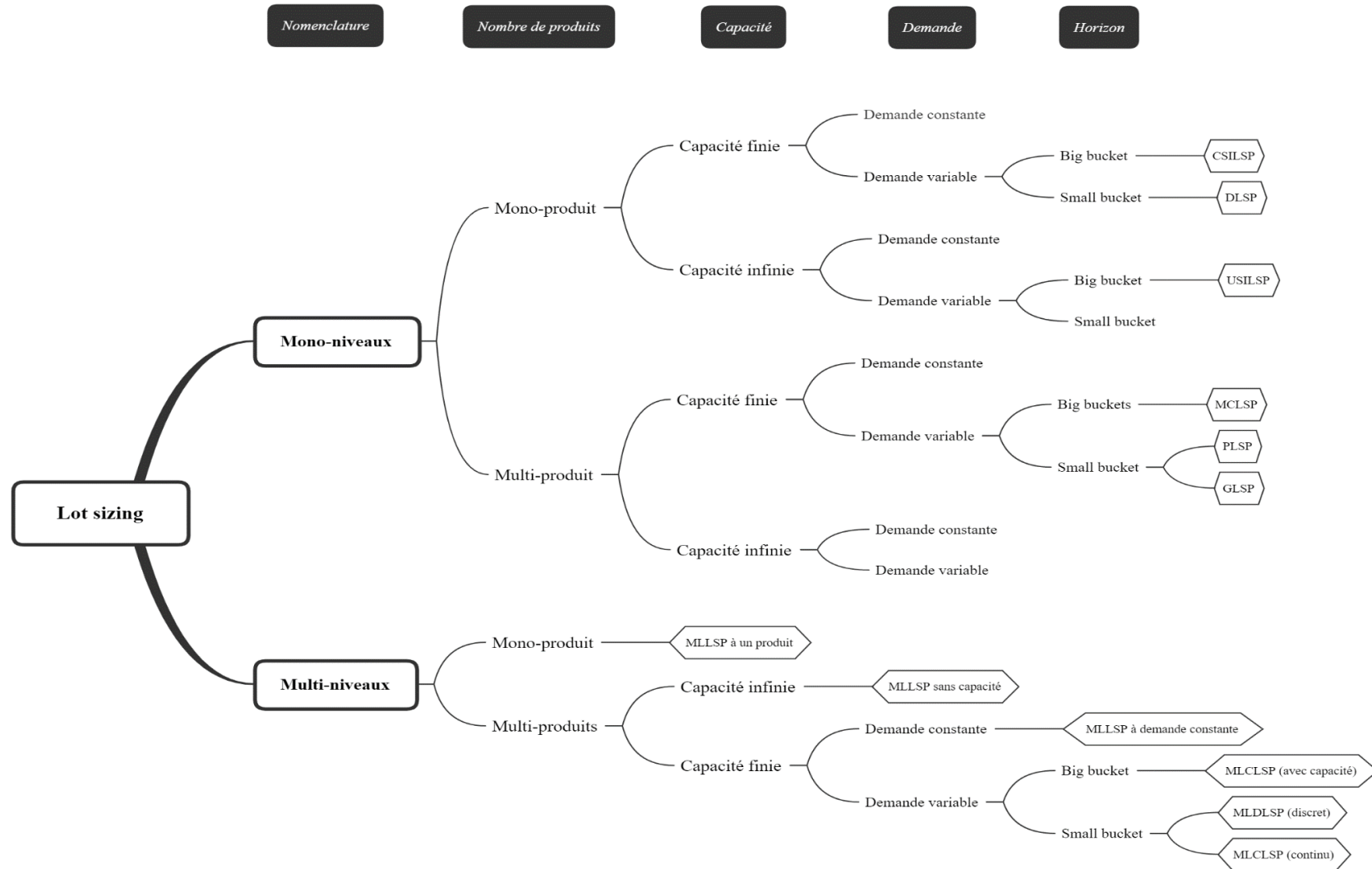


Figure 20: Proposition d'une classification des modèles de lot sizing.

Tableau 5 : Classification de quelques articles revus traitant le problème du lot sizing.

Problème traité		Références	
Mono-niveau	Mono-produit	Capacité finie	(Chung, Flynn, et Lin 1994), (Chung, Flynn, et Lin 1994), (Bitran et Yanasse 1982), (Florian, Lenstra, et Rinnooy Kan 1980), (Florian et Klein 1971)
		Capacité infinie	(Absi, Kedad-Sidhoum, et Dauzère-Pères 2011), (Van Vyve et Ortega 2004), (Lu 2003), (Golany, Yang, et Yu 2001), (Hsu 2000) (Friedman et Winter 1978), (Zangwill 1969), (Wagner et Whitin 1958)
	Multi-produit	Capacité finie	(Absi et Kedad-Sidhoum 2008), (A. Drexel et Kimms 1997), (Fleischmann et Meyr 1997), (Andreas Drexel et Haase 1995), (Kirca et Kökten 1994), (Karmarkar, Kekre, et Kekre 1987)
		Capacité infinie	(Basnet et Leung 2005)
Multi-niveau	Mono-produit	Capacité finie	(Van Hoesel et al. 2005), (Y. Yu et al. 2013)
		Capacité infinie	(Önal 2016)
	Multi-produit	Capacité finie	(Hakeem-Ur-Rehman, Wan, et Zhan 2019a), (França et al. 1997), (Tempelmeier et Derstroff 1996), (Billington, McClain, et Thomas 1986), (Chandra et Fisher 1994),
		Capacité infinie	(Manupati et al. 2018), (Afentakis et Gavish 1986)

Les différentes classifications préalablement citées ont donné naissance à plusieurs classes du problème du *lot sizing*. Étant donné le nombre important de recherche faites sur ce problème, nous avons orienté la présente revue vers les problèmes que nous avons jugé les plus pertinents et proches par rapport au problème industriel sur lequel nous travaillons. Nous les présentons dans ce qui suit selon la structure du système étudié, la section 0 revoie donc les problème de *lot sizing* mono-niveau, et la section 4 revoie les problèmes multi-niveaux.

3. LE LOT SIZING MONO-NIVEAU

Les problèmes de *lot sizing* mono-niveau peuvent être décomposé selon la longueur des périodes qui composent l'horizon de planification. Ainsi, les problèmes avec des périodes de grandes tailles (*Big time bucket*) sont caractérisés par des périodes de production relativement longues, de l'ordre de quelques jours ou bien quelques semaines selon le contexte du problème. Ces problèmes sont présentés dans la section 3.1. Les problèmes avec des périodes de petites tailles (*Small time buckets*), quant à eux, sont

caractérisés par des périodes de production relativement petites, de l'ordre de quelques heures à quelques jours en fonction du domaine étudié ; ils sont présentés dans la section 3.2.

Des périodes de très grandes tailles (*Very big time buckets*) peuvent également être distinguées. Ces périodes peuvent être de l'ordre de quelques mois ou années. Les problèmes à très longues périodes sont considérés comme étant une agrégation temporelle des deux catégories précitées et relèvent des problèmes de planification hiérarchique. Ces problèmes n'étant pas du ressort du travail actuel, nous suggérons (Bitran et Tirupati 1993) et (Mercé, Hétreux, et Fontan 1997) pour une introduction sur ces problèmes.

3.1. Problèmes mono-niveaux à longues périodes - *Big time bucket problems*

Comme précédemment mentionné, cette classe de problèmes est caractérisée par un horizon de planification composé de périodes de tailles relativement grandes, de l'ordre de quelques jours ou semaines. Cette classe de problèmes est également caractérisée par la possibilité de produire plusieurs produits par période.

Uncapacitated Single Item Lot Sizing Problem (USILSP)

C'est le problème de base initialement proposé par (Wagner et Whitin 1958). Il concerne un problème de lot sizing avec un seul produit sans prise en compte de la contrainte de capacité. (Brahimi et al. 2006) affirme que le problème USILP est intéressant dans le cas où les deux critères suivants sont présents : (1) Une production mono-produit ou quand les produits peuvent être agrégés et (2) La capacité de production est assez élevée pour ne pas contraindre une solution optimale. Plusieurs extensions de ce problème ont été réalisées. (Zangwill 1969) a résolu le problème en considérant la rupture de stocks. (Friedman et Winter 1978) et (Hsu 2000) ont étendu le USILSP pour étudier le cas des produits périssables. (Golany, Yang, et Yu 2001) et (Lu 2003) ont aussi étendu le problème du USILSP pour inclure le reconditionnement (*remanufacturing*) des produits. (Dauzère-Pérès et al. 2002) et (C.-Y. Lee, Çetinkaya, et Wagelmans 2001) ont étudié le cas d'existence des fenêtres de temps de la demande.

Capacitated Single Item Lot Sizing Problem (CSILSP)

C'est un des problèmes les plus étudiés dans la littérature car il suppose une capacité finie des ressources, ce qui est plus réaliste. (Florian, Lenstra, et Rinnooy Kan 1980) et (Bitran et Yanasse 1982) ont étudié et analysé la complexité du CSILSP.

Multi-Item Capacitated Lot-Sizing Problem (MCLS)

Très tôt, (Manne 1958) a étendu le modèle de Wagner et Whitin afin d'introduire la contrainte de capacité et la multitude de produits. (Karimi, Ghomi, et Wilson 2003) ont analysé et revu la littérature ayant abordé le MCLS.

3.2. Problèmes mono-niveaux à courtes périodes – *Small time bucket problems*

Comme préalablement noté, cette catégorie de problèmes concerne des périodes de petite taille. Dans ces problèmes, on suppose généralement qu'un seul produit peut être fabriqué par période. Une différence importante de ces problèmes en comparaison avec les problèmes avec périodes de grande taille réside dans la prise en compte du temps de lancement de la production. Les coûts de lancement dans le cas du *big buckets* sont générés à chaque période, ils correspondent donc aux coûts de *set up*. Par contre, pour les problèmes de type *small buckets*, les coûts de lancement sont générés au début d'une séquence de production, qui peut s'étaler sur plusieurs périodes. Ils correspondent dans ce cas aux coûts de *start up*. Cette différence est illustrée par la Figure 21.

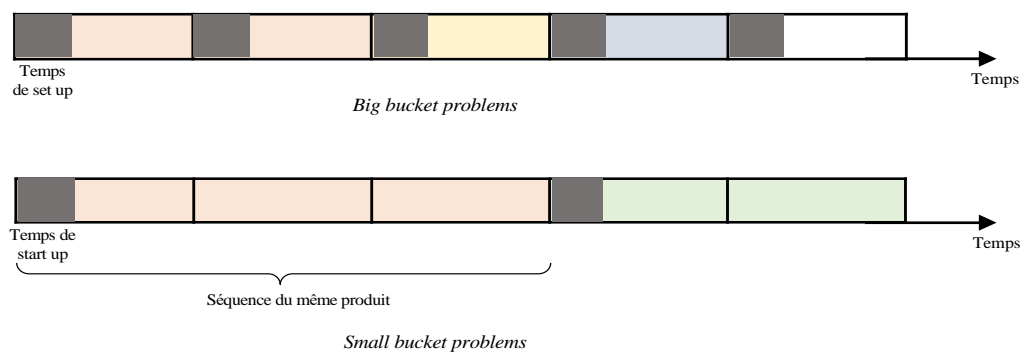


Figure 21 : Différence de la prise en compte du temps de lancement dans le cas des problèmes de type *Small bucket* et *Big bucket*

Selon (Pochet 2001) la décomposition du temps en petites périodes a pour objectif de représenter finement le séquençement et bien la chronologie d'évènements (comme par exemple le début de la production, la fin de la production, la date de remplissage du stock,...)

Nous définissons et comparons dans ce qui suit quelques sous-classes du problème de *lot sizing* à courtes périodes.

Discrete Lot-Sizing and Scheduling Problem (DLSP)

C'est le problème de base pour les problèmes de *lot sizing* à petites périodes. Il considère un seul produit par période de production et traite aussi le séquençement des produits sur les ressources. (A. Drexl et Kimms 1997) ont revu les problèmes dédiés au *lot sizing* dans le cas des périodes de petite taille. Selon eux, le DLSP est le problème qui résulte de la subdivision des macro-périodes du problème du CSILSP en micro-périodes. Également, une des hypothèses fondamentales de ce problème est le « tout ou rien » qui stipule que, si une production est programmée, elle se produit alors en pleine capacité de production.

Continuous Setup Lot Sizing Problem (CSLP)

Ce problème résout l'inconvénient du « tout ou rien » posé par le problème précédent (DLSP). Il suppose qu'un seul produit peut être fabriqué par période mais que la capacité peut être partiellement utilisée. Il est donc possible d'utiliser uniquement la capacité nécessaire pour produire ce produit. (Karmarkar, Kekre, et Kekre 1987) ont présenté, modélisé et résolu par une approche *Branch and bound* le problème du CLSP.

Proportional Lot Sizing Problem (PLSP)

Un inconvénient du CSLP serait le fait de ne pas pouvoir exploiter la capacité restante quand la capacité d'une ressource n'est pas entièrement exploitée. Cet inconvénient est résolu par le PLSP qui permet de réutiliser la capacité restante au cours d'une période pour la production d'un autre produit. Ce problème a été étudié par (Andreas Drexl et Haase 1995) et (A. Drexl et Kimms 1997).

General Lot Sizing Problem (GLSP)

Le GLSP est le problème générique de la classe des problèmes du *lot sizing* avec petites périodes. Le nombre de produits par périodes n'est pas limité. Il intègre le dimensionnement de des lots et le séquençement de plusieurs produits en tenant compte de la capacité des ressources. (Fleischmann et Meyr 1997) ont étudié et résolu le problème du GLSP en utilisant un algorithme de recherche locale.

4. LE LOT SIZING MULTI-NIVEAUX AVEC CAPACITE FINIE (MLCLSP)

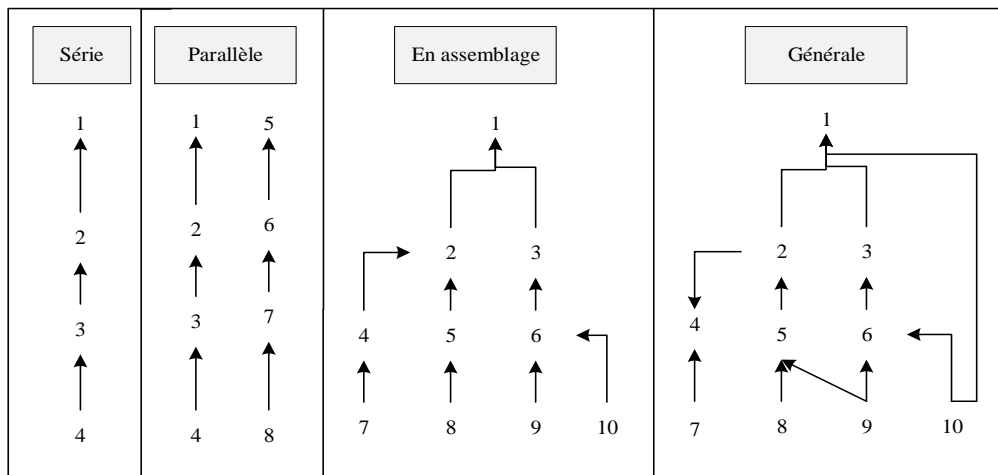
4.1. MLCLSP - Définition

Comme précédemment cité, le problème du *lot sizing* multi-niveau avec capacité finie (MLCLSP⁴) est une variante du problème du *lot sizing* dans laquelle la production des composants des produits finis est prise compte. La conversion de la demande des produits finis en besoins en composants est effectuée par le biais de la matrice de Gozinto. Cette matrice est composée des coefficients qui représentent le nombre de produits i nécessaires pour produire un produit j , où i est le prédécesseur immédiat de j dans la nomenclature du produit j . Il est important de souligner que cette conversion est effectuée d'une manière itérative dans le cas d'un système composé de plus de deux niveaux de transformation, c'est-à-dire que les composantes des produits finis au niveau de production n deviennent produits à fabriquer pour les niveaux de production $n-1$, et ainsi de suite... La matrice de Gozinto joue donc un rôle crucial dans le modèle du MLCLSP car elle permet la propagation horizontale de la demande de l'aval vers l'amont de la chaîne logistique. La demande finale du produit fini est dite indépendante car elle dépend de paramètres externes au système étudié. Les demandes en composants des produits finis sont dites des demandes dépendantes puisqu'elles dépendent des caractéristiques structurelles du système étudié. Souvent, le MLCLSP est classé selon la structure de la nomenclature des produits. Ces structures peuvent être classées selon l'arborescence de composition des produits comme présenté dans la Figure 22, en :

⁴ MLCLSP: Multi Level Capacitated Lot Sizing Problem.

- **Structure en série** : chaque produit possède un seul successeur et un seul prédécesseur.
- **Structure en parallèle** : agencement en parallèle de deux ou plusieurs structures en séries.
- **Structure en assemblage** : flux de matière sont convergents.
- **Structure générale** qui est une combinaison des structures précitées.

Figure 22: Schémas de nomenclatures des produits



4.2. MLCLSP - Modélisation

Le modèle de base multi niveau est nommé le MLCLSP (*Multi-Level Capacitated Lot sizing Problem*). Il a été proposé en premier par [Billington et al., 1986]. Nous présentons dans ce qui suit le modèle mathématique du problème MLCLSP. Pour cela, nous introduisons les notations suivantes :

Les ensembles

K : Ensemble de ressources, $k \in K$.

T : Ensemble de périodes, $t \in T$.

N : Ensemble de produits, $i \in N$.

$S(i)$: Ensemble des successeurs du produit i dans la nomenclature.

$R(k)$: Ensemble des produits pouvant être produit dans la ressource k .

Les paramètres

- d_{it} : Demande externe du produit i à la période t .
- v_{ik} : Capacité nécessaire pour produire le produit i sur la ressource k .
- c_{kt} : Capacité disponible de la ressource k à la date t .
- a_{ij} : Nombre d'unités du produit i nécessaires pour produire le produit j .
- α_{it} : Coût de production unitaire variable du produit i à la date t .
- β_{it} : Coût fixe relatif au démarrage de la production du produit i à la date t .
- γ_{it} : Coût unitaire de stockage du produit i à la date t .

Les variables

- x_{it} : Quantité produite du produit i à la date t .
- y_{it} : Variable binaire de *set up*, égale à 1 si et seulement si $x_{it} > 0$, 0 sinon.
- s_{it} : Quantité stockée du produit i à la date t .

Le problème du *lot sizing* multi-niveau, multi-produit avec capacité finie est formulé comme suit :

$$\text{Min} \sum_t \sum_i (\alpha_{it} x_{it} + \beta_{it} y_{it} + \gamma_{it} s_{it}) \quad (6)$$

Les contraintes du problème sont :

$$x_{it} - s_{it} + s_{it-1} - \sum_{j \in S(i)} a_{ij} x_{jt} = d_{it} \quad \forall i, t \quad (7)$$

$$\sum_{i \in R(k)} v_{ik} x_{it} \leq c_{kt} \quad \forall k, t \quad (8)$$

$$x_{it} < \sum_{l \in T} d_{lt} y_{it} \quad \forall i, t \quad (9)$$

$$x_{it}, s_{it} \geq 0 \quad \forall it \quad (10)$$

$$y_{it} \in \{0, 1\} \quad \forall it \quad (11)$$

La fonction objectif (6) minimise les coûts variables de production, les coûts de *set up* et les coûts de stockage pour tous les produits et pour l'ensemble de l'horizon de planification. L'équation (7) traduit l'équilibre des stocks, la demande interne est représentée par l'intermédiaire des coefficients de la matrice de gozinto a_{ij} qui garantit la conversion de la demande finale en demandes intermédiaires en composantes. La contrainte (8) garantit le respect de la capacité de production pour chaque ressource k et

pour chaque période t . La contrainte (9) définit la variable de *set up*, elle traduit le fait que la production d'un produit ne peut avoir lieu que si la variable y_{it} est égale à 1. Finalement, la contrainte (10) garantit la non négativité des variable de production et de stockage et la contrainte (11) définit le champs de la variable de *set up* .

5. LE PROBLEME DU MLLSP INTEGRE AU PROBLEME DE TRANSPORT

Dans ce qui suit, nous allons nous intéresser aux problèmes intégrés de planification de la production et de la distribution survenant dans un horizon tactique / opérationnel. (Adulyasak, Cordeau, et Jans 2014, 2015) ont classés ces problèmes en cinq classes définies dans le Tableau 6. Nous définirons ensuite chacun de ses problèmes.

Tableau 6: Problèmes de planification intégrée de la production et de la distribution

	Production	Stockage	Distribution	Routage
<i>Lot Sizing Problem</i> (LSP)	•	•		
<i>Integrated lot sizing with direct shipment</i>	•	•	•	
<i>Inventory Routing Problem</i> (IRP)		•	•	•
<i>Production Routing Problem</i> (PRP)	•	•	•	•

5.1. Problème du *lot sizing* (LSP)

Le LSP est l'un des problèmes les plus étudiés en planification et contrôle de la production et du stockage, il est considéré comme un problème fondamental en management de la production. Il a été initié par Wagner et Whitin en 1958. Ce problème intègre la planification de la production et du stockage, et considère un système mono-produit, mono-ressource avec un horizon de planification fini. Il a pour objectif de dimensionner les tailles de lots optimales afin de trouver un compromis entre les coûts de *set up* élevés pour des tailles de lot petites, les coûts variables de production, et les couts de stockage qui sont plutôt élevés quand les tailles de lot sont grandes.

5.2. Inventory Routing Problem (IRP)

L'IRP a été initialement traité par (Bell et al. 1983) dans le cadre d'une étude de stockage et transport du gaz industriel. Le champ décisionnel du problème de stockage-routage (*Inventory Routing Problem (IRP)*) s'étend sur les décisions de stockage, transport et routage, la production n'étant pas étudiée par l'IRP. Ce problème commence généralement par un dépôt ou bien une unité de stockage. L'IRP est une généralisation du problème du VRP (Adulyasak, Cordeau, et Jans 2015). L'objectif du VRP est de concevoir les routages nécessaires afin de livrer (ou collecter) des produits à des clients (ou des points de collectes). En plus de cela, le problème de l'IRP considère la date de livraison de la demande aux clients ainsi que les quantités à acheminer. L'objectif est de minimiser les coûts totaux de stockage et de transport. Il est à noter que dans le cas du VRP, les quantités à acheminer sont fixées par le client. Tandis que dans le problème de l'IRP ces quantités sont une variable de décision du problème (Moin et Salhi 2007).

(Andersson et al. 2010), (Moin et Salhi 2007), (Campbell et al. 1998) (Cohen et Lee 1988) détaillent les différentes applications, modélisations et méthodes de résolution de l'IRP.

5.3. Production Routing Problem (PRP)

Ce problème résulte de l'intégration des problèmes du VRP et de l'IRP (Adulyasak, Cordeau, et Jans 2015). Il englobe l'ensemble des aspects de la planification de la chaîne logistique à savoir la production, le stockage, la distribution et le routage (comme mentionné dans le Tableau 6). Le PRP est donc un problème intégré qui cherche à déterminer si la production a lieu dans une période donnée, dimensionner les lots correspondants si la production est lancée, la production est soumise à une capacité maximale de production, la distribution du produit est réalisée via une flotte de véhicules à capacité finie, les produits peuvent être stockés à l'unité de production ou bien chez le client. Le problème minimise les coûts totaux qui sont : les coûts de lancement de production, les coûts variables de production, les coûts de transport et les coûts de stockage.

(Adulyasak, Cordeau, et Jans 2015), (Díaz-Madroño, Peidro, et Mula 2015) détaillent les différentes applications, modélisations et méthodes de résolution du PRP.

5.4. *Lot sizing* intégré au transport direct

Ce problème étant le plus proche de notre problème étudié, il sera donc détaillé plus amplement que les autres problèmes précités. Nous passerons en revue plusieurs références ayant abordé ce problème avec les méthodes de résolution suivies pour le résoudre afin d'aboutir sur la particularité du problème traité.

Le problème de *lot sizing* intégré au transport par voie directe (*Integrated lot sizing with direct shipment*) considère la livraison directe des produits depuis les unités de production vers les clients. L'objectif est de minimiser les coûts de production (coûts de *set up* et variables) de stockage, et de transport par voie directe, le coût de transport dépend du client. Plusieurs chercheurs ont étudié ce problème dont la majorité a considéré un coût de distribution fixe ou bien une structure de coût complexe.

(Li, Hsu, et Xiao 2004) ont étudié deux cas de figures du problème de *lot sizing* intégré au transport par voie directe. (1) Dans le premier modèle, le retard sur la demande (*backlogging*) est autorisé, des tailles de lots fixes sont imposés à la production, et les coûts considérés sont variables en fonction du temps, le coût de transport est sous la forme d'une fonction linéaire par morceaux. (2) Le deuxième modèle est construit la base du premier et adopte une structure de coûts complexe (forme générale du coût d'acquisition du produit, coût unitaire de production variable en fonction du temps et un coût de transport avec remises sur l'utilisation des camions). Le premier modèle est résolu en utilisant un algorithme basé sur la programmation dynamique. Tandis que le deuxième modèle est résolu avec un algorithme basé sur les résultats du premier.

(Jaruphongsas, Çetinkaya, et Lee 2007) ont traité un problème de *lot sizing* à deux niveaux intégré à problème transport pouvant être effectué selon deux modes : (1) Un transport avec des charges complètes (*full-truckload (FTL)*) caractérisé par un coût de transport fixe pour chaque conteneur transporté. (2) Le second mode est un transport avec des charges partielles (*less-than-truckload (LTL)*) caractérisé par une structure de coût qui dépend de la charge du conteneur. Pour résoudre ce problème, (Jaruphongsas, Çetinkaya, et Lee 2007) ont proposé un algorithme basé sur une approche de programmation dynamique.

(Van Norden et Van de Velde 2005) ont étudié le cas d'une société de transport européenne pour laquelle la capacité de transport réservée pourrait être échangée par une

remise. Leur étude est basée sur l'hypothèse selon laquelle le taux de fret diminue quand les charges transportées augmentent. Le problème étudié est celui du dimensionnement des lots transportés afin de répondre à la demande des dépôts en minimisant les coûts totaux et sans autoriser la rupture de stock. Le coût de transport est modélisé par une fonction linéaire par morceaux. Afin de résoudre le problème, (Van Norden et Van de Velde 2005) ont proposé un algorithme basé sur la relaxation lagrangienne qui a pu donner de « bons » résultats en termes de temps de résolution et de qualité de la solution.

La particularité du problème étudié par (Rizk, Martel, et Ramudhin 2006) réside dans le fait qu'il ont étudié le cas d'une ressource partagée, cette ressource pourrait être un moyen de transport (approvisionnement ou livraison) ou bien de production. Le partage des ressources permet de réduire le coût de production ou de transport, ce coût est modélisé par une fonction linéaire par morceaux. (Rizk, Martel, et Ramudhin 2006) ont décomposé le problème en sous problèmes à capacité infinie. Ensuite ils ont développé une heuristique « efficace » et « robuste » basée sur la relaxation lagrangienne capable de résoudre des instances réelles de grande taille.

(Chand et al. 2007) ont généralisé le problème pour étudier le cas de clients multiples pour lesquels la rupture sur la demande est autorisée. Le coût de rupture sur la demande est d'autant plus élevé quand le produit revêt une grande importance pour le client, l'inverse est vrai. Le problème est résolu à l'aide d'un algorithme basé sur la programmation dynamique.

(Jaruphongsas et Lee 2008) ont traité un problème de *lot sizing* dans lequel la demande est contrainte par des fenêtres de temps intégré à un problème de transport avec une structure de coûts particulière. La demande devrait être satisfaite dans un intervalle de temps caractérisé par une date au plus tôt et une date au plus tard. Autrement, un coût de possession des stocks ou bien un coût de rupture sont encourus. L'objectif est donc de satisfaire la demande en minimisant les coûts totaux de *set up*, d'approvisionnement, de transport et de possession des stocks. Ensuite, deux algorithmes basés sur la programmation dynamique ont été proposés afin de résoudre ce problème.

(Herer et Tzur 2001) ont étudié un cas particulier dans lequel le transbordement de la marchandise entre les clients est pris en compte. Le problème considéré est un problème de *lot sizing* dynamique multi-sites qui détermine pour chaque période la quantité à

compléter et la quantité à transborder d'un autre site. Cette étude est motivée par la différence entre les coûts de stockage dans les différents sites.

(W.-S. Lee, Han, et Cho 2005) ont analysé un problème multi-produits avec un seul client. La livraison de la demande est effectuée via un seul type de conteneurs et la rupture sur la demande n'est pas autorisée.

Quand les capacités de production et de transport sont infinies, le problème de *lot sizing* intégré au transport par voie directe est nommé également *One-Warehouse Multi-Retailer Problem* (OWMR) (Adulyasak, Cordeau, et Jans 2015).

(Federgruen et Tzur 1999) ont résolu un problème de *lot sizing* et transport ayant lieu dans système multi produits, multi-sites, composé d'un seul dépôt et plusieurs détaillants. Afin de résoudre ce problème, ils ont développé une heuristique efficace basée sur la division de l'horizon temporel en de petits intervalles.

(Solyalı et Süral 2012) ont considéré le problème dans lequel un seul dépôt fournit plusieurs détaillants avec un seul produit. Afin de résoudre ce problème, ils ont proposé un algorithme basé sur le modèle du plus court chemin.

En guise de synthèse, le Tableau 7 présente une classification de références ayant traité le problème du *lot sizing* intégré au stockage et/ou transport.

Tableau 7: Classification de références traitant le *lot sizing* intégré au stockage et/ou transport

Type du problème de planification intégrée	Références
<i>Lot Sizing Problem</i> (LSP)	(Witt et Voss 2010), (Fleischhacker et Zhao 2011), (Heuts, Seidel, et Selen 1992), (Torres, Santiago, et Chung 2010)
<i>Vehicle Routing Problem</i> (VRP)	(Baldacci, Mingozzi, et Roberti 2012), (Baker et Ayechev 2003), (Prins 2004), (Bertsimas 1992), (Cordeau, Gendreau, et Laporte 1997), (B. Yu, Yang, et Yao 2009)
<i>Integrated lot sizing with direct shipment</i>	(Li, Hsu, et Xiao 2004), (Jaruphongsa, Çetinkaya, et Lee 2007), (van Norden et van de Velde 2005), (Rizk, Martel, et Ramudhin 2006), (Chand et al. 2007), (Herer et Tzur 2001), (W.-S. Lee, Han, et Cho 2005), (Federgruen et Tzur 1999), (Van Hoesel et al. 2005), (Kaminsky et Simchi-Levi 2003), (Wang, Grunder, et Moudni 2014), (Pibernik et Sucky 2007)
<i>Inventory Routing Problem</i> (IRP)	(Bell et al. 1983), (Archetti et al. 2007), (Rusdiansyah et Tsao 2005), (A. M. Campbell et Savelsbergh 2004), (Coelho, Cordeau, et Laporte 2012)
<i>Production Routing Problem</i> (PRP)	(Manupati et al. 2018), (Adulyasak, Cordeau, et Jans 2014), (Absi et al. 2014), (Qiu, Qiao, et Pardalos 2017), (Brahimi et Aouam 2016), (Solyali et Süral 2017)

(Z.-L. Chen 2004; Díaz-Madroñero, Peidro, et Mula 2015; Erengüç, Simpson, et Vakharia 1999) proposent une synthèse des approches proposées.

6. LE PROBLEME DU *LOT SIZING* MULTI-NIVEAUX - METHODES DE RESOLUTION

La section suivante définit les méthodes les plus connus et les plus utilisées pour résoudre les problèmes de *lot sizing* et fournit des illustrations pour chacune des méthodes. Nous organisons cette partie en deux sous-parties : méthodes exactes et méthodes heuristiques à base de MIP qui s'articule autour des heuristiques *Relax and Fix*.

6.1. Méthodes exactes

Les méthodes exactes sont très utiles pour traiter les problèmes qui sont résolus dans un temps polynomial, ou bien qui sont des sous problèmes de problèmes plus difficiles. Parmi ces méthodes exactes, on peut trouver :

Modèles de programmation linéaire et non linéaire

Les modèles de programmation mathématique sont un moyen très utilisé afin de résoudre les problèmes intégrés de *lot sizing* multi-niveaux. Plusieurs solveurs commerciaux sont disponibles à cet effet tel que : (« FICO® Xpress Solver » 2021), (« CPLEX Optimizer » 2021), (« Gurobi Solver » 2021).

La programmation linéaire (*Linear programming (LP)*) utilise des variables continues et donne des solutions dans le même espace. Elle est applicable quand l'ensemble des modèles sous-jacents des processus sont linéaires. Il existe des algorithmes efficaces permettant de résoudre ce type de programmes tel que le simplexe.

Si le programme utilise des variables entières le consensus scientifique l'appelle programme linéaire en nombre entiers (*Integer Linear Program (ILP)* ou bien (*IP*). Quand le programme contient des variables continues et des variables entières, il est nommé programme entier-mixte (*Mix-Integer Linear Program (MILP)*). Ce type de programme est applicable lorsque la fonction objectif et l'ensemble des contraintes sont linéaire, et que certaines variables sont continues et d'autres sont discrètes. Pour résoudre ces problèmes, des méthodes arborescentes sont les utilisées tels que le *Branch-and-bound*, *Branch-and-cut* et le *Branch-and-price* (Absi 2005).

Dans le cas d'une fonction objectif non linéaire ou bien d'une ou plusieurs contraintes non linéaires, le programme relève dans ce cas de la programmation non linéaire (PNL) (Brahimi 2004). A l'exception des cas faciles (avec un objectif convexe et des contraintes convexes), les algorithmes actuels convergent en général vers un optimum local (Absi 2005).

La programmation dynamique

C'est une méthode de résolution des problèmes d'optimisation qui a été initiée en 1957 par (Bellman 1957). Elle a été initialement utilisée pour des systèmes dynamiques (d'où son appellation) dont un / des paramètres évoluent dans le temps ou bien dont les

décisions prises dépendent du temps. Mais elle est également utilisée pour résoudre des problèmes qui ne dépendent pas du temps. Elle est applicable aux problèmes d'optimisation linéaire ou non linéaire, continue ou discrète. La programmation dynamique est largement utilisée pour les problèmes de planification de la production, surtout pour des problèmes à un seul produit avec ou sans contrainte de capacité (Brahimi et al. 2006). Le principe de la méthode consiste à décomposer le problème de grande taille en sous problèmes plus petits et plus faciles à résoudre. La solution optimale du problème global est ensuite construite en reliant les solutions des sous problèmes par des relations de récursivité.

Méthode Branch and Bound

Appelée également méthodes de Séparation et Évaluation Progressive (SEP) (Absi 2005), elle est considérée comme une méthode fondamentale pour résoudre les programmes en nombre entiers (IP) et les programmes mixtes en nombre entiers (MIP). Son principe repose une énumération 'intelligente' des solutions admissibles d'un problème donné. L'application de cette méthode nécessite la disposition de trois moyens:

- Un moyen de calcul de la borne inférieure d'une solution partielle.
- Une stratégie pour partitionner l'espace de solutions pour créer des espaces plus petits.
- Un moyen pour calculer la borne supérieure d'au moins une solution.

Son principe est composé de deux étapes : séparation et évaluation appliquées récursivement au problème jusqu'à atteindre la solution optimale. Son principe peut être résumé comme suit :

Soit $S = \{S_i \mid i = 1, \dots, N\}$ l'ensemble de solution d'un problème P . L'ensemble S est appelé racine de la solution du problème P . Chaque solution S_i correspond à un sous-problème P_i et sa valeur est bornée par une limite inférieure B_i^{inf} et une borne supérieure B_i^{sup} . Les sous-problèmes et leurs solutions respectives forment une hiérarchie arborescente, appelée « arbre de décision ». L'objectif de la méthode est de parcourir l'arbre de décision en trouvant pour chaque P_i des successions de bornes qui convergent en une solution où B_i^{sup} est égal à la borne supérieure du problème original. Ensuite l'étape

d'évaluation consiste à décider pour chaque nœud trouvé, de continuer ou pas la recherche dans la branche en cours de l'arbre.

(Gelders, Maes, et van Wassenhove 1986) et (Hindi 1995) ont été pionniers à résoudre le problème de *lot sizing* avec contrainte de capacité en se basant sur le *Branch and Bound*.

Méthode Branch and Cut

L'algorithme du *Branch and Cut* est une extension du *Branch and Bound* dans laquelle l'étape de séparation est améliorée par des coupes (Brahimi 2004). Les plans de coupe sont générés à chaque nœud de l'arbre de décision. Contrairement au *Branch and Bound*, le *Branch and Cut* ne cherche pas à réduire le nombre de nœuds, elle cherche à générer toutes les coupes afin de générer l'enveloppe convexe des solutions du problème. Cependant, il est généralement difficile de générer toutes les coupes. De plus l'identification de coupes utiles nécessite beaucoup de temps de calcul et de mémoire interne.

En ce qui concerne le *lot sizing*, les chercheurs ont appliqués le *Branch and Cut* surtout pour des problèmes à un niveau et plusieurs produits (Brahimi 2004). Citons à titre illustratif (Leung, Magnanti, et Vachani 1989; Pochet et Wolsey 1991; Belvaux et Wolsey 2000).

6.2. Méthodes heuristiques à base de MIP

Dès la fin des années 90, l'utilisation des heuristiques à base de MIP a connu un grand essor, tirant profit du développement des solveurs commerciaux. Citant à titre d'exemple (Santos et Almada-Lobo 2012) ayant traité un problème intégré de planification et d'ordonnancement de la production dans le cadre d'une industrie de production de pâtes et de papier. L'objectif principal étant de synchroniser le flux de matière dans l'usine de pâtes et papiers en tenant compte de la consommation d'énergie, de la satisfaction de la demande et de coûts opérationnels. Le problème est modélisé comme un problème hybride de *lot sizing* longues périodes (*big bucket*) et courtes périodes (*small bucket*). Afin de résoudre ce problème, (Santos et Almada-Lobo 2012) ont développé une heuristique de recherche locale à base de MIP qui permis d'obtenir des solutions de bonne qualité basées sur des instances réelles.

(Ríos-Solís et al. 2020) ont étudié un problème de fabrication et d'assemblage de pièces en vue de la production de produit (Product-Piece-Mold-Machine (PPMM)). L'objectif est de dimensionner les lots et les ordonnancer afin de maximiser le profit des produits assemblés sur un horizon déterminé. Ils ont donc développé une heuristique itérative en deux étapes basées sur la programmation mathématique.

Nous citons également d'autres travaux ayant étudié différentes approches basées sur des MIP pour résoudre le problème du *lot sizing* (Ramezani, Saidi-Mehrabad, et Fattahi 2013; Ramezani et Saidi-Mehrabad 2013; Xiao et al. 2013; Wu, Shi, et Song 2012; James et Almada-Lobo 2011; Lang et Shen 2011; Mohammadi et al. 2010; Mercé et Fontan 2003).

Aussi, plusieurs revues de littérature ont analysé les méthodes basées sur les MIP utilisées pour résoudre le problème de *lot sizing*. (Pochet et Van Vyve 2004) a étudié plusieurs heuristiques traitant le problème de la planification de la production. Ils ont démontré expérimentalement que l'heuristique *Relax and Fix* donne de meilleurs résultats sur des problèmes de complexité facile et moyenne. (Güner Gören et Tunali 2018) ont étudié quant à eux la littérature proposant des heuristiques de type *Fix and Optimize* pour résoudre le problème de *lot sizing* avec contrainte de capacité. Le lecteur peut aussi consulter (Maes, McClain, et Van Wassenhove 1991).

6.2.1. Heuristiques *Relax and Fix* - Définition

L'heuristique de type *Relax and Fix* est l'une des méthodes les plus utilisées pour résoudre les problèmes de *lot sizing*. C'est une méthode itérative qui résout de manière heuristique à chaque itération un problème réduit. Les problèmes réduits sont obtenus en réduisant le nombre de variables et contraintes binaires du problème d'origine. La réduction du problème d'origine est basée sur une approche de décomposition de l'horizon de planification, dans laquelle les contraintes d'intégrité des variables binaires sont maintenues uniquement dans un intervalle fixe de l'horizon de planification appelé fenêtre de décision. Cette opération permet de réduire considérablement le temps de calcul (CPU) des sous problèmes résultants.

Bien évidemment, la qualité de la solution obtenue dépend en grande partie de la longueur de la fenêtre de décision considérée. Or le temps de calcul augmente d'une façon exponentielle en augmentant la taille de la fenêtre de décision, d'où le recours au

paramètre de chevauchement (*overlap parameter*). En effet, ce paramètre permet d'améliorer la qualité de la solution tout en évitant le risque d'explosion exponentielle du problème. En guise de précision, le paramètre de chevauchement réfère à un nombre de période de chevauchement entre les fenêtres de décision de deux itérations successives de l'algorithme.

Comme précédemment cité, la méthode *Relax and Fix* repose sur la décomposition de l'horizon de planification en trois fenêtres de temps : fenêtre gelée, fenêtre de décision et fenêtre d'approximation. Les étapes suivantes décrivent sommairement l'heuristique *Relax and Fix* :

1. Fixer une fenêtre de décision au début de l'horizon de planification, dans lequel les contraintes d'intégrité des variables de décision sont maintenues. Tandis que ces contraintes sont relâchées dans le reste de l'horizon
2. Glisser la fenêtre de décision an avant dans l'horizon de planification, en maintenant une section de chevauchement, égale au nombre de périodes du paramètre de chevauchement, avec la fenêtre de décision de l'itération précédente.
3. Répéter (2) jusqu'à couverture de l'ensemble de l'horizon de planification.

6.2.2. Heuristiques *Relax and Fix* – Revue de littérature

Le début des années 2000 a connu l'apparition des méthodes *Relax and Fix* sur la scène des méthodes à base MIP comme une méthode performante permettant de résoudre le problème de *lot sizing*. (A. R. Clark et Clark 2000) sont parmi les pionniers à appliquer l'heuristique *Relax and Fix* pour résoudre un problème de *lot sizing* multi-produits sur des machines parallèles avec un temps de *set up* dépendant de la séquence de production. Ils ont par ailleurs prouvé que cette méthode offre aux utilisateurs industriels des solutions obtenus dans un temps de calcul rapide avec une perte de qualité minimale en comparaison avec des méthodes exactes.

(Absi et Kedad-Sidhoum 2007) ont traité un problème de *lot sizing* multi-produits avec temps de *set up* ayant lieu dans un contexte industriel réel de planification de la production. Ils ont ainsi résolu leur problème en utilisant une heuristique de type *Relax and Fix* et ont prouvé, par un ensemble d'expériences, l'efficacité de cette méthode.

Comme étude récente, citons (Aouam et al. 2018) qui ont analysé la valeur ajoutée du fait d’octroyer aux décideurs la flexibilité d’accepter ou rejeter les commandes, appelée flexibilité de la demande, dans un contexte de demande incertaine. Pour cela, ils ont adapté une heuristique *Relax and Fix* qui a permis de trouver des solutions réalisables pour le problème robuste, ensuite ils ont amélioré cette heuristique avec une heuristique de type *Fix and Optimize*.

(Hakeem- Ur- Rehman, Wan, et Zhan 2019) ont étudié un problème de *lot-sizing* multi-niveaux et d’ordonnancement avec mise à jour de la demande dans une contexte d’industrie automobile. Ils ont développé un modèle MIP considérant les contraintes de capacité, le *set up* et les coûts. Pour résoudre ce modèle, ils ont proposé trois heuristiques basé sur l’approche *Relax and Fix*.

(Rodoplu, Arbaoui, et Yalaoui 2019) ont traité un problème dont l’objectif est de calculer les plans de production et contrats d’énergie optimaux en tenant compte des objectifs et contraintes de production, mais aussi des conditions imposées par les fournisseurs énergétiques. Pour résoudre leur problème, (Rodoplu, Arbaoui, et Yalaoui 2019) ont proposé une heuristique *Relax and Fix* qui a permis de trouver des solutions de bonne qualité en termes d’écart par rapport à la solution optimale, spécialement pour les instances de grande taille.

Finalement (Absi et van den Heuvel 2019) ont étudié le pire comportement (*worst case behavior*) des heuristiques *Relax and Fix* dans le cadre du problème de *lot sizing*. Ils ont ainsi prouvé que le ratio du pire des cas n’est pas borné dans le cas des problèmes de *lot sizing* sans contrainte de capacité. Par contre, ces méthodes sont efficaces lorsqu’il s’agit de problème multi-produits, multi-niveaux de grande taille. Ceci est justifié par le fait que la résolution des problèmes intégrés résultants requiert un temps de calcul important, les approches de décomposition permettent dans ce cas de trouver des solutions faisables dans temps réduits.

Par ailleurs, nous citons d’autres travaux aillant traité le problème de *lot sizing* par des heuristiques *Relax and Fix* : (Paquay et al. 2018; Tempelmeier et Copil 2016; H. Chen 2015; Oliveira et al. 2014; James et Almada-Lobo 2011; Ferreira, Morabito, et Rangel 2010; Kelly et Mann 2004).

7. LE *LOT SIZING* – APPLICATIONS INDUSTRIELLES

Le problème de *lot sizing intégré* traité dans le cadre de cette recherche émane d'une problématique industrielle réelle.. La section suivante passe en revue des références ayant appliqué le *lot sizing* à un problème industriel réel similaire au contexte de notre étude. Nous n'avons pas pu trouver un travail ayant abordé un problème de *lot sizing* dans un contexte minier, nous avons donc revus des travaux avec des applications industrielles dans l'industrie du process en général, puis dans la sidérurgie et finalement dans l'industrie chimique.

7.1. L'industrie du process

(Pochet 2001) affirme que la modélisation des problèmes de production dans l'industrie de process constitue un axe de recherche prometteur grâce à ces caractéristiques peu étudiées dans la littérature telles que : le temps de planification continu et l'adaptation de la modélisation de la structure du produit aux spécificités de l'activité. Nous présentons si dessous quelques travaux ayant étudié des systèmes relevant de l'industrie de process.

(Smith-Daniels et Ritzman 1988) a étudié un problème intégré de dimensionnement de lot et d'ordonnancement dans le cadre d'une industrie de process. Le papier présente un modèle linéaire mixte qui réalise un arbitrage économique entre deux aspects caractérisant ce type d'activité : (1) le *lot sizing* avec contrainte de capacité, (2) l'ordonnancement avec *set up* dépendant du séquençement des produits. Les solutions données par le modèle sont ensuite comparées avec des approches qui décomposent les problèmes de dimensionnement de lot et l'ordonnancement. Il a démontré que la décomposition du problème pourrait donner des solutions « globalement » infaisables.

(Kirschstein et Meisel 2019) traitent un problème intégré de *lot sizing* et sélection des fournisseurs. Ils considèrent une seule unité de production approvisionnée par plusieurs de fournisseurs, et un ensemble d'unités de stockages dans lesquelles peuvent être stockées les matières premières. Le problème consiste à déterminer les fournisseurs, les unités de stockages, ainsi que les quantités à commander et les routes à emprunter afin d'acheminer les matières premières vers l'unité de production. Afin de résoudre le

problème, (Kirschstein et Meisel 2019) proposent une heuristique lagrangienne qui a été testée sur des données réelles.

7.2. Sidérurgie (Steel industry)

(Sambasivan et Yahya 2005) ont étudié un problème intégré de planification de la production, transport, et stockage multi-sites avec contrainte de capacité. Le problème étudié survient dans une industrie sidérurgique aux États Unis. Le problème a été résolu en utilisant une heuristique lagrangienne.

(Witt et Voss 2010) traitent un problème de planification tactique de la production survenant dans une industrie sidérurgique allemande. Un modèle mathématique de *lot sizing* multi-sites a été proposé afin de résoudre ce problème. Le modèle a été implanté et permet de générer les campagnes de production ainsi que les niveaux de stocks.

7.3. Industrie chimique

(Fleischhacker et Zhao 2011) abordent un système industriel pharmaceutique dans lequel il est question de produire des médicaments expérimentaux qui seront testés sur des humains. Suite à ces tests, tout médicament défectueux (i.e. dangereux ou inefficace) est détruit, le stock du produit défectueux est également détruit. Il est donc recommandé de produire des lots de petites tailles afin d'éviter les gaspillages, or des lots de petites quantités mettent l'entreprise devant des coûts de *set up* élevés. C'est ainsi que (Fleischhacker et Zhao 2011) proposent un modèle stochastique de *lot sizing* qui calcule les tailles de lots optimales de telle sorte à minimiser simultanément le risque de défectuosité du produit et le coût de *set up*.

(Heuts, Seidel, et Selen 1992) traitent un système industriel chimique avec une seule machine avec des tailles de lots fixes, et des temps de *set up* dépendant de l'ordonnancement des produits et des capacités de production et de stockage finies. La demande considérée est incertaine avec un horizon de planification glissant. (Heuts, Seidel, et Selen 1992) proposent et comparent deux heuristiques afin de résoudre ce problème applicable à dans l'industrie de process.

(Torres, Santiago, et Chung 2010) abordent un système de production pharmaceutique dans lequel la production est organisée sous la forme de campagnes de production. Une campagne de production est définie par un nombre de lots successifs, du même produit, de même taille. L'objectif du problème est de calculer le nombre optimal de lots par campagne ainsi que le temps de changement inter-campagnes. Le papier présente deux modèles qui traitent deux cas : (i) un temps inter-campagne fixe, ou bien (ii) ou bien variable.

(Bell et al. 1983) a traité le cas d'une industrie spécialisée dans la production et le transport de gaz industriel. Il a présenté un modèle mathématique, faisant partie d'un outil d'aide à la décision large, qui intègre le *lot sizing* et l'ordonnancement des tournées de véhicules afin d'acheminer les produits vers les clients. L'implémentation de cet outil a permis une réduction entre 6 et 10 % des coûts opérationnels.

(Timpe et Kallrath 2000) a étudié un problème survenant dans l'industrie chimique incluant : une production par lots et par campagnes de production avec des *change-overs* dans une structure multi-sites, la gestion des stocks des matières premières, le transport entre les différents sites et les points de ventes, le stockage dans les points de vente, les prix de ventes des produits aux différents clients. L'objectif est de maximiser le profit total.

8. SYNTHÈSE DE L'ÉTAT DE L'ART

L'état de l'art proposé dans ce chapitre porte un double objectif pour la construction de notre recherche. D'abord, l'objectif premier est de questionner l'applicabilité des recherches antérieures sur le problème étudié, ce qui permet de prouver, éventuellement, l'originalité et la valeur ajoutée du travail mené. Le second objectif est tout aussi important. La mise en œuvre de l'état de l'art permet de capitaliser sur les travaux antérieurement menés afin d'apporter des réponses à la problématique, originale, identifiée.

Cependant, suite à la réalisation de cet état de l'art, les recherches jugées les plus proches à notre problème, parmi toutes celles revues dans le présent état de l'art, ont été répertoriées dans le tableau comparatif (Tableau 8). Nous avons veillé à choisir ces articles sur la base des trois critères suivants :

- Problèmes de *lot sizing* multi-niveaux
- Problèmes de *lot sizing* intégrés au problème de transport
- Recherches ayant traité un problème industriel réel ou ayant une application directe sur l'industrie.

L'objectif du Tableau 8 est de comparer les composantes structurelles du problème étudié. Pour cela, les articles identifiés sont comparés sur la base des paramètres mis en évidence au cours de cet état de l'art, mais aussi sur la base des caractéristiques de nos travaux de recherche. Les critères de comparaison sont donc les suivants :

- Les sous-systèmes de la chaîne logistique concernés : approvisionnement, production, stockage, transport, ou bien routage.
- Type de la demande : stationnaire, dynamique ou bien stochastique.
- Horizon de planification : stratégique, tactique ou bien opérationnel.
- Nombre de produits : mono-produits ou multi-produits.
- Nombre de niveaux : mono-niveaux ou multi-niveaux.
- Méthodes de résolution adoptée : exacte ou approchée
- Domaine d'application de la recherche.

Tableau 8: Tableau comparatif des problèmes traités par les principales références constituant l'état de l'art

Article	Sous-système de la chaîne logistique					Demande			Horizon			Nombre de produits		Méthode de résolution		Domaine d'application
	Approvisionnement	Production	Stockage	Transport	ROUTAGE	Stationnaire	Dynamique	Stochastique	Strat	Tact	Op	mono	multi	Exacte	Approchée	
(Witt et Voss 2010)		Cap	Cap				•						•	•		
(Fleischhacker et Zhao 2011)		Cap	Cap				•	•				•			Heuristique	Pharmaceutique
(Heuts, Seidel, et Selen 1992)		Cap	Cap					•							Heuristique	Chimique
(Torres, Santiago, et Chung 2010)		Cap	Cap			•								•		Pharmaceutique
(Hakeem-Ur-Rehman, Wan, et Zhan 2019)		Cap	Uncap							•			•		Heuristique de type "Relax and Fix"	Automobile
(França et al. 1997)		Cap	Uncap				•						•		Heuristique	
(Tempelmeier et Derstroff 1996)		Cap	Uncap				•						•		Heuristique lagrangienne	
(Billington, McClain, et Thomas 1986)		Cap	Uncap				•						•		Heuristique lagrangienne	
(Li, Hsu, et xiao 2004)		Cap		Cap			•						•		Programmation dynamique	
(Jaruphongs, Çetinkaya, et Lee 2007)		Uncap	Uncap	Cap			•						•		Programmation dynamique	
(van Norden et van de Velde 2005)		Uncap	Uncap	Uncap			•						•		Heuristique lagrangienne	Transport de marchandise
(Rizk, Martel, et Ramudhin 2006)		Cap	Cap	cap			•						•		Heuristique lagrangienne	
(Chand et al. 2007)		Uncap	Uncap	Uncap			•						•		Programmation dynamique	
(Jaruphongs et Lee 2008)		Uncap	Uncap	Uncap			•						•		Programmation dynamique	
(Herer et Tzur 2001)		Uncap	Uncap	Uncap			•						•		Programmation dynamique	
(W.-S. Lee, Han, et Cho 2005)		Uncap	Uncap	cap			•						•		Heuristique	
(Federgruen et Tzur 1999)		Uncap	Uncap	Uncap			•						•		Heuristique	
(Solyali et Sural 2012)		Uncap	Uncap	Uncap			•						•		Heuristique	
(Sambasivan et Yahya 2005)		Cap	Uncap	Uncap			•			•			•		Heuristique lagrangienne	Sidérurgie
(Timpe et Kalrath 2000)		Cap	Cap	cap			•						•	•		Process
(Van Hoesel et al. 2005)		Cap	Uncap	Uncap			•						•		Programmation dynamique	
(Önal 2016)		Uncap	Uncap	Uncap			•						•		Programmation dynamique	
(Wang, Grunder, et Moudni 2014)		Cap	Cap	cap			•						•			
(Pibernik et Sucky 2007)		Cap	Cap	Uncap			•			•			•	•		
(Kaminsky et Simchi-Levi 2003)		Cap	Cap	Uncap			•						•		Programmation dynamique	
(Tang, Yung, et Ip 2004)	•	Cap	Uncap	Uncap		•				•			•		Heuristique basée sur une méthode de décomposition	
(Kirschstein et Meisel 2019)	•	Uncap	Cap	cap			•						•		Heuristique	Industrie de process
(Bell et al. 1983)			Uncap	cap			•						•		Heuristique lagrangienne	Transport du gaz industriel
(Manupati et al. 2018)		Uncap	Uncap		Uncap			•					•		Heuristique	Conception et évaluation d'une chaîne logistique durable
(Wang, Grunder, et Moudni 2014)		Cap	Uncap		Uncap		•			•	•		•	•		Micro-électronique
(Darvish, Larrain, et Coelho 2016)		Cap	Cap		Uncap		•			•			•	•		Partenaire industriel anonyme
Notre problème		Cap	Cap	Cap			•			•	•		•	•	Heuristiques	Secteur minier

Cap: Avec contrainte de capacité
Uncap: Sans contrainte de capacité

Strat: Stratégique
Tact: Tactique

Op: Opérationnel

Suite à l'analyse de ce tableau et au regard des critères de comparaison précédemment cités, le premier constat pouvant être dressé est que « quelques sous-problèmes de notre problème » ont été traités par des travaux antérieurs. Notons qu'ils ont été traités de manière séparé ; nous n'avons pas trouvé d'article les liant simultanément. Par exemple, aucune étude ne considère simultanément les aspects liés à la planification de production, de stockage et de transport avec prise en compte des contraintes de capacités des ressources. Nous avons remarqué que la majorité des papiers ont traité simultanément ces trois sous problèmes et n'ont pas pour autant considéré la limitation des capacités de ces ressources. Également, à notre connaissance, nous n'avons pas identifié une recherche ayant intégré la planification de la production et stockage au transport ferroviaire avec fenêtres de temps. Enfin, le champs industriel minier constitue également un axe d'originalité de notre étude, puisque nous n'avons pas identifié des études similaires.

Au-delà des composantes générales des problèmes considérées, nous souhaitons approfondir encore plus notre analyse de la littérature. L'objectif est d'affiner la comparaison afin de regarder de près la modélisation retenue des sous-systèmes de production, stockage et transport lorsque ceux-là sont considérés. Le Tableau 9 propose une comparaison des contraintes et paramètres considérés dans notre modélisation avec ceux des modèles retrouvés dans la littérature. Le tableau distingue les paramètres caractérisant les systèmes de production, stockage et de transport, les coûts considérés pour valoriser les solutions données par les modèles, et les variables de décision prises en compte.

Tableau 9: Tableau comparatif des contraintes et paramètres traités par les principales références de notre état de l’art

	(Li, Hsu, et Xiao 2004)	(Jaruphongsat, Cetinkaya, et Lee 2007)	(van Norden et van de Velde 2005)	(Rizk, Martel, et Ramudhin 2006)	(Chand et al. 2007)	(Jaruphongsat et Lee 2008)	(Herer et Tzur 2001)	(W.-S. Lee, Han, et Cho 2005)	(Federgruen et Tzur 1999)	(Kirschstein et Meisel 2019)	(Witt et Voss 2010)	(Fleischhacker et Zhao 2011)	(Heuts, Seidel, et Selen 1992)	(Torres, Santiago, et Chung 2010)	(Bell et al. 1983)	(Timpe et Kallrath 2000)	(Van Hoessel et al. 2005)	(Manupati et al. 2018)	(Pibernik et Sucky 2007)	(Hakeem-Ur-Rehman, Wan, et Zhan 2019)
Paramètres et contraintes																				
Production																				
Production multi modes				x												x				
Capacité maximale de production	x										x	x	x	x		x	x		x	x
Capacité minimale de production											x									
Nomenclature des produits											x								x	x
Production par compagnes											x			x		x				
Stockage																				
Variation de la capacité en fonction du nombre de produits																				
Temps de séjour aux stocks																				
Transport																				
Capacité maximale	x	x						x		x						x				
Capacité minimale																				
Fenêtres de temps																				
Temps d'acheminement																				
Coûts considérés																				
Coût de production	x			x		x	x	x	x			x				x	x	x	x	x
Coût de stockage			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x
Coût de transport	x		x	x	x	x	x	x	x	x					x	x	x	x	x	x
Variables de décision																				
Production	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x		x			x	x	x	x	x
Stockage	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x
Transport	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x		x	x	x	x	x	x	x
Switch off																				
Start up																				

Malgré la prise en compte séparée de quelque sous-systèmes de notre problème par les travaux antérieurs (comme montré par le Tableau 8), l'analyse du Tableau 9 montre que les contraintes et paramètres que nous traitons sont toutefois très peu étudiés. En particulier, les caractéristiques du systèmes de stockage n'ont pas été prises en compte auparavant, comme le transport ferroviaire avec fenêtres de temps. Également, ce tableau montre qu'aucune de ces études ne traite simultanément les paramètres de notre problème.

Partant de ces constats, une des contributions du présent travail de recherche initié par la problématique de l'OCP vient de l'ajout de variables opérationnelles telles que le transport des produits finis par voie ferroviaire, les fenêtres de temps de livraison des produits finis ainsi que les caractéristiques du système de production (telle que la production multi- modes), et de stockage (la caractérisation de la capacité de stockage). De plus, et c'est là un des principales originalité, le problème industriel de l'OCP propose une riche adaptation du problème classique du *lot sizing* à un champs industriel assez particulier. En effet, les systèmes logistiques relevant de ce champs industriel présentent plusieurs particularités, dont par exemple :

- La nature hybride des flux physiques traversant le système logistique.
- La forte interdépendance entre les différents niveaux de production.
- Des capacités de production bien définies dans les lignes de fabrication et qui ne peuvent varier que dans une plage de valeur restreinte, avec des temps de démarrage et de changement de produit relativement élevée (pouvant atteindre quelques jours dans certains cas).

L'exposé ci-dessus des différentes caractéristiques du contexte minier étudié met en évidence l'originalité des aspects de la problématique traitée dans la présente recherche et, par voie de conséquence, l'originalité des outils d'aide à la décision développés pour traiter les caractéristiques complexes du système industriel étudié.

9. CONCLUSION

Ce deuxième chapitre a pour objectif premier celui de positionner la problématique que nous adressons par rapport aux recherches antérieurement menées. Plus précisément, il s'agit de poser le cadre général défini par le problème du *lot sizing*. Les principaux problèmes ayant

découlé du problème initial ont été classés dans un premier temps selon la structure du système étudié, puis dans un deuxième temps selon la taille des périodes qui composent l'horizon temporel. Au cours de cette revue, une attention particulière a été accordée à l'intégration du problème du *lot sizing* multi-niveaux avec transport. Nous avons essayé de caractériser le plus fidèlement possible les différentes variantes qui découlent de cette intégration. Enfin cette revue a également examiné les recherches ayant appliqués le LSP à des champs industriels similaires à celui de l'industrie minière.

Au-delà du récit des travaux antérieurs, cette revue vise également la mise en évidence de l'impossibilité d'appliquer les modèles existant dans la littérature à notre problème et dans notre contexte industriel. Cela montre les défis scientifiques à relever nos travaux. Ces défis sont les suivants :

- L'adaptation du problème classique de *lot sizing* multi-niveaux (Multi Level Lot Sizing Problem 'MLLSP') aux spécificités et caractéristiques structurelles du système logistique minier. Ceci se fait par l'ajout de variables et paramètres opérationnels traduisant le fonctionnement du système de production et stockage minier dans le cadre d'un système multi-niveaux, multi-sites, et multi-produits Par exemple: la production sous forme de compagnes de produits de taille maximale ; la capacité (débit) de production restreinte dans une plage définie ; le temps de séjour dans les stocks, la capacité des stocks variable en fonction du volume stocké...).
- Le transport des produits fabriqués par le système de production avec prise en compte des fenêtres de temps.
- L'intégration des deux problèmes mentionnées dans les deux point précédents. Ceci revient à l'intégration du problème de *lot sizing* multi-niveaux avec celui du transport ferroviaire conditionné par les fenêtres de temps comme mode d'acheminement direct.
- La configuration du réseau logistique composé d'un ensemble de sites de production interconnectés, et dans lequel chaque site est composé d'unités de fabrication avec des unités de stockage en amont et en aval.

Ce défi scientifique nous a conduit à proposer un nouveau modèle de lot sizing que nous nommons MLLSP-TTW (*Multi Level Lot Sizing Problem integrated with train transport*

with time windows) et dont nous proposons la formulation à partir des contraintes industrielles dans le chapitre suivant.

Chapitre III : Modélisation du problème MLLSP-TTW

Résumé. Ce troisième chapitre a pour objectif d'introduire le formalisme mathématique avec lequel a été appréhendé le système industriel minier préalablement décrit. Ce formalisme est présenté dans le cadre de la mise en œuvre d'un outil d'aide à la décision sous la forme de MILP. Plusieurs expérimentations sont donc présentées dans l'objectif de mettre en évidence les apports managériaux de l'outil développé dans le cadre de cette thèse.

1. INTRODUCTION

Dans les chapitres précédents, nous avons décrit le contexte industriel et scientifique de cette recherche. A ce stade du manuscrit de thèse, la problématique industrielle a été définie tandis que la problématique scientifique a été rattachée au problème classique de *lot sizing* dans sa forme multi-niveaux. Nous avons ensuite présenté un état de l'art positionnant notre problème au sein de la littérature scientifique ; notre constat a de ce fait été comparé à ceux traités dans les travaux précédemment réalisés. Nous avons donc réalisé que ceux-ci sont inadaptés aux particularités de notre contexte industriel. Plus précisément, le premier constat est qu'une partie des contraintes et paramètres de notre problème a également été traitée par des travaux antérieurs. Le deuxième constat part des propriétés intrinsèques de l'activité industrielle minière et montre que l'originalité des aspects de la planification dans l'industrie minière oblige à enclencher un processus de transformation du problème classique de *lot sizing* au problème de cette thèse. Partant de ces constats, notre problème a été formulé comme un problème de *lot sizing* multi-niveaux (MLLSP) intégré à un problème de transport avec fenêtre de temps. Nous avons nommé ce problème MLLSP-TTW (*Multi Level Lot Sizing Problem integrated with train transport with time windows*)

L'objectif de ce chapitre est donc de proposer une modélisation du MLLSP-TTW. La première partie est dédiée à la description des différentes composantes du problème industriel traité tout au long du manuscrit et l'introduction des notations utilisées dans la modélisation mathématique. Dans la seconde partie, nous proposons les différentes contraintes traduisant le problème présenté ainsi que leur transcription sous la forme d'un problème linéaire à variables mixtes et entières (Mix Integer Linear Program, MILP). Finalement la dernière partie de ce chapitre présente plusieurs expérimentations mettant en évidence les apports de l'outil d'aide à la décision proposé ; ces apports industriels s'articulent autour des axes suivants : Amélioration de la flexibilité du système industriel, Amélioration du processus de prise de décision, Évaluation de la propagation en amont et en aval des décisions prises, et Analyse de la structure des coûts et de la sensibilité du coût total aux différents éléments du coût.

2. DESCRIPTION DÉTAILLÉE DE LA SUPPLY CHAIN MINIÈRE DE L'OCP

Le présent travail concerne l'axe centre de l'OCP, qui est l'un des trois axes parallèles indépendants composant sa chaîne logistique. Le rôle du sous-système étudié est décrit dans la Figure 23. Il consiste en l'extraction des minerais, leur valorisation chimique et le transport des produits vers les sites de transformation chimique ou bien vers les clients internationaux. En effet, le système étudié est alimenté en minerai par trois mines (Ben Guerir, Mzinda et Bouchane). Le minerai extrait est acheminé via convoyeurs vers trois sites de production dans lesquels il est valorisé chimiquement. La valorisation chimique consiste en un ensemble de transformations ayant pour objectif d'augmenter la concentration du phosphate et diminuer la concentration des impuretés dans le minerai. Les produits fabriqués sont ensuite transportés via une voie ferroviaire unique vers deux types de clients : les clients internes matérialisés par sites de transformation chimiques qui produisent les acides et fertilisants à Safi, et les clients externes qui achètent le minerai valorisé ou les engrais.

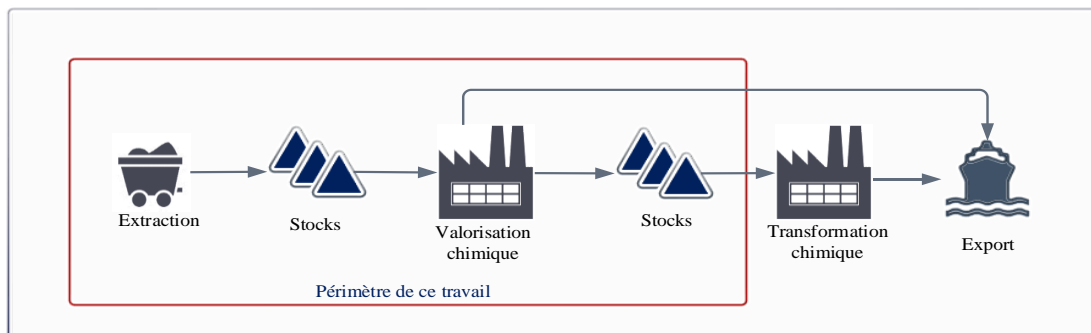


Figure 23: Rappel du périmètre organisationnel

3. MODELISATION DU PROBLEME

Le point de départ de cette recherche étant un problème industriel réel posé par notre partenaire, nous proposons cependant une modélisation généralisable pouvant être appliquée et adaptée dans le cadre d'une activité industrielle similaire. Cette partie a pour objectif de présenter la manière avec laquelle ont été appréhendées les différentes composantes du système industriel. Plus précisément, il s'agit d'indiquer comment ses éléments ont été approchés afin d'être modélisés. Cependant avant de passer à la formulation mathématique du problème, il

convient d'introduire la façon dont le système de production, de stockage et de transport dans son ensemble. Nous en profitons pour introduire également quelques notations employées dans la suite du manuscrit.

3.1. Système de production

Le système étudié, décrit à la Figure 24, est un réseau logistique (supply chain) alimenté en minerai par un ensemble K de mines considérées nœuds sources. Chaque mine (nœud source) approvisionne le système par un ensemble de minerais O considérés matière première. Le réseau de production est composé d'un ensemble P de sites de production fabriquant un ensemble de produits N . Chaque site de production est composé d'une usine de production, d'un stock amont dans lequel sont stockés les matières premières et d'un stock aval dans lequel sont stockés les produits fabriqués. Bien entendu, les usines de production transforment les minerais sources soit en produits intermédiaires ou bien en produits finis. De plus, un produit peut être fabriqué simultanément dans plusieurs usines. Chaque usine est limitée par une capacité maximale de production $C_{i,s,m}^{\max}$ (qui se réfère à la capacité maximale de production du produit i selon le mode m dans le site de production $s \in P$), et par une capacité minimale de production $C_{i,s,m}^{\min}$ (qui se réfère à la capacité minimale de production du produit i selon le mode m dans le site de production $s \in P$). Les usines de production sont multimodes. Nous définissons un mode de production comme un état de fonctionnement possible de l'usine de production. Le choix d'un mode de production définit un ensemble de produits pouvant être produits dans l'usine en question. M est l'ensemble des modes possibles pour les usines de production. En conséquence, le choix d'un mode de production stipule la quantité de minerais (matières premières) à acheminer dans une période à une usine. Une usine ne peut fonctionner que selon un seul mode à la fois. Un produit peut être produit selon plusieurs modes de production.

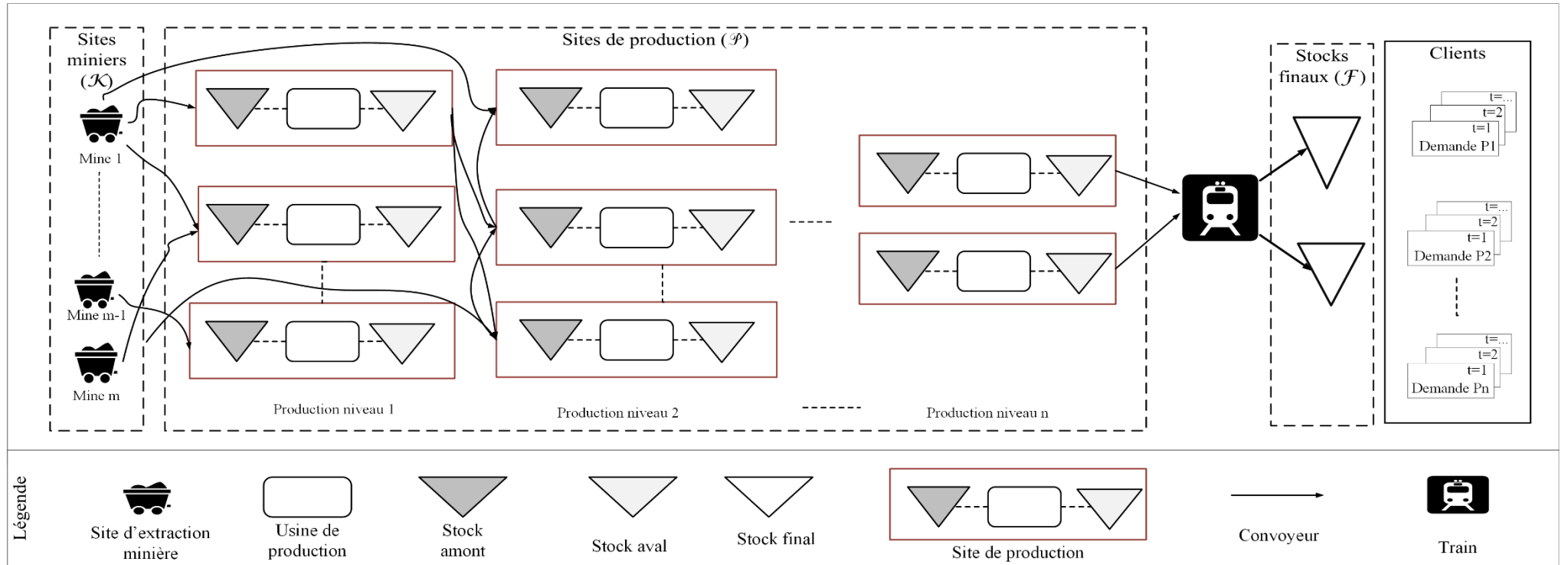


Figure 24: Structure multi-sites, multi-période du système étudié

3.2. Système de stockage

Concernant le système de stockage, nous distinguons trois types de sites de stockage. Les deux premiers sont les unités de stockage en amont des usines de production dans lesquelles sont stockées les matières premières relatives de chaque usine, et les unités de stockage en aval des unités de production dans lesquelles sont stockées les produits fabriqués dans les usines afférentes. Également, ces unités de stockage sont limitées par des capacités maximales de stockage, G_s^{\max} et Q_s^{\max} correspondant respectivement aux capacités maximales de stockage dans le stock amont et stock aval de site de production $s \in P$. Il est à noter que dans notre modélisation, chaque élément de l'ensemble des sites de production P fait référence à l'ensemble {stock amont, usine de production, stock aval}, c'est-à-dire l'usine de production et/ ou les stocks amont et aval qui lui sont rattachés (voir Figure 24). Par exemple, pour le paramètre Q_s^{\max} , $s \in P$ réfère au stock aval du site s , alors que pour la variable de décision $g_{i,t,s}$ (qui correspond au niveau du stock amont du site $s \in P$ du produit i à la période t) $s \in P$ réfère au stock amont du site s .

Finalement, le troisième type de stocks modélisé dans le système étudié sont les stocks finaux F . Ces stocks sont localisés à la sortie du système logistique en aval de la voie ferroviaire. Les produits finis fabriqués dans les différentes usines de production sont stockés avant leur distribution aux clients internes et externes. La demande est donc satisfaite à partir de ces stocks finaux. Également, les stocks finaux sont limités par une capacité maximale de stockage L_s^{\max} , correspondant à la capacité maximale de stockage dans le stock final $s \in F$.

3.3. Système de transport

Le système de transport est un système à flux hybride composé de convoyeurs à flux continu et de système de transport par trains à flux discret. Les convoyeurs assurent le transport inter-sites de la matière première et des produits semi-finis. A cause de leurs spécifications techniques, ces convoyeurs sont caractérisés par un débit maximal de produit qu'ils peuvent transporter pendant une période donnée J_s^{\max} (le débit maximal du convoyeur entrant au site de

production $s \in P$) et par un débit minimal de produits qu'ils peuvent transporter pendant une période donnée J_s^{\min} (le débit minimal du convoyeur entrant au site de production $s \in P$).

Ensuite, l'ensemble des produits fabriqués dans la supply chain minière est transporté via une voie ferroviaire unique vers deux destinations : le port duquel les produits sont acheminés vers les clients internationaux, et les sites de transformation chimique qui transforment ces produits en acides et fertilisants. Ce système de transport des produits finis est particulier car il est conditionné par des contraintes spatio-temporelles conditionnant les périodes pendant lesquelles il est possible d'acheminer les produits finis. En effet, la voie ferroviaire utilisée pour le transport des produits finis est également exploitée pour le transport des passagers. Cette contrainte impose le respect de plage horaires, que nous appelons fenêtres de temps. Ces fenêtres de temps sont communément appelées sillons. En dehors de ces sillons, l'usage de la voie ferroviaire pour le transport du phosphate est interdit.

De plus, un train ne peut transporter qu'un seul produit à la fois, et requiert un temps de transport $\Delta_{s,s'}$ pour transporter un produit du site de production $s \in P$ vers le site final $s' \in F$.

Finalement, en respect des spécifications techniques du transport par train, chaque expédition des produits finis doit respecter une capacité maximale de transport par train B^{\max} et une capacité minimale de transport par train B^{\min} .

Discrétisation du temps

La demande traitée est une demande indépendante connue pour un horizon de temps fini, représentée par le paramètre $d_{i,t}$ (la demande du produit i durant la période t). Avec l'objectif de capter les caractéristiques fines du problème étudié, en l'occurrence les fenêtres de temps relatives au transport par train, l'horizon de planification est discrétisé en un ensemble petites périodes de temps T (*small time buckets*) égales à une heure pour nos expérimentations (section 5). Enfin la rupture de stock n'est pas autorisée, ce qui signifie que toute demande non satisfaite pendant une période donnée est perdue.

3.4. Objectifs du modèle

L'objectif de cette recherche est d'appréhender le système étudié globalement afin de mettre en œuvre un modèle unique, intégré, pour la planification de l'ensemble des flux physiques. Nous cherchons à répondre aux questions suivantes :

- *Quelles sont les quantités à fabriquer par produit dans chaque site de production ? En quelle période ?*
- *Quelle est le mode de production à sélectionner dans chaque site de production et dans chaque période ?*
- *Quelles sont les quantités à stocker par produit et par période dans les stocks amont et aval des usines de production et dans les stocks finaux ? En quelle période ?*
- *Quelles sont les quantités des minerais et de produits intermédiaires à transporter entre les différents sites pour chaque période ?*
- *Quelles sont les quantités de produits finis à acheminer par trains depuis les sites de production vers les stocks finaux pour chaque période en respectant les fenêtres de temps ?*

3.4.1. Objectifs optimisés – indicateurs de performance

Afin d'obtenir une meilleure représentation des spécifications du système minier que nous modélisons, nous avons identifié trois objectifs / indicateurs de performance que nous cherchons à optimiser. Ces objectifs sont optimisés hiérarchiquement dans l'ordre suivant :

- **Un objectif commercial** qui cherche à satisfaire la demande pour chaque produit et pour chaque période. Critère classique en planification de la production, la satisfaction de la demande est l'objectif majeur et principal de tout système de production. Cet objectif est traduit dans notre modèle par la variable de décision de demande perdue (*lost sales*). Bien entendu, le modèle cherche à minimiser la demande perdue pour l'ensemble des produits pour tout l'horizon de planification. Ceci revient à maximiser la satisfaction de la demande pour l'ensemble des produits et pour l'ensemble de l'horizon considéré.
- **Un objectif industriel** qui consiste en minimiser les arrêts de production dans l'ensemble des sites de production et pour l'ensemble de l'horizon de planification. En

effet, minimiser les arrêts de production permet en premier lieu d'éviter les temps de démarrage relativement lents et qui sont également accompagnés de consommation importante d'énergie. En outre, les coûts d'acquisition élevés des installations et équipements de production imposent aux 'planificateurs' de garder des taux d'utilisation élevés des ressources. Cela revient à minimiser les arrêts de production lors de l'établissement des plans de production.

- **Objectif économique** qui consiste en la minimisation des coûts opérationnels totaux liés aux activités de production, de stockage et de transport. Ces couts sont détaillés dans la section qui suit.

3.4.2. Coûts considérés

Un système de valorisation a été pensé à partir de la littérature sur le LSP et des réunions dans l'Axe centre avec l'objectif d'obtenir une meilleure représentation du système industriel réel.

Concernant le système de production, deux coûts sont identifiés afin de valoriser le plan de production calculé par le modèle, à savoir :

- Un coût variable de production $b_{i,s}$: est engendré par chaque unité produite. Ce coût correspond à $b_{i,s}$, coût unitaire de la production du produit i au site de production $s \in P$
- Un coût de *start up* $c_{i,s}$: Afin de transformer le minerai extrait en produit fini ou semi-fini, certains processus de production procèdent à très haute températures. La température du processus de production dépend des caractéristiques chimiques du produit à la sortie. L'énergie nécessaire pour chauffer les machines de production a été traduite par le coût de *start up* $c_{i,s}$ du produit i dans le site de production $s \in P$. Ce coût correspond aux coûts fixes de lancement générés au début d'une séquence successive du même produit sur une ligne de production après être en état d'arrêt. Bien entendu, cette séquence peut s'étaler sur plusieurs périodes.

Ensuite, afin de valoriser le plan de stockage calculé par le modèle, nous avons identifié trois types du coût de stockage :

- $o_{i,s}$ le coût de stockage du produit i au stock amont du site $s \in P$
- $e_{i,s}$ le coût de stockage du produit i au stock aval au site $s \in P$
- $t_{i,s}$ le coût de stockage du produit i au stock final $s \in F$

Finalement, afin de valoriser le plan de transport, le modèle considère le paramètre J correspondant au coût unitaire de transport par train.

4. FORMALISATION DES CONTRAINTES INDUSTRIELLES

Le problème a été modélisé sous la forme d'un problème de *lot sizing* multi-niveaux, avec des périodes courtes (*small bucket*), intégré à un problème de transport avec fenêtres de temps. Nous nommons ce problème *Multi-Level Lot-Sizing Problem with Transport Time Windows (MLLSP-TTW)*. Nous décrivons en détail dans ce qui suit la formulation retenue pour les différentes contraintes industrielles. Pour cela, nous commençons par décrire les équations de conservation des flux, ensuite nous détaillons les contraintes relatives aux différents nœuds de production et de stockage. Nous adressons finalement les contraintes relatives aux arcs du réseau logistique.

4.1. Notations

Les notations introduites et utilisées tout au long de ce document sont nombreuses, certaines ont été précédemment définies dans la partie descriptive du problème. Ainsi, l'intégralité des notations utilisées est définie dans le Tableau 10. Nous avons distingué les ensembles, les paramètres ainsi que les variables comme illustré dans ce qui suit.

Tableau 10: Tableau récapitulatif des notations retenues pour la modélisation mathématique

Ensembles et indices

T	Ensemble des périodes, $t \in T$
O	Ensemble des minerais extraits (qualités sources), $k \in O$
N	Ensemble des produits fabriqués, $i \in N$
K	Ensemble des sites miniers, $s \in K$
P	Ensemble des sites de production, $s \in P$

- F Ensemble des stocks finaux, $s \in F$
- M Ensemble des modes de production, $m \in M$

Paramètres de production

- $d_{i,t}$ Demande finale du produit i à la période t
- $C_{i,s,m}^{\max}$ Capacité maximale de production du produit i selon le mode m au site de production $s \in P$
- $C_{i,s,m}^{\min}$ Capacité minimale de production du produit i selon le mode m au site de production $s \in P$
- $a_{i,j,s,m}$ Nombre d'unités du produit i nécessaires pour produire une unité du produit j au site de production $s \in P$ selon le mode m , et $a_{i,j,s,m} = 0$ si $j < i$
- $\phi_{i,s}$ Capacité maximale d'extraction du minerai i au site minier $s \in K$
- $\gamma_{i,s}$ Paramètre binaire, égal à 1 si le minerai $i \in O$ peut être extrait au site minier $s \in K$, 0 sinon.
- $\psi_{i,s,m}$ Paramètre binaire, égal à 1 si le produit i peut être produit au site de production $s \in P$ selon le mode m , 0 sinon.
- $\varphi_{i,j}$ Paramètre binaire, égal à 1 si les produits i et j ne peuvent pas être simultanément produit dans la même ligne de production, 0 sinon.

Paramètres de stockage

- G_s^{\max} Capacité maximale de stockage au site amont du $s \in P$
- Q_s^{\max} Capacité maximale de stockage au site aval du $s \in P$
- L_s^{\max} Capacité maximale de stockage au stock final $s \in F$
- $\pi_{i,j,s}$ Paramètre binaire, égal à 1 si les produits i et j ne peuvent pas être stockés simultanément au stock aval du site de production s
- $p_{i,s}$ Temps minimum de repos du produit i au stock s
- τ Pourcentage perdu de la capacité de stockage suite au stockage simultané de deux produits différents

$\alpha_{k,s}$	Paramètre binaire, égal à 1 si le minerai k est stocké au stock amont du site s , 0 sinon
$\beta_{i,s}$	Paramètre binaire égal à 1 si le produit i ne peut pas être stocké dans le stock aval du site s , 0 sinon
$\partial_{i,s}$	Paramètre binaire à 1 si le produit i peut être stocké au stock final s , 0 sinon

Paramètres de transport

J_s^{\max}	Le flux maximal de produit pouvant être transporté par le convoyeur entrant au site de production $s \in P$
J_s^{\min}	Le flux minimal de produit pouvant être transporté par le convoyeur entrant au site de production $s \in P$
B^{\max}	Capacité maximale de transport par train
B^{\min}	Capacité minimale de transport par train
$\Delta_{s',s}$	Temps requis pour transporter un produit par train du site de production $s' \in (K \cup P)$ vers le stock $s \in (P \cup F)$
R^{\max}	Nombre maximal de train possibles par jour
ϖ_t	Paramètre binaire égal à 1 si le transport par train est possible à la période t , 0 sinon
H	Nombre d'heures considérées par jour
D	Nombre de jours composant l'horizon

Coûts

$b_{i,s}$	Coût unitaire de production du produit i au site de production $s \in P$
$c_{i,s}$	Coût de <i>start up</i> de la production du produit i au site de production $s \in P$
$o_{i,s}$	Coût de stockage du produit i au stock amont du site de production $s \in P$
$e_{i,s}$	Coût de stockage du produit i au stock aval du site de production $s \in P$
$t_{i,s}$	Coût de stockage du produit i au stock final $s \in F$
J	Coût unitaire de transport par train

Variables de décision de production

$x_{i,t,s,m}$	Quantité du produit i au produire au site de production $s \in P$ à la période t selon le mode m
$r_{i,t}$	Demande perdue du produit i à la période t
$y_{i,t,s,m}$	Variable binaire de <i>set up</i> , égale à 1 si et seulement si if $x_{i,t,s,m} > 0$
$z_{i,t,s,m}$	Variable binaire de <i>start up</i> , égale à 1 si la production au site $s \in P$ est lancée pour produire le produit i à la période t , alors le produit i n'était pas en cours de production à la période $t-1$
$w_{i,t,s,m}$	Variable binaire de <i>switch off</i> , égale à 1 si la production au site $s \in P$ est lancée pour produire le produit i à la période t , mais le produit i ne sera pas produit à la période $t+1$

Variables de décision de stockage

$i_{i,t,s}$	Niveau du stock aval du produit i au site $s \in P$ à la période t
$g_{i,t,s}$	Niveau du stock amont du produit i au site $s \in P$ à la période t
$f_{i,t,s}$	Niveau du stock final i au site $s \in F$ à la période t
$\lambda_{i,t,s}$	Variable binaire, égale à 1 si et seulement si $i_{i,t,s} > 0$
$\chi_{i,j,t,s}$	Variable binaire, égale à 1 si et seulement si les produits i et j peuvent être simultanément stockés au stock aval du site s à la période t

Variables de décision de transport

$q_{i,t,s,s'}$	Quantité du produit i transportée du site $s \in P$ vers le site $s' \in (P \cup F)$, à la période t
$\omega_{i,t,s,s'}$	Variable binaire de transport, égale à 1 si et seulement si $q_{i,t,s,s'} > 0$

4.2. Équations d'équilibre des stocks

Le modèle distingue trois types d'unité de stockage. Ces derniers se distinguent par leur position dans le système logistique et par la nature des produits qui y sont stockés :

- Stocks amont : stocks consacrés à la matière première, localisés en amont des usines de production.
- Stocks aval : stocks consacrés aux produits intermédiaires et finis, localisés en aval des usines de production.
- Stocks finaux : consacrés au stockage des produits finis avant leur distribution aux clients.

Les équations d'équilibre des stocks traduisent la conservation du flux de matière dans les différents nœuds de stockage. Ils relient la somme des flux entrants et sortants du nœud de stockage pour chaque période. Le modèle suppose que la rupture de stock n'est pas autorisée, ce qui implique que les niveaux de stocks ne peuvent prendre des valeurs négatives. L'équation (12) exprime l'équilibre des stocks pour les stocks amonts des sites de production. La variable $g_{i,t,s}$ traduit le niveau du stock amont du produit i au site $s \in P$ à la période t . La variable $q_{i,t,s',s}$ est la quantité du produit i transportée à la période t à partir du site minier (dans le cas de minerai) ou du site de production (dans le cas de produit semi-fini) $s' \in O \cup P$ vers le stock amont du site s . Le temps nécessaire pour acheminer un produit du site s' vers le site s est traduit par le paramètre $\Delta_{s',s}$. La variable $x_{i,t,s,m}$ exprime la quantité du produit i à produire au site de production $s \in P$ à la période t selon le mode m . La Figure 25 illustre le lien entre les flux entrants et sortants des stocks amonts des sites de production.

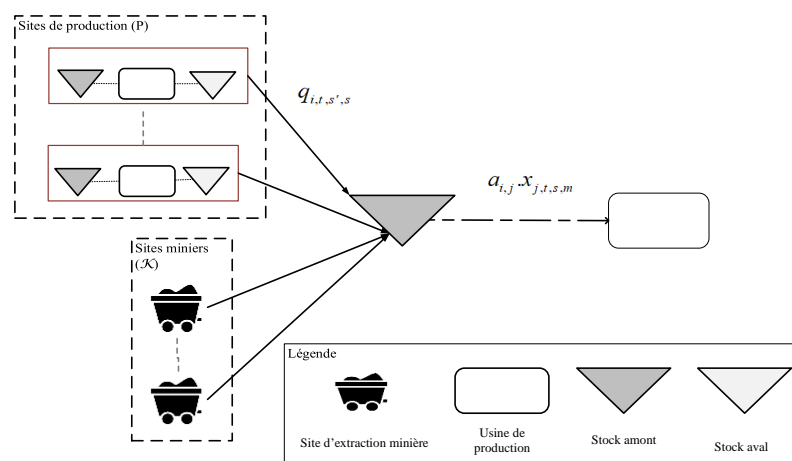


Figure 25: Illustration de la conservation des flux dans les stocks avals des sites de production

Notons que le système de production traité par nos travaux de recherche correspond à un réseau de production multi-site. Il convient de remarquer que chaque lancement de production à un nœud donné du réseau se traduit par un besoin en matières premières, ces derniers pouvant être soit fabriqués dans des sites de production amont, ou bien extraits à partir des sites miniers d'extraction. Ainsi, les produits fabriqués dans le réseau sont reliés au flux des matières premières correspondantes par l'intermédiaire du paramètre $a_{i,j,s,m}$. Ce paramètre se réfère au nombre d'unités du produit i nécessaires pour produire une unité du produit j au site de production $s \in P$ selon le mode m . La relation entre la consommation des matières premières à la période t , et leur disponibilité est donc établie par les équations d'équilibre des stocks (12) et (13).

$$g_{i,t,s} = g_{i,t-1,s} - \sum_{j \in N, m \in M} a_{i,j,s,m} \cdot x_{j,t,s,m} \quad (12)$$

$$(\forall i \in (O \cup N), t < \Delta_{s',s}, s' \in (K \cup P) \mid \beta_{i,s'} + \gamma_{i,s'} \geq 1, s \in P)$$

$$g_{i,t,s} = g_{i,t-1,s} + \sum_{s' \in (K \cup P)} a_{i,t-\Delta_{s',s},s',s} - \sum_{j \in N, m \in M} a_{i,j,s,m} \cdot x_{j,t,s,m} \quad (13)$$

$$(\forall i \in (O \cup N), t \geq \Delta_{s',s}, s \in P)$$

Les équations (14) et (15) traduisent la conservation de flux dans les stocks avals des sites production. La Figure 26 illustre la conservation des flux dans les stocks avals des sites de production.

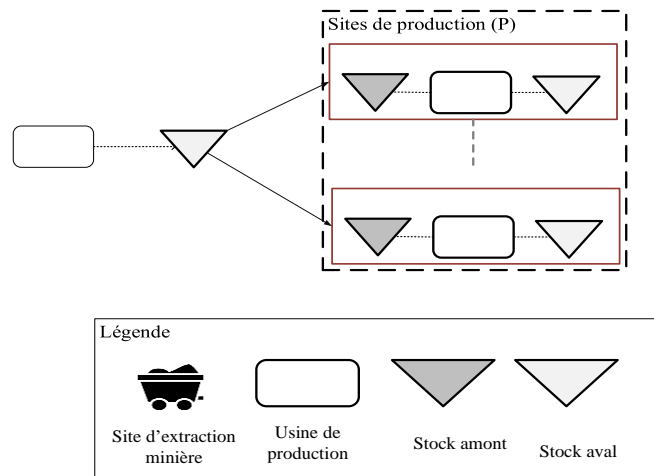


Figure 26: Illustration de la conservation des flux dans les stocks amonts des sites de production

Pour certains sites de production, un temps minimum de repos est requis pour les produits fabriqués dans les stocks avals avant d'être transporté aux autres sites de production. Notons que les produits fabriqués sont stockés à l'air libre sous la forme d'énormes tas de produits. Ce temps de repos $p_{i,s}$ a pour objectif de permettre la stabilisation de certaines caractéristiques chimiques du produit fabriqué, principalement son humidité. En effet, garder le produit en stock à la sortie de certains processus de fabrication favorise l'évaporation et le drainage d'une quantité d'eau existante dans le produit. Ce temps de latence permet par la suite une nette amélioration des rendements de production des processus de production en aval. $p_{i,s}$ dépend de la nature du site de production $s \in P$ est égal à 0 que le temps de repos n'est pas requis pour le site de production en question. Mathématiquement, les équations (14) et (15) expriment la conservation des flux dans les stocks avals des sites de production en tenant compte du temps de repos $p_{i,s}$.

$$i_{i,t,s} = i_{i,t-1,s} - \sum_{s' \in P \cup F} q_{i,t,s,s'} \quad (\forall i \in N, t \in T / t < p_{i,s}, s \in P) \quad (14)$$

$$i_{i,t,s} = i_{i,t-1,s} - \sum_{s' \in P \cup F} q_{i,t,s,s'} + \sum_{m \in M} x_{i,(t-p_{i,s}+1),s,m} \quad (\forall i \in N, t \in T / t \geq p_{i,s}, s \in P) \quad (15)$$

Les produits finis produits par l'ensemble des sites de production sont stockés dans les stocks finaux, positionnés à la fin du système logistique étudié. Ces produits sont transportés par train à partir des sites de production vers les stocks finaux. Étant donné que les stocks finaux sont localisés dans sites géographiquement éloignés des sites de production, un temps de transport $\Delta_{s,s'}$ est requis pour transporter les produits finis du site de production $s \in P$ vers le stock final $s' \in F$. Les stocks finis se situent au port duquel sont acheminés les produits vers les clients internationaux, et en amont des sites de transformation chimique qui transforment ces produits en acides et fertilisants. La variable $f_{i,t,s}$ réfère au niveau du stock final du produit i au stock final $s \in F$ à la période t . Le paramètre $d_{i,t}$ traduit la demande du produit i à la période t . Toute demande non satisfaite est perdue. Le modèle considère donc la variable $r_{i,t}$ correspondant à la demande perdue du produit i durant la période t . Les équations (16) et (17) traduisent la conservation des flux dans les stocks finaux en considérant le temps d'acheminement des produits $\Delta_{s',s}$ et la demande perdue $r_{i,t}$.

$$f_{i,t,s} = f_{i,t-1,s} - d_{i,t} + r_{i,t} \quad (\forall i \in \mathbf{N}, t \in \mathbf{T} / t \leq \Delta_{s',s}, s' \in \mathbf{P} \mid \beta_{i,s'} = 1, s \in \mathbf{F}) \quad (16)$$

$$f_{i,t,s} = f_{i,t-1,s} + \sum_{s' \in \mathbf{P}} q_{i,t-\Delta_{s',s},s',s} - d_{i,t} + r_{i,t} \quad (\forall i \in \mathbf{N}, t \in \mathbf{T} / t > \Delta_{s',s}, s \in \mathbf{F}) \quad (17)$$

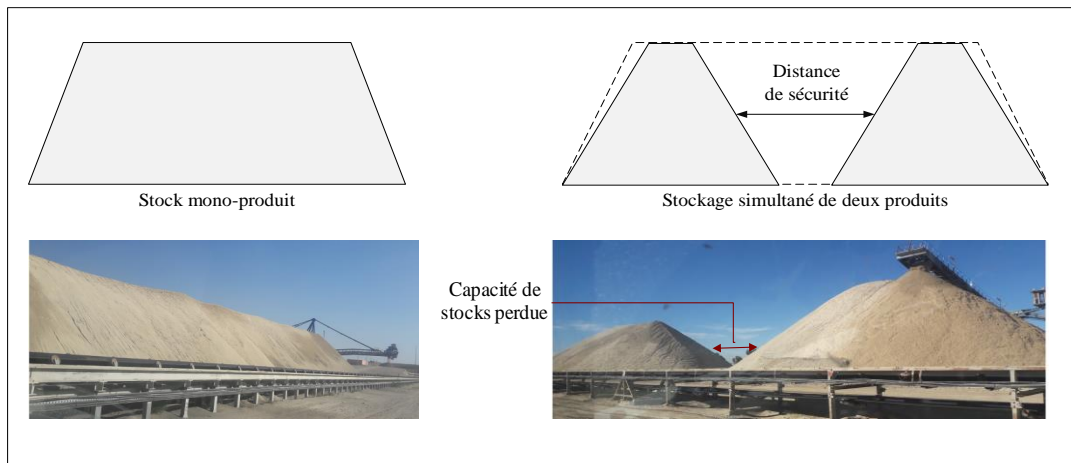
La contrainte (18) interdit à la variable de la demande perdue $r_{i,t}$ de dépasser la valeur de la demande $d_{i,t}$ pour le produit i à une période t .

$$r_{i,t} \leq d_{i,t} \quad (\forall i \in \mathbf{N}, t \in \mathbf{T}) \quad (18)$$

4.3. Capacité maximale de stockage

Le système de stockage dans le contexte industriel minier présente plusieurs spécificités caractéristiques de ce type d'activité industrielle. Ceci est dû en partie à la configuration des unités de stockage. Les produits intermédiaires et finaux sont stockés sous la forme d'énormes tas. En conséquence, la capacité maximale de stockage dans ces unités dépend du nombre des produits stockés. Deux cas de figures se présentent (voir la Figure 27) : (i) Dans le premier cas, un seul produit est stocké pendant la période t . La capacité maximale de stockage est égale à Q_s^{\max} . (ii) Dans le deuxième cas, plusieurs produits sont simultanément stockés. Une distance de sécurité est donc nécessaire afin d'éviter la contamination croisée des produits. Ce qui engendre une perte de la capacité de stockage représentée par le paramètre τ .

Figure 27: Variation de la capacité maximale de stockage en fonction du nombre des produits stockés.



La contrainte (19) introduit le paramètre binaire $\lambda_{i,t,s}$ qui vaut 1 quand le niveau du stock aval du produit i au site de production s est strictement positif $i_{i,t,s} > 0$.

$$i_{i,t,s} + \sum_{t'=\max(1;t-p_{i,s}), m \in M}^t x_{i,t',s,m} \leq Q_s^{\max} \lambda_{i,t,s} \quad (\forall i \in N, t \in T, s \in P) \quad (19)$$

Le modèle considère le cas du stockage simultané de deux produits différents dans le même stock aval.

$$\sum_{i \in N} \lambda_{i,t,s} \leq 2 \quad (\forall t \in T, s \in P) \quad (20)$$

Afin de traduire la perte de capacité résultant du stockage simultané de deux produits différents, la variable binaire $\chi_{t,s}$ est introduite, elle prend la valeur 1 quand deux produits sont simultanément stockés dans le stock aval du site de production $s \in P$ à la période t . Les contraintes (21) et (22) définissent la variable $\chi_{t,s}$ en fonction de la variable $\lambda_{i,t,s}$.

$$\chi_{t,s} \geq (\sum_{i \in N} \lambda_{i,t,s} - 1) / 2 \quad (\forall t \in T, s \in P) \quad (21)$$

$$\chi_{t,s} \leq (\sum_{i \in N} \lambda_{i,t,s}) / 2 \quad (\forall t \in T, s \in P) \quad (22)$$

Ensuite, la contrainte (23) impose le respect de la capacité maximal de stockage Q_s^{\max} du stock aval du site de production $s \in P$ en tenant compte du temps de repos $p_{i,s}$

$$i_{i,t,s} + \sum_{t'=\max(1;t-p_{i,s}), m \in M}^t x_{i,t',s,m} \leq Q_s^{\max} (1 - \tau \cdot \chi_{t,s}) \quad (\forall t \in T, i \in N, s \in P) \quad (23)$$

Enfin, les contraintes (24), (25) et (26) imposent les affectations possibles des minerais et produits fabriqués aux unités de stockage correspondantes. En effet, ces contraintes traduisent la correspondance entre les produits et unités de stockage en interdisant les possibilités inexistantes dans le système réel de stockage de produits dans les sites de stockage. De plus les contraintes (24) et (26) imposent le respect de la capacité maximale de stockage.

$$g_{i,t,s} < \alpha_{i,s} G_s^{\max} \quad (\forall i \in O, t \in T, s \in P) \quad (24)$$

$$i_{i,t,s} < \beta_{i,s} Q_s^{\max} \quad (\forall i \in N, t \in T, s \in P) \quad (25)$$

$$f_{i,t,s} < \partial_{i,s} L_s^{\max} \quad (\forall i \in N, t \in T, s \in F) \quad (26)$$

4.4. Productions multimodes

Conformément aux éléments indiqués lors des deux premiers chapitres, les unités de production fonctionnent selon un système multimode, multi-produits, multi-sites. De plus, chaque usine de production est composée de plusieurs lignes de production pouvant fonctionner simultanément. Également, chaque ligne de production est multi-produit. Un mode de production est défini comme un état de fonctionnement possible de l'usine de production. Le choix d'un mode de production définit un ensemble de produits pouvant être produits dans l'usine en question. Inversement, un produit peut être produit selon différents modes. En conséquence, le choix d'un mode de production stipule le choix et la quantité de matières premières à acheminer dans une période à une usine. Une usine ne peut fonctionner que selon un seul mode à la fois.

Il convient également de remarquer que chaque usine de production $s \in P$ est limitée par une capacité maximale de production $C_{i,s,m}^{\max}$ du produit i selon le mode m . La contrainte (27) traduit le respect de la capacité maximale de production dans les usines de production.

$$x_{i,t,s,m} \leq C_{i,s,m}^{\max} y_{i,t,s,m} \quad (\forall i \in N, t \in T, s \in P, m \in M) \quad (27)$$

A cause des caractéristiques structurelles des processus de production, le débit de production varie uniquement dans un intervalle restreint de valeurs. Ceci se traduit par une capacité minimale de production $C_{i,s,m}^{\min}$ du produit i dans le site de production $s \in P$ selon le mode m .

$$x_{i,t,spr,m} \geq C_{i,spr,m}^{\min} y_{i,t,s,m} \quad (\forall i \in N, t \in T, s \in P, m \in M) \quad (28)$$

Notons également que les contraintes (27) et (28) relient la variable continue de production à la variable binaire de *set up* $y_{i,t,s,m}$.

La contrainte (29) impose le choix d'un seul mode de production à la fois dans chaque période.

$$\sum_{m \in M} y_{i,t,s,m} \leq 1 \quad (\forall i \in N, t \in T, s \in P) \quad (29)$$

Afin d'éviter les combinaisons impossibles {produit, usine de production, mode de production}, la contrainte (30) connecte les usines de production aux produits et modes de production correspondants. Pour cela, le modèle introduit le paramètre binaire $\psi_{i,s,m}$ égal à 1 quand le produit i peut être produit dans l'usine de production $s \in P$ selon le mode m .

$$x_{i,t,s,m} \leq \psi_{i,s,m} C_{i,s,m}^{\max} \quad (\forall i, t, s \in P, m) \quad (30)$$

Conformément à la contrainte (30), le choix d'un mode production détermine les produits pouvant être fabriqués dans une usine de production. Toutefois, certains produits ne peuvent être fabriqués simultanément dans la même usine. Pour traduire cette propriété, le modèle introduit le paramètre $\phi_{i,j}$ égale à 1 quand les produits i et j ne peuvent être simultanément fabriqués. La contrainte (31) exprime cette exclusivité de production.

$$\sum_{i|j \wedge \phi_{i,j}=1} y_{i,t,s,m} \leq 1 \quad (\forall j \in N, t \in T, s \in P, m \in M) \quad (31)$$

4.5. Capacité maximale d'extraction

Le réseau de production est alimenté en minerais par un ensemble de sites miniers d'extraction. Chaque mine fournit un ensemble de minerais transportés aux sites de production dans lesquels ils sont transformés en produits semi-finis ou produits finis. La contrainte (32) impose le respect de la capacité maximale d'extraction $\phi_{i,s'}$ dans le site minier $s' \in K$.

$$\sum_{s \in P} q_{i,t,s',s} \leq \phi_{i,s'} \quad (\forall i \in O, s' \in K, t \in T) \quad (32)$$

4.6. Transport par convoyeurs et par trains

Trois éventualités se présentent devant les produits fabriqués dans une usine donnée : stockage dans le stock aval du site de production, transport vers un autre site aval du système ou bien transport vers les stocks finaux pour être distribué aux clients respectifs. En conséquence, nous distinguons deux types de transport :

- **Transport inter-sites assuré par des convoyeurs à flux continu.**

La liaison entre les différents sites de production est assurée par des convoyeurs à flux continu. Ces convoyeurs transportent également les minerais extraits des sites miniers d'extraction vers les sites de production. Pour chaque période, la quantité transportée par période est limitée par un débit maximal à ne pas dépasser J_s^{\max} , ce paramètre traduit le débit maximal du convoyeur entrant au site de production $s \in P$. La contrainte (33) impose le respect du flux maximal pour chaque convoyeur.

$$\sum_{s' \in (K \cup P)} q_{i,t,s',s} \leq J_s^{\max} \quad (\forall i \in (O \cup N), t \in T, s \in P) \quad (33)$$

De plus, le transport par convoyeur est également sujet à un débit minimal à respecter. Ce flux minimal dépend de la taille du convoyeur et représenté par le paramètre J_s^{\min} , ce paramètre traduit le débit minimal du convoyeur entrant au site de production $s \in P$. La contrainte (34) impose le respect du débit minimal lors du transport par convoyeurs.

$$\sum_{s' \in (K \cup P)} q_{i,t,s',s} \geq J_s^{\min} \quad (\forall i \in (O \cup N), t \in T, s \in P) \quad (34)$$

- **Transport par train assurant l'acheminement des produits finis vers les stocks finaux.**

Le deuxième type de transport modélisé correspond au transport par trains. En effet, l'ensemble des produits finis fabriqués dans le réseau de production est transporté via une voie ferroviaire unique vers les stocks finis. La demande est donc satisfaite à partir de ces stocks.

Cependant, un train ne peut être mobilisé pour transporter des quantités de produits relativement petites. La contrainte (35) impose le respect de la quantité minimale à transporter par train B^{\min} . Évidemment, cette contrainte n'est valable que lorsque le transport par train a

lieu, i.e. lorsque la variable binaire $\omega_{i,t,s,s'}$ est égale à 1. D'où l'usage de $\omega_{i,t,s,s'}$ dans la contrainte (35).

$$q_{i,t,s,s'} \geq B^{\min} \cdot \omega_{i,t,s,s'} \quad (\forall i \in \mathbf{N}, t \in \mathbf{T}, s \in \mathbf{P}, s' \in \mathbf{F}) \quad (35)$$

La contrainte (36) relie la variable continue de la quantité transportée $q_{i,t,s,s'}$ et la variable binaire $\omega_{i,t,s,s'}$. Elle impose également le respect de la capacité maximale de transport par trains B^{\max} .

$$q_{i,t,s,s'} \leq B^{\max} \cdot \omega_{i,t,s,s'} \quad (\forall i \in \mathbf{N}, t \in \mathbf{T}, s \in \mathbf{P}, s' \in \mathbf{F}) \quad (36)$$

Notons à ce niveau qu'il est impératif de respecter des fenêtres de temps (sillons) quant au transport des produits finis par train. La voie ferroviaire étant destinée au transport des passagers en dehors de ces fenêtres de temps. Afin de représenter ces fenêtres de temps, le modèle introduit le paramètre binaire ϖ_t égal à 1 quand le transport par train est possible à la période t . La contrainte (37) impose le respect des fenêtres de temps.

$$q_{i,t,s,s'} \leq B^{\max} \cdot \varpi_t \quad (\forall i \in \mathbf{N}, t \in \mathbf{T}, s \in \mathbf{P}, s' \in \mathbf{F}) \quad (37)$$

De plus, chaque expédition par train ne peut transporter qu'un seul produit à la fois. La contrainte (38) impose le respect du transport d'un seul produit à la fois. Également, la contrainte (38) stipule le respect de l'expédition d'un seul train par période, contrainte imposée par l'unicité de la voie ferroviaire reliant le réseau de production aux stocks finaux.

$$\sum_{i \in \mathbf{N}, s \in \mathbf{P}} \omega_{i,t,s,s'} \leq 1 \quad (\forall t \in \mathbf{T}, s' \in \mathbf{F}) \quad (38)$$

Le transport par train est également limité par un nombre journalier de trains disponibles. La contrainte (39) impose le respect du nombre maximal de rames disponibles par jour.

$$\sum_{t \in \mathbf{H}} \omega_{i,t+(H(j-1)),s,s'} \leq R^{\max} \quad (\forall i \in \mathbf{N}, j \in \{1, \dots, D\}, s \in \mathbf{P}, s' \in \mathbf{F}) \quad (39)$$

4.7. La production par campagnes

Un des éléments à la fois important et particulier caractérisant les processus de production miniers est la nécessité de production par campagnes de production. Ceci est dû à plusieurs raisons :

- Certains processus de production (séchage, calcination) opèrent à de très haute températures, imposant des temps de démarrage et de changement de produits longs,
- Le changement des produits impacte fortement l'amont et l'aval du réseau logistique étant donné la forte dépendance des différents niveaux de production (par exemple : la difficulté de stockage de plusieurs produits, le transport par train d'un seul produit à la fois).

En conséquence, la production est planifiée sous la forme de série de campagnes du même produit. Afin de tenir compte de l'organisation de la production sous la forme de campagnes de production, le modèle introduit différents variables et paramètres :

- Variable binaire de lancement de la production (appelée *start up*) $z_{i,t,s,m}$ égale à 1 quand la variable binaire de *set up* passe de 0 à 1. C'est une variable indicatrice de la période de lancement de la production d'une séquence du même produit.
- Variable binaire de *switch off* $w_{i,t,s,m}$ égale à 1 quand la variable binaire de *set up* $y_{i,t,s,m}$ passe de 1 à 0. C'est une variable indicatrice de la période de la fin de la production d'une séquence du même produit.

La relation entre ces différentes variables est illustrée par la Figure 28.

Inspiré par les travaux de (Belvaux et Wolsey 2001), les contraintes (40) et (41) définissent les variables $w_{i,t,s,m}$ et $z_{i,t,s,m}$ en fonction de la variable de *set up* $y_{i,t,s,m}$.

$$z_{i,t,s,m} - w_{i,t,s,m} = y_{i,t,s,m} - y_{i,t-1,s,m} \quad (\forall i \in \mathbf{N}, t \in \mathbf{T}, s \in \mathbf{P}, m \in \mathbf{M}) \quad (40)$$

$$z_{i,t,s,m} \leq y_{i,t,s,m} \quad (\forall i \in \mathbf{N}, t \in \mathbf{T}, s \in \mathbf{P}, m \in \mathbf{M}) \quad (41)$$

Afin de planifier la production sous la forme de campagnes de produits de longueur maximale, le modèle affecte un coût de pénalité de grande valeur au *switch off* dans la fonction objectif (53).

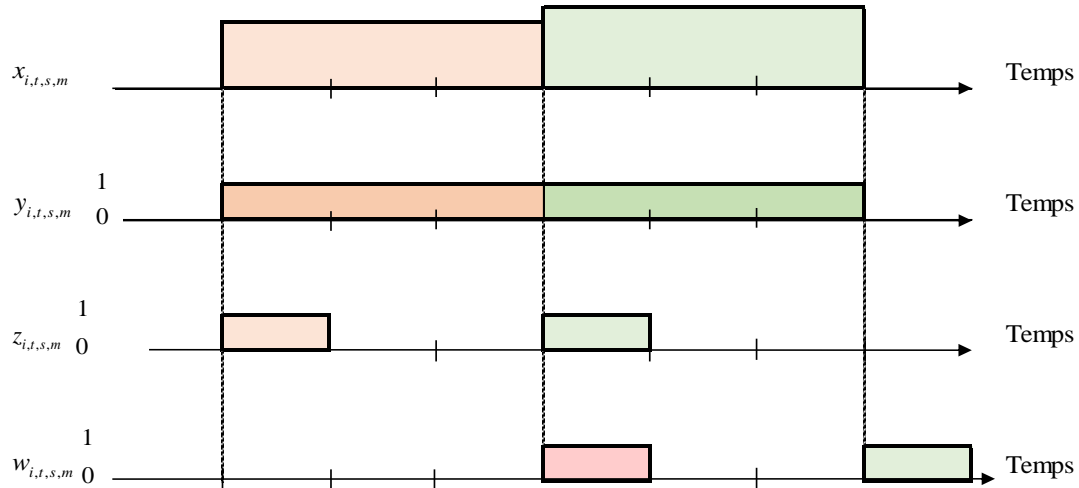


Figure 28: schéma récapitulatif de la relation entre les variables continue et binaires modélisant la production.

4.8. Structure du réseau logistique

Le système étudié étant un réseau multi-sites, il est donc nécessaire de définir les arcs possibles reliant chacun des nœuds du réseau logistique. Les équations (42), (43) et (44) définissent la structure du réseau multi-sites traité. Pour cela, le modèle introduit un ensemble de paramètres détaillés dans ce qui suit.

La contrainte (42) définit les arcs reliant les mines aux stocks avals des sites de production. Elle mobilise les paramètres binaires : $\gamma_{i,s'}$ égale à 1 quand le minerai $i \in O$ peut être extrait $s' \in K$, et $\alpha_{i,s}$ égale à 1 quand le minerai $i \in O$ peut être stocké au stock amont $s \in P$.

$$2.\omega_{i,t,s',s} \leq \gamma_{i,s'} + \alpha_{i,s} \quad (\forall i \in O, t \in T, s' \in K, s \in P) \quad (42)$$

La contrainte (43) définit les arcs reliant deux sites de production inter-reliés. $\beta_{i,s}$ est un paramètre binaire indiquant si le produit i peut être stocké au stock aval du site s .

$$2.\omega_{i,t,s,s'} \leq \beta_{i,s} + \alpha_{i,s'} \quad (\forall i \in N, t \in T, (s, s') \in P) \quad (43)$$

Également, la contrainte (44) définit les arcs reliant les sites de production aux stocks finaux. Le paramètre binaire $\partial_{i,s}$ est égal à 1 s'il est possible de stocker le produit i au stock final ($s \in F$).

$$2.\omega_{i,t,s,s'} \leq \beta_{i,s} + \partial_{i,s'} \quad (\forall i \in N, t \in T, s \in P, s' \in F) \quad (44)$$

Finalement les contraintes (45) et (46) définissent les domaines des variables de décision.

$$x_{i,t,s,m}, r_{i,t}, i_{i,t,s}, g_{i,t,s}, f_{i,t,s}, q_{i,t,s,s'} \geq 0 \quad (\forall i \in N, t \in T, s \in P \cup K, s' \in F, m \in M) \quad (45)$$

$$y_{i,t,s,m}, z_{i,t,s,m}, w_{i,t,s,m}, \lambda_{i,t,s}, \chi_{i,j,t,s}, \omega_{i,t,s,s'} \in \{0,1\} \quad (\forall (i, j) \in N, t \in T, s \in P \cup K, s' \in F, m \in M) \quad (46)$$

4.9. Fonction objectif

Les parties précédentes de ce chapitre ont eu objectif de formaliser le problème industriel et de détailler la manière avec laquelle ont été considérées et modélisées les différentes contraintes posées par ce problème. Dans la même perspective, la fonction « objectif » a été définie afin de prendre en considération la diversité des objectifs du système industriel réel. Celle-ci a été définie de manière à trouver un arbitrage entre des objectifs industriels parfois divergents, sans pour autant entraîner des surcoûts importants risquant de mettre à mal la pérennité du système. Ainsi, le modèle introduit une fonction « objectif » qui optimise hiérarchiquement trois critères. En réalité, les éléments introduits au sein de la fonction objectif ne sont pas tous des coûts réels à proprement parlé, certains éléments correspondants d'avantage à des pénalités. En effet, il s'avère parfois difficile d'estimer le coût réel d'une opération. Par exemple, les coûts engendrés par les changements de production : ce terme ne cherche pas à traduire le coût des changements de produits, mais plutôt à minimiser au maximum possible les changements de produits afin d'organiser la production sous la forme de campagnes de production. Pour que le nombre de changements de produits soit limité, celui-ci est tout de

même considéré au sein de la fonction objectif afin de discriminer les solutions entre elles. Les trois critères optimisés par la fonction objectif sont les suivants :

1. Minimiser la demande perdue durant l'ensemble de l'horizon de planification. Associé à une pénalité M_1 ce terme cherche à satisfaire la demande des différents produits dans l'intégralité de l'horizon.
2. Minimiser le nombre total des *switch off* pour l'ensemble des usines de production durant l'horizon de planification. En effet, l'introduction de ce terme à un double objectif. Le premier est celui de minimiser les arrêts de production afin de maintenir des taux d'utilisation élevés des ressources. Le deuxième objectif est celui de planifier la production sous la forme de campagnes de production de longueur maximale afin de tenir compte de la nature des installations de production, de stockage et de transport. Le nombre total des *switch off* dans l'intégralité de l'horizon est associé à une pénalité M_2 tel que $M_1 \gg M_2$.
3. Minimiser les coûts opérationnels totaux induits par l'ensemble des sous-systèmes du système logistique. Dans ce cadre, différents coûts ont été considérés, notamment deux inhérents à la production : le coût de lancement de la production (nommé *start up cost* dans la littérature) et le coût variable de production, le coût de transport et le coût de stockage.

Nous détaillons les éléments composant la fonction « objectif » ainsi que leur mode de calcul.

Coûts de la demande perdue

Le premier terme (47) a pour objectif de minimiser le total de la demande perdue $r_{i,t}$ du produit i à la période t pour l'intégralité de l'horizon.

$$C^{ls} = M_1 \sum_{i \in T} \sum_{i \in N} r_{i,t} \quad (47)$$

Coûts de changement de production

Un des éléments importants relatifs à la planification est celui de proposer des plans sous la forme de campagnes de production. Une campagne de production est définie comme une

séquence du même type de produit. Pour réaliser ce but, le terme (48) minimise le nombre total des *switch off* dans l'ensemble des usines de production et pour la totalité de l'horizon.

$$C^{sw} = M_2 \sum_{m \in M} \sum_{s \in P} \sum_{t \in T} \sum_{i \in N} w_{i,t,s,m} \quad (48)$$

Coût de lancement de la production

En raison des caractéristiques techniques des installations de production, le lancement de la production après un arrêt engendre une consommation importante d'énergie. Cette consommation d'énergie est traduite par le coût $c_{i,s}$, représentant le coût induit par l'énergie consommée avant de produire une première unité du produit i dans le site de production $s \in P$ après un arrêt de production. Le terme (49) calcul donc le coût total de lancement de la production dans l'ensemble des sites de production et pour la totalité de l'horizon de planification.

$$C^{st} = \sum_{m \in M} \sum_{s \in P} \sum_{t \in T} \sum_{i \in N} c_{i,s} \cdot z_{i,t,s,m} \quad (49)$$

Coût variable de production

Le terme (50) minimise les coûts variables de production $b_{i,s}$ dans l'ensemble des sites de production et pour la totalité de l'horizon de planification.

$$C^{pr} = \sum_{m \in M} \sum_{s \in P} \sum_{t \in T} \sum_{i \in N} b_{i,s} \cdot x_{i,t,s,m} \quad (50)$$

Coût de stockage

Le terme (51) minimise le coût stockage dans les stocks amonts $o_{i,s}$, le coût de stockage dans les stocks avals $e_{i,s}$ et le coût de stockage dans les stocks finaux $t_{i,s}$.

$$C^{inv} = \sum_{t \in T} \sum_{s \in P} \sum_{i \in N} (o_{i,s} \cdot g_{i,t,s} + e_{i,s} \cdot i_{i,t,s} + t_{i,s} \cdot f_{i,t,s}) \quad (51)$$

Coût de transport

Le terme (52) calcul le coût total d'acheminement des produits finis par trains. J étant le coût d'expédition d'un train des sites de production vers les stocks finaux, cet item calcule le coût de transport par train en fonction du nombre de trains programmés depuis les sites de production vers les stocks finaux.

$$C^{tr} = J \sum_{t \in T} \sum_{i \in N} \sum_{s \in P} \sum_{s' \in F} \omega_{i,t,s,s'} \quad (52)$$

Finalement, la fonction « objectif » est formulée comme suit :

Minimiser Z , tel que

$$Z = C^{ls} + C^{sw} + C^{st} + C^{pr} + C^{inv} + C^{tr} \quad (53)$$

5. APPLICATIONS INDUSTRIELLES

La section suivante introduit un ensemble d'applications numériques dans l'objectif d'illustrer le fonctionnement du MILP précédemment défini.

Cette recherche traite un système industriel multi-sites, complexe, dans lequel chaque sous-système est caractérisé par ensemble de paramètres et contraintes. Cette complexité est due en partie à la diversité des paramètres de performance qui régissent les différents sous-systèmes qui s'avèrent parfois conflictuels, voire contradictoires. L'objectif donc de la présente modélisation est de fournir aux managers un outil d'aide à la décision intégrant la planification de l'ensemble des composantes du système logistique, en tenant compte des fines caractéristiques de ses sous-ensembles. De plus, l'outil proposé permet également de tester différents scénarii hypothétiques afin de permettre une meilleure assimilation de la structure et du fonctionnement du système global.

Afin de décrire le système industriel réel traité par les expérimentations, le présent paragraphe commence par décrire les différents nœuds composant le réseau logistique, pour enchaîner ensuite avec le flux physique de produits traversant ce réseau. L'explication qualitative du réseau logistique est illustrée par la Figure 29. Ce paragraphe détaille les

caractéristiques quantitatives du système logistique avant d'aborder la construction et la composition des instances considérées pour la suite du paragraphe.

5.1. Caractéristiques du problème réel

Afin de mettre en évidence la valeur ajoutée de l'outil conçu dans le contexte industriel, un ensemble d'expérimentations ont été mises en œuvre en appliquant le MILP décrit dans la première partie de ce chapitre sur le problème industriel réel. Cependant, ces expérimentations ont tenu compte des caractéristiques et spécifications techniques du système logistique réel.

Le problème réel considéré (décrit par la Figure 29) est composé d'un réseau de production est composé de trois sites de production, avec chacun leurs unités de stockage en amont et en aval. Ces sites de production peuvent être décrits comme suit :

- Une *laverie* considérée comme site de production mono-produit composé de deux unités de production ; chaque unité est composée de trois lignes de production parallèles identiques pouvant fonctionner simultanément. Le produit fabriqué à laverie est acheminé vers les sites en aval pour être transformé en produits finis. La laverie possède deux unités de stockage amont et aval pour le stockage des matières premières et produits finis.
- Un site de production multi-produit, appelé *calcination*, composé de deux unités de production ; chaque unité est composée de deux lignes de production parallèles identiques qui fonctionnent obligatoirement simultanément. Chaque unité peut fonctionner selon deux modes de production. Le choix d'un mode définit le choix des produits pouvant être produits, les capacités de production, et par voie de conséquence la nature des matières premières à acheminer.
- Un site de production multi-produits, appelé *séchage*, composé de huit lignes de production identiques parallèles et indépendantes pouvant fonctionner simultanément. Ces différentes lignes de production sont reliées aux mêmes convoyeurs à l'entrée (pour l'acheminement des matières premières) et la sortie (pour la livraison des produits finis). Par conséquence, si plusieurs lignes entre elles sont opérationnelles, elles ne peuvent que produire le même produit dans la même période.

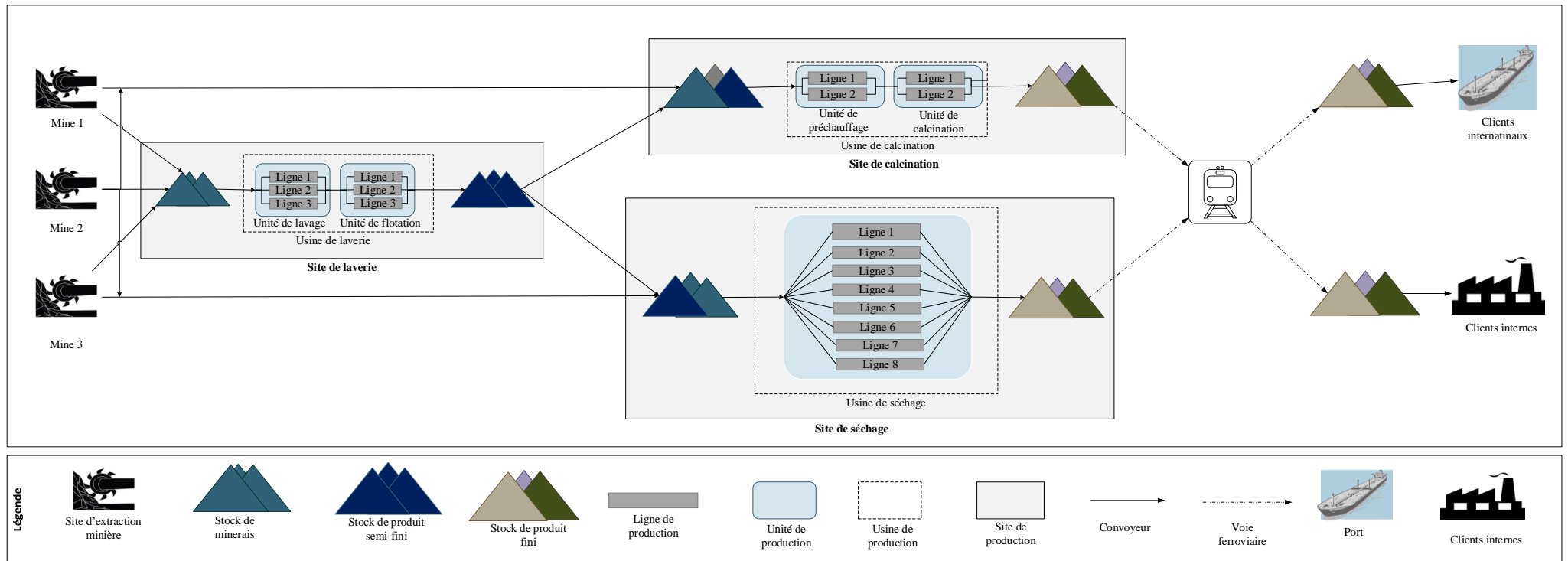


Figure 29: Schéma descriptif du système multi-sites modélisé

Afin de fabriquer les produits finis, chaque site de production du réseau multi-sites est approvisionné par un ensemble de minerais en plus du produit semi-fini fabriqué par le site de laverie. Nous considérons trois minerais extraits dans trois sites miniers d'extraction. Chaque mine produit un ou plusieurs minerais.

Avec l'objectif de réaliser les expérimentations, notre partenaire industriel OCP nous a fourni une large base de données concernant les demandes, les coûts et les capacités de production, de stockage et de transports. Ainsi, en se basant sur cette base de données, dix instances ont été construites sur la base des capacités et caractéristiques réelles du système. Les demandes ont été générées à partir d'un historique de demandes réelles. Ces instances ont servi pour construire les expériences présentées dans la suite de ce chapitre.

Concernant la structure temporelle des dix instances, les périodes représentent les heures et l'horizon de planification considéré est de 10 jours correspondant à 240 périodes. Le choix de cet horizon de planification a pour objectif de ne pas aboutir à des durées d'exécution trop importants. Le système de production est composé de trois sites de production ayant pour objectif de produire cinq produits (dont quatre produits finis et un produit intermédiaire). Concernant les nœuds de stockage, huit unités de stockage sont réparties dans le système logistique (incluant stocks amont, aval et finaux). Le réseau est approvisionné par trois minerais provenant de trois sites miniers d'extraction. Concernant le transport par trains, six rames sont disponibles par jour pour transporter les produits finis vers les stocks finaux. En plus, le transport par train est conditionné temporellement par huit fenêtres de temps fixes par jours. Enfin, le problème résultant de ces caractéristiques est décrit par les paramètres détaillés dans le Tableau 11.

Tableau 11: Aperçu de la taille du problème réel

Rangs (contraintes)	48408
Colonnes (variables)	38751
Éléments non nuls	165852
Entités globales	28176

Afin de résoudre ce modèle mathématique, nous avons recouru au solveur commercial Xpress IVE. Les calculs présentés dans la suite de ce chapitre ont été exécutés sur une grille de

processeurs Intel (R) Xeon (R) CPU E3-1240 v5 fonctionnant à 3,50 GHz avec jusqu'à 64 Go de RAM. Les solutions présentées dans ces expérimentations ont été obtenues à partir de deux critères d'arrêt programmé dans le solveur commercial : un temps limite d'exécution d'une heure ou bien un écart de la solution optimale inférieur à 1 %.

5.2. Expérimentations – Contribution industrielle

Le reste de ce chapitre présente plusieurs expériences dans l'objectif d'illustrer les apports industriels de l'outil développé.

La première expérience a pour objectif d'aider le décideur à choisir la meilleure stratégie de transport par trains. Elle étudie deux paramètres relatifs à la capacité de transport par train : le nombre maximal de rames disponibles par jour et les fenêtres de temps de transport par train. Pour cela, plusieurs scénarii faisables sont explorés dans l'objectif d'évaluer l'impact de la variation de ces deux paramètres sur le taux de satisfaction de la demande.

Ensuite, nous analysons la structure des coûts dans le système à travers deux expériences : (i) La première traite la contribution de chaque composante de coût dans le coût total afin d'identifier les éléments qui pèsent le plus sur le coût total. (ii) La deuxième propose une analyse de sensibilité du système aux différents coûts dans l'objectif d'identifier d'évaluer l'impact de la variation des paramètres de coûts sur le coût total.

Ensuite, deux expériences additionnelles sont présentées afin de mettre en évidence le bénéfice de la flexibilité offerte par l'approche intégrée : (i) La première étudie la flexibilité relative à l'affectation des produits aux sites de production, et évalue l'impact de cette flexibilité sur le coût total, le changement des produits et le taux de satisfaction de la demande.

Finalement, les deux dernières expériences évaluent la propagation amont et aval des paramètres dans le système logistique : (i) La première étudie comment le temps de séjour dans les stocks aval affecte-il les processus en aval dans le système logistique. (ii) Ensuite dans le sens opposé, la deuxième évalue comment la variabilité de la demande affecte le système de production.

Pour conclure ce chapitre, la Figure 30 fournit une schématisation des apports industriels de l’outil d’aide à la décision développé ainsi que de la contribution potentielle des expériences présentées pour le pilote de la *supply chain* minière.

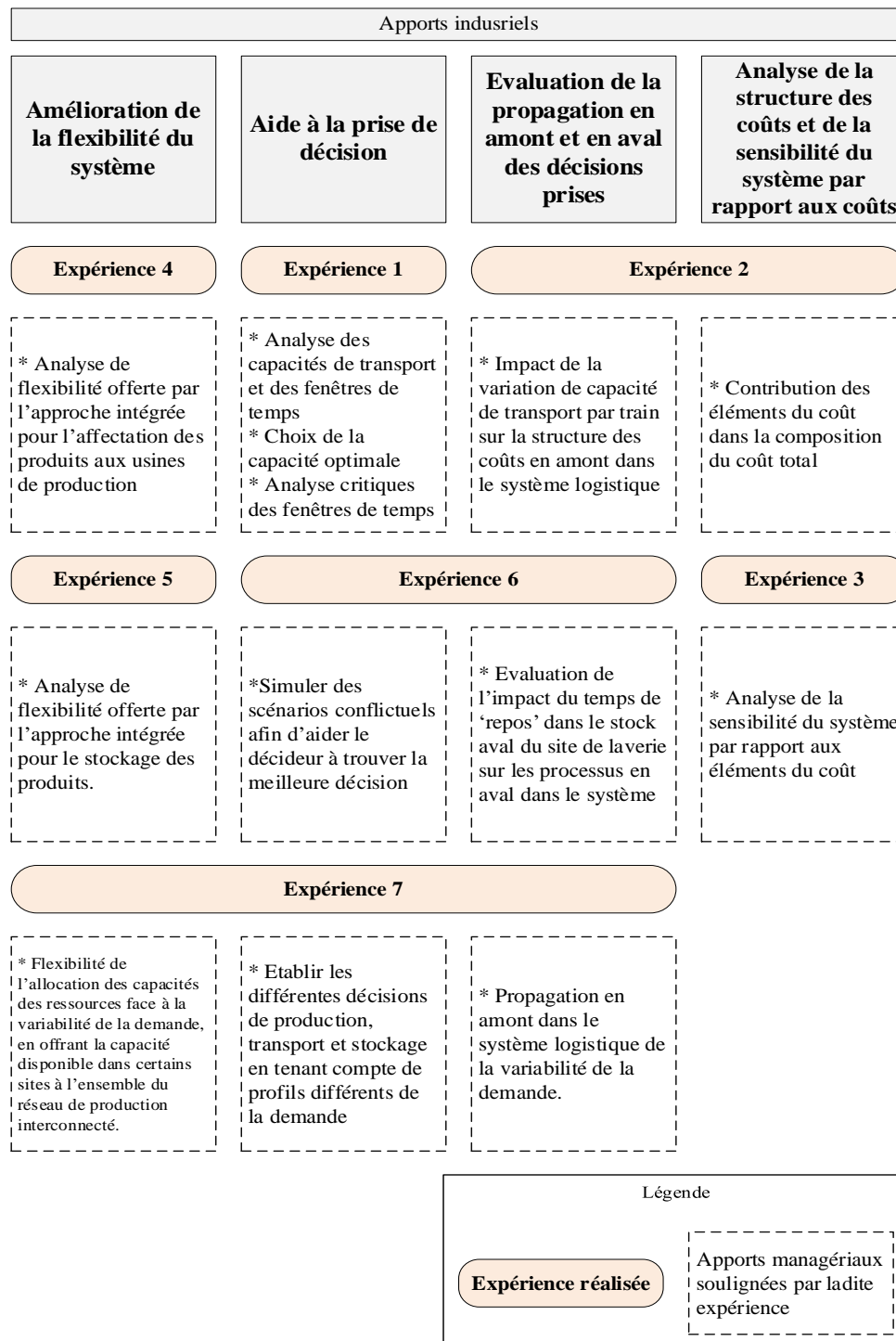


Figure 30: Apports industriels de l’outil d’aide à la décision proposé

Expérience 1: Impact des paramètres de transport par train sur la demande finale

L'analyse numérique du MILP proposé commence par l'étude du système de transport par trains. Ce choix est justifié par le rôle vital du système de transport par trains dans le système logistique étudié. C'est le passage obligé de tous les produits finis vers les stocks finaux. Il est également intéressant d'étudier ce mode de transport à cause de ses caractéristiques spécifiques et peu communes dans la littérature. Cependant, le système de transport est caractérisé par quatre paramètres (cf. paragraphe 3.3) :

- La capacité maximale d'un train.
- La capacité minimale d'un train.
- Le nombre de rames disponibles par jour.
- Les fenêtres de temps dans lesquelles il est possible de planifier l'acheminement par train.

Nous avons commencé par identifier les paramètres sur lesquels il est possible d'agir et qui présentent un choix pour le décideur. Les capacités maximales et minimales relèvent des spécifications techniques des rames et sont difficiles à augmenter. De plus, le coût de transport est calculé en fonction du nombre de trains expédiés (cf. paragraphe 3.4.2) ; la réduction de cette capacité n'est pas donc appropriée dans ce contexte. Nous nous sommes donc penchés sur l'étude des fenêtres de temps et du nombre de rames disponibles par jour. Pour ce faire, cette expérience compare trois scénarii faisables analysant la localisation des fenêtres de temps dans la journée :

- Scénario 1 : favorise la localisation des fenêtres de temps en début de la journée.
- Scénario 2 : favorise la localisation des fenêtres de temps en milieu de la journée.
- Scénario 3 : favorise la localisation des fenêtres de temps en fin de la journée.

Il est à noter que le scénario 2 représente les pratiques actuelles de notre partenaire industrielle. Les scénarii 1, 3 sont inspirés du fonctionnement actuel et déplacent les heures de transport. De plus cette expérience fait varier le nombre de trains disponibles par jour de 1 à 10. Le Tableau 13 présente les moyennes des solutions pour les dix instances retenues.

L'analyse du Tableau 13 montre que le scénario 3 présente un coût total minimal (en moyenne 7,63% de moins que le scénario 2), suivi par le scénario 2 moins coûteux de 1,60%

en moyenne que le scénario 1. En ce qui concerne le taux de satisfaction de la demande, nous observons également un meilleur résultat pour le scénario 3 qui, en comparaison avec les autres scénarii, offre un taux meilleur de 1% en moyenne par rapport au scénario 2 et de 2.58% en moyenne par rapport scénario 1. Ceci montre que le placement des fenêtres de temps relatives au transport par train offre une meilleure minimisation des coûts opérationnels totaux ; cette différence est due principalement aux coûts de stockage qui sont réduites pour ce cas de figure dans l'ensemble des instances étudiées. De l'autre côté, cette configuration permet surtout une meilleure satisfaction de la demande, car elle donne plus de marge organisationnelle pour les sites de production afin de répondre efficacement à la demande.

Afin de mieux appréhender l'impact des paramètres de transport retenus sur le taux de satisfaction de la demande et sur la fonction « objectif », la Figure 31 compare le taux de satisfaction de la demande (pour le graphe de gauche) et la valeur de la fonction objectif (graphe de droite) pour les trois scénarii.

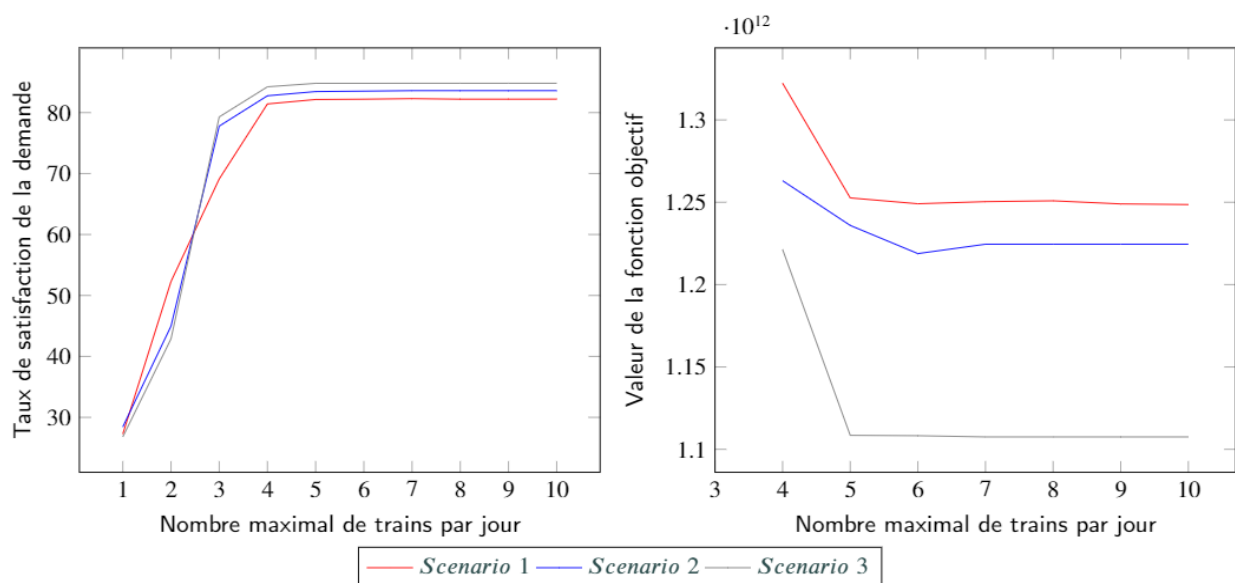


Figure 31: Comparaison du taux de satisfaction de la demande et de la valeur de la fonction objectif pour les trois scénarii

L'analyse de la Figure 31 révèle un autre aspect important relatif à la stratégie de transport. En effet nous constatons que pour les trois scénarii, le taux de satisfaction de la demande et les coûts totaux deviennent constants quand le nombre de trains par jour dépasse 5. Cela montre qu'un nombre maximal de 5 trains par jour serait suffisant pour répondre à la

demande du système étudié, il n'y'a pas donc de besoin de mobiliser davantage de trains en tenant compte des actuelles caractéristiques du problème. **Ces deux conclusions revêtent une grande importance lors de l'établissement des termes du contrat de transport par trains, négocié annuellement avec le prestataire national de transport par trains.** En effet, ils permettent d'avoir une base argumentée afin de négocier et de dimensionner le nombre de trains à consacrer pour le transport par trains ainsi que les créneaux horaires qui leurs seront alloués.

Expérience 2 : Analyse de la contribution des éléments de coûts dans le coût total

L'étude qui suit analyse la participation de chaque coût dans la formation du coût total. Le Tableau 14 représente la contribution de chaque élément de coût dans le coût total, en pourcentage, en variant le nombre maximal de trains disponibles par jour. Les résultats présentés dans le tableau représentent les moyennes obtenues pour les instances considérées. L'objectif est d'identifier les coûts opérationnels qui pèsent le plus sur le coût total.

Le Tableau 14 montre que le coût de production contribue le plus dans le coût total, avec en moyenne 38% suivi par les coûts de stockage et de transport avec en moyenne 24% et 22% respectivement. Nous remarquons également que le coût de *start up* est le moins prépondérant dans le coût total (il occupe en moyenne 16% du coût total). **Nous concluons donc que le coût de production est le plus grand contributeur à la formation du coût total, suivi respectivement par les coûts de stockage et transport.**

De plus, les contributions des coûts de transport et de stockage évoluent dans deux sens opposées quand le nombre maximal de train évolue. En effet, l'augmentation progressive du nombre maximal de trains disponible par jour permet de transporter une plus grande quantité de produits finis vers les stocks finaux afin de mieux répondre à la demande, ce qui a pour effet de diminuer le besoin de stocker les produits finis en amont dans les sites de production. **Ce constat met à l'évidence la propagation des décisions prises quant au transport par train en amont dans le système logistique, il permet également de démontrer la variation de la structure des coûts dans le système logistique selon les capacités de transport par trains disponibles dans le système logistique.**

Expérience 3 : Analyse de la sensibilité du système par rapport aux coûts

Cette expérience a pour objectif d'évaluer la sensibilité du coût total par rapport aux différents coûts opérationnels, en évaluant l'impact de la variation des composantes du coût total sur celui-ci. Le Tableau 13 présente l'écart en pourcentage du coût total quand les composantes de ce coûts varient. Nous faisons varier les composantes du coût selon les cas de figure suivants : en multipliant par 2 et en divisant par 2 chaque composante du coût. Les résultats présentés dans le tableau correspondent aux moyennes obtenues pour les instances considérées. Également, les colonnes font varier le nombre maximal de trains disponibles par jour. La colonne « facteur » présente le facteur de multiplication appliqué aux coûts.

L'analyse de sensibilité relève que lors de la division des éléments du coût par 2, les coûts de production et de stockage impactent le plus le coût total (le coût total diminue en moyenne de 18% et 14% respectivement pour ces deux éléments). L'analyse de la deuxième partie du Tableau 13 montre que la multiplication par 2 du coût de production produit le plus grand impact par rapport au coût total. Ceci produit une augmentation de ce dernier de 35,7% en moyenne. Ensuite, la multiplication par deux des coûts de stockage et transport engendre une augmentation du coût total de 25% et 24%, en moyenne, respectivement. Finalement le doublement du coût de *start up* produit la plus faible augmentation du coût total, en moyenne égale à 12%. Ces résultats confirment le constat établi préalablement : les coûts de production et de stockage ont un grand impact sur le coût total respectivement. Une diminution moins importante est observée lors de la division par du coût de *start up*, en moyenne égale à 10,7%. La division par 2 du coût de transport produit quant à elle une diminution du coût total de 8% en moyenne.

Expérience 4 : Flexibilité offerte par l'approche intégrée – cas des usines de production

Dans l'objectif d'illustrer le bénéfice de la flexibilité offerte par l'approche intégrée, cette expérience compare deux configurations du système de production. Une première configuration que nous nommons 'rigide' dans laquelle certains produits sont produits exclusivement dans des sites de production dédiés. Une seconde configuration, nommée flexible, dans laquelle l'affectation des produits aux sites de production n'est pas prédéfinie.

Il est à noter que la première configuration correspond aux pratiques habituelles adoptées par notre partenaire industriel. Les résultats sont présentés dans le Tableau 16. La première

colonne présente la configuration retenue de l'affectation des produits aux sites de production. La deuxième colonne présente les termes retenus pour présenter les résultats, qui sont les coûts totaux, nombre total de *switch off* (changement de produits dans les usines de production durant la période de planification étudiée), et le taux de satisfaction de la demande. Les coûts totaux font référence à la somme du coût de production, de *start up* (démarrage de la production après un arrêt), de transport et de stockage. Les dix dernières colonnes rapportent les résultats obtenus pour les dix instances. Il est à noter que pour ces expériences nous avons exploité les résultats de l'expérience 1, à savoir un nombre maximal de 5 trains par jours pouvant être expédié selon le scénario 3 (scénario 3 référencé dans l'expérience 2) des fenêtres de temps. Ensuite, la dernière ligne du tableau présente l'écart de la fonction objectif du scénario rigide par rapport au scénario flexible. Cet écart est calculé comme suit :

$$\text{Ecart de la FO} = \frac{\text{FO du scénario rigide} - \text{FO du scénario flexible}}{\text{FO du scénario flexible}} \quad (54)$$

L'analyse des résultats présentés dans le Tableau 16 démontre, comme préalablement constaté dans la revue de littérature, l'apport de l'approche intégrée en termes d'amélioration de l'efficacité et du fonctionnement du système logistique. En effet, la prédétermination des affectations possibles des produits aux sites de production a engendré une diminution du taux de satisfaction de la demande évaluée à 9% en moyenne. En effet, la flexibilité de l'affectation des produits à certains sites de production permet au réseau de production de récupérer et d'exploiter l'excédent de la capacité de production par rapport à la quantité produite, pour une période donnée, pour les sites qui sont en dessous de leur capacité. Cet excédent est mis à la disposition du réseau de production. Ceci a pour effet d'augmenter la capacité de production globale du système pour chaque produit, et par voie de conséquence d'améliorer le taux de satisfaction de la demande par produit.

En ce qui concerne le fonctionnement du système de production, le tableau démontre que la fixation des choix possibles de l'allocation des produits aux usines a engendré une augmentation du nombre total de *switch off* dans le système de production de 40% en moyenne. Ce qui a également pour effet de perdre en termes de capacité de production. En ce qui concerne les coûts totaux, le scénario flexible a enregistré une augmentation de ces derniers de 3% en

⁵ FO : Fonction Objectif

moyenne pour les dix instances. Ceci est principalement dû à l'augmentation des coûts de production. Enfin, l'écart moyen de la fonction objectif pour le scénario rigide par rapport au scénario flexible est de 19% pour les dix instances étudiées. Ce qui démontre l'amélioration de l'efficacité du système global apportée par l'approche flexible.

Expérience 5 : Flexibilité offerte par l'approche intégrée – cas des unités de stockage

Dans la même perspective de mettre en évidence l'apport de l'approche intégrée en termes de flexibilité offerte au système logistique, cette expérience a pour objectif d'étudier un deuxième aspect de cette flexibilité relatif à l'affectation des produits aux sites de stockage. Comme préalablement expliqué dans le paragraphe 3.2, le MILP actuel propose la possibilité de stockage de deux produits dans le même tas avec prise en compte d'une distance de sécurité afin d'éviter la contamination des produits au lieu de stocker les produits dans des tas mono-produit. L'objectif donc de cette expérience est d'évaluer l'impact de cette proposition sur le fonctionnement du système étudié. Elle compare deux configurations possibles des unités de stockage :

- Possibilité de stockage d'un seul produit à la fois dans chaque tas des unités de stockage.
- Possibilité de stocker deux produits à la fois dans chaque tas des unités de stockage.

Il est à noter que la première configuration correspond aux pratiques habituelles adoptées par notre partenaire industriel. Le Tableau 17 présente l'écart de la moyenne du taux de satisfaction de la demande, pour l'ensemble des produits, de la configuration multi produits par rapport à la configuration mono produit. Cet écart est calculé comme suit :

$$\text{Ecart du TSD} = \frac{\text{TSD du scénario multi produits} - \text{FO du scénario mono produit}}{\text{FO du scénario mono produit}} \quad (55)$$

L'analyse du Tableau 17 montre que la possibilité de stocker dans des tas multi-produits permet une amélioration considérable du taux de satisfaction de la demande évaluée en moyenne à 10,39%, et ce malgré le fait qu'elle engendre une diminution de la capacité de stockage par la nécessité de respecter une distance de sécurité entre les produits.

⁶ TSD : Taux de Satisfaction de la Demande

Les deux expériences précédentes confirment la conclusion selon laquelle l'approche globale adoptée par le modèle intégré augmente la flexibilité du système logistique, et a pour effet d'améliorer sa capacité pour répondre à la demande tout en permettant un meilleur fonctionnement de ses usines de production.

Expérience 6 : Impact du temps de 'repos' des produits dans les unités de stockage sur les sites aval dans le réseau logistique

Cette expérience a pour objectif de démontrer l'impact du temps de repos dans les unités de stockage sur les sites de production en aval dans le réseau logistique. Notons que ce paramètre revêt une grande importance pour le produit semi-fini stocké en aval de l'usine de lavage. Rappelons dans ce cadre que l'usine de laverie est un nœud de transformation qui a pour objectif principal d'augmenter la concentration du Phosphate (P_2O^5) du minerai entrant à travers des processus de lavage et flottation. Le produit sortant de la laverie est donc caractérisé par un taux d'humidité relativement élevé. Un temps minimal de repos du produit dans le stock aval du site de laverie est exigé afin avant de l'expédier aux sites de production en aval. Ainsi, ce temps de repos permet de baisser le taux d'humidité du produit car il favorise l'évaporation et le drainage des eaux contenus dans les tas du produit lavé. De plus, il est également important de noter dans ce cadre que le rendement des processus en aval est fortement impacté par l'humidité des produits entrant à ces processus. Ceci dit, il est important de trouver le bon arbitrage entre le temps de repos à mettre à retenir dans les stocks aval de l'usine de laverie, qui lui immobilise une certaine capacité de stockage pendant une ou plusieurs périodes, et l'amélioration du rendement dans les processus aval observée quand ce temps de repos augmente.

Maintenant, afin de mesurer comment la variation du temps de repos dans les stocks aval de l'usine de laverie peut affecter les processus en aval, nous avons simulé trois scénarios concernant ce temps de repos. Ces scénarios ont été établis avec l'aide des responsables de production dans les unités de production en question. Les trois scénarios retenus ainsi que les résultats trouvés pour ces trois scénarios sont présentés dans le Tableau 12. La deuxième ligne du tableau présente trois valeurs du temps de repos dans le stock aval du site de laverie habituellement pratiquées. La troisième ligne du tableau présente le rendement du processus de séchage. Ces valeurs correspondent au rendement des fours de séchage lorsque le produit entrant a passé en repos les valeurs retenues dans la deuxième ligne. Ces rendements ont été

calculés à partir d'un suivi journalier de quatre ans et correspondent aux moyennes des valeurs constatées durant ces quatre années. De plus, afin de mieux évaluer les changements survenant dans le système, nous avons exploité les instances préalablement établies en prolongeant l'horizon de planification de 10 à 20 jours.

Tableau 12: Caractéristiques et résultats des scénarios relatifs au temps de repos dans les unités de stockage

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Temps de repos (en jours)	3	3,5	4
Rendement de l'usine du séchage (T/h)	47	56	67
Taux de satisfaction de la demande (%)	97,04	97,95	100

L'analyse du Tableau 12 montre que le taux de satisfaction de la demande résultant diffère d'un scénario à un autre et augmente progressivement en fonction de l'augmentation du temps de repos. Le scénario 3 propose un temps de repos de 4 jours et permet un taux de satisfaction de la demande de 100%. Nous constatons donc que l'augmentation du temps de repos en aval de la laverie conditionne la capacité de stockage en aval de la laverie et la capacité de stockage globale du système. Ceci est totalement compensé par l'amélioration du rendement de l'unité de production.

Ensuite afin de mieux appréhender l'impact de la variation de ce temps de repos sur le fonctionnement de l'unité de séchage en aval dans le système logistique, la Figure 32 trace l'évolution de la production totale de l'usine de séchage suite à la variation du temps de 'repos' dans le stock en amont dans l'unité de laverie.

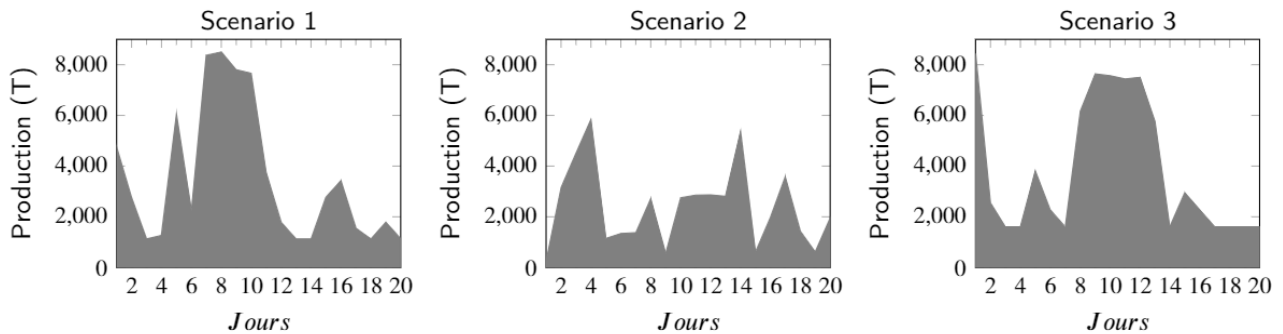


Figure 32 : Évolution de la production totale de l’usine de séchage suite à la variation du temps de ‘repos’ dans le stock en amont dans l’unité de laverie.

La Figure 32 montre que la variation du temps de repos du produit dans le stock aval du site de laverie impacte fortement la production dans l’usine de séchage en aval dans le système étudié. En effet, ce temps de repos affecte deux autres variantes du système : le rendement de l’unité de production en aval, et la quantité du produit disponible à une période donnée et pouvant être acheminée aux unités de production en aval. Il est à noter que pour les premières périodes, la seconde conséquence est compensée par le stock initial.

En conclusion, le MILP proposé permet de simuler des scénarios contrastés pour lesquels le décideur se trouve devant des arbitrages conflictuels. De plus il nous a permis, une fois de plus, d’évaluer la propagation en aval des décisions prises en amont dans le système logistique. En l’occurrence, l’arbitrage réalisé dans la présente expérience consiste à décider entre (i) augmenter le temps de repos en aval de laverie, ce qui mobilise en grande partie la capacité des unités de stockage concernés mais augmente le rendement des processus en aval ; ou bien (ii) diminuer ce temps de repos afin de libérer plus d’espace dans lesdites unités de stockage et accepter en conséquence une détérioration du rendement des processus en aval.

Expérience 7 : Impact de la variabilité de la demande sur le système global

La présente expérience a pour objectif de prouver l’impact de la variabilité de la demande sur le réseau logistique étudié. Pour cela, nous avons établi trois scénarios de profils de la demande : demande élevée, demande moyenne, demande basse. Ces trois scénarios ont été établis sur la base d’un historique de demande de dix ans. L’objectif étant d’identifier la variabilité de la sollicitation des usines de production en fonction de la variabilité de la demande dans un environnement de planification intégrée. La Figure 33 présente la production totale par

usine, par produit, pour l'ensemble de l'horizon de planification. La figure contient trois graphes correspondant chacun à un profil de la demande. Les produits des usines de production sont notés : P1, P2, P3, P4 et P5, les usines de production sont notées Usine 1, Usine 2 et Usine 3.

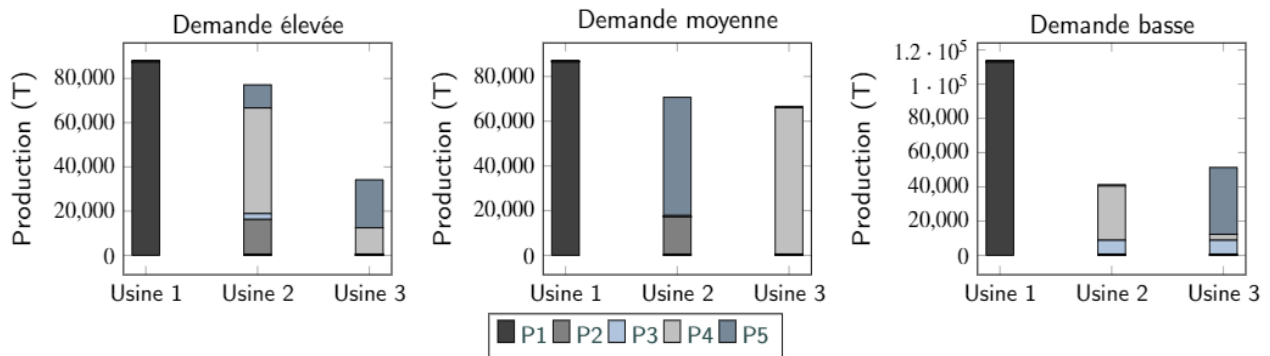


Figure 33: La production totale par usine, par produit, pour trois profils de demande différents

La Figure 33 montre que pour répondre aux différents profils de la demande, le MILP affecte différemment les produits au réseau de production. **Ceci démontre que face à la variabilité de la demande, le MILP s'adapte en offrant la capacité disponible dans certains sites à l'ensemble du réseau de production interconnecté. Ceci démontre encore une fois l'augmentation de la flexibilité du système grâce à l'approche globale retenue.**

Tableau 13: Évaluation de l'impact de la variation des paramètres de transport sur le système – Valeurs moyennes des solutions des instances

		Nombre maximal de trains par jour									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Scénario 1	Coût total	6.568.271	17.807.697	16.333.072	18.381.148	18.631.462	18.006.253	18.466.052	19.216.807	17.791.820	18.525.872
	Nombre total de switch off	5	14	7	5	6	5	7	5	3	5
	TSD* (%)	27,27	52,29	69,11	81,42	82,15	82,20	82,29	82,20	82,20	82,21
Scénario 2	Coût total	8.580.660	14.718.524	17.388.573	18.218.577	17.690.204	17.740.600	18.167.773	18.167.773	18.167.773	18.167.773
	Nombre total de switch off	12	20	6	6	6	6	8	8	8	8
	TSD* (%)	28,43	44,97	77,78	82,76	83,45	83,52	83,60	83,60	83,60	83,60
Scénario 3	Coût total	6.506.187	12.622.563	15.687.365	18.658.291	17.401.934	17.127.697	16.567.007	16.567.007	16.567.007	16.567.007
	Nombre total de switch off	2	10	7	7	5	3	5	5	5	5
	TSD* (%)	26,79	42,88	79,29	84,23	84,80	84,80	84,81	84,81	84,81	84,81

* TSD: Taux de satisfaction de la demande

Tableau 14: Contribution de chaque élément de coût dans le coût total (en pourcentage)

		Nombre maximal de trains par jour									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Scénario 1	Coût de production	41,43	23,56	33,11	38,80	40,09	39,55	39,57	37,71	41,88	39,25
	Coût de stockage	35,81	19,86	22,12	22,85	23,03	24,13	22,66	23,89	24,10	24,38
	Coût de transport	20,09	14,21	19,55	22,29	21,97	22,60	21,86	21,57	22,75	22,22
	Coût de start up	2,67	42,37	25,22	16,06	14,91	13,72	15,91	16,83	11,27	14,15
Scénario 2	Coût de production	32,6	22,3	43,9	35,1	42,4	42,0	41,0	41,3	42,1	42,1
	Coût de stockage	31,8	20,8	20,4	19,8	25,1	23,4	27,3	25,2	24,1	24,1
	Coût de transport	17,4	15,3	26,5	20,2	24,6	24,5	24,8	23,5	23,9	23,9
	Coût de start up	18,2	41,7	9,2	25,0	7,9	10,1	7,0	9,9	9,9	9,9
Scénario 3	Coût de production	36,22	27,36	35,56	36,57	39,37	41,70	40,73	40,73	40,73	40,73
	Coût de stockage	35,53	22,40	19,43	19,90	22,87	23,78	24,77	24,77	24,77	24,77
	Coût de transport	20,02	16,60	23,23	21,59	23,32	24,49	24,08	24,08	24,08	24,08
	Coût de start up	8,23	33,64	21,79	21,94	14,43	10,03	10,42	10,42	10,42	10,42

Tableau 15: Analyse de sensibilité du coût total par rapport aux différents coûts opérationnels

		Nombre maximal de trains par jour									
Facteur	Composante du coût	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,5	Production	-6,26	-13,69	-34,60	-8,23	-19,27	-20,63	-15,89	-10,42	-24,92	-24,92
	Stockage	-12,22	-31,01	-5,18	-21,25	-10,67	-14,58	-16,53	-5,73	-11,38	-11,38
	Transport	-7,27	-11,50	-10,46	-2,38	-3,45	-3,88	-9,56	-9,94	-11,65	-11,65
	Start up	-16,14	-20,33	-27,59	-9,17	-2,91	-3,36	-6,31	-5,35	-7,88	-7,88
2	Production	50,31	7,71	13,22	36,13	49,60	44,46	36,71	44,66	36,71	36,71
	Stockage	77,32	15,04	8,31	12,70	25,81	27,87	24,60	22,85	17,81	17,81
	Transport	35,45	27,02	8,35	17,27	29,48	30,94	21,79	27,18	21,56	21,56
	Start up	26,99	19,50	6,23	11,77	20,10	4,77	5,89	3,90	11,44	11,44

Tableau 16 : Comparaison entre configuration 'rigide' et 'flexible' de l'affectation des produits aux sites de production

		Instance 1	Instance 2	Instance 3	Instance 4	Instance 5	Instance 6	Instance 7	Instance 8	Instance 9	Instance 10
Scénario rigide	Coûts totaux	20884040	18994330	15794010	19269800	22803310	19992130	6983190	22888340	14984350	18667080
	Nombre total des switch off	6	3	3	8	11	27	12	12	1	12
	Taux de satisfaction de la demande	82,23%	94,43%	67,24%	90,70%	69,20%	47,54%	29,27%	87,63%	82,48%	70,44%
Scénario flexible	Coûts totaux	17162630	16748640	14822590	13919441	23851320	29800420	17458110	19129760	14970630	18667080
	Nombre total des switch off	7	0	1	0	10	33	1	2	1	12
	Taux de satisfaction de la demande	89,24%	94,47%	69,36%	93,32%	78,95%	56,88%	60,19%	93,36%	83,76%	70,44%
Ecart de la fonction objectif		3,09%	3,40%	3,50%	14,10%	13,01%	29,57%	93,80%	24,26%	1,04%	0,00%

Tableau 17 : Écart de la moyenne du taux de satisfaction de la demande, pour l'ensemble des produits, de la configuration multi produits par rapport à la configuration mono produit des unités de stockage (en %)

Synthèse	Instance 1	Instance 2	Instance 3	Instance 4	Instance 5	Instance 6	Instance 7	Instance 8	Instance 9	Instance 10
Ecart du Taux moyen de la satisfaction de la demande	22,25	0,93	1,01	3,49	0,95	6,96	58,96	2,55	1,36	5,45

6. CONCLUSION

Tout processus de modélisation d'un système industriel réel passe principalement par les phases suivantes : Étude et analyse du fonctionnement dudit système, appropriation du système et représentation de ses caractéristiques à l'aide d'un formalisme mathématique permettant d'approcher au maximum le système réel de départ. Dans ce contexte, le présent chapitre introduit la formalisation mathématique du problème de *lot sizing* multi-niveaux intégré au problème de transport avec fenêtre de temps (MLLSP-TTW, *Multi Level Lot Sizing Problem integrated with train transport with time windows*). Celle-ci est accompagnée d'une explication détaillée de la manière avec laquelle ont été considérées les différentes contraintes, tout en justifiant le choix des paramètres et variables retenues. Bien entendu, cette formalisation mathématique a été exprimée par l'intermédiaire d'un modèle linéaire mixte en nombre entier (MILP) et, ceci, afin de permettre son utilisation pour la résolution d'instances spécifiques à l'aide de solveurs adaptés (Xpress, Cplex, Gurobi, ...).

De plus, l'objectif premier de la modélisation proposée dans cette thèse est de mettre en œuvre un outil d'aide à la décision pour la planification intégrée des différents éléments du système logistique étudié. Dans ce contexte, le présent chapitre présente un ensemble d'expérimentations afin de mettre en évidence les apports managériaux de l'outil développé. Ces apports industriels contextualisés s'articulent autour des axes suivants :

- Amélioration de la flexibilité du système.
- Aide à la prise de décision.
- Évaluation de la propagation en amont et en aval des décisions prises.
- Analyse de la structure des coûts et de la sensibilité du système par rapport aux coûts.

Chapitre IV Approches de planification intégrée vs par décomposition pour le problème du MLLSP-TTW

Dans le chapitre précédent, nous proposons un programme linéaire mix en nombre entier (MILP) pour résoudre le problème de planification intégré de la production, stockage et transport dans le contexte de la *Supply Chain* (SC) de l'OCP. Compte tenu de la complexité des instances réelles et de la difficulté du MILP à résoudre des problèmes de taille importante, ce chapitre a pour but de proposer des méthodes de résolution heuristiques capables de traiter des instances de grande taille du problème du MLLSP-TTW. Nous présentons donc trois approches de résolution. Nous proposons également un ensemble d'expérimentations permettant, d'une part, de comparer les solutions obtenues par les heuristiques et le modèle intégré, et d'autre part, de prouver la capacité des approches heuristiques à résoudre des instances industrielles de taille importante.

1. INTRODUCTION

Le chapitre précédent de ce manuscrit a proposé une formalisation mathématique pour le problème de planification opérationnelle / tactique de la production, stockage et distribution dans le gisement Gantour de l'axe centre OCP. Également, un ensemble d'expérimentations a été proposé dans le but de démontrer les apports industriels de la planification intégrée en termes d'amélioration de la flexibilité, de la capacité du système à satisfaire la demande, et de la minimisation des coûts totaux. Même si l'approche intégrée permet de trouver la solution optimale du problème initialement posé, elle demeure inadéquate dans certaines situations réalistes car elle implique un degré élevé de temps de calcul informatique.

Compte tenu de ce constat et du caractère industriel de nos travaux nécessitant la résolution d'instances de grandes tailles, nous proposons dans ce chapitre des approches de résolution alternatives pour deux raisons principales. La première est qu'elles permettent d'obtenir des solutions de bonne qualité dans un temps de calcul acceptable lorsque l'approche intégrée ne prouve pas l'optimum. La seconde raison consiste à reproduire, par ces méthodes de résolution, différentes approches organisationnelles classiques quant à la planification afin d'analyser et de comparer le fonctionnement du système logistique sous différentes perspectives.

Nous avons donc proposé trois méthodes heuristiques qui reproduisent trois stratégies de décomposition du problème global, à savoir :

- Une heuristique *Relax and Fix* pouvant être définie comme une hybridation d'une méthode d'optimisation et d'une stratégie de décomposition de l'horizon de planification.
- Une heuristique *Top Down* qui optimise séquentiellement et hiérarchiquement les décisions de transport puis les décisions de *lot sizing*.
- Une heuristique *Bottom up* qui optimise, quant à elle, séquentiellement et hiérarchiquement les décisions de *lot sizing* puis de transport.

Enfin, ce chapitre présente des expérimentations effectuées sur des instances réelles dans l'objectif de comparer la performance des heuristiques proposées avec la méthode exacte. Les expériences menées montrent que l'heuristique *Relax and fix* permet d'obtenir des solutions de bonne qualité quelle que soit l'instance considérée. Les approches *Top down* et *Bottom up* ont

révélé des constats contre-intuitifs liés au comportement du système pour répondre à la demande. Également, nous avons démontré l'importance des approches proposées pour résoudre des grands problèmes dans des temps de calcul adéquats, en se basant sur des instances industrielles de grande taille, lorsque la méthode exacte ne peut pas trouver une solution de bonne qualité dans un temps de calcul raisonnable.

2. APPROCHES DE RESOLUTION

Cette section propose trois approches heuristiques pour résoudre le problème MLLSP-TTW. Ensuite l'étude et analyse de ces méthodes heuristiques s'articule autour de deux axes principaux. Le premier consiste à fournir une évaluation mais également une comparaison des performances des heuristiques en termes de qualité de la solution et de temps de calcul par rapport au modèle intégré introduit au chapitre 3. Le second consiste à reproduire quelques approches classiques de planification des systèmes logistiques dans le but de dresser une image claire du comportement et du fonctionnement de notre système industriel.

La suite de cette section est organisée comme suit, la partie 2.1 présente une heuristique de type *relax and fix* définie comme une hybridation d'une méthode d'optimisation et d'une stratégie de décomposition de l'horizon de planification. Ensuite, nous proposons deux heuristiques qui décomposent le problème en deux sous problèmes et les résolvent séquentiellement : la partie 2.2 présente une heuristique nommé *top down* où les décisions de transport sont priorisées, tandis que la partie 2.3 présente une configuration alternative, nommée *bottom up*, où les décisions de *lot sizing* sont prioritaires.

NB: Les parties suivantes de ce chapitre mobilisent les contraintes et notations préalablement définies dans le Tableau 10 du Chapitre III.

2.1. Heuristique *Relax and Fix*

Cette recherche propose une procédure *relax and fix*, inspirée des travaux de (Wolsey 1998; Absi et Kedad-Sidhoum 2007). Celle-ci consiste en une hybridation d'une méthode d'optimisation et d'une stratégie de décomposition de l'horizon afin de trouver une solution réalisable. Le problème global, complexe est ainsi décomposé en plusieurs sous-problèmes

réduits à l'aide de la stratégie de décomposition de l'horizon, ensuite les sous-problèmes obtenus sont résolus à l'optimum à l'aide de la méthode d'optimisation. Généralement, la complexité d'un problème augmente avec le nombre de variables binaires et de contraintes, et le temps de calcul a tendance à exploser lorsque le nombre de variables binaires devient important. Ainsi, la stratégie de décomposition de l'horizon proposée est très avantageuse car elle réduit considérablement les variables binaires et les contraintes du problème, ce qui réduit sa complexité et, par conséquent, le temps de calcul nécessaire pour le résoudre.

L'idée principale de la décomposition de l'horizon de planification est illustrée par la Figure 34. Elle repose sur le partitionnement de l'ensemble des variables entières en trois ensembles disjoints. À chaque itération, seules les variables de l'un de ces ensembles préservent leur intégrité. Alors que les variables des autres ensembles sont soit fixées, soit relaxées. Chaque ensemble est défini par un nombre de périodes de temps, appelé fenêtre. On distingue alors trois fenêtres de temps :

- Une fenêtre gelée (*frozen window*) où les variables entières sont "gelées", dans le cadre d'un processus itératif, à leur valeur de solution optimale à l'itération précédente.
- Une fenêtre de décision (*decision window*) où l'ensemble des contraintes du problème initial est maintenu sans modification.
- Une fenêtre d'approximation (*Approximation window*) où les contraintes d'intégrité des variables entières sont relaxées.

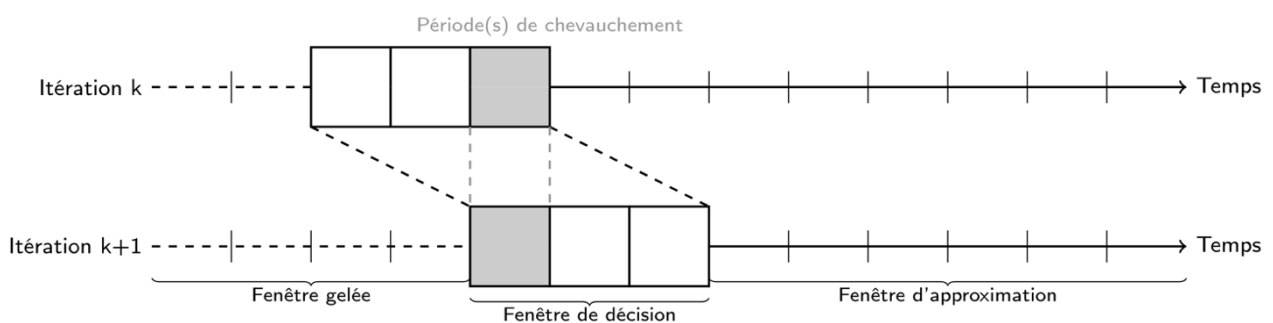


Figure 34: La stratégie de décomposition de l'horizon pour la méthode *relax and fix*.

Le problème partiellement relaxé obtenu est donc optimisé, tandis que la fenêtre de décision est glissée au fil des itérations jusqu'à couverture de la totalité de l'horizon de planification.

Toute méthode de résolution est caractérisée par des paramètres de contrôle qui impactent directement la performance de la méthode. Ainsi, la performance de la méthode *relax and fix* dépend de quatre paramètres de contrôle désignés par l'utilisateur : les deux premiers définissent la stratégie de décomposition de l'horizon de planification. Ensuite, les deux derniers définissent les critères d'arrêt de la méthode d'optimisation.

- Le paramètre σ spécifie le nombre de périodes qui composent la fenêtre de décision. Naturellement, la longueur de la fenêtre de décision améliore la qualité de la solution. Cependant, le temps de calcul augmente exponentiellement avec la taille de la fenêtre de décision, ce qui justifie l'utilisation du paramètre de chevauchement δ .
- Le paramètre de chevauchement δ : Il s'agit d'un nombre de périodes qui se chevauchent entre les fenêtres de décision de deux étapes successives de l'algorithme (comme illustré par la Figure 34). Le paramètre de chevauchement permet d'améliorer la qualité de la solution en remettant en cause les décisions de l'itération précédente. Cette remise en cause permet de proposer une meilleure solution, puisque la fenêtre d'approximation ne donne qu'une estimation par défaut de la capacité en ressources nécessaire.
- L'écart minimal requis *Iteration_gap* : c'est le pourcentage minimal d'optimalité requis pour résoudre du sous-problème à une itération de l'algorithme.
- Le temps de calcul maximal *Iteration_time* : c'est le temps maximal à passer pour résoudre un sous-problème à une étape de l'algorithme.

Dans ce qui suit, nous introduisons le cadre général de cette heuristique. Il est donc nécessaire d'introduire quelques nouvelles notations qui nous serviront à cet effet, en plus des paramètres de contrôle précédemment définis. Nous désignons par $[a_k, b_k]$ la fenêtre de décision à l'itération k . P_{a_k, b_k}^k désigne le sous-problème réduit résolu à l'itération k de l'heuristique. P_{a_k, b_k}^k est ainsi composé des contraintes (12)-(56) pour lesquelles l'intégrité des variables binaires est relaxée dans la fenêtre de décision. Le cadre général de l'heuristique se compose des étapes suivantes :

- 1- Fixer une fenêtre de décision $[a_1, b_1]$ au début de l'horizon de planification où l'intégrité des variables suivantes est préservée: variables binaires de production (*set*

up, *start up*, et *switch off*), variables binaires de stockage, et variables binaires de transport. L'intégrité de ces variables est relaxée dans la fenêtre d'approximation correspondant au reste de l'horizon. Résoudre ensuite le sous-problème résultant P_{a_1, b_1}^1 selon les critères d'arrêt prédéfinis. Le Tableau 18 distingue les variables concernées par la relaxation de fixation, des variables préservées.

- 2- Fixer une partie des variables entières, qui n'a pas été relaxée dans la première étape, à la valeur de la solution obtenue dans la fenêtre de décision de l'itération précédente. Faire avancer la fenêtre de décision, tout en gardant une section de chevauchement avec la fenêtre de décision précédente, le nombre de périodes de chevauchement est cependant égal au nombre fixe de périodes de chevauchement δ . Résoudre le sous-problème résultant selon les critères d'arrêt définis.
- 3- Réitérer l'étape 2 jusqu'à balayer l'ensemble de l'horizon de planification.

Tableau 18 : Stratégie de relaxation et fixation proposée

Variables binaires relaxées	Variables continues préservées
Production <i>set up</i> ($y_{i,t,s,m}$)	Quantité à produire ($x_{i,t,s,m}$)
Production <i>start-up</i> ($z_{i,t,s,m}$)	Demande perdue ($r_{i,t}$)
Production <i>switch-off</i> ($w_{i,t,s,m}$)	Quantités à stocker ($i_{i,t,s}, g_{i,t,s}, f_{i,t,s}$)
Variable binaire de stockage ($\lambda_{i,t,s}$)	Quantité à transporter ($q_{i,t,s,s'}$)
Variable binaire de transport ($\omega_{i,t,s,s'}$)	

Ensuite, le pseudocode de l'heuristique *relax and fix* est fourni par l'intermédiaire de l'Algorithme 1.

Algorithme 1: Procédure *Relax and fix*

Algorithme 1: Procédure *Relax and fix*

Paramètres

- k : Indice de l'itération, $k=1..K$
- a_k : Période de début de la fenêtre de décision à l'itération k

- b_k : Période de fin de la fenêtre de décision à l'itération k
- σ : Taille de la fenêtre de décision à l'étape k de l'algorithme
- δ : Nombre de périodes chevauchantes entre les fenêtres de décision des étapes $k-1$ et k , avec $0 < \delta < \sigma$
- P_{a_k, b_k}^k : Sous-problème composé des contraintes (12)-(53), résolu à l'itération k de l'heuristique, caractérisé par la fenêtre de décision $[a_k, b_k]$

Iteration_gap : Pourcentage d'optimalité minimum pour la résolution du sous-problème de l'étape k de l'algorithme

Iteration_time : Le temps maximum de résolution à l'étape k de l'algorithme.

Initialisation

$k \leftarrow 1$

$a_k \leftarrow 1$

$b_k \leftarrow \sigma$

$K \leftarrow \left\lceil \frac{T - \sigma}{\sigma - \delta} \right\rceil + 1$

Début

1. **Tant que** $b_k \leq T$ **faire**
2. $y_{i,t,s,m}, z_{i,t,s,m}, w_{i,t,s,m}, \lambda_{i,t,s}, \omega_{i,t,s,s'}$: continues, $(\forall t \in [a_k, b_k])$
3. **Tant que** les critères d'arrêts (*Iteration_gap* ou *Iteration_time*) ne sont pas atteints **faire**
4. Optimiser P_{a_k, b_k}^k
5. **Fin Tant que**
6. Retourner les valeurs optimales des variables de décision du problème P_{a_k, b_k}^k
7. Fixer $y_{i,t,s,m}, z_{i,t,s,m}, w_{i,t,s,m}, \lambda_{i,t,s}, \omega_{i,t,s,s'}$ à leurs valeurs optimales obtenues, $(\forall t \in [a_k, b_k - \delta])$
8. $k \leftarrow k + 1$
9. $a_k \leftarrow b_{k-1} - \delta$
10. $b_k \leftarrow b_{k-1} + \sigma - \delta$
11. **si** $b_k > T$

```

12.            $b_k \leftarrow T$ 
13.           Fin Si
14.           Fin Tant que
15.           Tant que les critères d'arrêts (Iteration_gap ou Iteration_time)
           ne
           sont pas atteints faire

16.           Optimiser  $P_{a_k, b_k}^k$ 
17.           Fin Tant que
18.           Retourner les valeurs optimales des variables de décision du
           problème  $P_{a_k, b_k}^k$ 

Fin

```

Bien entendu, la performance de cette approche vient du fait qu'elle ne préserve l'ensemble des contraintes d'intégrité du problème que sur une fenêtre de temps, dite fenêtre de décision, alors que ces contraintes sont soit fixées, dans la fenêtre gelée, soit relaxées dans la fenêtre d'approximation. Comme préalablement détaillée, toutes ces fenêtres glissent au fil des itérations sur la longueur de l'horizon de planification. Regardons maintenant de plus près quelles sont les contraintes neutralisées suite à la relaxation des variables binaires détaillées dans le Tableau 18.

Premièrement, nous remarquons que la relaxation des variables binaires précitées neutralise la contrainte (57).

$$\sum_{m \in M} y_{i,t,s,m} \leq 1 \quad (\forall i \in N, t \in T, s \in P) \quad (57)$$

En effet, la contrainte (57) a pour objectif d'imposer le respect de la production selon un seul mode de production à la fois dans le site de calcination. Cette restriction n'est plus garantie puisque la variable de *set up* $y_{i,t,s,m}$ peut prendre des valeurs continues entre 0 et 1.

Ensuite, la contrainte (58) est également annulée suite à la relaxation des variables binaires de production. Cette contrainte a pour objectif d'empêcher la production dans la même ligne et dans la même période de quelques produits (ce sont les produits G10-MP/G10-MC et YCC-y/YCC-az).

$$\sum_{i|i \neq j \wedge \varphi_{i,j}=1} y_{i,t,s,m} \leq 1 \quad (\forall j \in N, t \in T, s \in P, m \in M) \quad (58)$$

La contrainte de transport (59) est aussi relaxée dans la fenêtre d'approximation :

$$q_{i,t,s,s'} \geq B^{\min} \cdot \omega_{i,t,s,s'} \quad (\forall i \in N, t \in T, s \in P, s' \in F) \quad (59)$$

Dans le but d'éviter de mobiliser un train pour acheminer des quantités de produits relativement petites, la contrainte (59) impose le respect des quantités minimales à transporter par train. Cependant, suite à la relaxation de l'intégrité de la variable $\omega_{i,t,s,s'}$, cette contrainte n'est plus respectée.

Également, la relaxation de l'intégrité des variables binaires de transport $\omega_{i,t,s,s'}$ neutralise également la contrainte de transport (60).

$$\sum_{i \in N, s \in P} \omega_{i,t,s,s'} \leq 1 \quad (\forall t \in T, s' \in F) \quad (60)$$

En effet, la contrainte (60) a pour but d'imposer l'acheminement d'un seul produit par train (contrainte imposée par les localisations géographiques éloignées des sites de destination des produits) et également d'un seul train par période (contrainte imposée par l'unicité de la voie ferroviaire reliant le réseau de production et les stocks finaux).

Finalement, la définition des variables binaires de transport $\omega_{i,t,s,s'}$ comme continues neutralise également la contrainte (61). Cette contrainte a pour objectif initial d'imposer le respect du nombre maximal de rames disponibles par jour, égal à 5 pour cette instance.

$$\sum_{t \in H} \omega_{i,t+(H(j-1)),s,s} \leq R^{\max} \quad (\forall i \in N, j \in \{1, \dots, D\}, s \in P, s' \in F) \quad (61)$$

Dans le but d'illustrer le fonctionnement de l'approche *Relax and fix* proposée, nous allons détailler les étapes de construction d'une solution proposée par cette heuristique. Cette solution résulte de la résolution d'une instance industrielle réelle sur un horizon décisionnel de 10 jours. Pour cela, nous avons fixé les paramètres de contrôle suivants :

- Taille de la fenêtre de décision σ : **4 jours**
- Nombre de périodes chevauchantes entre les fenêtres de décision des étapes $k-1$ et k , δ : **1 jour**
- Pourcentage d'optimalité minimum pour la résolution du sous-problème de l'étape k de l'algorithme *Iteration_gap* : **1%**
- Temps maximum de résolution d'une étape k de l'algorithme, *Iteration_time* : **100**

Comme précédemment cité l'approche *Relax and fix* repose sur la décomposition de l'horizon de planification en un ensemble de fenêtres glissantes le long de l'horizon (voir Figure 34). Ensuite, les sous-problèmes résultants sont résolus à l'aide d'une méthode d'optimisation. Le Tableau 19 présente les résultats de la stratégie de décomposition ainsi que les solutions optimales pour chaque itération. Les deux premières lignes du tableau présentent les bornes inférieures et supérieures de la fenêtre de décision chaque itération k . Ensuite le Tableau 19 présente les valeurs de la fonction objectif, le taux moyen de satisfaction de la demande et le temps de résolution de chaque itération k de l'algorithme.

La Figure 35 présente la construction itérative du plan de transport calculé par l'heuristique *Relax and fix* pour résoudre l'instance retenue. Pour chaque itération, la Figure 35 présente les quantités à transporter par train, par produit, à partir du réseau de production vers les stocks finaux. Nous identifions également pour chaque itération les fenêtres gelées, de décision et d'approximation. Analysons maintenant le fonctionnement de l'heuristique dans chacune de ces fenêtres de temps.

Tableau 19 : Exemple illustratif de l'approche Relax and fix

		Itération k	1	2	3	4
Décomposition de l'horizon	a (k)		1	48	96	144
	b (k)		96	144	192	240
	Valeur de la fonction objectif		2.489E+12	2.505E+12	2.514E+12	2.505E+12
Optimisation des sous-problèmes	Taux moyen de satisfaction de la demande		0.7812	0.7841	0.7830	0.7850
	Temps de résolution (s)		49	35	16	14

Fenêtre gelée

L'analyse de la Figure 35 montre qu'à partir de l'itération 2, la fenêtre gelée reprend la solution de l'itération précédente dans la même période de temps.

Fenêtre de décision

C'est la fenêtre dans laquelle le problème global est intégralement préservé. Nous remarquons que dans cette fenêtre, les contraintes de transport sont respectées. Nous

remarquons aussi que cette fenêtre glisse d'une itération à la suivante jusqu'à couvrir la totalité de l'horizon de planification. Les différents graphes montrent aussi que les fenêtres de décision de deux itérations successives se chevauchent, par exemple dans la première itération la fenêtre de décision est égale à $[1,96]$ alors que la fenêtre de décision de l'itération 2 est égale à $[48, 144]$. Ce chevauchement entre les fenêtres de décision permet, par ailleurs, de remettre en cause les décisions de l'itération précédente et donc d'améliorer la qualité de la solution proposée.

Fenêtre d'approximation

Nous pouvons constater pour les quatre itérations que les contraintes de transport préalablement mentionnées (contraintes (59), (60), et (61)) ne sont pas respectées dans la fenêtre d'approximation. C'est-à-dire que, dans la fenêtre d'approximation, il est possible de transporter des quantités quelques fois inférieures aux quantités minimales de transport par train (par exemple pour la période 156 de l'itération 1), il est aussi possible de transporter plusieurs produits dans le même train (par exemple pour la période 99 et 117 de l'itération 1), et il est également possible d'expédier plusieurs trains la même période (par exemple pour la période 99 et 117 de l'itération 1).

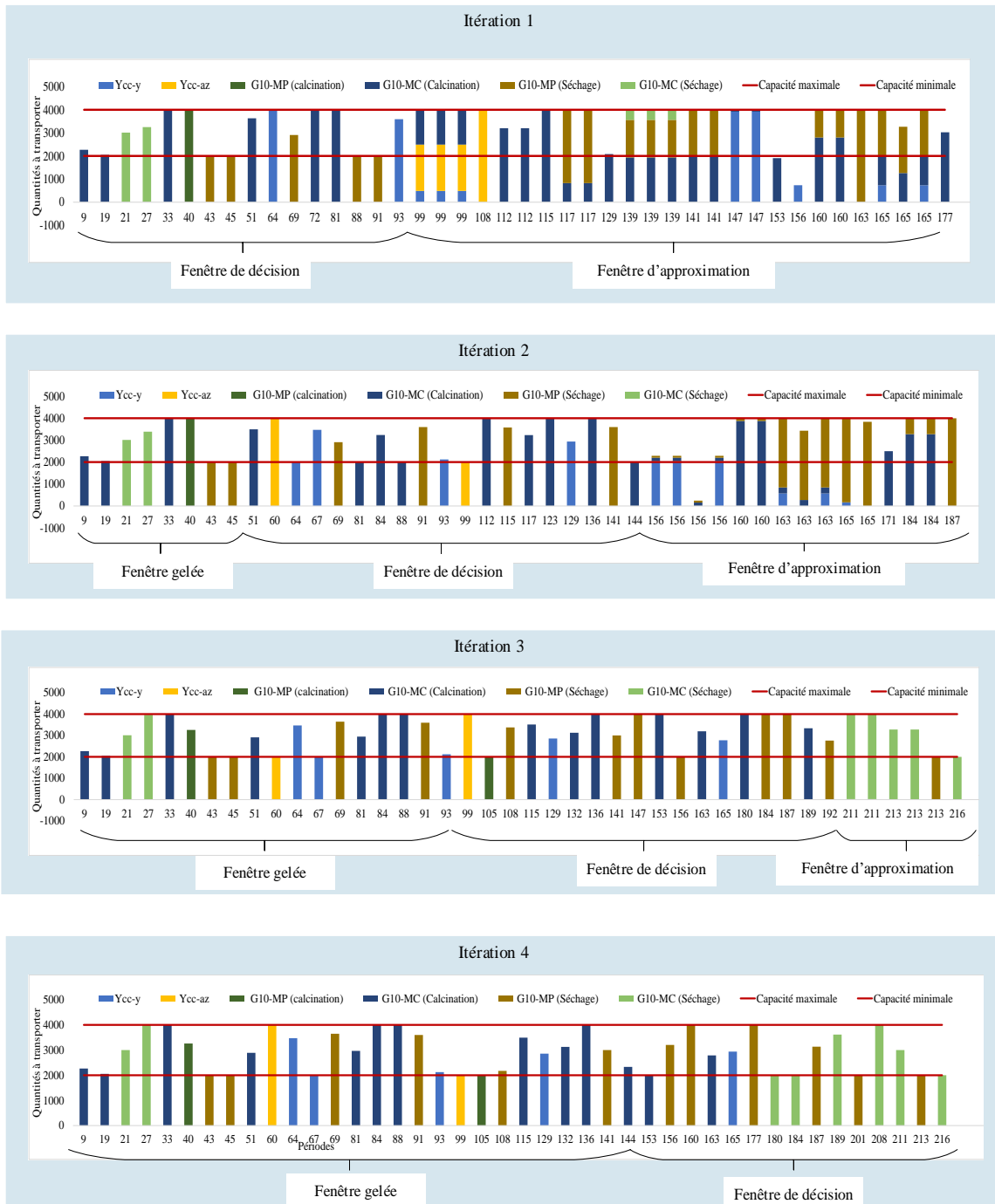


Figure 35 : Construction d'un plan de transport par train par l'approche *Relax and fix*

2.2. Heuristique Top down

Concrètement, cette approche vise à reproduire le processus décisionnel selon lequel le décideur planifie son système logistique d'une manière séquentielle, c'est-à-dire qu'il commence par planifier les décisions relatives au transport puis ensuite planifie la production et stockage en fonction du plan de transport préalablement établi. C'est donc une méthode de résolution séquentielle qui décompose le problème global en deux sous-problèmes : problème de transport et problème de *lot sizing* multi-niveaux. Ensuite la résolution des deux sous-problèmes est effectuées hiérarchiquement en priorisant les décisions de transport puis ensuite les décisions relatives au *lot sizing*.

En termes d'optimisation, la première phase consiste à construire un plan de transport tout en préservant les contraintes d'intégrité des variables binaires de transport ($\omega_{i,t,s,s'}$) et en relaxant ces contraintes pour les autres variables binaires. Ensuite, les variables binaires de transport sont fixées dans le problème de *lot sizing* à leurs valeurs optimales trouvées dans la première optimisation. La deuxième phase consiste alors à construire un plan de *lot sizing* multi-niveaux compatible avec les décisions binaires de distribution prédéterminées. Notons que le premier problème d'optimisation détermine quand transporter les quantités d'un site de production à un autre en respectant les différentes contraintes relatives au transport en général, et en particulier les fenêtres de temps de livraison par trains. Ceci diminue considérablement la complexité du problème et permet de réduire le temps d'exécution de l'optimisation suivante.

Le cadre général de l'heuristique *top down* est inspiré de l'approche "*relax and fix*", il est décrit par les étapes suivantes.

1. *Résoudre le problème de transport*: Maintenir l'intégrité des variables binaires de transport $\omega_{i,t,s,s'}$ et relaxer les contraintes d'intégrité pour les variables binaire restantes, à savoir : variable de *set up* $y_{i,t,s,m}$, variable de *start up* $z_{i,t,s,m}$, et variable de *switch off* $w_{i,t,s,m}$. Le sous-problème résultant est ensuite résolu jusqu'à l'optimalité.
2. *Résoudre le problème de lot sizing* : Fixer les variables binaires de transport $\omega_{i,t,s,s'}$ à leurs valeurs optimales obtenues lors de l'itération précédente. Maintenir l'intégrité des variables binaires de *lot sizing* ($y_{i,t,s,m}$, $z_{i,t,s,m}$, $w_{i,t,s,m}$). Enfin, résoudre à l'optimum le sous-problème obtenu.

Le pseudocode de cette procédure est fourni par l'Algorithme 2.

Algorithme 2: Procédure *Top down*

Algorithme 2: Procédure *Top down*

Paramètres

- k : Indice de l'itération, $k=1..2$
- P_{S_c, S_b}^k : Sous-problème composé des contraintes (12)-(53), résolu à l'itération k de l'heuristique
- S_c : Ensemble des variables des décisions continues définies dans le sous-problème P_{S_c, S_b}^k
- S_b : Ensemble des variables des décisions binaires définies dans le sous-problème P_{S_c, S_b}^k

Début

1. $S_c \leftarrow S_c + \{y_{i,t,s,m}, z_{i,t,s,m}, w_{i,t,s,m}\}$
2. Optimiser le problème P_{S_c, S_b}^1
3. Obtenir les valeurs optimales des variables: $\omega_{i,t,s,s'}$
4. Fixer les variables $\omega_{i,t,s,s'}$ à leurs valeurs optimales obtenues
5. $S_b \leftarrow S_b + \{y_{i,t,s,m}, z_{i,t,s,m}, w_{i,t,s,m}\}$
6. Optimiser le problème P_{S_c, S_b}^2
7. Obtenir les valeurs optimales de toutes les variables de décision

Fin

Pratiquement, afin d'illustrer le fonctionnement de cette approche, nous allons détailler la construction d'une solution de cette méthode étape par étape. Comme précédemment cité, l'approche *top down* décompose le problème global, complexe, en deux sous problèmes puis résout séquentiellement les sous problèmes de transport et de *lot sizing* en deux itérations. Nous allons maintenant nous pencher sur la construction progressive d'une solution dans les deux itérations de l'algorithme. La solution détaillée provient de la résolution d'une instance industrielle réelle par l'approche *top down*, sur un horizon décisionnel de 10 jours.

Itération 1 : Résolution du problème de transport

L'objectif de cette première étape est de résoudre le problème de transport par train en relaxant le problème de *lot sizing* dans un premier temps. Concrètement, la relaxation du problème de *lot sizing* se traduit par la relaxation des contraintes d'intégrité des variables binaires suivantes : variable de *set up* $y_{i,t,s,m}$, variable de *start up* $z_{i,t,s,m}$, et la variable de *switch off* $w_{i,t,s,m}$, Regardons maintenant la conséquence de cela sur le problème traité.

Nous remarquons que cette relaxation impacte directement quelques contraintes du modèle, et par voie de conséquence, elle impacte également la solution construite à cette étape de l'algorithme. Nous détaillons dans ce qui suit les contraintes relaxées ainsi que la solution construite.

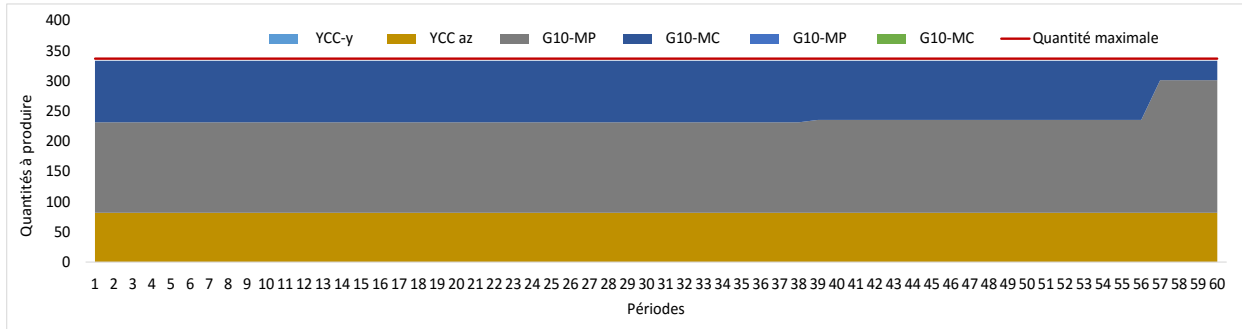
Premièrement, nous remarquons que la relaxation des variables précitées neutralise la contrainte (57). En effet, la contrainte (57) a pour objectif d'imposer une production monomode dans le site de calcination. Cette restriction n'est plus garantie puisque la variable de *set up* $y_{i,t,s,m}$ peut prendre des valeurs continues entre 0 et 1. Ensuite, la contrainte (58) est également annulée suite à la relaxation des variables binaires de production. Cette contrainte a pour objectif d'empêcher la production dans la même ligne et dans la même période de quelques produits.

La Figure 36 et la Figure 37 présentent respectivement le diagramme Gantt d'ordonnancement des produits et les quantités à produire dans les lignes de la calcination donnés par la solution de l'itération 1. Nous remarquons selon ces deux figures que la solution donnée par cette première phase de l'algorithme propose de produire les produits YCC-az et YCC-y dans les périodes 30 et 32, et propose de produire les produits G10-MP et G10-MC entre les périodes 1 et 48. Or la production simultanée de ces produits est interdite, normalement, par la contrainte (58).

Figure 36: Diagramme Gantt d'ordonnancement des produits dans les lignes de la calcination donné par la solution de l'itération 1 de la procédure *top down*

Jour	1																								2																							
Heure	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Période	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
YCC-az (Mode export)																																																
YCC-y (Mode export)																																																
G10-MP (Mode export)																																																
G10-MC (Mode export)																																																
G10-MP (Mode standard)																																																
G10-MC (Mode standard)																																																

Figure 37: Plan de production à la calcination donné par la solution de l'itération 1 de la procédure *top down*



Itération 2 : Résolution du problème de lot sizing

L'objectif de cette deuxième étape de l'approche *top down* est de résoudre le problème de *lot sizing* en fixant les variables binaires de transport à leurs valeurs optimales calculées lors de la première itération. Bien entendu, dans cette deuxième étape les contraintes d'intégrité des variables binaires $y_{i,t,s,m}$, $z_{i,t,s,m}$, et $w_{i,t,s,m}$ sont considérées. En d'autres termes, l'objectif est de proposer des plans de production et de stockage qui respectent les contraintes (57) et (58) en tenant compte du plan de transport calculé dans la première étape.

La Figure 38 et la Figure 39 présentent respectivement le diagramme Gantt d'ordonnancement des produits et les quantités à produire dans les lignes de la calcination donnés par la solution de l'itération 2. Nous remarquons que la contrainte (58) est désormais respectée puisque la solution donnée par la deuxième phase de l'algorithme propose de produire les produits G10-MP ou bien et G10-MC dans la même période, contrairement au plan proposé dans la première étape qui proposaient de produire simultanément ces deux produits.

Jour	1																								2																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Période	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
YCC-az (Mode export)	[Yellow bar]																																															
YCC-y (Mode export)	[Blue bar]																																															
G10-MP (Mode export)	[Grey bar]																								[Green bar]																							
G10-MC (Mode export)	[Dark blue bar]																								[Dark blue bar]																							
G10-MP (Mode standard)	[Empty]																																															
G10-MC (Mode standard)	[Empty]																																															

Figure 38 : Diagramme Gantt d'ordonnancement des produits dans les lignes de la calcination donné par la solution de l'itération 2 de la procédure *top down*

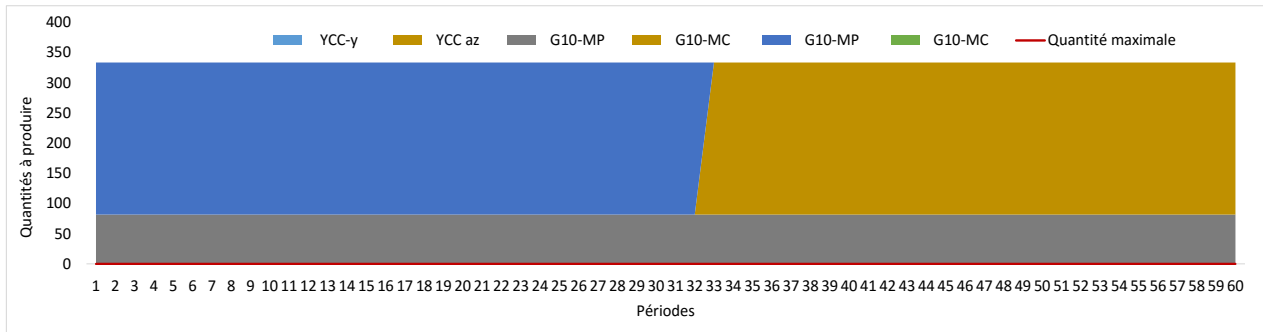


Figure 39 : Plan de production à la calcination par train donné par la solution de l'itération 2 de la procédure top down

Enfin, la Figure 40 récapitule le fonctionnement de procédure *top down*.

2.3. Heuristique bottom up

La procédure *bottom up* simule un processus décisionnel alternatif dans lequel le décideur planifie son système logistique en commençant par planifier les décisions relatives à la production et stockage puis ensuite planifie le transport en fonction des plans de production et stockage préalablement établi. C'est donc une méthode de résolution séquentielle dans laquelle le problème de *lot sizing* multi-niveaux est priorisé, suivi par le problème de transport. La première étape consiste à optimiser le problème tout en relaxant les contraintes d'intégrité des variables binaires de transport $\omega_{i,t,s,s'}$, et en préservant ces contraintes pour les variables binaires de *lot sizing*, à savoir : variable de *set up* $y_{i,t,s,m}$, variable de *start up* $z_{i,t,s,m}$, variable de *switch off* $w_{i,t,s,m}$, et variable binaire de stockage $\lambda_{i,t,s}$. Ensuite la deuxième étape consiste à optimiser le problème original tout en fixant les décisions binaires de *lot sizing* à leurs solutions précédemment trouvées.

Le cadre général de l'heuristique *bottom up* est également inspiré de l'approche "relax and fix", il est décrit par les étapes suivantes.

1. *Résoudre le problème de lot sizing* : Maintenir l'intégrité des variables binaires de de *lot sizing* (*set up* ($y_{i,t,s,m}$), *start-up* ($z_{i,t,s,m}$), *switch-off* ($w_{i,t,s,m}$)) et relaxer les contraintes d'intégrité pour des variables binaire de transport $\omega_{i,t,s,s'}$. Le sous-problème résultant est ensuite résolu jusqu'à l'optimalité.
2. *Résoudre le problème de transport* : Fixer les variables binaires de *lot sizing* ($y_{i,t,s,m}$, $z_{i,t,s,m}$, $w_{i,t,s,m}$) à leurs valeurs optimales obtenues lors de l'itération précédente. Maintenir l'intégrité des variables binaires de transport $\omega_{i,t,s,s'}$. Enfin, résoudre à l'optimum le sous-problème obtenu.

La procédure générale de l'heuristique *bottom up* est décrite par le pseudocode de l'Algorithme 3.

Algorithme 3 : Procédure *bottom up*

Algorithme 3: Procédure Bottom up

Paramètres

- k : Indice de l'itération, $k=1..2$
- P_{S_c, S_b}^k : Sous-problème composé des contraintes (12)-(53), résolu à l'itération k de l'heuristique
- S_c : Ensemble des variables des décisions continues définies dans le sous-problème P_{S_c, S_b}^k
- S_b : Ensemble des variables des décisions binaires définies dans le sous-problème P_{S_c, S_b}^k

Début

1. $S_c \leftarrow S_c + \{\omega_{i,t,s,s'}\}$
2. Optimiser le problème P_{S_c, S_b}^1
3. Obtenir les valeurs optimales des variables: $y_{i,t,s,m}, z_{i,t,s,m}, w_{i,t,s,m}$
4. Fixer les variables $y_{i,t,s,m}, z_{i,t,s,m}, w_{i,t,s,m}$ à leurs valeurs optimales obtenues
5. $S_b \leftarrow S_b + \{\omega_{i,t,s,s'}\}$
6. Optimiser le problème P_{S_c, S_b}^2
7. Obtenir les valeurs optimales de toutes les variables de décision

Fin

Pratiquement, afin d'illustrer le fonctionnement de cette approche, nous allons détailler la construction d'une solution de cette méthode étape par étape. Comme précédemment cité, l'approche *bottom up* décompose le problème global, complexe, en deux sous problèmes puis résout séquentiellement les sous problèmes de *lot sizing* et de transport en deux itérations. Nous allons maintenant nous pencher sur la construction progressive d'une solution dans les deux itérations de l'algorithme. La solution détaillée provient de la résolution d'une instance industrielle réelle par l'approche *bottom up*, sur un horizon décisionnel de 10 jours.

Itération 1 : Résolution du problème de lot sizing

L'objectif de cette première est de résoudre le problème de planification de la production et stockage (*lot sizing*) en relaxant le problème de transport dans un premier temps. Concrètement, la relaxation du problème de transport se traduit par la relaxation des contraintes d'intégrité des variables binaires de transport $\omega_{i,t,s,s'}$. Regardons maintenant la conséquence de cela sur le problème traité.

Nous remarquons que cette relaxation impacte directement quelques contraintes du modèle, et par voie de conséquence, elle impacte également la solution construite à cette étape de l'algorithme. Afin de démontrer cela, nous détaillons dans ce qui suit les contraintes du modèle relaxées ainsi que la solution construite.

La première contrainte de transport relaxée est la contrainte (59). Elle a pour objectif d'imposer des quantités minimales à transporter par train. Cependant, suite à la relaxation de l'intégrité de la variable $\omega_{i,t,s,s'}$, cette contrainte n'est plus respectée. La Figure 41 présente le plan de transport calculé lors de l'itération 1 de l'algorithme. Nous constatons donc que le plan propose de transporter des quantités quelques fois inférieures aux quantités minimales de transport par train (par exemple pour les périodes 19,21 et 24).

Ensuite, la relaxation de l'intégrité des variables binaires de transport $\omega_{i,t,s,s'}$ neutralise également la contrainte de transport (60). En effet, la contrainte (60) a pour but d'imposer l'acheminement d'un seul produit par train et un seul train par période. En effet, la contrainte (60) a pour but d'imposer l'acheminement d'un seul produit par train et un seul train par période. La Figure 42 présente le digramme Gantt d'ordonnancement du transport par train donné la solution de l'itération 1 de l'algorithme. Nous observons que la solution propose d'acheminer plusieurs trains lors de la même période comme le cas par exemple des périodes 9, 12 et 16. De plus, la Figure 41 montre également que la solution propose de transporter deux ou trois produits par train (comme pour les périodes 9, 12 et 16 par exemple).

3.1. Génération des instances

Plusieurs visites et études des sites industriels de l'OCP ont été réalisées dans le but d'assimiler la structure organisationnelle de ses processus logistiques ainsi que les méthodes de planification actuelles. Au cours de ces visites, des données concernant la demande, les contraintes techniques et caractéristiques structurelles (capacités des ressources, temps de démarrage, nomenclatures de produits...) ont été collectées. Les données obtenues ont été utilisées pour construire 10 instances industrielles.

Nous détaillons dans ce qui suit la construction des instances construites à partir du problème réel. Les demandes sont générées à partir d'un historique de 6 ans et correspondent à un horizon de planification de dix jours (équivalent à 240 périodes). Les données relatives aux capacités de production, de stockage et de transport représentent les limitations réelles des installations. Le réseau logistique multi-sites est composé d'un ensemble de nœuds interconnectés, ces nœuds peuvent être classés comme suit : trois usines de production, trois unités de stockage amont, trois unités de stockage aval, deux unités de stocks finaux et trois sites d'extraction correspondant aux nœuds sources. Concernant le flux physique, huit produits circulent dans le réseau logistique, dont trois minerais sources extraits depuis les mines, et cinq produits fabriqués dans les différentes unités de production comprenant quatre produits finis et un produit intermédiaire. Les dix instances construites présentent ainsi les mêmes caractéristiques structurelles et techniques (capacités, coûts...). Mais ils présentent des divers scénarii de la demande et de stocks de départ dans les différentes unités de stockage.

Enfin, le Tableau 20 résume les caractéristiques des instances de données considérées.

Tableau 20: Caractéristiques des instances industrielles générées

Nombre de périodes	240
Nombre de produits	8
Nombre de sites de production	3
Nombre de stocks amonts	3
Nombre de stocks avals	3
Nombre de stocks finaux	2
Nombre de fenêtres de temps	7
Nombre de trains autorisés par jour	5

Le modèle (composé par les contraintes (12)-(53)) et les heuristiques proposées sont implantés dans le solveur Xpress IVE. Les résolutions sont exécutées sur une machine de type Intel(R) Core(TM) i7-7600U @ RAM, 2.90 GHz.

3.2. Réglage fin de l'heuristique *relax and fix*

Cette section applique au problème de planification intégrée étudié la procédure *relax and fix* décrite dans la section 2.1. Cette heuristique est contrôlée par quatre paramètres. Cette section vise donc à générer les meilleurs paramètres de contrôle qui permettent de trouver la meilleure qualité de solution dans le meilleur temps de calcul. Pour cela, nous effectuons plusieurs tests dans lesquels nous faisons varier les paramètres de contrôle de la manière suivante :

- Le nombre de périodes composant la fenêtre de décision σ varie entre 3 et 4 jour (72 et 96 périodes)
- Le paramètre de chevauchement δ varie entre 1 et 2.
- L'écart minimum d'optimalité à obtenir pour chaque itération, *Iteration_gap*, est fixé à 1%.
- Le temps d'exécution maximal pour résoudre chaque itération du problème, *Iteration_time*, est fixé à 100 s.

Le Tableau 21 présente les résultats obtenus pour les dix instances considérées. Pour chaque instance, les quatre premières lignes présentent les résultats de l'heuristique *relax and fix*, tandis que la dernière ligne présente les résultats pour le modèle d'optimisation intégré (*Int_mod*). En colonnes, nous présentons le gap (en %) entre la solution obtenue par l'heuristique *relax and fix* ($Sol_{R\&F}$) et la solution obtenue par le modèle intégré (Sol_{Int_mod}). Ce gap est calculé comme suit : $100 * (Sol_{R\&F} - Sol_{Int_mod}) / Sol_{Int_mod}$, ainsi que le temps d'exécution (s) pour l'heuristique *relax and fix* et pour le modèle d'optimisation intégré.

Tableau 21: Réglage fin de l'heuristique relax and fix

δ	σ	Instance 1		Instance 2		Instance 3		Instance 4		Instance 5		
		Gap(%)	Temps(s)	Gap(%)	Temps(s)	Gap(%)	Temps(s)	Gap(%)	Temps(s)	Gap(%)	Temps(s)	
1	3	0.0075	26	0.0582	20	0.0096	30	0.0197	26	0.0012	17	
	4	0.2117	60	0.0027	27	0.0045	34	0.0195	26	0.0006	22	
2	3	0.0009	37	0.0448	48	0.0000	56	0.0054	29	0.0000	27	
	4	0.0056	103	0.0027	33	0.0000	78	0.0034	24	0.0000	29	
<i>Int_mod</i>			254		393		209		300		201	
δ	σ	Instance 6		Instance 7		Instance 8		Instance 9		Instance 10		
		Gap(%)	Temps(s)	Gap(%)	Temps(s)	Gap(%)	Temps(s)	Gap(%)	Temps(s)	Gap(%)	Temps(s)	
1	3	0.0013	34	0.0074	32	0.0726	87	0.9583	37	0.0611	36	
	4	0.0000	17	0.0016	25	0.0320	70	0.7984	47	0.0000	56	
2	3	0.0010	42	0.6987	61	0.0612	131	0.3295	121	0.0000	40	
	4	0.0000	30	0.0004	40	0.0305	118	0.0051	66	0.0000	54	
<i>Int_mod</i>			570		116		7469		177		144	

L'analyse du Tableau 21 nous permet tout d'abord de confirmer la performance de l'heuristique *relax and fix*. Ceci est manifesté par deux aspects :

- En termes de la qualité des solutions nous remarquons un gap inférieur à 0.9583%, et ceux pour les dix instances et pour l'ensemble des valeurs retenues des paramètres σ et δ .
- En termes de temps du calcul, nous remarquons que le temps requis par l'heuristique *relax and fix*, égal à en moyenne 47.40 s, est nettement inférieur à celui requis par le modèle intégré, égal en moyenne à 310.98 s.

Ensuite, comme prévu, la qualité de la solution et le temps de résolution dépendent des paramètres de contrôle sélectionnés. Afin de permettre une meilleure comparaison des résultats en fonction des paramètres de contrôle σ et δ , nous reportons les moyennes des résultats obtenus dans le Tableau 22. L'analyse de ce tableau nous a permis de retenir la configuration suivante pour l'heuristique *relax and fix* : un nombre de périodes composant la fenêtre de décision σ égal 4, et paramètre de chevauchement $\delta=2$. En effet, nous remarquons bien que ce choix de paramètre permet d'avoir très bonne qualité de solution avec un gap moyen de 0.0048%.

	σ	3	4	3	4
	δ	1	1	2	2
Relax and Fix	Gap	0.1197%	0.1071%	0.1141%	0.0048%
	Temps(s)	34.50	38.40	59.20	57.50
<i>Int_mod</i>	Temps(s)	983.25			

Tableau 22: Impact des paramètres et sur l'heuristique relax and fix

3.3. Comparaison des méthodes heuristiques proposées

Dans cette section, nous menons une série d'expérimentations afin de comparer les performances du modèle mathématique intégré proposé dans le chapitre III avec celles des heuristiques proposées dans la section 2. Cette comparaison est effectuée sur la base de la qualité opérationnelle et mathématique de la solution proposée. La qualité opérationnelle de la solution est mesurée par sa capacité à concilier les indicateurs de performance industriels, économiques et commerciaux retenus dans le but d'assurer une meilleure planification du système l'étudié. Les indicateurs retenus pour évaluer les solutions sur le plan opérationnel sont détaillés dans le Tableau 23. La qualité mathématique est évaluée par l'intermédiaire de deux mesures : l'écart des fonctions objectifs des solutions des heuristiques avec celles données par le modèle d'optimisation intégré, et le temps de résolution requis pour calculer ces solutions.

Tableau 23 : KPIs retenus pour comparer les solutions proposées par le modèle intégré et par les méthodes heuristiques

Type du KPI	Objectif (s)	Mesure (s)
KPIs industriels	Assurer au maximum la continuité du flux de production dans les unités de production	Nombre total des démarrages de production dans les unités de production
		Nombre total de changements de produits dans les lignes de production
KPIs économiques	Minimiser les coûts totaux opérationnels engendrés par l'activité logistique	Coût variable de production
		Coût de stockage
		Coût de transport
KPI commercial	Minimiser la demande perdue	Taux de satisfaction de la demande

Le Tableau 24 présente les résultats obtenus pour chacune des dix instances étudiés. Les lignes "FO_g", "Prod_g", "Stock_g", "Transp_g", "Start_g" et "TSD_g" rapportent respectivement l'écart des éléments suivants : fonction objectif, coût variable de production, coût de stockage, coût de transport, coût de démarrage et taux de satisfaction de la demande. Ces écarts sont calculés comme suit : $100 * (Sol_{heuristique} - Sol_{Int_mod}) / Sol_{Int_mod}$ où $Sol_{heuristique}$ et Sol_{Int_mod} sont, respectivement, les solutions obtenues par l'heuristique proposée et le modèle d'optimisation intégré. Les lignes "Switch_v", "Train_v" indiquent respectivement : le nombre total de *switch off* et le nombre moyen de trains expédiés quotidiennement. Enfin, la ligne "Temps_v" indique le temps de calcul en secondes (s) pour chaque approche.

En moyenne, la méthode *relax and fix* fournit de meilleures solutions, avec un écart moyen de la fonction objectif de 0.13 %, suivie de l'heuristique *top down* qui priorise problème du transport, avec un écart moyen de 0.26 %, et de l'heuristique *bottom up* où le problème du *lot sizing* est priorisé, avec un écart moyen de 2.18 %. Concernant le temps de calcul, l'heuristique *bottom up* est légèrement plus performante avec un temps de calcul moyen de 42.80 s, suivie de l'heuristique *top down* avec 54.11 s et de l'heuristique *relax and fix* avec 65.40 s. Il convient donc de souligner que les valeurs de la fonction objectif obtenues par l'approche *top down* sont inférieures à celles de l'approche *bottom up*, mais que la procédure *bottom up* est plus rapide. Notons également qu'en moyenne, la procédure *relax and fix* nécessite relativement plus de temps, notamment pour générer la première solution entière lors de la première itération. Cela est dû au fait que toutes les contraintes du problème sont préservées dans la fenêtre de décision.

Concernant le taux de satisfaction de la demande, nous remarquons que l'heuristique *relax and fix* surpasse les autres procédures en général, avec un écart moyen de 0.04%. Ensuite, concernant le nombre total de *switch off*, le tableau montre que la procédure *bottom up* réalise les meilleurs résultats avec un nombre moyen de *switch off* de 5.10. Ceci peut être expliqué par le fait que la procédure *bottom up* optimise en premier lieu le problème de *lot sizing*, ce qui permet d'obtenir de meilleures performances en matière de décisions de production.

En conclusion, nous remarquons que la méthode *relax and fix* fournit une meilleure solution globale. Tandis que l'un des inconvénients des procédures *top down* et *bottom up* demeure qu'elles peuvent être incapables de résoudre certaines instances comme le montre le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** pour l'instance 3.

3.4. Analyse de la composition des coûts

Afin de mieux assimiler la structure organisationnelle du système logistique, nous allons maintenant analyser la composition du coût total.

Le Tableau 25 détaille la composition du coût total pour les procédures et méthodes proposées dans cette recherche. La démarche suivie propose de décomposer le coût total en deux éléments principaux :

- Les coûts de *lot sizing* qui englobent le coût variable de production, le coût de démarrage de la production et le coût de stockage.
- Les coûts de transport.

Tableau 24: Approche intégrée VS méthodes heuristiques

	<i>Int_mod</i>	Relax and fix	top- down	bottom- up	<i>Int_mod</i>	Relax and fix	top- down	bottom- up	<i>Int_mod</i>	Relax and fix	top- down	bottom- up	<i>Int_mod</i>	Relax and fix	top- down	bottom- up
	Instance 1				Instance 2				Instance 3				Instance 4			
FO_g (%)	106.76 × 10 ¹⁰	0.00	0.00	0.01	36.41 × 10 ¹⁰	0.05	0.01	0.00	313.16 × 10 ¹⁰	0.27		0.00	55.92 × 10 ¹⁰	0.01	0.01	0.01
Prod_g (%)	666.81 × 10 ⁴	0.56	-27.55	-14.45	632.3 × 10 ⁴	-1.08	-41.84	8.22	679.36 × 10 ⁴	-0.16		0.91	591.99 × 10 ⁴	-8.73	-46.67	-44.27
Stock_g (%)	260.97 × 10 ⁴	1.62	107.09	72.64	332.61 × 10 ⁴	8.52	54.98	-9.39	321.15 × 10 ⁴	-20.13		34.99	350.69 × 10 ⁴	-4.49	28.31	34.19
Transp_g (%)	436.29 × 10 ⁴	0.00	0.00	0.00	335.77 × 10 ⁴	5.26	7.8	0.00	474.83 × 10 ⁴	-0.06	<i>Inf</i>	0.00	314.47 × 10 ⁴	-1.03	-0.58	-1.03
Start_g (%)	92.61 × 10 ⁴	0.00	199.59	399.59	92.61 × 10 ⁴	2.01	0.01	0.00	95.27 × 10 ⁴	586.44		-1.20	92.61 × 10 ⁴	1.23	-97.54	100.82
TSD_g (%)	0.92	0.00	-0.17	-0.35	0.96	-0.01	0.00	0.00	0.63	-0.11		0.00	0.95	0.00	0.00	0.00
Switch_v	0.00	0.00	3.00	9.00	0.00	7.00	3.00	0.00	8.00	30.00		4.00	0.00	3.00	5.00	5.00
Train_v	3.70	3.90	4.00	3.90	3.10	3.70	4.10	2.60	4.2	4.10		4.10	3.20	2.70	3.30	3.00
Temps_v	254	26	77	26	393	44	63	28	209	121		23	300	36	6	9
	Instance 5				Instance 6				Instance 7				Instance 8			
FO_g (%)	169.1 × 10 ¹⁰	0.00	0.00	0.00	81.79 × 10 ¹⁰	0.00	0.00	0.00	257.06 × 10 ¹⁰	0.7	0.00	0.89	54.41 × 10 ¹⁰	0.03	2.27	15.71
Prod_g (%)	616.11 × 10 ⁴	8.83	-0.44	6.48	625.54 × 10 ⁴	2.74	-39.31	-20.29	441.66 × 10 ⁴	44.19	-4.25	-3.04	482.88 × 10 ⁴	26.13	30.12	12.27
Stock_g (%)	280.82 × 10 ⁴	4.27	34.74	14.53	433.69 × 10 ⁴	-42.37	-19.07	-34.15	456.8 × 10 ⁴	-1.38	15.03	-1.92	406.78 × 10 ⁴	1.87	50.09	5.17
Transp_g (%)	393.15 × 10 ⁴	0.00	0.00	0.00	400.83 × 10 ⁴	-2.08	-3.87	-3.87	386.98 × 10 ⁴	1.69	0.00	-0.21	393.38 × 10 ⁴	1.23	0.08	-0.78
Start_g (%)	93.37 × 10 ⁴	-0.41	0	-0.81	93.75 × 10 ⁴	0.81	1.22	0.81	94.13 × 10 ⁴	392.73	0	0.81	93.75 × 10 ⁴	491.49	99.19	-0.41
TSD_g (%)	0.83	-0.14	-0.14	-0.08	0.74	0.00	0.00	0.00	0.66	-0.08	0.00	-0.46	0.98	0.00	-0.04	-0.31
Switch_v	2.00	1.00	2.00	0.00	4.00	5.00	7.00	8.00	5.00	11.00	4.00	6.00	5.00	21.00	8.00	4.00
Train_v	3.60	4.10	3.80	3.10	3.8	3.90	3.60	3.40	3.5	3.70	4.10	3.10	3.6	3.90	4.20	3.20
Temps_v	200	29	40	31	570	50	76	28	116	83	36	46	7469	132	94	181
	Instance 9				Instance 10											
FO_g (%)	257.02 × 10 ¹⁰	0.33	0.00	4.11	247.02 × 10 ¹⁰	0.00	0.00	1.05								
Prod_g (%)	625.29 × 10 ⁴	3.31	6.09	7.89	666.06 × 10 ⁴	-0.32	-20.64	-8								
Stock_g (%)	369.43 × 10 ⁴	-12.27	16.15	-18.51	300.07 × 10 ⁴	-5.35	37.93	4.71								
Transp_g (%)	431.65 × 10 ⁴	-0.07	0.00	-0.88	435.25 × 10 ⁴	0.00	0.00	-0.22								
Start_g (%)	92.61 × 10 ⁴	404.92	597.95	203.28	93.75 × 10 ⁴	-1.22	294.33	-0.41								
TSD_g (%)	0.78	-0.1011	-0.3124	-0.48	0.74	0.00	0.00	-0.12								
Switch_v	1.00	21.00	8.00	12.00	3.00	1.00	6.00	3.00								
Train_v	4.00	3.90	3.80	3.80	3.80	3.80	3.70	3.80								
Temps_v	177	101	41	21	145	32	54	35								

FO: Fonction Objectif; TSD: Taux de Satisfaction de la Demande; Prod: Coût variable de production; Stock: Coût de stockage; Transp: Coût de transport; Start: Coût de *Start up*; Switch: Nombre de *Switch-off*; Train: Nombre de trains expédiés par jour(moyenne); *Inf*: Solution infaisable

La contribution de chacun de ces éléments est évaluée en pourcentage du coût total.

Tableau 25: Contribution des composantes du coût au coût total (en %)

	Composante du coût	Modèle intégré	Relax and fix	Top-down	Bottom-up
Instance 1	Lot sizing	70.05	70.21	74.89	77.28
	Transport	29.95	29.79	25.11	22.72
Instance 2	Lot sizing	75.9	78.16	72.97	76.25
	Transport	24.1	21.84	27.03	23.75
Instance 3	Lot sizing	69.77	77	-	71.87
	Transport	30.23	23	-	28.13
Instance 4	Lot sizing	76.7	75.69	71.07	76.02
	Transport	23.3	24.31	28.93	23.98
Instance 5	Lot sizing	71.58	72.88	71.75	73.13
	Transport	28.42	27.12	28.25	26.87
Instance 6	Lot sizing	74.2	71.55	68.18	69.52
	Transport	25.8	28.45	31.82	30.48
Instance 7	Lot sizing	71.95	79.76	72.93	71.55
	Transport	28.05	20.24	27.07	28.45
Instance 8	Lot sizing	71.43	79.85	78.36	73.15
	Transport	28.57	20.15	21.64	26.85
Instance 9	Lot sizing	71.58	76.92	80.11	74.6
	Transport	28.42	23.08	19.89	25.4
Instance 10	Lot sizing	70.89	70.51	75.09	70.14
	Transport	29.11	29.49	24.91	29.86

Le premier constat que nous pouvons dresser est que le compromis de coûts effectué par l'heuristique *relax and fix* est similaire à celui effectué par le modèle d'optimisation intégrée, ce qui confirme les résultats obtenus précédemment.

Le second constat provient de la comparaison de la composition des coûts pour les approches séquentielles à savoir *top down* et *bottom up*. Nous remarquons ainsi certains résultats contre-intuitifs. Nous observons que la part du coût du transport est plus importante dans l'heuristique *top down*, où le problème du transport est priorisé, que dans l'heuristique *bottom up*, où le problème du *lot sizing* est priorisé. De même, la part du coût du *lot sizing* est plus importante dans l'heuristique *bottom up*, où le problème de *lot sizing* est priorisé, que dans l'heuristique *top down*, où le problème de transport est priorisé.

En effet, cela est dû à la structure de la fonction objectif du problème. Rappelons que la fonction « objectif » minimise hiérarchiquement en premier lieu les quantités des demandes perdues, en deuxième lieu le nombre total de *switch off* et enfin les coûts opérationnels totaux. Dans ce contexte, la procédure *top down* priorise le transport pour maximiser la satisfaction de la demande, ce qui augmente le coût du transport au lieu de le minimiser. De la même manière, la procédure *bottom up* tend à satisfaire le maximum de la demande tout priorisant les décisions de production. Ce qui entraîne une augmentation des coûts liés à la production.

Enfin, nous remarquons que ces propriétés de coût ne sont pas respectées pour les instances 7, 8, 9, et 10. Ceci s'explique par la qualité relativement dégradée de la solution obtenue pour ces instances pour les heuristiques *top down* et *bottom up*. **Le Erreur ! Source du renvoi introuvable.** rapporte des écarts de la fonction objectif de 0.89%, 15.71%, 4.11% et 1.05% respectivement pour les instances 7, 8, 9, et 10.

3.5. Exploration des résultats des procédures séquentielles

Cette section a pour objectif d'approfondir l'analyse des interactions entre les sous-systèmes qui composent le système global étudié, mais également de regarder de plus près les négociations de contraintes effectuées entre les maillons du système logistique afin d'optimiser les critères de la fonction objectif. Dans la même logique que les sections précédentes, le système global est décomposé en deux sous-systèmes, à savoir le sous-système transport et le sous-système production et stockage. Ensuite, nous proposons une analyse fine de des solutions obtenues dans chacune des itérations par les heuristiques *top down* et *bottom up*, et ceux pour les dix instances industrielles étudiées. Bien entendu, une itération dans une des deux procédures séquentielles correspond à la résolution à l'optimum d'un des deux sous problèmes : transport ou bien *lot sizing*. La pertinence donc de l'analyse approfondie des solutions intermédiaires des deux heuristiques vient du fait qu'elles simulent le fonctionnement interne du système logistique, c'est-à-dire les interactions entre sous-systèmes, dans le cas où le manager décide de planifier en priorisant les décisions de transport dans le cas de l'heuristique *top down*, ou bien en priorisant les décisions de production dans le cas de l'heuristique *bottom up*.

Le Tableau 26 détaille les solutions optimales trouvées pour chacun des sous-problèmes et pour chacune des deux méthodes. Afin de permettre une comparaison mutuelle des solutions des sous-problèmes, le Tableau 26 fournit pour chaque instance les éléments suivants : la valeur de la fonction « objectif » des sous-problèmes, le taux moyen de satisfaction de la demande, le taux d'utilisation du transport par train. Ensuite, ce tableau présente les taux d'utilisation des ressources de production selon leurs positionnements dans le réseau de production : Unités de production – niveau 2 correspondent aux unités de production qui produisent les produits finis ; les unités de production – niveau 1 correspondent aux unités de production fabriquant les produits intermédiaires. De plus, nous avons également calculé le taux d'utilisation des mines qui sont les nœuds sources qui alimentent le réseau en minerais. Le tableau présente également les taux d'utilisation des unités de stockage selon leurs positionnements dans le réseau : les stocks finaux sont les stocks de produits finis situés en aval du transport par train, les stocks avals – niveau 2 correspondent aux stocks de produits finis en amont du transport par trains ; les stocks intermédiaires se réfèrent soit aux stocks amonts des unités de production - niveau 2 ou bien aux stocks avals des unités de production – niveau 1. Enfin les stocks amont – niveau 1 sont les stocks situés en amont des unités de production – niveau 1 dans lesquelles sont stockées les minerais après leurs acheminements depuis les mines d'extraction.

Tableau 26 : Solutions des sous-problèmes selon les approches Top down et Bottom up

Sous-problème	Heuristique Top-Down		Heuristique bottom-up			
	Transport	Lot sizing	Lot sizing	Transport		
Instance 1	Valeur de la fonction objectif	106.76×10 ¹⁰	106.77×10 ¹⁰	106.77×10 ¹⁰	106.77×10 ¹⁰	
	Taux moyen de satisfaction de la demande (%)	87.79	87.79	91.58	87.79	
	Taux d'utilisation du transport par trains (%)	60.60	60.60	60.60	60.60	
	<i>Taux d'utilisation du réseau de production (%)</i>					
	Unités de production - niveau 2	43.22	43.19	40.54	40.69	
	Unités de production - niveau 1	25.71	65.86	10.34	10.34	
	Mines (source nodes)	11.62	18.41	9.01	9.01	
	<i>Taux d'utilisation du réseau de stockage (%)</i>					
	Stocks finaux	8.30	8.36	8.15	8.28	
	Stocks aval - niveau 2	7.75	9.89	1.80	5.52	
	Stocks intermédiaires	0.13	0.23	1.34	3.95	
	Stocks amont - niveau 1	0.25	0.85	3.45	3.45	
	Instance 2	Valeur de la fonction objectif	36.41×10 ¹⁰	36.42×10 ¹⁰	36.41×10 ¹⁰	36.41×10 ¹⁰
		Taux moyen de satisfaction de la demande (%)	96.11	96.11	96.11	96.11
Taux d'utilisation du transport par trains (%)		49.09	49.09	46.63	46.63	
<i>Taux d'utilisation du réseau de production (%)</i>						
Unités de production - niveau 2		19.69	19.69	30.97	30.97	
Unités de production - niveau 1		6.18	0	55.52	55.52	
Mines (source nodes)		0.53	0.03	10.61	10.87	
<i>Taux d'utilisation du réseau de stockage (%)</i>						
Stocks finaux		6.58	6.56	4.91	5.5	
Stocks aval - niveau 2		7.84	9.49	7.99	8.23	
Stocks intermédiaires		0.89	0.92	1.72	1.55	
Stocks amont - niveau 1		1.16	5	1.73	1.73	
Instance 3		Valeur de la fonction objectif	313.15×10 ¹⁰	313.17×10 ¹⁰	313.17×10 ¹⁰	319.85×10 ¹⁰
		Taux moyen de satisfaction de la demande (%)	62.78	62.78	62.78	62.37
	Taux d'utilisation du transport par trains (%)	65.95	65.95	65.95	65.61	
	<i>Taux d'utilisation du réseau de production (%)</i>					
	Unités de production - niveau 2	42.71	42.71	50.07	50.27	
	Unités de production - niveau 1	26.43	82.76	81.72	81.72	
	Mines (source nodes)	11.61	21.04	24.97	24.79	
	<i>Taux d'utilisation du réseau de stockage (%)</i>					
	Stocks finaux	8.19	9.03	8.26	8.02	
	Stocks aval - niveau 2	3.7	3.3	2.33	4.22	
	Stocks intermédiaires	0.08	0.06	0.06	0.06	
	Stocks amont - niveau 1	0.34	0.09	0.11	0.11	
	Instance 4	Valeur de la fonction objectif	128.07×10 ¹⁰	128.08×10 ¹⁰	119.76×10 ¹⁰	133.08×10 ¹⁰
		Taux moyen de satisfaction de la demande (%)	87.03	87.03	89.32	87.96
Taux d'utilisation du transport par trains (%)		83.74	83.74	84.57	83.24	
<i>Taux d'utilisation du réseau de production (%)</i>						
Unités de production - niveau 2		52.92	52.41	51.58	49.66	
Unités de production - niveau 1		22.47	82.76	36.51	36.15	
Mines (source nodes)		5.9	16.07	8.16	7.86	
<i>Taux d'utilisation du réseau de stockage (%)</i>						
Stocks finaux		14.57	14.29	13.92	13.73	
Stocks aval - niveau 2		7.3	7.94	6.1	7.68	
Stocks intermédiaires		1.81	0.89	1.98	3.6	
Stocks amont - niveau 1		0.4	0.11	0.11	0.11	
Instance 5		Valeur de la fonction objectif	169.09×10 ¹⁰	169.1×10 ¹⁰	169.11×10 ¹⁰	177.95×10 ¹⁰
		Taux moyen de satisfaction de la demande (%)	83.17	83.17	83.46	82.84
	Taux d'utilisation du transport par trains (%)	54.72	54.72	54.6	54.16	
	<i>Taux d'utilisation du réseau de production (%)</i>					
	Unités de production - niveau 2	38.76	38.77	38.46	38.47	
	Unités de production - niveau 1	26.43	76.55	28.22	28.22	
	Mines (source nodes)	11.68	20.39	11.83	11.56	
	<i>Taux d'utilisation du réseau de stockage (%)</i>					
	Stocks finaux	6.98	7.11	6.78	8.2	
	Stocks aval - niveau 2	3.58	4.59	3.12	4.25	
	Stocks intermédiaires	0.08	0.08	0.57	1.63	
	Stocks amont - niveau 1	0.34	0.46	0.09	0.09	

Instance 6	Valeur de la fonction objectif	81.78×10 ¹⁰	81.79×10 ¹⁰	72.8×10 ¹⁰	81.78×10 ¹⁰
	Taux moyen de satisfaction de la demande (%)	74.24	74.24	77.98	74.24
	Taux d'utilisation du transport par trains (%)	53.52	53.52	53.96	53.52
	<i>Taux d'utilisation du réseau de production (%)</i>				
	Unités de production - niveau 2	22.68	23.01	36.56	36.56
	Unités de production - niveau 1	6.45	0.83	29.31	29.31
	Mines (source nodes)	0.54	0	10.48	10.38
	<i>Taux d'utilisation du réseau de stockage (%)</i>				
	Stocks finaux	7.27	7.9	6.43	6.24
	Stocks aval - niveau 2	3.15	4.36	4.48	5.96
Stocks intermédiaires	0.58	0.68	2.27	2.59	
Stocks amont - niveau 1	1.11	4.8	0.3	0.3	
Instance 7	Valeur de la fonction objectif	257.05×10 ¹⁰	257.06×10 ¹⁰	257.06×10 ¹⁰	257.06×10 ¹⁰
	Taux moyen de satisfaction de la demande (%)	66.27	66.27	66.27	66.27
	Taux d'utilisation du transport par trains (%)	53.75	53.75	53.75	53.75
	<i>Taux d'utilisation du réseau de production (%)</i>				
	Unités de production - niveau 2	27.67	27.69	38.81	38.81
	Unités de production - niveau 1	7.17	4.83	52.07	52.07
	Mines (source nodes)	1.57	1.2	15.47	15.46
	<i>Taux d'utilisation du réseau de stockage (%)</i>				
	Stocks finaux	8.41	8.87	7.95	8.21
	Stocks aval - niveau 2	8.58	10.56	8.96	9.42
Stocks intermédiaires	0.17	0.26	0.65	1.04	
Stocks amont - niveau 1	1.24	5.34	0.11	0.11	
Instance 8	Valeur de la fonction objectif	54.4×10 ¹⁰	55.64×10 ¹⁰	54.4×10 ¹⁰	59.28×10 ¹⁰
	Taux moyen de satisfaction de la demande (%)	97.84	97.8	97.84	97.63
	Taux d'utilisation du transport par trains (%)	54.64	54.65	54.64	54.39
	<i>Taux d'utilisation du réseau de production (%)</i>				
	Unités de production - niveau 2	40.1	40.01	37.59	37.3
	Unités de production - niveau 1	18.41	60.34	42.76	42.76
	Mines (source nodes)	8.67	15.83	12.92	13.01
	<i>Taux d'utilisation du réseau de stockage (%)</i>				
	Stocks finaux	10.58	10.72	12.17	10.36
	Stocks aval - niveau 2	12.95	13.17	2.03	3.98
Stocks intermédiaires	0.08	0.36	1.46	0.63	
Stocks amont - niveau 1	0.4	1.44	2.5	2.5	
Instance 9	Valeur de la fonction objectif	257.02×10 ¹⁰	257.02×10 ¹⁰	257.04×10 ¹⁰	257.04×10 ¹⁰
	Taux moyen de satisfaction de la demande (%)	77.71	77.71	77.73	77.67
	Taux d'utilisation du transport par trains (%)	59.95	59.95	59.95	59.95
	<i>Taux d'utilisation du réseau de production (%)</i>				
	Unités de production - niveau 2	45.72	45.7	43.33	43.47
	Unités de production - niveau 1	26.94	58.71	74.48	74.48
	Mines (source nodes)	13.37	19.02	21.22	21.61
	<i>Taux d'utilisation du réseau de stockage (%)</i>				
	Stocks finaux	10.03	9.97	9.18	11.81
	Stocks aval - niveau 2	6.99	9.25	3.14	4
Stocks intermédiaires	0.08	1.64	0.07	0.08	
Stocks amont - niveau 1	0.35	0.09	0.37	0.37	
Instance 10	Valeur de la fonction objectif	247.02×10 ¹⁰	247.03×10 ¹⁰	247.03×10 ¹⁰	252.54×10 ¹⁰
	Taux moyen de satisfaction de la demande (%)	73.76	73.76	73.76	73.58
	Taux d'utilisation du transport par trains (%)	60.45	60.45	60.45	60.18
	<i>Taux d'utilisation du réseau de production (%)</i>				
	Unités de production - niveau 2	47.83	47.67	45.23	43.39
	Unités de production - niveau 1	26.94	72.07	82.76	82.76
	Mines (source nodes)	13.43	21	23.87	23.21
	<i>Taux d'utilisation du réseau de stockage (%)</i>				
	Stocks finaux	8.22	9.49	9.37	8.93
	Stocks aval - niveau 2	9.76	11.66	1.92	4.14
Stocks intermédiaires	0.09	0.26	0.06	0.06	
Stocks amont - niveau 1	0.32	0.09	0.09	0.09	

Analysons maintenant le comportement de chaque approche séquentielle séparément.

3.5.1. Approche *top down*

Cette approche résout le problème de transport dans la première itération, puis résout ensuite, dans sa deuxième itération, le problème de *lot sizing* multi-niveaux en fixant les variables binaires de transport. Nous observons alors que la qualité globale des solutions du sous-problème de dimensionnement des lots est légèrement détériorée par rapport au sous-problème de transport. Ceci est montré par le faible écart entre les valeurs des fonctions objectives des sous-problèmes de transport et de dimensionnement des lots, en moyenne égal à 0,08%. Nous remarquons également que le taux moyen de satisfaction de la demande reste presque inchangé entre les deux sous-problèmes avec un écart moyen de 0,01%.

Le taux d'utilisation des ressources de production augmente considérablement de 54,17% en moyenne. Dans la première itération, les variables de production binaires sont relâchées, et par conséquent les capacités des ressources de production sont également relâchées. Dans la deuxième itération, les variables de production binaires sont discrétisées, ce qui augmente le taux d'utilisation de la production puisque les capacités de production sont respectées.

3.5.2. Approche *bottom up*

Cette approche résout le problème du *lot sizing* dans la première itération, puis résout ensuite le problème de transport tout en fixant les variables binaires *lot sizing* dans la deuxième itération. Nous remarquons d'abord que la qualité globale des solutions du sous-problème de transport est fortement détériorée par rapport au sous-problème de *lot sizing*. Ceci est montré par l'écart important entre les valeurs de la fonction objectif des deux sous-problèmes, en moyenne égal à 2,95%. Cette affirmation est également confirmée par la diminution du taux de satisfaction de la demande entre les deux itérations, avec un écart moyen de 1,27%. Nous remarquons également que le taux de satisfaction de la demande diminue bien que le taux d'utilisation du transport reste presque constant entre le premier et le deuxième sous-problème. Le transport par train est sollicité tant lors de la résolution du sous problème du *lot sizing* que pour la résolution du sous problème de transport ; ceci n'a pas empêché la dégradation du taux de satisfaction de la demande.

Cette diminution du taux de satisfaction de la demande dans le sous-problème de transport s'explique par la discrétisation de la variable binaire de transport dans la deuxième itération. Ceci active les contraintes de transport, et particulièrement les capacités maximales et minimales du train, et les fenêtres de temps de transport des trains alors qu'elles étaient relâchées lors de la première itération. Par conséquent, le transport par train n'est plus capable d'acheminer les mêmes quantités de produits finis depuis les unités de production vers les stocks finaux. Cela entraîne une diminution du taux de satisfaction de la demande, et par conséquent une augmentation de la valeur de la fonction objectif.

En guise de conclusion, nous remarquons que l'heuristique *top down* est plus performante que l'heuristique *bottom up*. Ces résultats fournissent une preuve de l'impact fort des contraintes de transport par train sur la performance globale de la supply chain minière de l'axe centre de l'OCP. Pour les mêmes instances industrielles nous avons montré que la priorisation de la planification de par rapport à celle du *lot sizing* permet une meilleure performance du système industriel global.

3.6. Analyse des instances de grande taille

Nous n'avons utilisé dans les expériences précédentes que des instances relativement modestes caractérisées par un horizon de planification de 240 périodes. Cela nous a permis de résoudre à l'optimum le problème intégré afin de tester et comparer les performances des procédures et heuristiques proposées.

Cependant, le paramètre contrôlant le nombre de périodes semble avoir un impact important sur la performance du modèle d'optimisation. En effet, celui-ci augmente considérablement la taille du problème, mesurée par le nombre de variables et de contraintes. Nous allons maintenant tester différentes instances de grande taille.

Ces instances sont obtenues en augmentant progressivement l'horizon de planification. L'objectif derrière cette démarche est double : celui d'évaluer les limites du modèle intégré dans des situations plus réalistes, et celui de mettre en évidence un autre aspect des avantages des approches heuristiques proposées. Le Tableau 27 présente les résultats. Le délai maximal de calcul est fixé à 1 h.

Tableau 27 : Temps de calcul (en s) et gap associé (en %) pour les méthodes de résolution proposés

Horizon (jours)	Modèle intégré		Relax and fix		Heuristique Top-down		bottom-up	
	Temps (s)	Gap du solveur (%)	Temps (s)	Gap (%)	Temps (s)	Gap (%)	Temps (s)	Gap (%)
10	254	0.0000	26	0	77	0	26	0.01
20	400	0.0000	193	1.26	254	0	119	0
30	509	0.0030	932	0	Infaisable	-	254	0.0013
40	1226	0.0040	993	0.0019	545	0	511	0
50	1837	0.001	592	1.1257	620	1.5474	671	0.4499
60	3601	100	983	-	767	-	895	-
80	3202	100	2650	-	3517	-	2604	-

Nous observons que le modèle intégré devient incapable de trouver une solution optimale en moins de 1 h lorsque l'horizon de planification dépasse 60 jours, alors que l'heuristique proposée permet de trouver une solution dans le temps de calcul fixé. Nous notons cependant que la méthode *bottom up* est plus rapide pour résoudre les instances de grande taille, suivie par l'heuristique *relax and fix*, puis par la méthode *top down*.

4. CONCLUSION

Nous avons construit un problème intégré de planification de la production, de stockage et de transport par train avec des fenêtres de temps survenant dans le contexte d'une industrie minière. Pour construire et résoudre ce problème, nous avons proposé dans le chapitre III une approche de modélisation intégrée basée sur le problème classique de *lot sizing* multi-niveaux qui a pour objectif de minimiser hiérarchiquement les demandes perdues, les *switch off* et les coûts opérationnels totaux. Cette approche de modélisation intégrée présente l'avantage de trouver la meilleure solution optimale pour le problème global, mais elle demeure difficilement applicable pour des problèmes réels de grande taille impliquant un grand niveau de complexité algorithmique et nécessitant ainsi un degré élevé d'infrastructure de calcul. Sur le plan industriel, le temps de calcul des solutions proposées est un critère important quand il s'agit d'outils destinés à résoudre des problèmes réels. Proposer donc des méthodes alternatives au modèle intégré d'optimisation est essentiel pour pouvoir résoudre des instances réelles de grande taille dans un temps de calcul acceptable. Nous proposons dans ce contexte trois approches heuristiques pour résoudre le problème traité à savoir :

- Une heuristique *relax and fix* qui est une hybridation entre l'optimisation et une stratégie de décomposition de l'horizon.
- Une heuristique *top down* qui optimise séquentiellement et hiérarchiquement les décisions de transport puis de *lot sizing*.
- Une heuristique *bottom up* qui, elle, optimise séquentiellement et hiérarchiquement les décisions de *lot sizing* puis de transport.

Nous avons ensuite effectué une série d'expérimentations sur des instances réelles avec l'objectif de fournir une évaluation et une comparaison de la qualité des solutions du modèle d'optimisation intégré et des méthodes proposées. De plus, les expériences sur des procédures séquentielles ont permis de reproduire le fonctionnement du système selon différentes stratégies de planification afin de mieux appréhender leur impact sur le processus de planification. Ainsi, les expériences menées démontrent que l'heuristique *relax and fix* permet d'obtenir des solutions de très bonne qualité quelle que soit l'instance considérée. Les approches *top down* et *bottom up* ont révélé que l'optimisation du transport avant ou après le *lot sizing* a un impact important sur la négociation des contraintes dans le système logistique. Enfin, nous avons démontré

l'importance des approches proposées sur les grandes instances lorsque la méthode exacte est incapable de trouver une solution de bonne qualité dans un temps de calcul raisonnable.

Conclusion générale

Les travaux de thèse présentés dans ce manuscrit sont réalisés dans le cadre de la chaire OCP-SA d'optimisation industrielle, rattachée à l'EMINES *School of Industrial Management* - Université Mohamed VI Polytechnique. Ils ont porté sur la mise en œuvre d'outils d'aide à la décision visant la planification intégrée du flux physique traversant un système logistique multi-sites de la *Supply Chain* (SC) de l'OCP. Nos travaux sont ainsi rattachés à la thématique plurielle du *Supply Chain Management* (SCM) et mobilisent les outils offerts par la recherche opérationnelle, en l'occurrence la modélisation mathématique, au service de l'aide à la décision en logistique. Les questions de recherche de cette thèse étaient les suivantes :

1. Dans quelle mesure les outils de planification existants dans la littérature sont-ils applicables à la planification des flux physiques dans le contexte logistique minier ?
2. En quoi l'intégration des décisions de planification des entités d'un système logistique minier à l'aide du MLLSP-TTW est-elle créatrice de facteurs clés de succès pour les acteurs du Supply Chain Management ?

Les chapitres 1 et 2 ont permis de répondre à la première question de recherche. En effet, ils ont montré qu'il existait des outils permettant de répondre à une planification des sous-systèmes locaux tandis que les approches globales existantes ne suffisent pas à proposer une solution correcte pour l'axe centre de l'OCP. Ce contexte particulier de l'OCP nous a permis de proposer un nouveau modèle de planification, le MLLSP-TTW. Les chapitres 3 et 4 nous permettent ainsi de répondre à notre deuxième question de recherche en montrant à la fois notre contribution scientifique et managériale. Nous avons valorisé en revues et en conférences chemin faisant notre travail scientifique (cf. introduction).

Dans la suite de la logique d'intégration et de coordination, essence même de la philosophie du SCM, cette recherche propose d'étendre le décloisonnement des décisions de planification logistique dans le monde de l'industrie minière. Dans cet esprit, nous avons appréhendé sous une approche globale le système logistique industriel étudié pour concevoir un environnement intégré de planification des flux physiques dans un horizon tactique /

opérationnel. Le système logistique considéré est composé d'unités de production, stockage et d'un système de transport par trains conditionné par des fenêtres de temps. Autrement, le système étudié est un couplage d'un système de production et stockage multi-sites, et un système de transport ferroviaire avec des contraintes spatio-temporelles qui conditionnent l'acheminement des produits.

Compte tenu des spécificités de notre problématique industrielle et du contexte scientifique de notre recherche, il nous a été indispensable de suivre un protocole méthodologique adapté afin d'établir le pont entre la réalité industrielle complexe et le monde scientifique théorique. Dans ce contexte, nous avons suivi la méthodologie de modélisation pour l'aide à la décision (Féniès 2006; Tchernev 1997) comme protocole afin de mettre en œuvre notre recherche action - ingénierique. Le point fort de cette méthodologie est qu'elle intègre explicitement un cadre de modélisation, ce qui permet de cerner et d'appréhender le système logistique industriel dans toute sa complexité afin d'apporter au final une meilleure aide à la prise de décision. Cette méthodologie repose sur la construction d'un modèle de connaissance qui retranscrit la complexité du système industriel en un langage intelligible dans le monde scientifique, ensuite un modèle d'action est déduit de ce premier et résout la problématique posée, et donne ensuite naissance à un modèle de résultats qui propose des solutions et effectue des bouclages avec le monde industriel et scientifique.

Partant d'un problème industriel réel, la problématique sujet de notre thèse est ramenée au problème théorique du Lot sizing (LSP). L'analyse de la littérature du LSP, présentée au chapitre II, a montré que les contenus des modèles antérieurement développés ne correspondaient que très partiellement au contexte de la Supply Chain minière. Ce qui a écarté la possibilité d'appliquer les outils existants dans la littérature pour notre problématique. Dès lors, nous avons cherché à capitaliser sur les modèles existants, pour proposer un environnement de planification intégrée qui prend en compte les caractéristiques structurelles et la complexité systémique posées par l'activité minière en particulier, et l'industrie de process en général.

L'environnement de planification intégrée que nous proposons a donné naissance à quatre modèles d'action que nous avons synthétisé au Tableau 28 à savoir : (i) Un modèle d'optimisation intégré, (ii) Une méthode de résolution de type *Relax and fix* pour résoudre le modèle intégré, (iii) Une heuristique *top down* qui résout le problème hiérarchiquement en priorisant le transport puis le *lot sizing*, (iv) Une heuristique *bottom up* qui résout le problème hiérarchiquement en priorisant le *lot sizing* puis le transport.

	Modèles réalisés			
	Modèle intégré	Heuristique <i>Relax and Fix</i> pour résoudre le modèle MLLSP-TTW	Heuristique <i>top down</i>	Heuristique <i>bottom up</i>
Méthode de résolution	Modélisation mathématique linéaire mixte (MILP)	Heuristique basée sur le MILP de type " <i>Relax and Fix</i> "	Heuristique basée sur le MILP	Heuristique basée sur le MILP
Approche	Optimisation intégrée	Optimisation itérative basée sur la décomposition de l'horizon de planification	Optimisation itérative basée sur la décomposition séquentielle du problème	Optimisation itérative basée sur la décomposition séquentielle du problème
Objectif	Optimisation simultanée de l'ensemble des décisions	Optimisation simultanée de l'ensemble des décisions par fenêtres de temps	Optimisation hiérarchique du transport et du lot sizing	Optimisation hiérarchique du lot sizing et du transport
Niveau de granularité	Microscopique	Microscopique	Microscopique	Microscopique
Maille de la planification	Heure (h)	Heure (h)	Heure (h)	Heure (h)
Horizon	Opérationnel / tactique	Opérationnel / tactique	Opérationnel / tactique	Opérationnel / tactique
Eclairage décisionnel	Planification / Replanification opérationnelle	Planification / Replanification opérationnelle	Planification / Replanification opérationnelle	Planification / Replanification opérationnelle

Tableau 28: Récapitulatif des travaux de recherche réalisés au cours de cette thèse

Partant de ce constat, notre mission lors de cette thèse a consisté à creuser cette piste de recherche non encore explorée. Ceci prend la forme de la réalisation d'outils de planification pouvant combler les vides suivants constatés dans la littérature :

- i. L'adaptation du problème de *lot sizing* au champ industriel minier. Cette adaptation consiste en la prise en compte simultanée des caractéristiques structurelles spécifiques du système logistique industriel minier. Ces caractéristiques concernent particulièrement la configuration des unités de production et de stockage ainsi que la typologie continue du flux physique qui les traverse (Par exemple: la production sous forme de compagnes de produits de taille maximale, capacité (débit) de production restreinte dans une plage définie, temps de séjour dans les stocks, capacité des stocks variable en fonction du nombre des produits stockés...).

- ii. Acheminement des produits finis par trains avec des contraintes de fenêtres de temps (sillons)
- iii. Couplage et intégration des deux problèmes (i) et (ii).
- iv. Configuration du réseau logistique composé d'un ensemble de sites de production interconnectés, et dans lequel chaque site est composé d'unités de fabrication avec des unités de stockage en amont et en aval.

Le modèle intégré proposé est scrupuleusement décrit au chapitre III. Bien qu'il propose une modélisation fine du système industriel, celui-ci trouve une difficulté à résoudre des instances industrielles de taille importante, le nombre de contraintes associées étant très élevé. Or, étant donnée l'application industrielle des outils développés, le critère du temps de résolution est important ; surtout quand il s'agit de construire un outil de planification opérationnelle / tactique. Nous proposons donc dans le chapitre IV trois méthodes heuristiques pour résoudre le modèle d'optimisation intégré, chacune regardant le problème d'un angle de vue différent.

Les méthodes de résolution proposées au chapitre V revêtent un double intérêt pour notre recherche. Le premier est de palier la difficulté rencontrée par le modèle intégré quand il s'agit de résoudre des instances de taille importante. Nous avons donc proposé une heuristique *Relax and Fix*, basée sur le modèle mathématique, qui résout les instances de grande taille en des temps adéquats. Celle-ci fournit des solutions de très bonne qualité, proches de la solution optimale. Nous avons également proposé deux autres heuristiques, appelées *Top down* et *Bottom up*, qui reproduisent deux approches de planification séquentielle, et c'est là le second intérêt des méthodes de résolution développées. Globalement, ces méthodes de résolution opposent et comparent l'approche de planification globale et l'approche de planification séquentielle. L'objectif est de reproduire quelques approches traditionnelles de planification, de confirmer l'intérêt de l'intégration des décisions, mais également de mieux comprendre le fonctionnement du système logistique industriel.

Contributions scientifiques & managériales

« *La recherche qui ne produit que des livres ne suffit pas* » (Lewin 1946), la recherche action permet ainsi de créer un pont entre la science et le terrain, en produisant à la fois des

connaissances actionnables pour le terrain et un savoir qui contribue au progrès de la science (Gilbert, Raulet-Croset, et Teglborg 2018). Partant de ce constat, nous identifions un double apport scientifique et managérial pour notre recherche action.

Contributions scientifiques

1. Une construction scientifique à partir d'un besoin industriel

Cette thèse a fait l'objet d'un contrat de recherche établi entre l'Emines, School of Industrial Management de l'Université Mohammed VI Polytechnique et le Groupe OCP (Office Chérifien des Phosphates). Elle a donc revêtu un objectif industriel qui consiste en la mise en œuvre d'un outil d'aide à la décision pour le problème de planification opérationnelle de l'ensemble des composantes du système logistique industriel précédemment décrit. Celui-ci a pour but d'intégrer dans un modèle unique, global, l'ensemble des maillons du système étudié. De plus, et c'est une de ses valeurs ajoutées, il devrait apporter une prise en compte simultanée de l'ensemble des facteurs de complexité afin de garantir une meilleure organisation spatio-temporelle de la production, du stockage et du transport ferroviaire.

Au-delà de cet objectif, la modélisation retenue pour la problématique du système logistique de l'OCP a eu comme second objectif d'étendre ce cas spécifique à un problème théorique plus général. A commencer par la configuration retenue pour les usines production. Celle-ci considère un réseau de production multi-sites, multi-niveaux, dans lequel chaque niveau de production transforme des matières premières et/ou produits intermédiaire en autres produits intermédiaires ou produits finis. La transformation de la matière première en produits finis est ainsi réalisée en un ou plusieurs niveaux de production dans le cadre supply chain étalée sur plusieurs usines, et dans laquelle chaque usine apporte au produit une valeur ajoutée. De plus les usines modélisées sont multimodes, c'est-à-dire que chaque usine peut fonctionner selon plusieurs modes et chaque mode définit un ensemble de produits à fabriquer. En plus de cet aspect nos travaux de recherche ont considéré une autre caractéristique de la production à flux continu. Ainsi, nous considérons des ressources de production avec des débits maximaux, des débits minimums, et des restrictions sur les produits pouvant être produit dans chaque usine selon le mode sélectionné. Plus encore, la production minière étant fortement gourmande en ressources capitalistiques, la modélisation retenue maximise le taux d'utilisation des ressources. Ce dernier point a un objectif double, d'un côté il permet de minimiser les arrêts de production

pour éviter les temps de démarrage très important pour ces lourdes installations de production. De l'autre côté il permet d'avoir un flux de production continu dans le réseau de production global, facilitant la coordination des activités. Soulignons à cette étape que cette modélisation des ressources de production est généralisable à d'autres contextes industriels caractérisés par un flux continu et/ou des installations lourdes, par exemple : la métallurgie, d'autres domaines de l'industrie minière, l'industrie de process (en général), et quelques types d'industrie chimique...

La configuration du réseau de production considère également un autre aspect très important quand il s'agit de la planification de la production dans les réseaux logistiques, c'est la nomenclature des produits dans les unités de production. Nous avons considéré dans chaque unité de production, l'explosion des produits fabriqués en des quantités de matières premières et/ou produits intermédiaires à fournir à chaque période. Ces besoins en matières premières sont ensuite progressivement propagés dans le réseau logistique de l'aval vers l'amont jusqu'au premier niveau de production pour enfin calculer les besoins en matières premières pour l'ensemble du réseau, pour chaque période. Dans notre cas les minerais sources, qui sont nos matières premières, sont directement acheminés depuis les mines. Remarquons également que nous avons considéré des capacités maximales de minerais pouvant être extraites dans chaque période. Cet aspect représente une ébauche non négligeable permettant un large champ d'applications, notamment pour définir et calculer la MRP ou le plan d'approvisionnement des matières premières et en réalisant des couplages en amont avec d'autres modes et moyens de transport (camions possédés en propre, prestataires logistiques...)

Le système de stockage, quant à lui, est également un élément original de nos travaux de recherche pouvant être implanté dans d'autres contextes industriels. En effet, les stocks considérés sont sous la forme de tas mono-produits. L'alimentation et le prélèvement des produits à partir de ces stocks est réalisé en flux continus. Les stocks sont de capacités limitées. Le stockage de plusieurs produits dans la même période requiert une distance de sécurité entre les tas pour éviter leur contamination croisée, réduisant la capacité globale de stock. A cette contrainte spatiale s'ajoute une contrainte temporelle de temps de séjour de stockage pour la stabilisation des caractéristiques physico-chimiques de certains produits ; dans ce cas, le processus de stockage devient une étape amenant de la valeur ajoutée au produit, et fait donc partie de la « recette » de fabrication du produit.

2. Proposition d'une approche intégrée de planification

Au-delà de la réalisation de méthodes et d'outils permettant de proposer une approche aidant à améliorer le fonctionnement de la Supply Chain de l'OCP, les activités de recherche réalisées dans le cadre de ce doctorat ont permis d'aboutir à la réalisation d'un environnement de planification intégrée couvrant les différents maillons de la création de la valeur dans la chaîne logistique. Plus précisément, il s'agit de considérer la majorité des décisions relatives à la planification opérationnelle du flux physique, à savoir, la production, le stockage et le transport. A travers ces éléments, nous pouvons donc noter que ces travaux de recherche s'inscrivent dans le cadre du *Supply Chain Management* (SCM) et précisément dans une démarche d'optimisation globale des décisions. En effet, dans une chaîne logistique interconnectée, la propagation des décisions prises dans un point donné de la chaîne en amont et en aval dans celle-ci est un élément indéniablement important quand il s'agit de planification logistique. Le recours à l'approche globale montre ici un intérêt de ce point de vue puisqu'elle permet une bonne intégration des sous-systèmes de la chaîne logistique et une meilleure prise en compte de la propagation des décisions dans celle-ci.

Comme illustré dans la Figure 9, cette étude considère un réseau d'entités inter-reliées par des moyens de transport permettant ainsi un transfert de charge entre ces différents sous-systèmes. Ces entités sont approvisionnées en minerais à partir de nœuds sources, et le produit fini est transporté par trains aux stocks finaux. Le système étudié couvre donc les différents maillons du système logistique depuis l'extraction dans les mines jusqu'au transport du produit fini. A ceci s'ajoute la prise en compte simultanée des contraintes et paramètres interprocessus régissant les sous-systèmes entre eux. Un des avantages majeurs de l'approche d'optimisation intégrée consiste donc en la mutualisation des ressources dans le réseau logistique ce qui permet une nette amélioration de la performance globale du système industriel. Elle permet également une meilleure négociation des contraintes entre les différents sous-systèmes.

En guise de conclusion, rappelons que l'approche de planification intégrée permet, par la prise en compte simultanée de plusieurs maillons de la chaîne logistique et donc la mutualisation des ressources, une nette amélioration de la performance du système global, une minimisation des coûts opérationnels totaux, et une meilleure flexibilité du système industriel. Bien entendu, cette démarche serait facilement extensible à d'autres systèmes logistiques multi-sites.

3. Couplage entre le problème de *lot sizing* et le problème de transport

Aujourd'hui plus que jamais la communauté scientifique est sensibilisée à l'importance du problème de transport et de sa planification comme maillon dont la maîtrise est incontournable pour améliorer la performance de la chaîne logistique. Traditionnellement, ces problèmes de transport et de production sont traités séparément ou bien séquentiellement. Or, la séparation des deux problèmes aboutit généralement à des solutions sous-optimales. Plusieurs facteurs sont à l'origine de cette perte de performance ; nous pouvons citer : (i) les incohérences décisionnelles susceptibles d'avoir lieu à cause de la mauvaise négociation des contraintes entre les deux sous-systèmes, (ii) l'augmentation des coûts totaux, (iii) l'augmentation du *lead time* et une détérioration de la réactivité du système face aux fluctuations de la demande (Fahimnia et al. 2013; Adulyasak, Cordeau, et Jans 2013; Lambert et Cooper 2000).

Ce travail formalise ainsi un couplage entre un problème de *lot sizing* multi-niveaux et un problème de transport avec fenêtre de temps. L'objectif est de synchroniser les deux problèmes afin de proposer un optimum global. Cependant, cette approche peut être étendue dans d'autres contextes afin de coupler le système industriel et le transport. Cet apport est à la fois scientifique et managérial (cf. infra).

4. Une construction d'un nouveau problème de *lot sizing*

Le *lot sizing* est un des problèmes les plus étudiés en planification de la chaîne logistique. Initié par (Wagner et Whitin 1958), sa version initiale a traité une configuration industrielle simple. C'est celle de planifier la production dans une seule usine, avec un seul produit, pour répondre à une demande multi-périodes en minimisant les coûts totaux afférents. Aussi, simple qu'il soit, son champ d'application est très large, et la multitude des recherches effectuées sur le *lot sizing* témoigne de cela. Chaque recherche a bien évidemment enrichi le problème en l'adaptant à un contexte particulier et en rajoutant des extensions au problème initial. Ceci est une des forces majeures de ce problème, qui est doté d'une grande adaptabilité aux différents contextes et structures industriels, et est susceptible de s'associer à la grande majorité des problèmes de planification de la Supply Chain, tels que l'approvisionnement, le transport, le routage...

Par ailleurs, malgré le nombre important de recherche effectuées sur le *lot sizing*, moins d'études ont été menées dans le contexte minier, encore moins concernant l'intégration du

problème de planification multi-sites, multi-niveaux, et du problème de transport ferroviaire avec fenêtres de temps. Les travaux présentés dans cette thèse viennent donc contribuer, à cette carence mentionnée dans le volet de la littérature en proposant une adaptation du problème classique du *lot sizing* au contexte particulier de l'industrie minière.

Le contexte industriel que nous traitons est caractérisé par un environnement de production à flux continu couplé avec un mode de transport à flux discret. Plusieurs caractéristiques font la particularité de ce champs industriel, nous en citons quelques-uns. En effet l'industrie minière est fortement capitalistique puisqu'elle requiert des investissements lourds en termes de ressources logistiques ceci implique donc une planification adaptée qui cherche plutôt à maximiser l'utilisation de ces ressources afin de rentabiliser les investissements entrepris. Une deuxième particularité réside dans la variabilité de la composition chimique du flux physique qui circule dans le système logistique. En effet celle-ci dépend fortement de la composition chimique des minerais extraits depuis les mines, ce qui requiert une flexibilité du système de production et de stockage afin d'adapter continuellement les recettes de production à la composition chimique du minerai en provenance des mines.

Ce récit des spécificités du champ industriel minier que nous avons jugé importantes, justifie notre recours au problème classique du *lot sizing* comme modèle de référence prend toute sa justification puisqu'il permet la prise en compte simultanée de tous ces paramètres.

Implications managériales

L'environnement de planification intégrée proposé offre aux industriels un outil d'aide à la décision leurs permettant un ensemble d'apports managériaux. Ces apports managériaux s'articulent autour des axes suivants :

- Le premier apport est le plus évident, les outils de planification développés offrent une aide à la prise décision. En automatisant le processus de prise de décisions, ils permettent de proposer une solution optimale en tenant compte de l'ensemble des paramètres et contraintes modélisées.
- Les outils développés peuvent également être utilisés pour des fins de simulation, afin d'évaluer différents scenarii logistiques (demandes, coûts, capacités des ressources, fenêtres de temps par rapport aux trains, ...).

Par ailleurs, l'intégration et l'optimisation simultanée des décisions de planification du flux physique permettent d'améliorer la performance et l'efficacité du système logistique. Cette amélioration de la performance est due aux points suivants :

- **Amélioration de la flexibilité des ressources logistiques** en permettant une allocation flexible des produits aux ressources de production et de stockage. En effet, dans un réseau logistique intégré, les ressources sont mutualisées ce qui permet :
 - Une minimisation du coût total opérationnel : Pour chaque période, le modèle choisit parmi l'ensemble des ressources du réseau interconnecté ceux qui minimisent le coût opérationnel associé. Bien entendu, cette gymnastique n'est pas possible dans le cadre d'une configuration rigide de l'allocation des produits aux ressources logistiques.
 - Amélioration de la capacité du système à répondre à la demande : En offrant en chaque période la capacité restante au niveau d'une ressource donnée à la totalité du système logistique, le système de production global dispose ainsi d'une meilleure habilité pour répondre à la demande, surtout quand il s'agit des périodes de hausse de la demande.
- **Meilleure propagation en amont et en aval des décisions prises dans un point donné du système.** En effet, la prise en compte simultanée de l'ensemble des contraintes qui régissent les sous-processus permet de calculer des solutions synchronisées et évite ainsi les incohérences et les conflits susceptibles d'avoir lieu dans le cadre d'une démarche locale de planification.
- **Le couplage de la planification du transport par trains avec celle du système industriel en amont,** permet de maîtriser la contrainte posée par les fenêtres de temps liées au transport ferroviaire. La difficulté posée par cette contrainte réside dans la synchronisation en amont d'un système industriel lourd caractérisé par des temps de démarrage et de changement assez importants, et un transport ferroviaire conditionné par des plages horaires précises dans lesquelles l'acheminement des produits est possible. Cependant, les outils proposés permettent une synchronisation de l'ensemble du système de production et stockage en amont en fonction des fenêtres de temps du train.

Perspectives de recherche

Différentes perspectives d'évolutions de nos travaux de recherche peuvent être envisagées :

- ***L'évaluation économique des solutions proposées.*** En effet, la modélisation proposée optimise hiérarchiquement trois critères dont les deux suivants : maximisation de la satisfaction de la demande, puis ensuite minimisation des coûts opérationnels associés. Il serait donc intéressant d'améliorer ce raisonnement en maximisant la rentabilité des solutions proposées, ce qui implique de chercher plutôt l'équilibre entre le chiffre d'affaires généré et les coûts engendrés. Certes, notre raisonnement actuel repose sur l'hypothèse implicite de la stabilité du prix de vente dans un horizon opérationnel / tactique. Il serait donc intéressant de lever cette hypothèse afin d'évaluer les solutions en fonction de leur rentabilité financière.
- ***Le caractère incertain de la demande.*** Il serait donc intéressant de se pencher sur les fluctuations de la demande (surtout la demande externe qui concerne les produits destinés à l'export) afin de considérer les changements imprévus de cette dernière dans l'horizon de planification tactique.
- ***Le test de nos outils et méthodes dans d'autres contextes ;*** le modèle proposé pourrait être testé dans d'autres domaines et dans d'autres industries, en devenant un outil de planification pour l'industriel ou le transporteur (l'opérateur de train) ; il pourrait être intéressant pour un transporteur de proposer une solution « supply chain intégrée » permettant l'usage de certaines lignes connectées à des ports ou à des industries avec une logique de lot-sizing pour son client ; cette démarche pourrait également prendre en compte une dimension «environnementale » dans l'objectif recherche.

Enfin, nous clôturons ce manuscrit en ouvrant le débat par les questions suivantes :

- Au-delà des flux physiques, à quelles autres composantes organisationnelles pourrait-on étendre l'approche de management intégrée ?
- Quelles sont les risques organisationnels et managériaux liés à l'intégration des décisions dans les organisations ? Autrement, jusqu'à quel niveau / limite peut-on intégrer les entités internes et externes de l'entreprise ?

BIBLIOGRAPHIE

- Absi, Nabil. 2005. « Modélisation et résolution de problèmes de lot-sizing à capacité finie ». Paris 6.
- Absi, Nabil, et Wilco van den Heuvel. 2019. « Worst Case Analysis of Relax and Fix Heuristics for Lot-Sizing Problems ». *European Journal of Operational Research* 279 (2): 449-58. doi:10.1016/j.ejor.2019.06.010.
- Absi, Nabil, et Safia Kedad-Sidhoum. 2007. « MIP-Based Heuristics for Multi-Item Capacitated Lot-Sizing Problem with Setup Times and Shortage Costs ». *RAIRO - Operations Research* 41 (2). EDP Sciences: 171-92. doi:10.1051/ro:2007014.
- Adulyasak, Yossiri, Jean-François Cordeau, et Raf Jans. 2013. « Formulations and branch-and-cut algorithms for multivehicle production and inventory routing problems ». *INFORMS Journal on Computing* 26 (1): 103-20.
- . 2014. « Optimization-based adaptive large neighborhood search for the production routing problem ». *Transportation Science* 48 (1): 20-45.
- . 2015. « The production routing problem: A review of formulations and solution algorithms ». *Computers & Operations Research* 55. Elsevier: 141-52.
- Andersson, Henrik, Arild Hoff, Marielle Christiansen, Geir Hasle, et Arne Løkketangen. 2010. « Industrial Aspects and Literature Survey: Combined Inventory Management and Routing ». *Computers & Operations Research* 37 (9): 1515-36. doi:10.1016/j.cor.2009.11.009.
- Aouam, Tarik, Kobe Geryl, Kunal Kumar, et Nadjib Brahimi. 2018. « Production Planning with Order Acceptance and Demand Uncertainty ». *Computers & Operations Research* 91 (mars): 145-59. doi:10.1016/j.cor.2017.11.013.
- Arshinder, Kaur, Arun Kanda, et S. G. Deshmukh. 2011. « A review on supply chain coordination: coordination mechanisms, managing uncertainty and research directions ». In *Supply chain coordination under uncertainty*, 39-82. Springer.
- Azzamouri, Ahlam. 2018. « Construction de méthodes et d'outils de planification pour l'industrie minière du phosphate en contexte de Lean Management ». Thèse de doctorat, Paris 10. <https://www.theses.fr/2018PA100125>.
- Bara, Najat. 2020. « Modèles d'aide à la décision en supply chain : management et valorisation économique : principes méthodologiques et applications ». Thèse de doctorat, Paris 1. <http://www.theses.fr/2020PA01E028>.
- Bell, Walter J., Louis M. Dalberto, Marshall L. Fisher, Arnold J. Greenfield, R. Jaikumar, Pradeep Kedia, Robert G. Mack, et Paul J. Prutzman. 1983. « Improving the Distribution of Industrial Gases with an On-Line Computerized Routing and Scheduling Optimizer ». *INFORMS Journal on Applied Analytics* 13 (6). INFORMS: 4-23. doi:10.1287/inte.13.6.4.
- Bellman, R. 1957. « Dynamic programming: Princeton univ. press ». N°J 95.

- Belvaux, Gaetan, et Laurence A. Wolsey. 2000. « Bc—prod: a specialized branch-and-cut system for lot-sizing problems ». *Management Science* 46 (5): 724-38.
- . 2001. « Modelling practical lot-sizing problems as mixed-integer programs ». *Management Science* 47 (7): 993-1007.
- Billington, Peter J., John O. McClain, et L. Joseph Thomas. 1983. « Mathematical programming approaches to capacity-constrained MRP systems: Review, formulation and problem reduction ». *Management Science* 29 (10): 1126-41.
- Bitran, Gabriel R., et Devanath Tirupati. 1993. « Hierarchical production planning ». *Handbooks in operations research and management science* 4: 523-68.
- Bitran, Gabriel R., et Horacio H. Yanasse. 1982. « Computational complexity of the capacitated lot size problem ». *Management Science* 28 (10): 1174-86.
- Brahimi, Nadjib. 2004. « Planification de la production: modèles et algorithmes pour les problèmes de dimensionnement de lots ». PhD Thesis, Nantes.
- Brahimi, Nadjib, Nabil Absi, Stéphane Dauzère-Pérès, et Atle Nordli. 2017. « Single-Item Dynamic Lot-Sizing Problems: An Updated Survey ». *European Journal of Operational Research* 263 (3): 838-63. doi:10.1016/j.ejor.2017.05.008.
- Brahimi, Nadjib, Stéphane Dauzere-Peres, Najib M. Najid, et Atle Nordli. 2006. « Single item lot sizing problems ». *European Journal of Operational Research* 168 (1): 1-16. doi:10.1016/j.ejor.2004.01.054.
- Bréchet, J. P., et A. Desreumaux. 1998. « Le thème de la valeur en Sciences de Gestion. Transversalité, ambiguïté et enjeux ». *Actes des XIV^{ème} journées nationales des LAE, Nantes*, 7-12.
- Bushuev, Maxim A., Alfred Guiffrida, M. Y. Jaber, et Mehmood Khan. 2015. « A review of inventory lot sizing review papers ». *Management Research Review* 38 (3): 283-98.
- Campbell, Ann, Lloyd Clarke, Anton Kleywegt, et Martin Savelsbergh. 1998. « The Inventory Routing Problem ». In *Fleet Management and Logistics*, édité par Teodor Gabriel Crainic et Gilbert Laporte, 95-113. Centre for Research on Transportation. Boston, MA: Springer US. doi:10.1007/978-1-4615-5755-5_4.
- Chanal, Valérie, Humbert Lesca, et Alain Charles Martinet. 1997. « Recherche ingénierique et connaissances procédurales en sciences de gestion: réflexions épistémologiques et méthodologiques ». *Revue française de gestion* 116: 41-51.
- Chand, Suresh, Vernon Ning Hsu, Suresh Sethi, et Vinayak Deshpande. 2007. « A dynamic lot sizing problem with multiple customers: customer-specific shipping and backlogging costs ». *IIE Transactions* 39 (11). Taylor & Francis: 1059-69. doi:10.1080/07408170601089497.
- Chen, Haoxun. 2015. « Fix-and-Optimize and Variable Neighborhood Search Approaches for Multi-Level Capacitated Lot Sizing Problems ». *Omega* 56 (octobre): 25-36. doi:10.1016/j.omega.2015.03.002.

- Chen, Zhi-Long. 2004. « Integrated Production and Distribution Operations ». In *Handbook of Quantitative Supply Chain Analysis: Modeling in the E-Business Era*, édité par David Simchi-Levi, S. David Wu, et Zuo-Jun Shen, 711-45. International Series in Operations Research & Management Science. Boston, MA: Springer US. doi:10.1007/978-1-4020-7953-5_17.
- Clark, A.R., et S.J. Clark. 2000. « Rolling-horizon lot-sizing when set-up times are sequence-dependent ». *International Journal of Production Research* 38 (10): 2287-2307. doi:10.1080/00207540050028106.
- Clark, Guest Editors Alistair, Bernardo Almada-Lobo, et Christian Almeder. 2011. « Lot sizing and scheduling: industrial extensions and research opportunities ». *International Journal of Production Research* 49 (9): 2457-61. doi:10.1080/00207543.2010.532908.
- Cohen, Morris A., et Hau L. Lee. 1988. « Strategic Analysis of Integrated Production-Distribution Systems: Models and Methods ». *Operations Research* 36 (2). INFORMS: 216-28. doi:10.1287/opre.36.2.216.
- Crama, Yves, Yves Pochet, et Yannic Wera. 2001. « A discussion of production planning approaches in the process industry ».
- Dauzère-Pérès, S., N. Brahimi, N. Najid, et A. Nordli. 2002. « The single-item lot sizing problem with time windows ». *Technical Report, 02/4/AUTO*.
- Díaz-Madroño, Manuel, David Peidro, et Josefa Mula. 2015. « A review of tactical optimization models for integrated production and transport routing planning decisions ». *Computers & Industrial Engineering* 88: 518-35.
- Drexl, A., et A. Kimms. 1997. « Lot sizing and scheduling — Survey and extensions ». *European Journal of Operational Research* 99 (2): 221-35. doi:10.1016/S0377-2217(97)00030-1.
- Drexl, Andreas, et Knut Haase. 1995. « Proportional lotsizing and scheduling ». *International Journal of Production Economics* 40 (1). Elsevier: 73-87.
- Elmaghraby, Salah E. 1978. « The economic lot scheduling problem (ELSP): review and extensions ». *Management Science* 24 (6). INFORMS: 587-98.
- Erengüç, Ş Selçuk, Natalie C. Simpson, et Asoo J. Vakharia. 1999. « Integrated production/distribution planning in supply chains: An invited review ». *European journal of operational research* 115 (2): 219-36.
- Fahimnia, Behnam, Reza Zanjirani Farahani, Romeo Marian, et Lee Luong. 2013. « A review and critique on integrated production–distribution planning models and techniques ». *Journal of Manufacturing Systems* 32 (1): 1-19.
- Fawcett, Stanley E., et Gregory M. Magnan. 2002. « The rhetoric and reality of supply chain integration ». *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 32 (5). MCB UP Ltd: 339-61. doi:10.1108/09600030210436222.
- Federgruen, Awi, et Michal Tzur. 1999. « Time-partitioning heuristics: Application to one warehouse, multiitem, multiretailer lot-sizing problems ». *Naval Research Logistics (NRL)* 46 (5): 463-86.

- Fenies, P., M. Gourgand, et N. Tchernev. 2004. « A framework for supply chain performance evaluation ». In *Congresso Internacional de pesquisa em logistica*, 87:1-12.
- Féniès, Pierre. 2006. « Une méthodologie de modélisation par processus multiples et incrémentiels: application pour l'évaluation des performances de la Supply Chain ». PhD Thesis.
- Fenies, Pierre, Samuel Lagrange, et Nikolay Tchernev. 2010. « A decisional modelling for supply chain management in franchised networks: application in franchise bakery networks ». *Production Planning & Control* 21 (6). Taylor & Francis: 595-608.
- Fenies, Pierre, et Nikolay Tchernev. 2012. « From advanced planning system to advanced budgeting system: the next step in supply chain management software ». *Pathways to Supply Chain Excellence*. BoD—Books on Demand, 1.
- Ferreira, Deisemara, Reinaldo Morabito, et Socorro Rangel. 2010. « Relax and Fix Heuristics to Solve One-Stage One-Machine Lot-Scheduling Models for Small-Scale Soft Drink Plants ». *Computers & Operations Research* 37 (4): 684-91. doi:10.1016/j.cor.2009.06.007.
- Fleischhacker, Adam J., et Yao Zhao. 2011. « Planning for Demand Failure: A Dynamic Lot Size Model for Clinical Trial Supply Chains ». *European Journal of Operational Research* 211 (3): 496-506. doi:10.1016/j.ejor.2011.01.004.
- Fleischmann, Bernhard, et Herbert Meyr. 1997. « The General Lotsizing and Scheduling Problem ». *Operations-Research-Spektrum* 19 (1): 11-21. doi:10.1007/BF01539800.
- Florian, Michael, Jan Karel Lenstra, et A. H. G. Rinnooy Kan. 1980. « Deterministic production planning: Algorithms and complexity ». *Management science* 26 (7): 669-79.
- Friedman, Moshe, et Jeffrey L. Winter. 1978. « A Study of the Infinite Horizon 'Solution' of Inventory Lot Size Models with a Linear Demand Function ». *Computers & Operations Research* 5 (2): 157-60. doi:10.1016/0305-0548(78)90009-6.
- Gelders, Ludo F., Johan Maes, et Luk N. van Wassenhove. 1986. « A branch and bound algorithm for the multi item single level capacitated dynamic lotsizing problem ». In *Multi-stage production planning and inventory control*, 92-108. Springer.
- Giard, Vincent. 2003. *Gestion de la production et des flux*. Economica Paris.
- Gilbert, Patrick, Nathalie Raulet-Croset, et Ann-Charlotte Teglborg. 2018. « Étudier un courant managérial émergent: quelle démarche de recherche? » *Recherches qualitatives* 37 (1). Association pour la recherche qualitative (ARQ): 96-116.
- Glock, Christoph H., Eric H. Grosse, et Jörg M. Ries. 2014. « The Lot Sizing Problem: A Tertiary Study ». *International Journal of Production Economics*, Celebrating a century of the economic order quantity model, 155 (septembre): 39-51. doi:10.1016/j.ijpe.2013.12.009.

- Goetschalckx, Marc, Carlos J. Vidal, et Koray Dogan. 2002. « Modeling and Design of Global Logistics Systems: A Review of Integrated Strategic and Tactical Models and Design Algorithms ». *European Journal of Operational Research* 143 (1): 1-18. doi:10.1016/S0377-2217(02)00142-X.
- Golany, Boaz, Jian Yang, et Gang Yu. 2001. « Economic lot-sizing with remanufacturing options ». *Iie Transactions* 33 (11): 995-1004.
- Gourgand, M., et N. Tchernev. 1998. « Un environnement de modélisation du processus logistique industriel ». *Paru dans les actes des deuxième rencontres internationales de "La recherche en logistique"*. Parutions par Nathalie Fabbe-Costes, Christine Roussat, 539-57.
- Güner Gören, Hacer, et Semra Tunali. 2018. « Fix-and-optimize heuristics for capacitated lot sizing with setup carryover and backordering ». *Journal of Enterprise Information Management* 31 (6). Emerald Publishing Limited: 879-90. doi:10.1108/JEIM-01-2017-0017.
- Hakeem-Ur-Rehman, Guohua Wan, et Yang Zhan. 2019. « Multi-Level, Multi-Stage Lot-Sizing and Scheduling in the Flexible Flow Shop with Demand Information Updating ». *International Transactions in Operational Research* 00 (2019): 1-27. doi:10.1111/itor.12645.
- Harris, F. 1913. « How many parts to make at once. Factory, The Magazine of Management 10 ». *Operations research and management science handbook*, CRC press.
- Herer, Yale T., et Michal Tzur. 2001. « The Dynamic Transshipment Problem ». *Naval Research Logistics (NRL)* 48 (5): 386-408. doi:10.1002/nav.1025.
- Heuts, R. M. J., H. P. Seidel, et W. J. Selen. 1992. « A Comparison of Two Lot Sizing-Sequencing Heuristics for the Process Industry ». *European Journal of Operational Research* 59 (3): 413-24. doi:10.1016/0377-2217(92)90198-I.
- Hindi, K. S. 1995. « Computationally efficient solution of the multi-item, capacitated lot-sizing problem ». *Computers & industrial engineering* 28 (4). Elsevier: 709-19.
- Hsu, Vernon Ning. 2000. « Dynamic Economic Lot Size Model with Perishable Inventory ». *Management Science* 46 (8). INFORMS: 1159-69. doi:10.1287/mnsc.46.8.1159.12021.
- James, Ross J. W., et Bernardo Almada-Lobo. 2011. « Single and Parallel Machine Capacitated Lotsizing and Scheduling: New Iterative MIP-Based Neighborhood Search Heuristics ». *Computers & Operations Research* 38 (12): 1816-25. doi:10.1016/j.cor.2011.02.005.
- Jans, Raf, et Zeger Degraeve. 2008a. « Modeling industrial lot sizing problems: a review ». *International Journal of Production Research* 46 (6): 1619-43.
- . 2008b. « Modeling industrial lot sizing problems: a review ». *International Journal of Production Research* 46 (6): 1619-43. doi:10.1080/00207540600902262.
- Jaruphongsa, Wikrom, Sila Çetinkaya, et Chung-Yee Lee. 2007. « Outbound Shipment Mode Considerations for Integrated Inventory and Delivery Lot-Sizing Decisions ». *Operations Research Letters* 35 (6): 813-22. doi:10.1016/j.orl.2007.02.009.

- Jaruphongsa, Wikrom, et Chung-Yee Lee. 2008. « Dynamic lot-sizing problem with demand time windows and container-based transportation cost ». *Optimization Letters* 2 (1). Springer: 39-51.
- Jasinski, Stephen M. 2013. « Mineral resource of the month: Phosphate rock ». *Earth*. <http://pubs.er.usgs.gov/publication/70186702>.
- Kanda, Arun, et S. G. Deshmukh. 2008. « Supply chain coordination: perspectives, empirical studies and research directions ». *International journal of production Economics* 115 (2): 316-35.
- Karimi, Behrooz, SMT Fatemi Ghomi, et J. M. Wilson. 2003. « The capacitated lot sizing problem: a review of models and algorithms ». *Omega* 31 (5): 365-78.
- Karmarkar, Uday S., Sham Kekre, et Sunder Kekre. 1987. « The Dynamic Lot-Sizing Problem with Startup and Reservation Costs ». *Operations Research* 35 (3). INFORMS: 389-98. doi:10.1287/opre.35.3.389.
- Kelly, Jeffrey D, et John L Mann. 2004. « Flowsheet Decomposition Heuristic for Scheduling: A Relax-and-Fix Method ». *Computers & Chemical Engineering* 28 (11): 2193-2200. doi:10.1016/j.compchemeng.2004.03.009.
- Kirschstein, Thomas, et Frank Meisel. 2019. « A Multi-Period Multi-Commodity Lot-Sizing Problem with Supplier Selection, Storage Selection and Discounts for the Process Industry ». *European Journal of Operational Research* 279 (2): 393-406. doi:10.1016/j.ejor.2019.05.039.
- Klose, Andreas, et Andreas Drexel. 2005. « Facility Location Models for Distribution System Design ». *European Journal of Operational Research, Logistics: From Theory to Application*, 162 (1): 4-29. doi:10.1016/j.ejor.2003.10.031.
- Kolb, François. 1972. *La Logistique : approvisionnement, production, distribution*. Paris: Entreprise Moderne d'Édition.
- Krajewski, Lee J., et Larry P. Ritzman. 2001. *Operations management: strategy and analysis*. Pearson College Division.
- Kuik, Roelof, Marc Salomon, et Luk N. Van Wassenhove. 1994. « Batching decisions: structure and models ». *European journal of operational research* 75 (2): 243-63.
- Lambert, Douglas M., et Martha C. Cooper. 2000. « Issues in supply chain management ». *Industrial marketing management* 29 (1): 65-83.
- Lang, Jan Christian, et Zuo-Jun Max Shen. 2011. « Fix-and-Optimize Heuristics for Capacitated Lot-Sizing with Sequence-Dependent Setups and Substitutions ». *European Journal of Operational Research* 214 (3): 595-605. doi:10.1016/j.ejor.2011.05.014.
- Le Moigne, Jean-Louis. 1991. « Jean-Louis Le Moigne, La modélisation des systèmes complexes, 1990 ». *Droit et Société* 19 (1). Persée - Portail des revues scientifiques en SHS: 424-424.
- Lee, Chung-Yee, Sila Çetinkaya, et Albert P. M. Wagelmans. 2001. « A Dynamic Lot-Sizing Model with Demand Time Windows ». *Management Science* 47 (10): 1384-95. doi:10.1287/mnsc.47.10.1384.

- Lee, Woon-Seek, Jong-Han Han, et Sung-Jin Cho. 2005. « A Heuristic Algorithm for a Multi-Product Dynamic Lot-Sizing and Shipping Problem ». *International Journal of Production Economics*, Production Research: Facing the Challenges in the New Millennium, 98 (2): 204-14. doi:10.1016/j.ijpe.2004.05.025.
- Leung, Janny M. Y., Thomas L. Magnanti, et Rita Vachani. 1989. « Facets and Algorithms for Capacitated Lot Sizing ». *Mathematical Programming* 45 (1): 331-59. doi:10.1007/BF01589110.
- Lewin, Kurt. 1946. « Action Research and Minority Problems ». *Journal of Social Issues* 2 (4): 34-46. doi:https://doi.org/10.1111/j.1540-4560.1946.tb02295.x.
- . 1947. « Frontiers in group dynamics: II. Channels of group life; social planning and action research ». *Human relations* 1 (2). Tavistock Publications Ltd. 2 Beaumont Street, London, W. 1: 143-53.
- Li, Chung-Lun, Vernon Ning Hsu, et Wen-Qiang Xiao. 2004. « Dynamic Lot Sizing with Batch Ordering and Truckload Discounts ». *Operations Research*, août. INFORMS. doi:10.1287/opre.1040.0121.
- Lu, Zhiqiang. 2003. « Planification hiérarchisée et optimisation des systèmes logistiques avec flux inverses ». Nantes.
- Maes, Johan, John O. McClain, et Luk N. Van Wassenhove. 1991. « Multilevel capacitated lotsizing complexity and LP-based heuristics ». *European Journal of Operational Research* 53 (2): 131-48.
- Manne, Alan S. 1958. « Programming of Economic Lot Sizes ». *Management Science* 4 (2): 115-35. doi:10.1287/mnsc.4.2.115.
- Martinet, A. C. 1996. « Préface dans Les stratégies de coopération industrielle, Aliouat B ». *Economica, Paris*.
- Mehahad, Mohamed Said, et Abdelhadi Bounar. 2020. « Phosphate Mining, Corporate Social Responsibility and Community Development in the Gantour Basin, Morocco ». *The Extractive Industries and Society* 7 (1): 170-80. doi:10.1016/j.exis.2019.11.016.
- Meixell, Mary J., et Vidyananya B. Gargeya. 2005. « Global Supply Chain Design: A Literature Review and Critique ». *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Global Logistics, 41 (6): 531-50. doi:10.1016/j.tre.2005.06.003.
- Mercé, C., et G. Fontan. 2003. « MIP-Based Heuristics for Capacitated Lotsizing Problems ». *International Journal of Production Economics*, Planning and Control of Productive Systems, 85 (1): 97-111. doi:10.1016/S0925-5273(03)00090-2.
- Mercé, C., H. Hétreux, et G. Fontan. 1997. *Aggregate and Detailed Planning, volume Concept et Outils pour les Systèmes de Production of Automatisation-Production, chapter 2*. Cépadués-Éditions.
- Min, Hokey, et Gengui Zhou. 2002. « Supply chain modeling: past, present and future ». *Computers & Industrial Engineering* 43 (1): 231-49. doi:10.1016/S0360-8352(02)00066-9.

- Mohammadi, M., S. M. T. Fatemi Ghomi, B. Karimi, et S. A. Torabi. 2010. « MIP-based heuristics for lotsizing in capacitated pure flow shop with sequence-dependent setups ». *International Journal of Production Research* 48 (10). Taylor & Francis: 2957-73. doi:10.1080/00207540902796016.
- Moin, N H, et S Salhi. 2007. « Inventory routing problems: a logistical overview ». *Journal of the Operational Research Society* 58 (9). Taylor & Francis: 1185-94. doi:10.1057/palgrave.jors.2602264.
- Norden, Linda van, et Steef van de Velde. 2005. « Multi-Product Lot-Sizing with a Transportation Capacity Reservation Contract ». *European Journal of Operational Research* 165 (1): 127-38. doi:10.1016/j.ejor.2003.04.008.
- « OCP sustainability report 2019 ». 2020. Consulté le août 11. https://corpo.ocpgroup.ma/sites/default/files/2020-07/Rapport_2020_EN_Certifiee.pdf.
- Oliveira, Beatriz Brito, Maria Antónia Carravilla, José Fernando Oliveira, et Franklina M. B. Toledo. 2014. « A Relax-and-Fix-Based Algorithm for the Vehicle-Reservation Assignment Problem in a Car Rental Company ». *European Journal of Operational Research* 237 (2): 729-37. doi:10.1016/j.ejor.2014.02.018.
- Paquay, Célia, Sabine Limbourg, Michaël Schyns, et José Fernando Oliveira. 2018. « MIP-based constructive heuristics for the three-dimensional Bin Packing Problem with transportation constraints ». *International Journal of Production Research* 56 (4). Taylor & Francis: 1581-92. doi:10.1080/00207543.2017.1355577.
- Park, Byung Joo, Hyung Rim Choi, et Moo Hong Kang. 2007. « Integration of production and distribution planning using a genetic algorithm in supply chain management ». In *Analysis and design of intelligent systems using soft computing techniques*, 416-26. Springer.
- « Planetoscope - Statistiques : Production mondiale de phosphates ». 2020. <https://www.planetoscope.com/matieres-premieres/527-production-mondiale-de-phosphates.html>.
- Pochet, Yves. 2001. « Mathematical Programming Models and Formulations for Deterministic Production Planning Problems ». In *Computational Combinatorial Optimization: Optimal or Provably Near-Optimal Solutions*, édité par Michael Jünger et Denis Naddef, 57-111. Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer. doi:10.1007/3-540-45586-8_3.
- Pochet, Yves, et Mathieu Van Vyve. 2004. « A General Heuristic for Production Planning Problems ». *INFORMS Journal on Computing* 16 (3). INFORMS: 316-27. doi:10.1287/ijoc.1030.0042.
- Pochet, Yves, et Laurence A. Wolsey. 1991. « Solving multi-item lot-sizing problems using strong cutting planes ». *Management Science* 37 (1). INFORMS: 53-67.
- Prud'Homme, Michel. 2010. « World phosphate rock flows, losses and uses ». In *International Fertilizer Industry Association, Phosphates 2010 International Conference*, 22-24.

- Ramezani, Reza, et Mohammad Saidi-Mehrabad. 2013. « Hybrid Simulated Annealing and MIP-Based Heuristics for Stochastic Lot-Sizing and Scheduling Problem in Capacitated Multi-Stage Production System ». *Applied Mathematical Modelling* 37 (7): 5134-47. doi:10.1016/j.apm.2012.10.024.
- Ramezani, Reza, Mohammad Saidi-Mehrabad, et Parviz Fattahi. 2013. « MIP Formulation and Heuristics for Multi-Stage Capacitated Lot-Sizing and Scheduling Problem with Availability Constraints ». *Journal of Manufacturing Systems* 32 (2): 392-401. doi:10.1016/j.jmsy.2013.01.002.
- Retmi, Kawtar. 2018. « Une approche pour une évaluation économique des décisions opérationnelles et tactiques : mise en œuvre sur la Supply chain de l'OCP ». Thèse de doctorat, Paris 10. <http://www.theses.fr/2018PA100165>.
- Ríos-Solís, Yasmín Á, Omar J. Ibarra-Rojas, Marta Cabo, et Edgar Possani. 2020. « A Heuristic Based on Mathematical Programming for a Lot-Sizing and Scheduling Problem in Mold-Injection Production ». *European Journal of Operational Research* 284 (3): 861-73. doi:10.1016/j.ejor.2020.01.016.
- Rizk, Nafee, Alain Martel, et Amar Ramudhin. 2006. « A Lagrangean Relaxation Algorithm for Multi-Item Lot-Sizing Problems with Joint Piecewise Linear Resource Costs ». *International Journal of Production Economics* 102 (2): 344-57. doi:10.1016/j.ijpe.2005.02.015.
- Rodoplu, Melek, Taha Arbaoui, et Alice Yalaoui. 2019. « A fix-and-relax heuristic for the single-item lot-sizing problem with a flow-shop system and energy constraints ». *International Journal of Production Research*. Taylor & Francis, 1-21.
- Rogers, Jack. 1958. « A computational approach to the economic lot scheduling problem ». *Management science* 4 (3). INFORMS: 264-91.
- Sambasivan, Murali, et Salleh Yahya. 2005. « A Lagrangean-Based Heuristic for Multi-Plant, Multi-Item, Multi-Period Capacitated Lot-Sizing Problems with Inter-Plant Transfers ». *Computers & Operations Research* 32 (3): 537-55. doi:10.1016/j.cor.2003.08.002.
- Santos, Maristela Oliveira, et Bernardo Almada-Lobo. 2012. « Integrated Pulp and Paper Mill Planning and Scheduling ». *Computers & Industrial Engineering* 63 (1): 1-12. doi:10.1016/j.cie.2012.01.008.
- Scholz, Roland W., Andrea E. Ulrich, Marjatta Eilittä, et Amit Roy. 2013. « Sustainable Use of Phosphorus: A Finite Resource ». *Science of The Total Environment* 461-462 (septembre): 799-803. doi:10.1016/j.scitotenv.2013.05.043.
- Schröder, J. J., A. L. Smit, D. Cordell, et Arno Rosemarin. 2011. « Improved phosphorus use efficiency in agriculture: a key requirement for its sustainable use ». *Chemosphere* 84 (6). Elsevier: 822-31.
- Smith-Daniels, V. L., et Larry P. Ritzman. 1988. « A model for lot sizing and sequencing in process industries ». *International Journal of Production Research* 26 (4). Taylor & Francis: 647-74. doi:10.1080/00207548808947890.

- Solyalı, Oğuz, et Haldun Süral. 2012. « The One-Warehouse Multi-Retailer Problem: Reformulation, Classification, and Computational Results ». *Annals of Operations Research* 196 (1): 517-41. doi:10.1007/s10479-011-1022-0.
- Sox, Charles R., et Yubo Gao. 1999. « The capacitated lot sizing problem with setup carry-over ». *He transactions* 31 (2). Springer: 173-81.
- Stadtler, Hartmut. 2005. « Supply chain management and advanced planning—basics, overview and challenges ». *European journal of operational research* 163 (3): 575-88.
- Tarim, S. Armagan, et Brian G Kingsman. 2004. « The Stochastic Dynamic Production/Inventory Lot-Sizing Problem with Service-Level Constraints ». *International Journal of Production Economics* 88 (1): 105-19. doi:10.1016/S0925-5273(03)00182-8.
- Tchernev, Nikolay. 1997. « Modélisation du processus logistique dans les systèmes flexibles de production ». PhD Thesis, Clermont-Ferrand 2.
- Tempelmeier, Horst, et Karina Copil. 2016. « Capacitated Lot Sizing with Parallel Machines, Sequence-Dependent Setups, and a Common Setup Operator ». *OR Spectrum* 38 (4): 819-47. doi:10.1007/s00291-015-0410-2.
- Timpe, Christian H., et Josef Kallrath. 2000. « Optimal planning in large multi-site production networks ». *European Journal of Operational Research* 126 (2): 422-35.
- Torres, Alex J. Ruiz, Pedro I. Santiago, et Wenming Chung. 2010. « The Campaign and Lot Size Scheduling Problem: A Modification of the Economic Lot Scheduling Problem for the Pharmaceutical Industry ». *International Journal of Logistics Systems and Management* 7 (2): 184. doi:10.1504/IJLSM.2010.034425.
- USGS. 2021. « Phosphate Rock Statistics and Information ». <https://www.usgs.gov/centers/nmic/phosphate-rock-statistics-and-information>.
- Vidal, Carlos J., et Marc Goetschalckx. 1997. « Strategic Production-Distribution Models: A Critical Review with Emphasis on Global Supply Chain Models ». *European Journal of Operational Research* 98 (1): 1-18. doi:10.1016/S0377-2217(97)80080-X.
- Wagner, Harvey M., et Thomson M. Whitin. 1958a. « Dynamic version of the economic lot size model ». *Management science* 5 (1): 89-96.
- . 1958b. « Dynamic version of the economic lot size model ». *Management science* 5 (1): 89-96.
- Witt, Andreas, et Stefan Voss. 2010. « Application of a Mathematical Model to an Intermediate- to Long-Term Real-World Steel Production Planning Problem Based on Standard Software ». *European Journal of Industrial Engineering*, décembre. Inderscience Publishers. <https://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/EJIE.2011.037227>.
- Wolsey, Laurence A. 1998. *Integer programming*. Vol. 42. Wiley Online Library.
- Wörbelauer, Martin, Herbert Meyr, et Bernardo Almada-Lobo. 2019. « Simultaneous lotsizing and scheduling considering secondary resources: a general model,

literature review and classification ». *Or Spectrum* 41 (1). Springer: 1-43.

Wu, Tao, Leyuan Shi, et Jie Song. 2012. « An MIP-Based Interval Heuristic for the Capacitated Multi-Level Lot-Sizing Problem with Setup Times ». *Annals of Operations Research* 196 (1): 635-50. doi:10.1007/s10479-011-1026-9.

Xiao, Jing, Canrong Zhang, Li Zheng, et Jatinder N. D. Gupta. 2013. « MIP-based fix-and-optimize algorithms for the parallel machine capacitated lot-sizing and scheduling problem ». *International Journal of Production Research* 51 (16). Taylor & Francis: 5011-28. doi:10.1080/00207543.2013.790570.

Zangwill, Willard I. 1969. « A backlogging model and a multi-echelon model of a dynamic economic lot size production system—a network approach ». *Management Science* 15 (9). INFORMS: 506-27.

WEBGRAPHIE

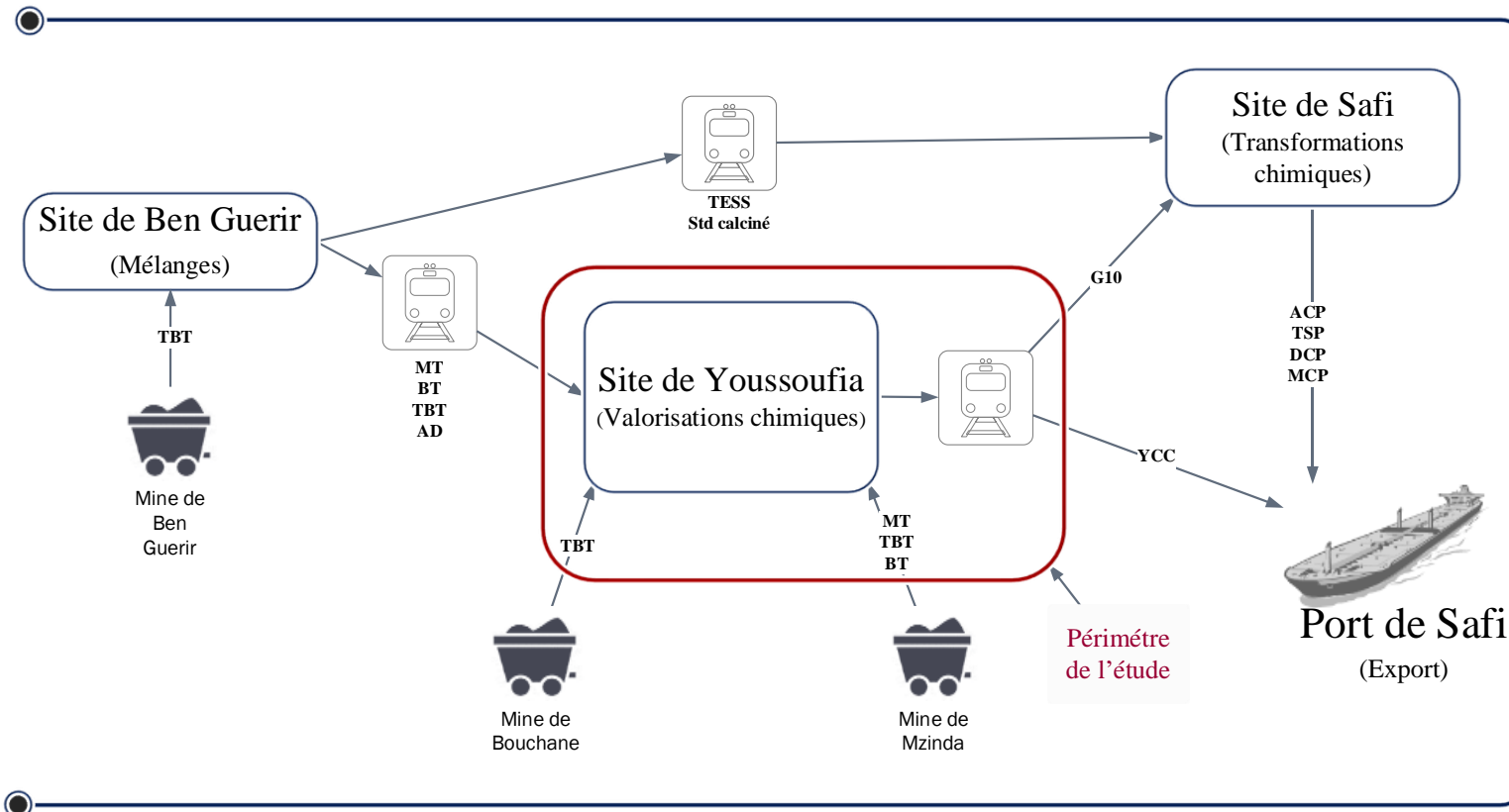
« CPLEX Optimizer ». 2021. août 11. <https://www.ibm.com/fr-fr/analytics/cplex-optimizer>.

« FICO® Xpress Solver ». 2021. FICO. Consulté le octobre 23. <https://www.fico.com/en/products/fico-xpress-solver>.

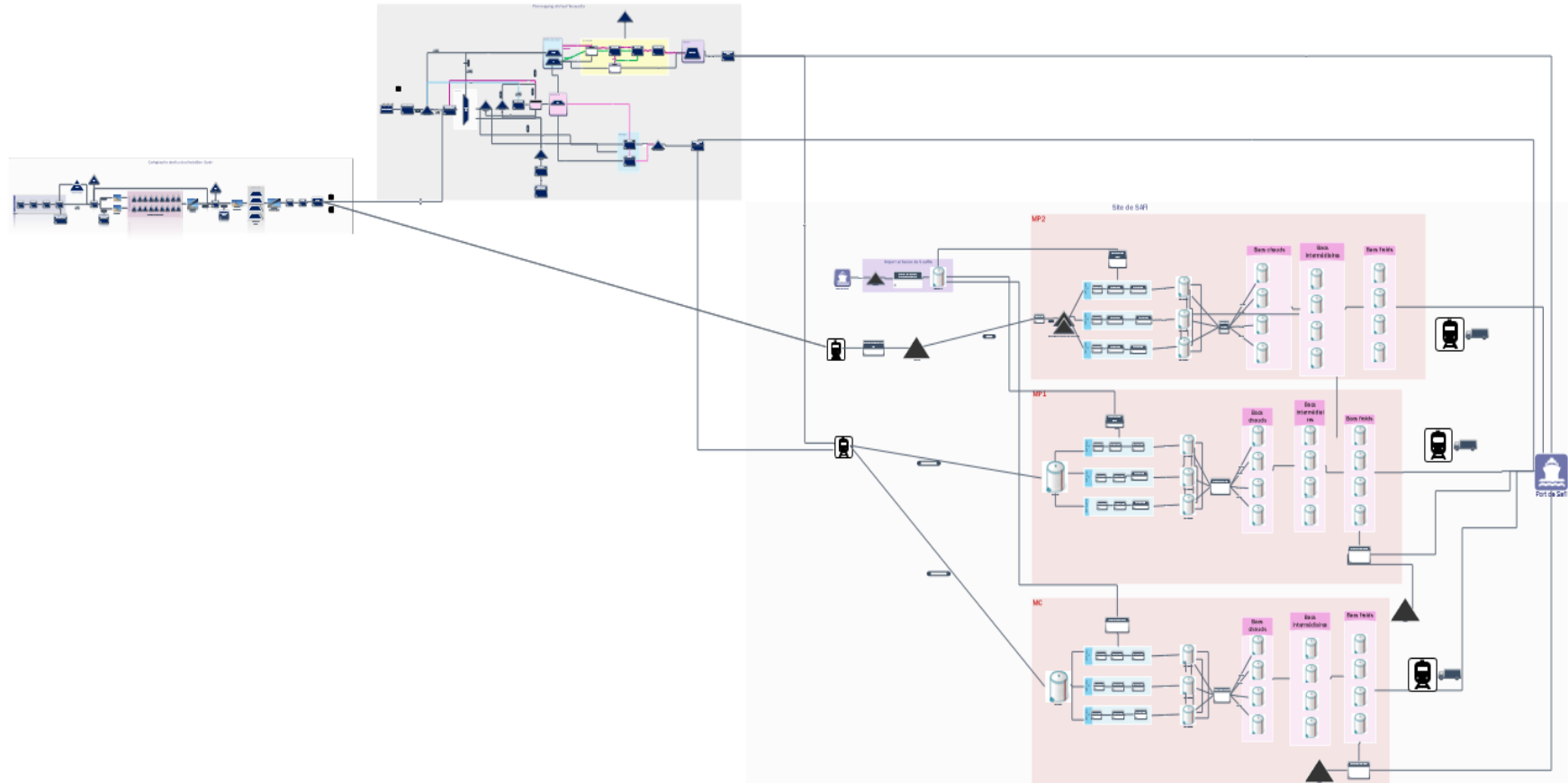
« Gurobi Solver ». 2021. *Gurobi*. <https://www.gurobi.com/>.

ANNEXES

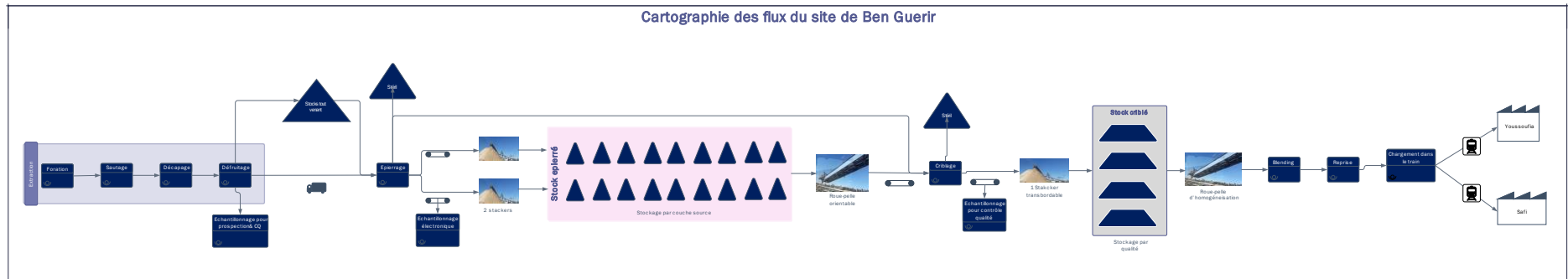
Annexe 1 : Cartographie macroscopique de l'axe centre



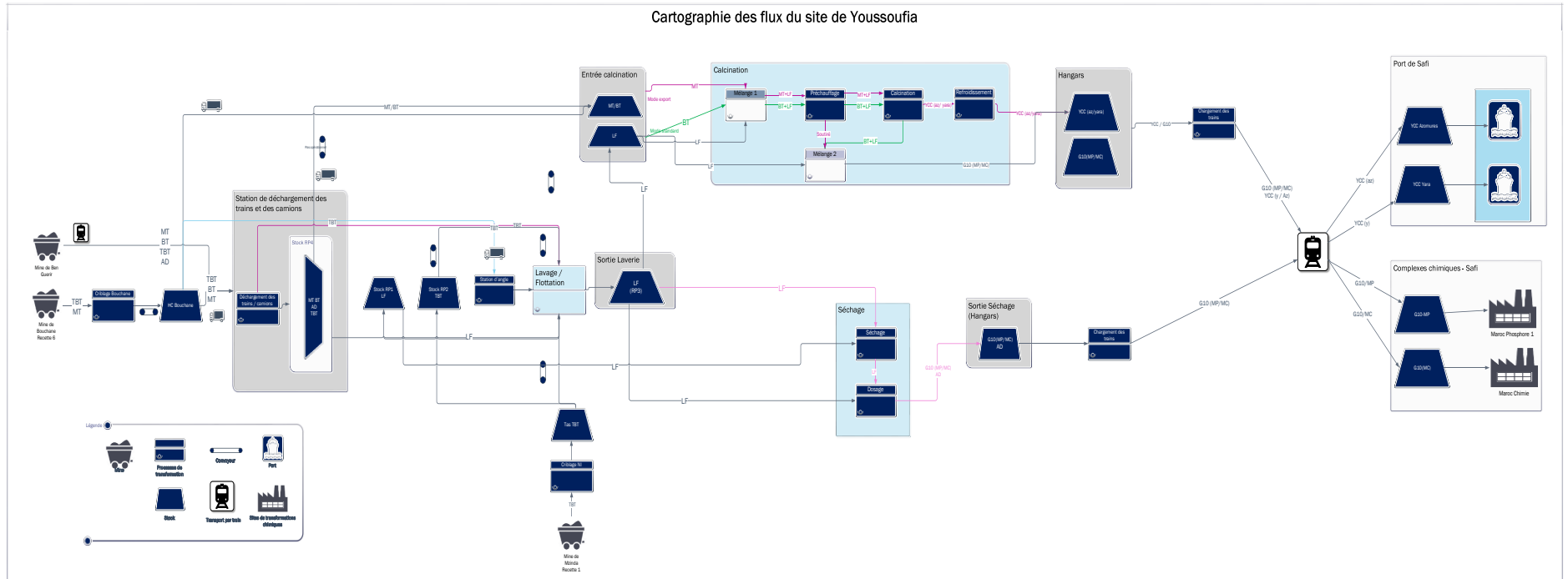
Annexe 2 : Cartographie microscopique de l'axe centre



Annexe 3 : Cartographie microscopique du site de Ben Guerir



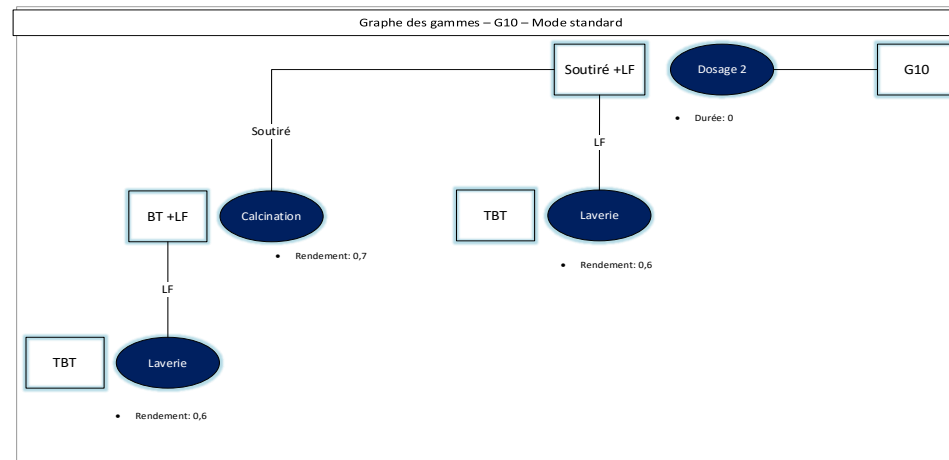
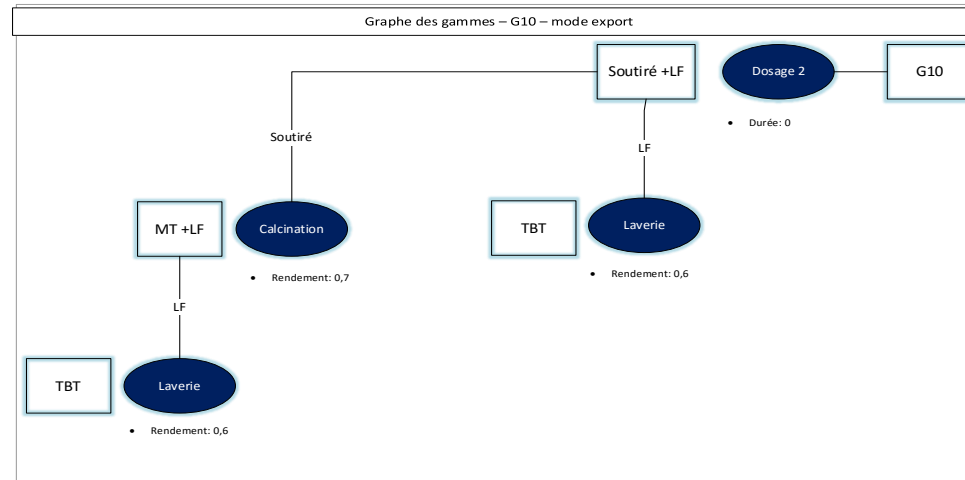
Annexe 4 : Cartographie microscopique du site de Youssoufia

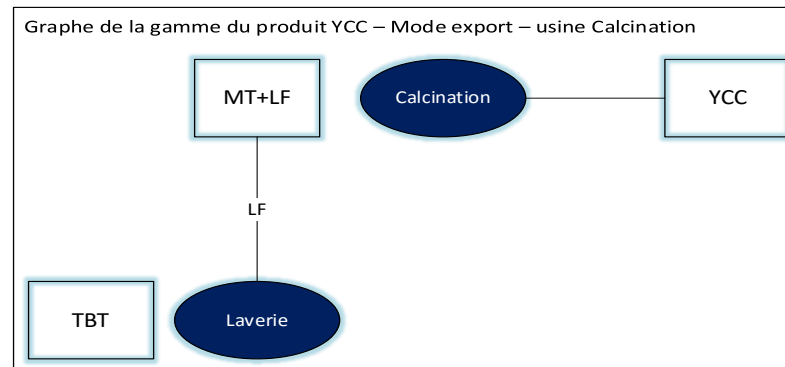
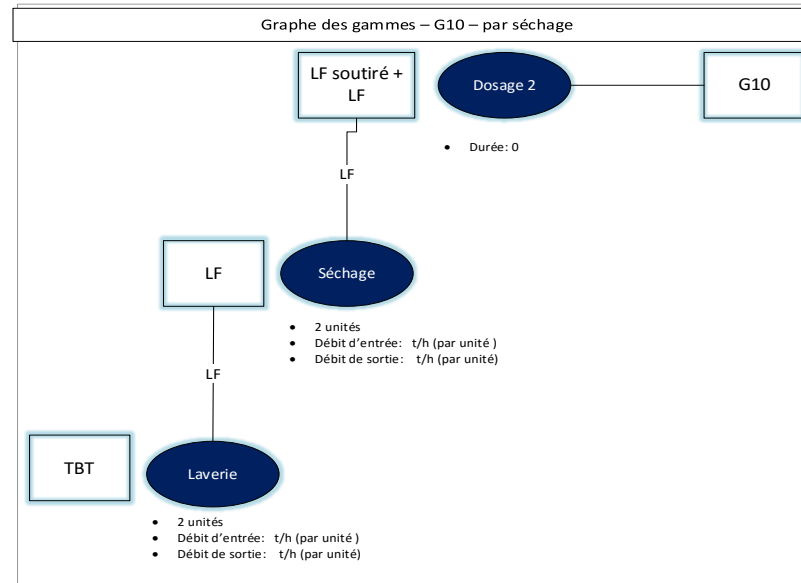


Annexe 5 : Cartographie microscopique du site de Safi



Annexe 6 : Graphes des gammes des produits fabriqués au site de Youssoufia





Annexe 7 : Graphes des nomenclatures des produits fabriqués au site de Youssoufia

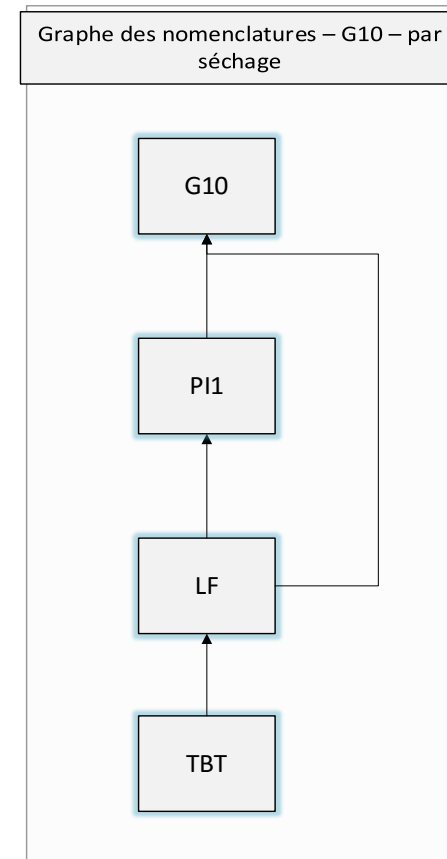
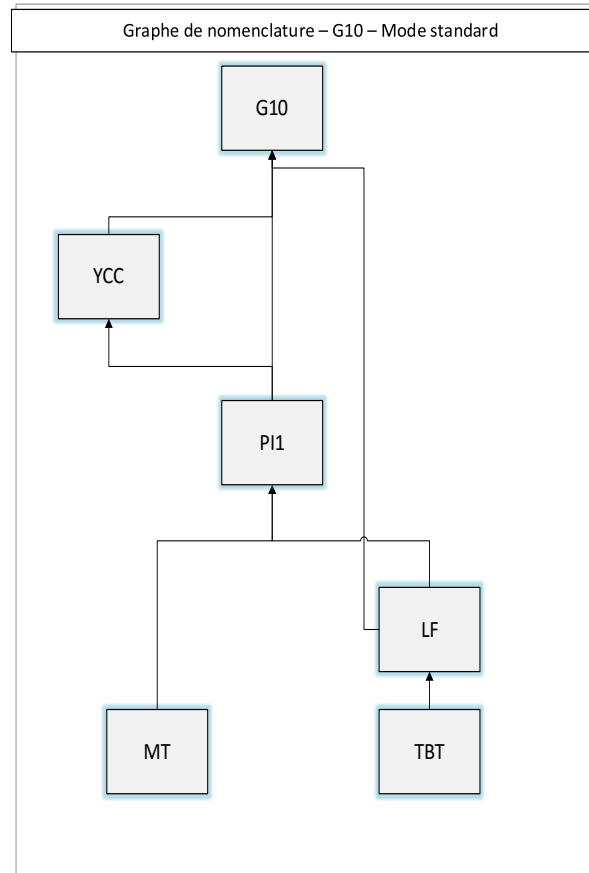
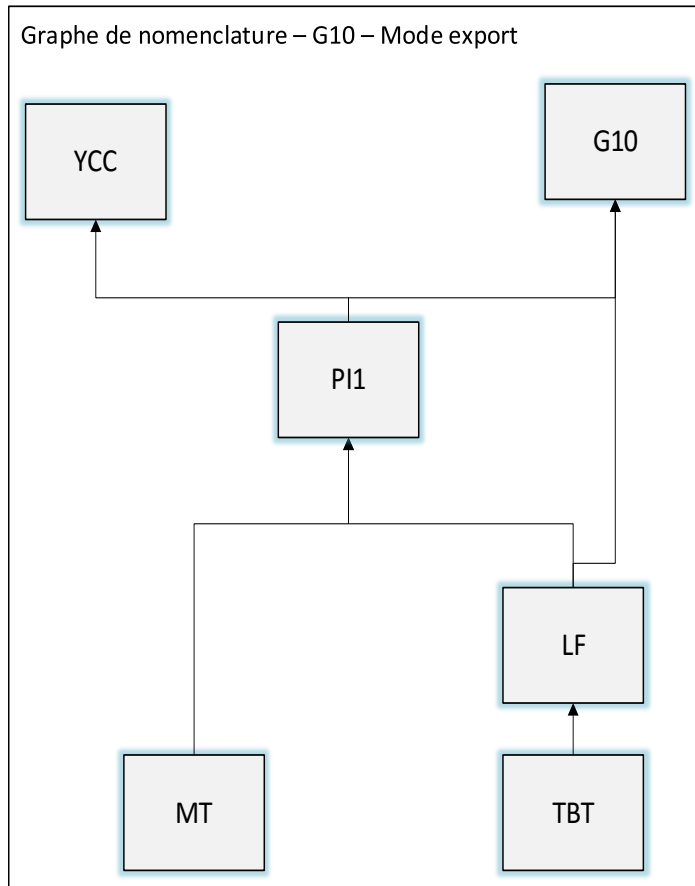


Table des matières

Introduction générale	12
Chapitre I : Contextualisation industrielle et scientifique de la recherche	29
1. Introduction	30
2. Contexte industriel.....	31
2.1. La Supply Chain du Phosphate	31
2.2. Positionnement de l'OCP dans le marché international de Phosphate	31
2.3. Le groupe OCP.....	33
2.4. L'axe centre OCP	35
2.5. Gisement Gantour - Site de Youssoufia	37
2.5.1. Système de production	37
2.5.2. Système de stockage	41
2.5.3. Système de transport	42
3. Rapport avec le terrain de recherche	44
4. Contexte scientifique : la planification dans la supply chain minière	49
4.1. Le Supply Chain Management	50
4.2. Approche de planification intégrée	51
4.3. Typologie des décisions prises par les modèles intégrés de planification	52
4.3.1. Approvisionnement	53
4.3.2. Production	53
4.3.3. Transport	54
4.3.4. Stockage	54
5. Définition de la problématique industrielle	55
6. Définition de la problématique scientifique	57
7. Facteurs de complexité	58

8.	Conclusion.....	60
Chapitre II : Revue de la littérature - le lot sizing associé au problème du transport . 61		
1.	Introduction	62
2.	Problème classique du <i>Lot Sizing</i> -	63
2.1.	Définition– modèle original de Wagner Whitin	63
2.2.	Classification des modèles de lot sizing	66
3.	Le <i>lot sizing</i> mono-niveau	70
3.1.	Problèmes mono-niveaux à longues périodes - <i>Big time bucket problems</i>	71
3.2.	Problèmes mono-niveaux à courtes périodes – <i>Small time bucket problems</i>	72
4.	Le <i>lot sizing</i> multi-niveaux avec capacité finie (MLCLSP).....	74
4.1.	MLCLSP - Définition	74
4.2.	MLCLSP - Modélisation	75
5.	Le problème du MLLSP intégré au problème de transport	77
5.1.	Problème du <i>lot sizing</i> (LSP).....	77
5.2.	Inventory Routing Problem (IRP)	78
5.3.	Production Routing Problem (PRP)	78
5.4.	<i>Lot sizing</i> intégré au transport direct.....	79
6.	Le problème du <i>lot sizing</i> multi-niveaux - Méthodes de résolution.....	82
6.1.	Méthodes exactes	83
6.2.	Méthodes heuristiques à base de MIP	85
6.2.1.	Heuristiques <i>Relax and Fix</i> - Définition	86
6.2.2.	Heuristiques <i>Relax and Fix</i> – Revue de littérature	87
7.	Le <i>lot sizing</i> – applications industrielles.....	89
7.1.	L’industrie du process.....	89
7.2.	Sidérurgie (Steel industry)	90
7.3.	Industrie chimique	90
8.	Synthèse de l’état de l’art	91
9.	Conclusion.....	96
Chapitre III : Modélisation du problème MLLSP-TTW..... 99		
1.	Introduction	100
2.	Description détaillée de la Supply Chain Minière de l’OCP	101

3.	Modélisation du problème	101
3.1.	Système de production	102
3.2.	Système de stockage	104
3.3.	Système de transport	104
3.4.	Objectifs du modèle	106
3.4.1.	Objectifs optimisés – indicateurs de performance	106
3.4.2.	Coûts considérés	107
4.	Formalisation des contraintes industrielles.....	108
4.1.	Notations	108
4.2.	Équations d'équilibre des stocks	111
4.3.	Capacité maximale de stockage	115
4.4.	Productions multimodes.....	117
4.5.	Capacité maximale d'extraction	118
4.6.	Transport par convoyeurs et par trains	119
4.7.	La production par campagnes	121
4.8.	Structure du réseau logistique	122
4.9.	Fonction objectif	123
5.	Applications industrielles.....	126
5.1.	Caractéristiques du problème réel	127
5.2.	Expérimentations – Contribution industrielle	130
6.	Conclusion.....	145
	Chapitre IV Approches de planification intégrée vs par décomposition pour le	
	problème du MLLSP-TTW	147
1.	Introduction	148
2.	Approches de résolution	149
2.1.	Heuristique <i>Relax and Fix</i>	149
2.2.	Heuristique Top down	159
2.3.	Heuristique bottom up	165
3.	Expérimentations.....	170
3.1.	Génération des instances.....	172
3.2.	Réglage fin de l'heuristique <i>relax and fix</i>	173
3.3.	Comparaison des méthodes heuristiques proposées.....	175
3.4.	Analyse de la composition des coûts	177

3.5.	Exploration des résultats des procédures séquentielles	180
3.5.1.	Approche top down	184
3.5.2.	Approche bottom up	184
3.6.	Analyse des instances de grande taille	185
4.	Conclusion.....	187
	Conclusion générale.....	189
	Contributions scientifiques & managériales.....	192
	Bibliographie	201
	Table des matières	221
	Liste des figures	224
	Liste des tableaux.....	226
	Liste des algorithmes	227

Liste des figures

<i>Figure 1: Démarche de recherche de type recherche action.....</i>	18
<i>Figure 2: Processus de recherche ingénierique tel que décrit par (Chanal, Lesca, et Martinet 1997).....</i>	18
<i>Figure 3: Étapes de construction de la recherche</i>	22
<i>Figure 4: Architecture du manuscrit de thèse.....</i>	25
<i>Figure 5: Réserves, parts de marché et production mondiale de phosphate par pays</i>	32
<i>Figure 6 : La répartition des parts mondiales du marché du phosphate.....</i>	33
<i>Figure 7: Présence de l'OCP au Maroc.</i>	34
<i>Figure 8: Cartographie macroscopique de l'axe centre.</i>	35
<i>Figure 9: Cartographie simplifiée des flux du système logistique étudié.....</i>	38
<i>Figure 10: Mines à ciel ouvert - axe centre.....</i>	39
<i>Figure 11: Unité de calcination à Youssoufia - axe centre.....</i>	40
<i>Figure 12: Processus de production à la calcination selon les deux modes de fonctionnement (Standard et Export).....</i>	40
<i>Figure 13: Sites de stockage</i>	41
<i>Figure 14: Convoyeur assurant le transport intersites dans le gisement Gantour.</i>	42

<i>Figure 15 : Train assurant le transport du phosphate entre Youssoufia et Safi</i>	43
<i>Figure 16: Cartographie des sillons possibles de transport par trains</i>	44
<i>Figure 17 : Schéma d'une Supply Chain Minière</i>	49
<i>Figure 18: Décisions prises dans le cadre des problèmes de la planification intégrée de la chaîne logistique</i> ..	55
<i>Figure 19: Schéma descriptif de la problématique industrielle</i>	57
<i>Figure 20: Proposition d'une classification des modèles de lot sizing</i>	69
<i>Figure 21 : Différence de la prise en compte du temps de lancement dans le cas des problèmes de type Small bucket et Big bucket</i>	72
<i>Figure 22: Schémas de nomenclatures des produits</i>	75
<i>Figure 23: Rappel du périmètre organisationnel</i>	101
<i>Figure 24: Structure multi-sites, multi-période du système étudié</i>	103
<i>Figure 25: Illustration de la conservation des flux dans les stocks avals des sites de production</i>	112
<i>Figure 26: Illustration de la conservation des flux dans les stocks amonts des sites de production</i>	113
<i>Figure 27: Variation de la capacité maximale de stockage en fonction du nombre des produits stockés</i>	115
<i>Figure 28: schéma récapitulatif de la relation entre les variables continue et binaires modélisant la production</i>	122
<i>Figure 29: Schéma descriptif du système multi-sites modélisé</i>	128
<i>Figure 30: Apports industriels de l'outil d'aide à la décision proposé</i>	131
<i>Figure 31: Comparaison du taux de satisfaction de la demande et de la valeur de la fonction objectif pour les trois scénarii</i>	133
<i>Figure 32 : Évolution de la production totale de l'usine de séchage suite à la variation du temps de 'repos' dans le stock en amont dans l'unité de laverie</i>	140
<i>Figure 33: La production totale par usine, par produit, pour trois profils de demande différents</i>	141
<i>Figure 34: La stratégie de décomposition de l'horizon pour la méthode relax and fix</i>	150
<i>Figure 35 : Construction d'un plan de transport par train par l'approche Relax and fix</i>	158
<i>Figure 36: Diagramme Gantt d'ordonnancement des produits dans les lignes de la calcination donné par la solution de l'itération 1 de la procédure top down</i>	161
<i>Figure 37: Plan de production à la calcination donné par la solution de l'itération 1 de la procédure top down</i>	162
<i>Figure 38 : Diagramme Gantt d'ordonnancement des produits dans les lignes de la calcination donné par la solution de l'itération 2 de la procédure top down</i>	162
<i>Figure 39 : Plan de production à la calcination par train donné par la solution de l'itération 2 de la procédure top down</i>	163
<i>Figure 40 : Schéma récapitulatif de l'approche top down</i>	164
<i>Figure 41 : Plan de transport par train donné par la solution de l'itération 1 de l'algorithme bottom up</i>	168
<i>Figure 42 : Plan de transport par train donné par la solution de l'itération 1 de l'algorithme bottom up</i>	168
<i>Figure 43 : Diagramme Gantt d'ordonnancement du transport par train donné par la solution de l'itération 2 de l'algorithme bottom up</i>	169
<i>Figure 44 : Plan de transport par train donné par la solution de l'itération 2 de l'algorithme bottom up</i>	170

Figure 45 : Schéma récapitulatif de l'approche bottom up 171

Liste des tableaux

Tableau 1: Répartition de la production par axe	34
Tableau 2: Classification des produits de l'axe centre par site producteur.	36
Tableau 3: Récapitulatif des réunions et visites les plus importantes réalisées au cours de notre thèse	48
Tableau 4: Critères de classification des problèmes du lot sizing	66
Tableau 5 : Classification de quelques articles revus traitant le problème du lot sizing.	70
Tableau 6: Problèmes de planification intégrée de la production et de la distribution	77
Tableau 7: Classification de références traitant le lot sizing intégré au stockage et/ou transport	82
Tableau 8: Tableau comparatif des problèmes traités par les principales références constituant l'état de l'art	93
Tableau 9: Tableau comparatif des contraintes et paramètres traités par les principales références de notre état de l'art	95
Tableau 10: Tableau récapitulatif des notations retenues pour la modélisation mathématique	108
Tableau 11: Aperçu de la taille du problème réel.....	129
Tableau 12: Caractéristiques et résultats des scénarios relatifs au temps de repos dans les unités de stockage	139
Tableau 13: Évaluation de l'impact de la variation des paramètres de transport sur le système – Valeurs moyennes des solutions des instances	142
Tableau 14: Contribution de chaque élément de coût dans le coût total (en pourcentage).....	142
Tableau 15: Analyse de sensibilité du coût total par rapport aux différents coûts opérationnels.....	143
Tableau 16 : Comparaison entre configuration 'rigide' et 'flexible' de l'affectation des produits aux sites de production.....	143
Tableau 17 : Écart de la moyenne du taux de satisfaction de la demande, pour l'ensemble des produits, de la configuration multi produits par rapport à la configuration mono produit de s unités de stockage (en %)	144
Tableau 18 : Stratégie de relaxation et fixation proposée	152
Tableau 19 : Exemple illustratif de l'approche Relax and fix.....	156
Tableau 20: Caractéristiques des instances industrielles générées.....	172
Tableau 21: Réglage fin de l'heuristique relax and fix	174
Tableau 22: Impact des paramètres et sur l'heuristique relax and fix	175
Tableau 23 : KPIs retenus pour comparer les solutions proposées par le modèle intégré et par les méthodes heuristiques.....	175
Tableau 24: Approche intégrée VS méthodes heuristiques	178

<i>Tableau 25: Contribution des composantes du coût au coût total (en %)</i>	179
<i>Tableau 26 : Solutions des sous-problèmes selon les approches Top down et Bottom up</i>	182
<i>Tableau 27 : Temps de calcul (en s) et gap associé (en %) pour les méthodes de résolution proposés</i>	186
<i>Tableau 28: Récapitulatif des travaux de recherche réalisés au cours de cette thèse</i>	191

Liste des algorithmes

<i>Algorithme 1: Procédure Relax and fix</i>	152
<i>Algorithme 2: Procédure Top down</i>	160
<i>Algorithme 3 : Procédure bottom up</i>	165