

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



Thèse de doctorat en Science de gestion
soutenue le 10/01/2024

**Système d'aide à la décision pour la planification
et la réconciliation décisionnelle multi-niveaux.
Cas de la Supply Chain minière**

Auteur Najoua Alaoui

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. Thierry Fouque, Paris Nanterre, Rapporteur

Pr. Samir Lamouri, Arts et Métiers Paris Tech, Rapporteur

Pr. Omar Bentahar, IAE Metz - université Lorraine, Suffragant

M. Ren Libo, Maître de conférences, IAE Clermont Ferrand, Suffragant

Mme. Selwa Elfirdoussi, EMINES, Mohammed VI Polytechnique, Suffragant

Mme. Ahlam Azzamouri, EMINES, Mohammed VI Polytechnique, 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.

Je dédie ce travail :

à mon père Azzouz et ma mère Zahra
Qui n'ont jamais cessé de formuler des prières à mon égard

à mon frère Houssine
Qui était toujours ma force quand je me sentais faible

à ma nièce Rana
Qui un jour lira ces mots. Sache, mon petit ange, que tu m'es précieuse

à mon bien aimé *Houssam*
Qui a partagé avec moi cette dernière ligne droite avec patience et amour

Remerciements

Je commence par exprimer ma gratitude et mes remerciements sincères à mon directeur de thèse le Professeur *Pierre Feniès* d'avoir accepté de diriger ma thèse. Son aide, ses encouragements et ses orientations tout au long de ma thèse m'ont rendu plus déterminée et m'ont donné le courage de continuer mon chemin.

J'adresse mes vifs remerciements aux Professeurs *Thierry Fouque et Samir Lamouri*, qui ont bien voulu rapporter sur mon travail de thèse. Je les remercie pour le temps et l'effort qu'ils ont consacré et l'évaluation de ma thèse.

J'adresse également ma gratitude aux Professeurs *Nikolay Tchernev, Omar Bentaher* ainsi que Mme *Selwa Elfirdoussi et Ahlam Azzamouri* d'avoir accepté d'être membres du jury de ma thèse.

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

Mes remerciements s'adressent au Professeur *Nicolas Cheimanoff* de m'avoir donné l'opportunité de mener ma thèse au sein du laboratoire de l'EMINES et au Professeur *Vincent Giard* de m'avoir initié au monde de la recherche, de m'avoir aidé avec ses conseils et ses critiques. Je tiens à remercier également Professeur *Frédéric Fontane* pour ses encouragements, ses réflexions, son écoute et sa rigueur. J'ai beaucoup appris de vous et je vous en suis reconnaissante. Je remercie Mme *Selwa Elfirdoussi* pour son aide, sa réactivité, sa générosité et sa bienveillance.

Je témoigne également mes remerciements au groupe OCP, notamment les collaborateurs de l'Axe Centre et de la mine de Ben Guérir pour leur réceptivité, générosité et collaboration tout le long de mes années de thèse.

Mes remerciements vont également aux doctorants qui ont partagé avec moi cette aventure de recherche pleine de hauts et de bas et *Asma*, qui au fil du temps est devenu plus qu'une collègue mais une amie proche, merci pour tes conseils, ta bienveillance et ton partage.

Finalement, mes plus profonds remerciements vont à mon père, ma mère et mes frères pour leur amour et soutien inconditionnel. Mes meilleures amies, *Fatima-zahra, Fatima-ezzahra et Salma* d'avoir été toujours là pour moi dans les meilleurs moments comme les pires. À mon cher Houssam, j'adresse ma pure gratitude. Merci pour tes petites attentions, ta protection et ton amour.

Résumé

L'industrie minière constitue un environnement complexe en raison des contraintes techniques, géologiques, environnementales, etc. La planification minière à court et moyen terme devient difficile en cherchant à atteindre différents objectifs liés aux coûts, qualité et délai. Cependant, peu de systèmes d'aide à la décision (DSS) abordent le thème de planification dans l'industrie minière en prenant compte des contraintes techniques et commerciales. Les limites des outils de planification existants peuvent être liées à l'absence de granularité fine dans la modélisation des contraintes et l'impact des décisions à multi-niveaux (dans le temps et l'espace). Ce travail de thèse vise à faciliter la construction rapide et cohérente des programmes d'extraction (PE) répondant à des critères conflictuels de performance. Nous proposons un DSS tenant compte des contraintes techniques et intégrant/alignant les différents aspects décisionnels confrontés par les décideurs. Ce dernier est basé sur un modèle de simulation à événements discrets pour générer un ensemble d'PE cohérents, couplé à une heuristique multicritère, pour filtrer et proposer un sous-ensemble de 2 ou 3 alternatifs réalisables et performants à visualiser par les décideurs. Une étude de cas a été menée sur une mine de phosphate pour validation et les résultats ont montré la viabilité pratique de l'utilisation du DSS.

Descripteurs : Planification opérationnelle tactique, Système d'Aide à la Décision DSS, Simulation à événement discrets, solutions alternatives, décision multicritère, industrie minière.

Abstract

The mining industry is a complex environment due to its various technical, geological, environmental, etc. constraints. The short and medium-term scheduling process of ore extraction becomes difficult while seeking to meet different objectives expressed in terms of cost, quality, and delay. However, few decision support systems tackle scheduling theme in the mining industry based on technical and commercial constraints. Moreover, limitations of the existing scheduling tools can be related to the absence of fine granularity in the constraints' modelling and decision impact at different levels (in time and space). This research aims to improve and facilitate the rapid and coherent construction of extraction programs (EP) while meeting conflicting criteria. It proposes a Decision Support System (DSS) considering technical constraints and integrating/aligning various decisional challenges confronted by mining decision-makers. It is based on a discrete event simulation model to generate a set of coherent EPs, coupled with a multi-criteria heuristic to filter and reduce it to a sub-set of 2 or 3 feasible and performant alternatives for the decision-makers to choose from. Furthermore, a case study was conducted on a phosphate mine for validation. The results have shown the practical viability of using the DSS on the mine.

Keywords: Tactical operational scheduling, Decision Support System DSS, Discrete event simulation, alternative solutions, multi-criteria decision making, Mining industry.

Principales abréviations

ABREVIATIONS	SIGNIFICATION
DSS	Système d'aide à la décision
QS	Qualité source (couche source)
QM	Qualité marchande (mélange souhaité par le client)
SC	Scénario
PE	Programme d'extraction
SED	Simulation à évènement discret
RR	Taux de robustesse (Robustness rate)
SR	Taux de satisfaction (Satisfaction rate)

Sommaire

<i>Introduction générale</i>	11
<i>Chapitre I Contexte Scientifique, industriel, organisationnel de la recherche</i>	19
1. Introduction	20
2. Contexte scientifique : Postures épistémologique et approche de recherche	20
2.1. Posture épistémologique	21
2.2. Approches décisionnelles	22
3. Contexte organisationnel : la recherche-action entre centres d'études doctorales et partenaire industriel	24
3.1. Centres d'études doctorales et partenaire industriel	24
3.2. La recherche-action	27
4. Contexte industriel : L'industrie minière	31
4.1. Généralités sur l'extraction minière	31
4.2. Le Groupe OCP : Leader mondial d'exploitation et d'exportation des phosphates	32
4.3. Site minier de Ben Guérir – Axe centre de Gantour	34
5. Définition des questions de recherches	40
6. Facteurs de complexité	42
7. Conclusion	43
<i>Chapitre II Les modèles de planification et d'aide à la décision dans la Supply Chain minière</i>	45
1. Introduction	46
2. Les modèles de la planification minière	48
2.1. Modèles stratégiques miniers	49
2.2. Modèles tactiques de séquençage de blocs minier	50
2.3. Modèles tactiques opérationnels d'allocation d'équipements miniers	51
3. Les modèles de décision et les systèmes d'aide à la décision	53

3.1.	DSS caractéristiques et typologie.....	53
3.2.	DSS et amélioration de la performance industrielle minière.	57
3.3.	DSS pilotés par un modèle de la simulation à évènement discret	61
3.4.	DSS orientés vers la sélection des scénarios performants	65
4.	Approche de recherche ascendante et descendante	73
4.1.	Approche descendante, ascendante et hybride : avantages et limites	74
4.2.	Applications des approches dans le secteur minier.....	80
4.3.	La recherche action et les approches ascendantes et descendantes	83
5.	Conclusion	87
 Chapitre III Développement du simulateur comme modèle décisionnel pour le pilotage opérationnel tactique de l'extraction minière		90
1.	Introduction.....	91
2.	Modélisation du processus d'extraction minière par le modèle SED.....	91
2.1.	Notations.....	94
2.2.	Formulation du gisement minier et des paramètres de pilotages du modèle SED	95
2.3.	Niveaux conceptuels du modèle SED	96
2.4.	Contraintes techniques intégrées	98
2.5.	Données de sortie.....	100
3.	Validation industrielle du modèle SED.....	101
3.1.	Description de la construction d'un programme d'extraction annuel	101
3.2.	Génération d'un ensemble de scénarios alternatifs	112
4.	Conclusion	116
 Chapitre IV Sélection et comparaison des scénarii alternatifs par une heuristique de filtrage multicritères		118
1.	Introduction.....	119
2.	Conception de l'heuristique de filtrage multicritères	120
2.1.	Notations.....	121
2.2.	Niveau 1 : Le traitement des données de sortie générées par la simulation	122
2.3.	Niveau 2 : L'étude de faisabilité comme étape de « screening » des scénarios	123
2.4.	Niveau 3 : L'étude de robustesse pour faire face à la fluctuation de la demande.....	125
2.5.	Niveau 4 : la dominance Pareto comme méthode de comparaison des scénarios.	127
3.	Analyses expérimentales et discussions des résultats.....	128

3.1.	Exemple d'application du niveau 1 : Description des données synthétisées	128
3.2.	Exemple d'application du niveau 2 : étude de faisabilité	129
3.3.	Exemple d'application du niveau 3 : étude de robustesse	136
3.4.	Exemple d'application du niveau 4 : sélection, comparaison et analyse multicritère ..	138
4.	Conclusion	154
<i>Chapitre V Aide à la décision dans un contexte de Supply Chain minière</i>		<i>155</i>
1.	Introduction	156
2.	Architecture et composants du DSS.....	156
2.1.	Architecture séquentielle et architecture classique	156
2.2.	Les composants du DSS et leurs rôles respectifs	161
3.	Le DSS comme point de réconciliation décisionnel.....	162
3.1.	L'approche descendante dans la Supply Chain minière étudiée	162
3.2.	L'approche ascendante grâce au model SED	165
3.3.	L'approche hybride basé sur le DSS	167
4.	Conclusion	171
<i>Conclusion général et perspectives de recherche</i>		<i>172</i>
<i>Bibliographie.....</i>		<i>193</i>
<i>Liste des tableaux.....</i>		<i>208</i>
<i>Liste des figures</i>		<i>210</i>

Introduction générale

Depuis plusieurs décennies et dans un climat de concurrence mondialisée, l'évolution à caractère compétitif du contexte économique ainsi que la forte croissance de la demande mondiale ont mené les industriels en concurrence à accroître leurs compétences et améliorer la maîtrise de leurs chaînes logistiques afin de s'adapter et assurer leurs parts de marché. Le développement des diverses technologies de l'information et des systèmes d'information a fortement influencé l'évolution des chaînes logistiques avec l'implantation d'outils fiables et performants permettant l'amélioration de l'efficacité et de l'efficience. C'est dans ce contexte que l'industrie minière se trouve obligée de chercher des outils d'aide à la décision permettant de répondre rapidement aux différentes attentes des clients, tout en renforçant le niveau de coopération entre les entités composant sa chaîne logistique. Les entreprises deviennent de plus en plus conscientes de l'importance d'adopter une vision de réconciliation et d'intégration décisionnelle, afin de faire face aux fortes interdépendances entre les entités d'une ou plusieurs organisations.

▪ **Volonté et objectifs du travail**

Une des volontés de ce travail est de procéder à une démarche de décloisonnement puis d'alignement et d'intégration entre les décisions opérationnelles et les décisions tactiques et stratégiques dans un cadre générique d'une problématique de planification. Aussi, nous avons conscience que lors de travaux de recherche appliquée nous ne pouvons pas échapper complètement au dilemme de fond de la recherche industrielle qui est étroitement lié aux perspectives économiques de l'entreprise et la critériologie scientifique de la recherche. Nous tenons dans ce travail à prouver que la production d'objets de recherche valides sous différentes formes de modélisation et conception des démarches de structurations et d'exploitation des données permettent non seulement l'identification et la résolution des problèmes, mais encore plus la fiabilisation, l'exploration, l'enrichissement et la bonne compréhension des décisions.

Pratiquement, notre thèse s'intéresse à la planification tactique et opérationnelle de l'activité de l'extraction minière dans une chaîne logistique complexe et propose une approche hybride décisionnelle via la conception d'un système interactif d'aide à la décision pour la planification minière. Cet outil permet de confronter et réconcilier les deux approches descendante et ascendante. Il repose sur un modèle de simulation à événements discrets permettant la prise des décisions opérationnelles concernant l'ordonnancement des choix des blocs à extraire ainsi que l'allocation des machines d'extraction au cours du temps. Le modèle SED intègre les contraintes de l'échelon inférieur de la chaîne logistique minière (la mine) en vue de garantir la cohérence technique du programme d'extraction simulé. Nous développons ensuite une heuristique de filtrage multicritères qui, couplée au modèle SED, permet :

- d'assurer la capacité des programmes d'extraction générés (aussi nommés scénarios alternatifs d'extraction dans ce travail) et de répondre à la demande prévisionnelle de la chaîne ;
- d'évaluer la robustesse d'un ensemble de scénarii vis-à-vis des éventuelles perturbations de la demande initialement exprimée ;
- de choisir 2 ou 3 scénarii performants selon plusieurs critères relevant des intérêts et besoins conflictuels des différents décideurs de la chaîne.

Le recours à une approche décisionnelle hybride¹ intégrée nous a conduits à établir une reliance entre les niveaux supérieurs (top-management) et inférieur (entité mine). En s'appuyant sur l'évaluation d'un ensemble de scénarii de planification de l'extraction minière sous différents ongles décisionnels, le niveau supérieur transmet la demande prévisionnelle annuelle à satisfaire en termes de quantité et de qualité souhaitée. Cette demande est ensuite ventilée sur des horizons trimestriels et mensuels. L'élaboration d'un programme d'extraction est ainsi soumise à des contraintes techniques liées aux caractéristiques des machines d'extraction utilisées et à la nature géologique du gisement à exploiter. Ces contraintes doivent être respectées pour assurer la cohérence technique du programme proposé, d'un côté. De l'autre, la satisfaction de la demande

¹ Une approche décisionnelle hybride : approche combinatoire entre l'approche décisionnelle ascendante et descendante.

au niveau globale et sur les différents horizons partiels doit être satisfaite pour que le programme soit aligné avec les objectifs formulés initialement.

Certaines données, telles que les éventuelles fluctuations de la demande en termes de quantités et de qualités au cours du temps, sont incertaines, mais représente un défi réel dans la chaîne logistique minière. La demande initiale est ainsi soumise à des perturbations et aléas divers contrôlés. Ainsi, il ne suffit pas d'avoir des programmes d'extraction cohérents techniquement et répondants à la demande initiale. Les programmes d'extraction doivent être robustes et stables à la suite d'aléas dus aux variations de certaines données, c'est-à-dire permettant d'évaluer la capacité des programmes à répondre à la demande perturbée créant des différences entre les quantités planifiées recalculées au cours du temps.

C'est dans ce contexte dynamique et complexe de planification tactique et opérationnelle, que s'insèrent nos travaux de thèse. L'objectif de cette thèse est donc de proposer une approche décisionnelle, hybride et intégrée qui répond aux problèmes d'incohérence entre les décisions tactiques et opérationnelles et qui assure une planification et un ordonnancement correct tout en assurant la robustesse et la performance de la solution face aux perturbations et aux besoins parfois conflictuels des décideurs de la chaîne logistique minière. L'approche est évaluée via un ensemble d'expérimentations effectuées sur des données réelles de la mine de Ben Guérir comme cas d'étude. Cette mine est une mine pilote de l'axe centre du groupe OCP, Leader mondial de l'extraction minière de phosphate au Maroc. Ces expérimentations sont menées sur la base des données géologiques du gisement minier, des caractéristiques du parc de machines dédiées à l'extraction, de la demande annuelle communiquée par le top-management. Les programmes proposés sont remis en cause par le niveau opérationnel et comparés à la planification manuelle actuelle par le biais de réunions de validation en collaboration avec les équipes de planification et de méthodes à la mine de Ben Guérir.

▪ **Structure de la thèse**

L'objectif principal de cette thèse repose sur le développement d'une approche combinée entre les objectifs d'extraction formulés par le "top-down" et la nécessité d'assurer une cohérence technique par le "Bottom-up" dans un contexte aussi complexe

que le secteur minier. Cette approche doit proposer un Framework robuste permettant l'élaboration des programmes d'extraction performants et réalisables. Pour aboutir à cet objectif, ce mémoire de thèse est organisé de la façon suivante (voir Figure 1) :

Le premier chapitre met le point sur le contexte général du travail de thèse selon trois dimensions principales : la dimension scientifique, organisationnelle et industrielle. Ensuite nous mettons en avant les questions de recherches formulées ainsi que les enjeux majeurs et les facteurs de complexité de notre projet d'étude. Enfin, nous explicitons les travaux de recherche et les activités pédagogiques qui ont découlé de cette thèse.

Le deuxième chapitre se concentre sur le positionnement de notre travail par rapport à plusieurs revues de littérature que nous avons été amenées à effectuer. Nous avons fait le choix d'arborer cet état de l'art du particulier au général, en commençant dans la première partie par le positionnement du problème scientifique de la planification minière selon les trois niveaux décisionnels : stratégique, tactique et opérationnel. Par la suite nous traitons le volet décisionnel avec une revue de littérature axée sur les systèmes d'aide à la décision et leurs impacts sur l'amélioration de la performance industrielle en général ainsi que l'utilisation de ces outils dans l'industrie minière en particulier. La dernière revue de littérature nous a permis de positionner notre travail par rapport à l'approche de recherche utilisée. Nous définissons et différencions donc les approches de recherche ascendante et descendante et nous expliquons aussi la nature de notre projet en tant que recherche-action. Nous présentons aussi à la fin, une réflexion sur l'apport scientifique de notre thèse par rapport à l'état d'art ainsi que notre motivation de recherche.

Le troisième, quatrième et cinquième chapitres exposent de manière progressive différents modèles ainsi que l'outil DSS que nous proposons dans notre recherche. Nous partons de l'élémentaire vers la vue d'ensemble en présentons d'abord dans le chapitre trois les fondements du modèle de résolution de simulation à événements discrets (SED) en termes de formulation, niveaux conceptuels, contraintes intégrées et données de sortie. Nous présentons aussi la validation industrielle du modèle sur le terrain en décrivant l'automatisation d'un seul programme d'extraction puis la génération d'un ensemble de scénarios alternatifs basée sur des données réelles. Nous poursuivons l'étude dans le chapitre quatre en introduisant le principe et les niveaux

conceptuels de l'heuristique de filtrage multicritères, ayant comme rôle l'affinement du processus décisionnel de la planification opérationnelle tactique de l'extraction minière. La deuxième partie de ce chapitre se concentre fondamentalement sur l'expérimentation avec les scénarios générés ultérieurement par la simulation pour mettre en valeur la pertinence de l'approche de sélection et choix des meilleurs scénarios. Ensuite, le chapitre cinq vient encapsuler les deux modèles de simulation et d'optimisation heuristique dans le cadre plus large de la proposition d'un DSS. Dans ce chapitre, nous détaillons l'architecture séquentielle et les composants de l'outil proposé. Nous décrivons le rôle du DSS dans la réconciliation des décisions entre l'approche descendante adoptée par les décideurs de la Supply Chain minière et l'approche ascendante que nous avons construite sur la base du modèle SED du processus extractif. Nous situons le DSS comme un point de reliance entre les deux approches pour aboutir à une approche hybride visant la confrontation des points de vue et préférences des décideurs du top-management versus celles des exploitants miniers et nous expliquons l'intérêt du découplage puis d'alignement et d'intégration entre les décisions opérationnelles d'un côté avec les décisions tactiques et stratégiques d'autre part.

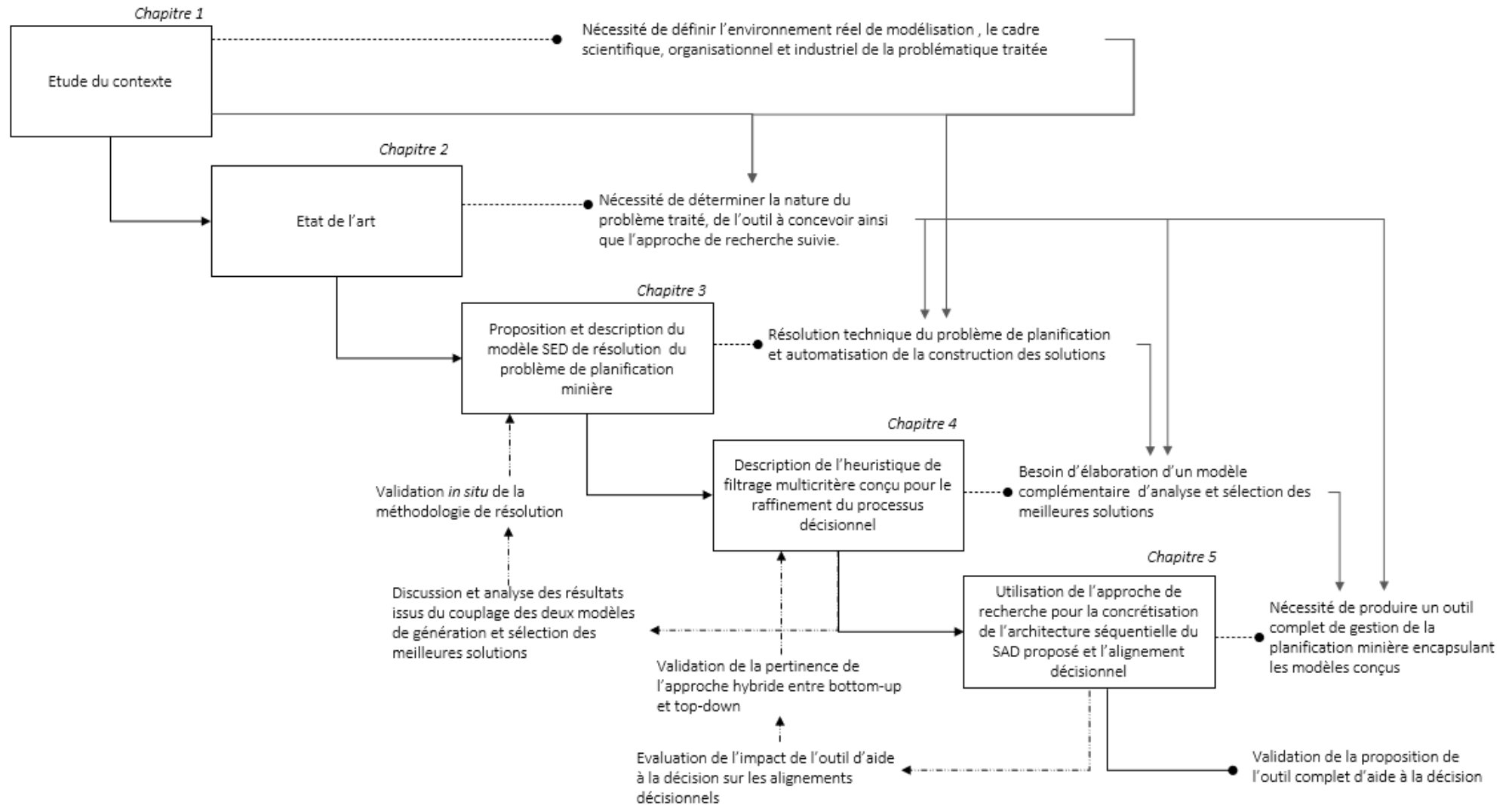


Figure 1 : Structure en boucle et enchaînement de nos travaux de thèse

▪ **Production scientifique**

Au sein de la communauté scientifique, la publication des travaux représente un passage crucial du processus de validation scientifique des travaux de recherche ainsi qu'un exercice fructueux de cristallisation et raffinement des idées. Tout au long de notre thèse, nous avons veillé à participer régulièrement à des conférences internationales et des workshops doctoraux pour une fin de partage collective et d'analyse des retours des relecteurs ainsi à travers la discussion de nos travaux nous avons pu évaluer, améliorer et mettre en valeur nos travaux ainsi que les confronter aux autres recherches venant d'autres contextes. A la fin de notre thèse nous avons soumis deux articles à deux revues internationales. Nous détaillons ci-dessous la liste des publications scientifiques effectuées :

➤ Revues internationales à comité de lecture :

1. Alaoui, N., A. Azzamouri, S. Elfirdoussi, P. Feniès, (2023). « Enhancing scheduling decision-making using a decision support system based on discrete event simulation and multi-criteria heuristic: mining case study » (*IJPE: International journal of production economics*), (statut: soumis ,Rang 1: FNEGE)

➤ Chapitres de livres :

2. Alaoui, N., A. Azzamouri, S. Elfirdoussi, P. Feniès (2021). « Multi-criteria filtering approach for comparison and analysis of scheduling alternatives scenarios », Publié dans *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, vol 628. Part 3: improvement of design and operation systems, Springer.

➤ Conférences et congrès internationaux

3. Alaoui, N., A. Azzamouri, S. Elfirdoussi, P. Feniès, V. Giard, (2019). « Système interactif d'aide à la décision pour la planification de

- l'extraction minière », *13ème Conférence internationale CIGI-QUALITA, Montréal, Québec, Canada.*
4. A. Najoua, A. Ahlam, E.F. Selwa, F. Pierre, V. Giard (2019). « Interactive Scheduling Decision Support System for ore extraction at a phosphate mine », *Proceeding of the International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM), Shanghai, China.*
 5. Alaoui, N., A. Azzamouri, S. Elfirdoussi, P. Feniès (2020). « Conception d'un SIAD pour la planification minière : Mise en œuvre dans le contexte minier de l'extraction du phosphate », *13th International Conference on Modeling, Optimization and Simulation (MOSIM), Agadir, Morocco.*
 6. Alaoui, N., A. Azzamouri, S. Elfirdoussi, P. Feniès (2021). « Multi-criteria filtering approach for comparison and analysis of scheduling alternative scenarios: case study on an open pit phosphate mine. », *Advances in Production Management Systems (APMS), Nantes, France.*
 7. Alaoui, N., A. Azzamouri, S. Elfirdoussi, P. Feniès (2023). « Conception d'un système d'aide à la décision multi-objectifs de planification : application à l'extraction de minerai dans une mine à ciel ouvert », *The 7th Edition of the International Conference on Project & Logistics (PROLOG), Luxembourg.*
 8. Alaoui, N., A. Azzamouri, S. Elfirdoussi, P. Feniès (2023). « Designing a multi-objective scheduling decision support system », *CIGI-QUALITA-MOSIM, Québec, Canada.*

Chapitre I

Contexte Scientifique, industriel, organisationnel de la recherche

1. Introduction.....	20
2. Contexte scientifique : Postures épistémologique et approche de recherche.....	20
2.1. Posture épistémologique.....	21
2.2. Approches décisionnelles	22
3. Contexte organisationnel : la recherche-action entre centres d'études doctorales et partenaire industriel.....	24
3.1. Centres d'études doctorales et partenaire industriel	24
3.2. La recherche-action.....	27
4. Contexte industriel : L'industrie minière	31
4.1. Généralités sur l'extraction minière	31
4.2. Le Groupe OCP : Leader mondial d'exploitation et d'exportation des phosphates	32
4.3. Site minier de Ben Guérir – Axe centre de Gantour	34
5. Définition des questions de recherches	40
6. Facteurs de complexité	42
7. Conclusion	43

1. INTRODUCTION

Notre recherche s'inscrit dans une perspective de recherche action. Ce chapitre introductif est consacré à la justification de cette posture, mais aussi à la description de l'environnement industriel de l'exploitation minière au sein du groupe OCP (Maroc) pour le compte duquel la recherche a été menée. L'expression « exploitation minière » est inclusive dans le sens où elle ne fait pas simplement référence au processus technique d'extraction des minerais, mais plus généralement, au cycle complet allant de leur découverte, exploration et quantification géologique, extraction, traitement et commercialisation sous différentes formes utiles pour d'autres industries. Par conséquent, l'exploitation minière représente l'ensemble des activités socioéconomiques qui sont menées pour obtenir et utiliser des ressources d'un dépôt minier.

Ce chapitre a pour objectif global de poser un cadre de référence pour la bonne compréhension des caractéristiques et des enjeux majeurs de l'industrie du phosphate. Ainsi, dans un premier temps, la section 2 se focalisera sur le choix de la posture épistémologique ainsi que l'approche de recherche globale suivie pour la concrétisation scientifique de notre travail de recherche. Dans la section 3, nous explorons le contexte organisationnel qui a donné lieu à cette thèse ainsi que le cadre de la recherche-action qui a lié le centre doctoral et le partenaire industriel. Ensuite, la section 4 portera sur la définition du contexte d'exploitation des mines à ciel ouvert de phosphates par le groupe OCP, la description de la chaîne logistique et du périmètre de notre travail. Nous enchaînons, dans la section 5, par une définition des questions de recherches, mêlant les trois dimensions : scientifique, organisationnelle et industrielle. Enfin, la section 6 présentera les enjeux et les facteurs de complexité étroitement liés à notre problématique de recherche et à sa résolution.

2. CONTEXTE SCIENTIFIQUE : POSTURES EPISTEMOLOGIQUE ET APPROCHE DE RECHERCHE

L'un des buts d'une thèse en science de gestion est de parvenir à élaborer de la connaissance valable sur un sujet donné à l'intention des managers et des organisations.

Si la recherche au sens général doit apporter de la nouveauté et de l'innovation, en sciences de gestion, elle engage aussi une application en plus d'une possibilité d'apport théorique.

2.1. Posture épistémologique

Le choix épistémologique dans les sciences de gestion s'avère un point de passage obligatoire, qui a pour objectif d'éclaircir les éléments nécessaires que le chercheur choisit pour la construction du raisonnement de ses travaux et ses paradigmes appropriés ainsi que la posture et l'acheminement pour défendre sa thèse. Ce choix permet la mise en valeur d'un travail de recherche scientifique. Bien que ce point de passage soit souvent sous-entendu dans le domaine des sciences pour l'ingénieur, il représente un passage obligé dans un travail de recherche en science de gestion.

Dès lors, nous comprenons que l'enjeu de clarification de la posture épistémologique est surtout de construire le projet de recherche sur une hypothèse fondatrice valide ~~et~~ qui permettra par la suite de produire des connaissances valides compte tenu des critères reconnus par la communauté scientifique. Cette lourde responsabilité nécessite l'interrogation sur la nature de la connaissance que nous souhaitons approfondir et le positionnement par rapport aux croyances fondamentales, afin d'appréhender l'objet étudié. L'épistémologie s'intéresse donc à l'étude de ce qu'est la connaissance et de la relation qui lie le chercheur à son objet d'étude.

Ce pilier de la connaissance scientifique se base sur trois principales postures. Le positivisme considère que le chercheur et son objet d'étude sont séparés, l'observateur est donc neutre devant ses découvertes. Il ne fait que les observer et les formuler comme elles se présentent, car elles font partie des lois universelles. Le subjectivisme stipule que le chercheur est impliqué et étroitement lié à son objet d'étude, la connaissance qui s'ensuit est donc relative et construite sur la perception du chercheur. Le pragmatisme, quant à lui, considère le chercheur comme un acteur engagé parmi d'autres à trouver des solutions et des alternatives qui peuvent potentiellement changer la réalité. La connaissance est donc générée par l'action et l'application.

Un point fondamental, que nous souhaitons éclaircir est notre choix de privilégier le dialogue entre la perspective théorique de résolution d'un problème de planification

opérationnelle tactique et la perspective pratique qui part des pratiques, besoins et défis managériaux pour enrichir les théories existantes. Cela ressemble à une co-construction des problèmes avec les acteurs soumis à des processus d'assimilation accommodative [J. Piaget, 1970]. En effet, le déroulement temporel des travaux de recherche menés dans le cadre de ce travail doctoral est révélateur d'un positionnement qualifié plus spécifiquement de constructiviste pragmatique (PECP: paradigme épistémologique, constructivisme pragmatique). L'objectif ultime de notre thèse est la production des connaissances pour une fin d'utilisation et d'assimilation par les managers ciblés en proposant une évolution des pratiques et des modes de prise de décisions. La réalité est donc construite sur la base de notre observation du terrain et de la formulation du vécu d'expérience des managers. Afin de construire des modèles et des outils intelligibles et proposer des repères viables et adaptés au contexte minier, nous avons ainsi privilégié l'épistémologie pragmatique due au fait que la connaissance élaborée est fondée sur l'expérience active, les itérations entre théorie et terrain pour tenir en compte les recommandations pertinentes et la réintégration des besoins qui se clarifient au fil du temps.

2.2. Approches décisionnelles

Sur le plan de la recherche scientifique, plusieurs stratégies décisionnelles ont vu le jour, afin de proposer des cadres d'applications organisationnelles permettant la structuration et l'acheminement du flux décisionnel ainsi que l'identification des rôles des entités composant la chaîne logistique. Au début des années 80. [Mazmanian et Sabatier, 1979] ont proposés une approche appelée descendante (Top-down). Ils décrivent une approche où les décisions sont mises en cascade d'une étape à l'autre, commençant par une formulation des objectifs globaux explicitée sous la direction de l'entité stratégique (top-management) et finissant par l'attribution des sous-objectifs pour les entités opérationnelles. Cette vision de la chaîne logistique apporte certes un sens organisationnel hiérarchique et macroscopique. En même temps, elle s'appuie sur une formulation d'hypothèses simplifiées pour modéliser et cerner la complexité décisionnelle. Celle-ci fournit au mieux une « perspective incertaine », au pire des résultats inutilisables, car loin de la réalité.

En réponse aux faiblesses perçues lors de l'application de l'approche descendante, une approche tout à fait différente est apparue, explicitée par [Hjern et Hull, 1982]. Ils proposent un pilotage participatif (ascendant) où le fil directeur des décisions démarre des perceptions et initiatives de l'échelon le plus bas ou le plus « terrain » pour être répercuté, décliné et pris en compte par les échelons supérieurs. Cette approche aussi nommée "Bottom-up" découle de la réalité empirique et évolue en proposant des adaptations et des ajustements entre les entités de la chaîne logistique. Elle est dans ce sens plus pratique et alignée avec la réalité. L'approche ascendante est donc plus crédible pour les acteurs du terrain. Cependant, le risque qu'elle découple, par sa vision sa vision myope ou très locale, la stratégie des entités opérationnelles des objectifs généraux de la Supply Chain est relativement important.

Souvent, les décisions stratégiques et tactiques sont prises sans concertation fortes avec les problèmes opérationnels. Par exemple, les contraintes de capacité sont modélisées grossièrement dans le calcul des plans de production, ce qui implique souvent la non-faisabilité définitive ou des écarts importants et peu justifiables entre ce qui est réalisé et ce qui est prévu. De plus, ces plans sont rarement remis en cause par le niveau opérationnel après avoir été transmis qui s'échine à réaliser la production tactique proposée ou qui la regarde juste comme un « objet » cérémoniel.

Dès lors, nous nous inscrivons dans une perspective qui stipule que bien que les modélisations macroscopiques des diverses chaînes logistiques découlant des approches hiérarchiques de type Top-Down soient utiles pour la définition des objectifs globaux et des éventuels besoins d'investissements pour l'entreprise, le pilotage de la chaîne logistique ne doit pas reposer entièrement ni se fier complètement aux résultats de ces derniers. Pour répondre aux besoins d'un système productif, il s'avère nécessaire de chercher les réponses aux échelons sources de la chaîne logistique. Ces derniers ne seront plus des entités d'exécution seulement, mais des entités clés proactives dans le pilotage de la chaîne. Le but étant de garder la vue globale de la perspective descendante et de remonter plus de détails sur le fonctionnement des échelons inférieurs avec le Bottom-up.

3. CONTEXTE ORGANISATIONNEL : LA RECHERCHE-ACTION ENTRE CENTRES D'ETUDES DOCTORALES ET PARTENAIRE INDUSTRIEL

3.1. Centres d'études doctorales et partenaire industriel

Nos travaux de recherche sont effectués dans le cadre d'une collaboration entre le centre d'études doctorales de l'université Mohammed 6 polytechnique (UM6P) au sein du laboratoire du management industriel et logistique (EMINES) , du laboratoire de recherche en sciences de gestion Panthéon-Assas (LARGEPA) et le groupe OCP SA. Le but est de conduire des recherches appliquées sur l'amélioration et la réconciliation des niveaux décisionnelles au sein d'une chaîne logistique minière, en s'attaquant dans un premier temps à l'échelon source de cette chaîne qui est la mine, et en évoluant par la suite vers l'aide à la décision sous une optique d'amélioration globale de la performance.

Notre travail se situe donc à l'interface entre les sciences de gestion et les sciences d'ingénieries, basé sur un terrain d'étude réel. Notre partenaire OCP (office chérifien du phosphate) s'inscrit dans la perspective de l'engagement des chercheurs et des décideurs des entreprises dans l'évolution et l'application des productions scientifiques dans les pratiques industrielles.

Les problèmes traités dans ce cadre sont divers. Notamment, des problèmes de modélisation logistique et organisationnelle, d'aide à la décision et d'amélioration de performance en matière d'efficacité et d'efficience. Notre intérêt s'est porté sur les systèmes logistiques de planification de l'extraction minière, opérationnelle et tactique. Plusieurs raisons expliquent ce choix :

- Le premier provient de la nature des contrats de collaboration de recherche industrielle entre les laboratoires de recherche et le secteur dans lequel porte l'activité du partenaire industriel ;

- Le deuxième provient de notre champ de compétences d'origine, puisque les travaux de recherches collectives au sein des deux laboratoires portent sur des thématiques mêlant des problématiques de gestion et d'ingénierie logistique.

En effet, le domaine de recherche de la gestion de la chaîne logistique (SCM) regroupe des thèmes multidisciplinaires tels que l'informatique, la gestion et l'ingénierie logistique. Comme ce courant est multidisciplinaire, il est courant de trouver des travaux rattachés au SCM dans chacune des disciplines séparément. Mais, il est moins fréquent de trouver des travaux qui cherchent à s'inscrire simultanément dans plusieurs disciplines de manière à percevoir une vision plus complémentaire et riche de la problématique traitée. Nous avons alors considéré que nous devions nous situer à l'interface des deux grands thèmes très larges du SCM, qui sont traités chacun de manière bien différente dans le cadre des Sciences de gestion et dans le cadre des Sciences pour l'ingénieur. Ces deux thèmes sont d'une part la logistique (particulièrement les problèmes de planification dans notre cas) et d'autre part l'aide à la décision. Nous nous basons sur la classification élaborée par [Feniès, 2006] pour situer et valider nos travaux.

		Logistique	
		Management logistique	Ingénierie logistique
Aide à la décision	Contrôle de Gestion	Appartient au Domaine des Sciences de Gestion	Quel est ce territoire ? Quel est l'intérêt de travailler dans ce territoire ? Comment valoriser les objets de recherche de ce territoire ?
	Recherche Opérationnelle	Quel est ce territoire ? Quel est l'intérêt de travailler dans ce territoire ? Comment valoriser les objets de recherche de ce territoire ?	Appartient au Domaine des Sciences pour l'Ingénieur

Figure 2: Positionnement des domaines académiques dans le cadre de l'aide à la décision pour la logistique (Feniès, 2006)

Sur la base de la Figure 2, nous expliquons notre cheminement en identifiant les différents territoires qui apparaissent :

- Le premier territoire clair dans nos travaux est celui issu du croisement des thèmes de la recherche opérationnelle avec l'ingénierie logistique. Il constitue un territoire qui appartient au monde de la Science de l'ingénierie, qui se reflète par la partie de modélisation par simulation du problème de la planification de l'extraction ainsi que le couplage avec l'heuristique multicritère de filtrage ;
- Le deuxième territoire important est issu du croisement des thèmes de la recherche opérationnelle avec ceux de la gestion logistique. Dans nos travaux, cet aspect englobe la conception du système informatique d'aide à la décision permettant la fiabilisation des données, la gestion, l'analyse et la visualisation pertinente de celles-ci afin d'améliorer le processus décisionnel.
- Le troisième, issu du croisement du champ du management logistique avec celui du contrôle de gestion, dans une perspective de continuité de nos travaux concernant la valorisation économique des scénarios d'extraction.

Les territoires de croisement entre le contrôle de gestion et l'ingénierie logistique, ainsi que celui entre la recherche opérationnelle et le management logistique n'étant pas clairement revendiqués exclusivement ni par le domaine de science de gestion ni par le domaine de science de l'ingénierie constitue des pistes d'enrichissement et d'apport scientifique supplémentaire.

Plusieurs questions se posent:

- **QR1** Comment peut-on produire une recherche qui alimente management logistique et ingénierie logistique dans le contexte de l'aide à la décision pour la chaîne logistique minière ?
- **QR2** Comment valoriser des travaux de recherche qui cherchent à la fois à améliorer la performance et la gestion décisionnelle tout en se basant sur une implémentation pratique et efficace de cette dernière dans la chaîne logistique minière ?

Cela n'est que la pointe de l'iceberg de cette réflexion. Celle-ci nous mènera par la suite vers la formulation d'autres questions de recherche.

En effet, notre interlocuteur industriel est l'entité de planification et de méthodes au sein du site minier de Ben Guérir. Cette entité a comme rôle principal d'établir une planification annuelle de l'extraction des différentes qualités sources afin de répondre à la demande prévisionnelle en qualités marchandes communiquées par le top management. Pour ce faire, ce programme de planification de l'extraction opérationnelle doit être en mesure de déterminer avec précision le choix des cases à extraire au niveau du gisement, les machines à affecter suivant le processus d'extraction, mais aussi de veiller à ce que le programme proposé assure la satisfaction de la demande tout au long de l'année.

Le besoin initialement exprimé par notre interlocuteur portait premièrement sur l'automatisation de la construction d'un programme d'extraction en respectant la complexité des contraintes techniques de l'activité minière. L'élaboration d'un programme d'extraction été habituellement faite manuellement par l'équipe de planification. En effet, l'entité de planification trouvait que les outils de planification commerciale n'arrivaient pas à répondre aux besoins spécifiques du secteur minier qui présente une grande complexité et nécessite des outils plus adaptés avec des fonctionnalités plus élargies. Ce besoin a été le point de départ de notre travail, qui va engendrer au fur et à mesure de son avancement et des collaborations avec les responsables miniers encore plus de défis et de perspectives industrielles et scientifiques. Progressivement, le rapprochement entre recherche scientifique et contexte industriel présentera un intérêt où nous nous interrogerons sur la dimension décisionnelle et exploratoire que peut apporter ce travail de thèse.

Pour cerner les problèmes réels, nous avons effectué des visites in situ, bénéficié des réunions d'échange, de tests et de validation des composants de notre outil d'aide à la décision ont été effectuées tout au long de notre thèse, pour assurer l'adéquation et la pertinence de la solution proposée pour le partenaire industriel.

3.2. La recherche-action

L'approche macroscopique de notre travail de thèse s'inscrit dans une démarche de recherche-action. Venu tout droit du domaine des sciences sociales, le terme de recherche-action est attribué à [Lewin, 1946] qui a avancé l'idée « qu'à travers la

recherche-action des avancées théoriques pouvaient être réalisées en même temps que des changements sociaux ». Cette démarche est donc destinée à avoir des retombées autant dans la pratique que dans la théorie. [Kemmis et McTaggart, 1988] ont repris l'idée de Lewin pour présenter un protocole de recherche-action (Figure 3). Ce dernier se présente comme une spirale de cycles de recherche de structure identique. Chaque cycle commence par une observation de ce qui se passe sur le terrain, suivi par une réflexion permettant de déterminer un plan d'action. La concrétisation du plan élaboré laisse place ensuite à une analyse des effets puis à l'alternance ou l'ajustement si nécessaire pour reprendre le cycle en séquences similaires.

Ce protocole montre bien la nature répétitive de la recherche-action ainsi que les phases principales de planification, action, observation et réflexion avant une révision du plan.

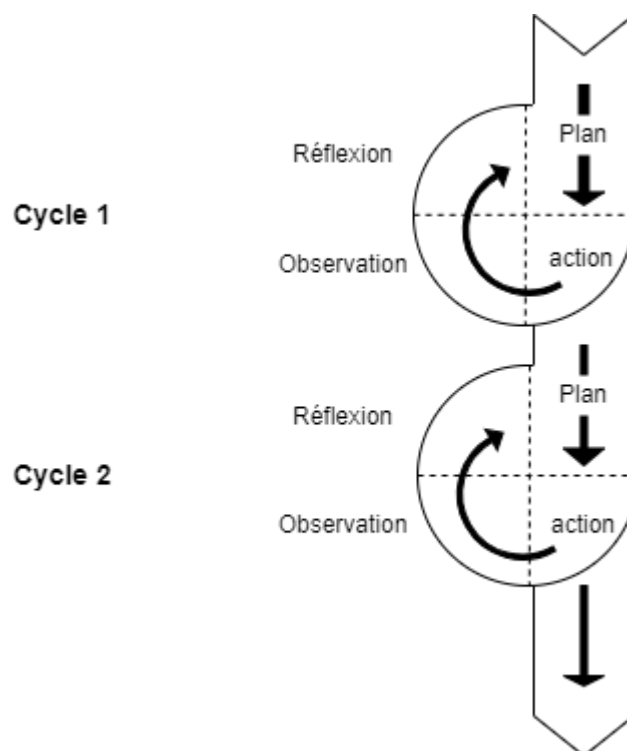


Figure 3 : Schéma de recherche-action de Kemmis et McTaggart 1988

Suivant le même protocole de la recherche-action proposé dans la Figure 3, notre travail de recherche a évolué selon 5 cycles interconnectés (Figure 4) qui ont contribué à la proposition finale du système d'aide à la décision.

Le premier cycle se base sur le passage de l'observation du terrain, l'étude des contraintes et des besoins de l'entité de planification et méthode pour formuler un

premier plan d'action. Des changements sont ensuite opérés selon le plan établi et sont soigneusement contrôlés afin de pouvoir conduire à leur étude et analyse. Dans notre cas, ces changements se sont cristallisés en étendant et améliorant le fonctionnement d'une première version d'un modèle de simulation du processus d'extraction élaboré par [Azzamouri et al, 2018], pour aboutir à une construction automatique et cohérente d'un programme d'extraction respectant les contraintes posées par la nature de l'environnement minier. Une observation, discussion et négociation est menée à la base des résultats obtenus pour ensuite enchaîner avec une réflexion sur les retombées des résultats et tests effectués, explorer les diverses possibilités et évaluer la pertinence de ces possibles. Cette réflexion conduit au stade suivant de formulation d'un second plan qui n'est pas une phase distincte en elle-même; elle est générée par l'action et la réflexion du cycle qui précède. En conséquence, la multiplication de cycles courts permet d'accélérer les changements apportés et d'affiner les actions envisagées pour la résolution de la problématique.

Chaque cycle repose non seulement sur une évolution indépendante de la pensée de résolution théorique, mais aussi sur la liaison étroite avec le terrain d'étude et les responsables miniers.

Notre collaboration avec le partenaire industriel a pris différentes formes notamment :

- L'observation et assimilation des différents processus de la chaîne logistique minière en effectuant des visites in situ
- La formulation des contraintes techniques observées, collecte et traitement des données structurelles et dynamiques liées au gisement, avec les opérationnels et l'équipe géologique.
- La définition de formes graphiques souhaitées pour une meilleure interprétation des résultats obtenus.
- Les réunions et atelier de travail à l'OCP et à l'EMINES pour présenter les différents états d'avancement, recueillir les retours et réajuster les attentes et les objectifs de notre partenaire industriel. Ces réunions réunissent des collaborateurs OCP appartenant aux différents niveaux hiérarchiques allant des opérationnels jusqu'au directeur de l'axe centre de Gantour, afin d'avoir des perspectives locales et globales et de s'en servir dans l'évolution de notre travail sur l'aide à la décision.

Cycle 1

Construction d'un programme d'extraction cohérent respectant les contraintes techniques opérationnelles de l'activité minière sur un horizon de planification court terme (3 mois)

Cycle 2

Evolution d'une vision opérationnel vers une vision tactique tenant en compte : la demande prévisionnelle , un horizon de planification annuel, intégration de la notion de plusieurs scénarios alternatives d'extraction possible

Cycle 3

Fiabilisation de la cohérence des données structurales et dynamiques du gisement pour une amélioration de la qualité et de la précision des scénarios proposés

Cycle 4

Elaboration d'un module de visualisation des conséquences spatio-temporelles d'un scénario d'extraction sous formes graphique facile à analyser et interpréter

Cycle 5

Aide à la décision via une approche multicritères de comparaison des scénarios alternatives dans le but d'en choisir les plus performants

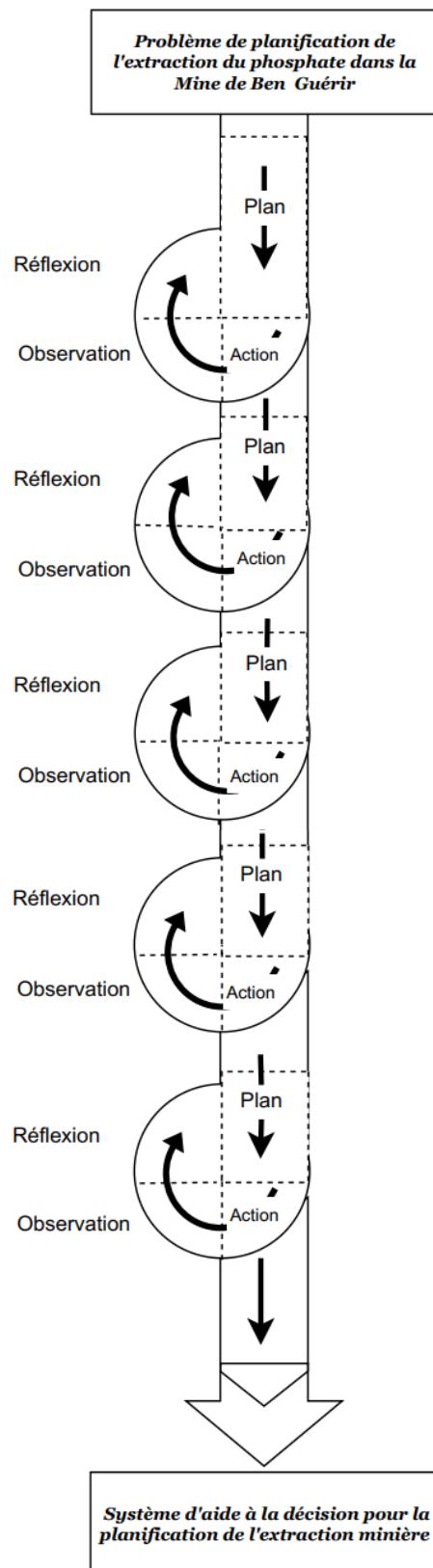


Figure 4 : Schéma de recherche-action de Kemmis et McTaggart adapté à notre travail de recherche

4. CONTEXTE INDUSTRIEL : L'INDUSTRIE MINIERE

4.1. Généralités sur l'extraction minière

L'extraction minière est définie par l'activité consistant à extraire de la terre des ressources minérales utiles. Selon, le code JORC (joint of ore reserves committee) du comité des réserves mineures mondiales (2003), un gisement est considéré comme une ressource minérale : "Lorsque l'emplacement, la quantité, la teneur, les caractéristiques géologiques et la continuité de la minéralisation sont connus, et qu'il existe une concentration ou une occurrence du matériau d'intérêt économique intrinsèque dans ou sur la croûte terrestre sous une forme et en quantité telles qu'il existe des perspectives raisonnables d'une éventuelle extraction économique".

Les méthodes de l'extraction minière sont variables, étant dictées par la nature et les caractéristiques de la ressource minérale, les conditions géologiques ainsi que par des considérations d'ordre économique telles que les marchés existants et les possibilités de financement. Cependant, nous distinguons deux méthodes fondamentales : l'extraction souterraine et l'extraction à ciel ouvert. L'extraction souterraine revient à exploiter en quelque sorte une mine aménagée aux profondeurs de la terre en vue de remonter le minerai à la surface où il est traité pour obtenir un concentré riche en valeur marchande. Selon [Hamrin, 1986] une mine souterraine peut ressembler à une fourmilière. C'est un immense réseau de tunnels verticaux et horizontaux permettant d'atteindre le minerai et le remonté à la surface par des puits. Tandis que, l'extraction à ciel ouvert est une méthode d'extraction d'un minerai depuis une excavation créée en surface après avoir enlevé les matériaux stériles qui le surmontent. Elle concerne généralement des ressources minérales qui sont plus proches de la surface de la terre, où l'enjeu est « d'enlevé un minimum de stériles de recouvrement pour atteindre les volumes minéralisés ayant la plus grande valeur marchande » [Hethmon et Dotson, 2000].

4.2. Le Groupe OCP : Leader mondial d'exploitation et d'exportation des phosphates

Au Maroc, l'industrie minière est entièrement pilotée par le l'Office Chérifien des Phosphates (OCP). Fondé en août 1920 et transformé en 2008 en une société anonyme (OCP SA). Le groupe à l'exclusivité de l'exploitation minière au Maroc et se positionne comme un acteur clé sur le marché international des phosphates et dérivés. Il est l'un des principaux producteurs et exportateurs de phosphate brut, d'acide phosphorique et d'engrais phosphatés dans le monde. OCP dispose d'un nombre vaste d'installations d'extraction, traitement, transport et stockage lui permettant d'assurer ses activités d'exploitation et de valorisation du phosphate. Bénéficiant de 70% des réserves mondiales de phosphate à environ 50 milliards de tonnes estimées par « U.S Geological Survey » (USGS) en 2020, le Groupe OCP continue à aligner ses objectifs avec la croissance prévue de la demande globale en engrais phosphatés, tout en améliorant son positionnement parmi les producteurs mondiaux et en s'inscrivant dans une approche durable d'exploitation du phosphate.

Le phosphate extrait par le groupe OCP est exporté sous différentes formes : la roche phosphatée, l'acide phosphorique et les engrais. L'acide phosphorique est exporté sous deux types fondamentaux selon son utilisation finale : l'acide phosphorique orienté vers la fabrication des engrais pour fertilisation des plantes et l'acide purifié pour une utilisation agroalimentaire, cosmétique, pharmaceutique ou encore dans la fabrication des détergents.

L'entreprise compte en total 4 sites miniers et 2 complexes chimiques ainsi que 4 ports phosphatiers. La chaîne logistique du groupe OCP est assez complexe, constituée de 3 chaînes intégrées indépendantes aussi appelées axes (Figure 5) :

- Axe Nord (Khouribga) : constitué des sites miniers de Khouribga, équipés de transport par « Slurry Pipeline » et voie ferrée, les usines de transformation à Jorf Lasfar et le port de Jorf Lasfar ainsi que le port de Casablanca pour l'export de la roche de phosphate.
- Axe Centre (Gantour) : comprenant les trois sites miniers (Ben Guérir, M'Zinda et Bouchane), le transport par voie ferroviaire vers les unités de

traitement à Youssoufia, le pôle chimique Safi pour transformation en acides ou engrais et le port Safi.

- Axe Sud (Phosboucraâ) : regroupe le site minier de Boucraâ, le transport par convoyeur (le plus long convoyeur au monde mesurant 102 km de long) vers le port comprenant une usine de valorisation ainsi que les installations portuaires de Laâyoune.

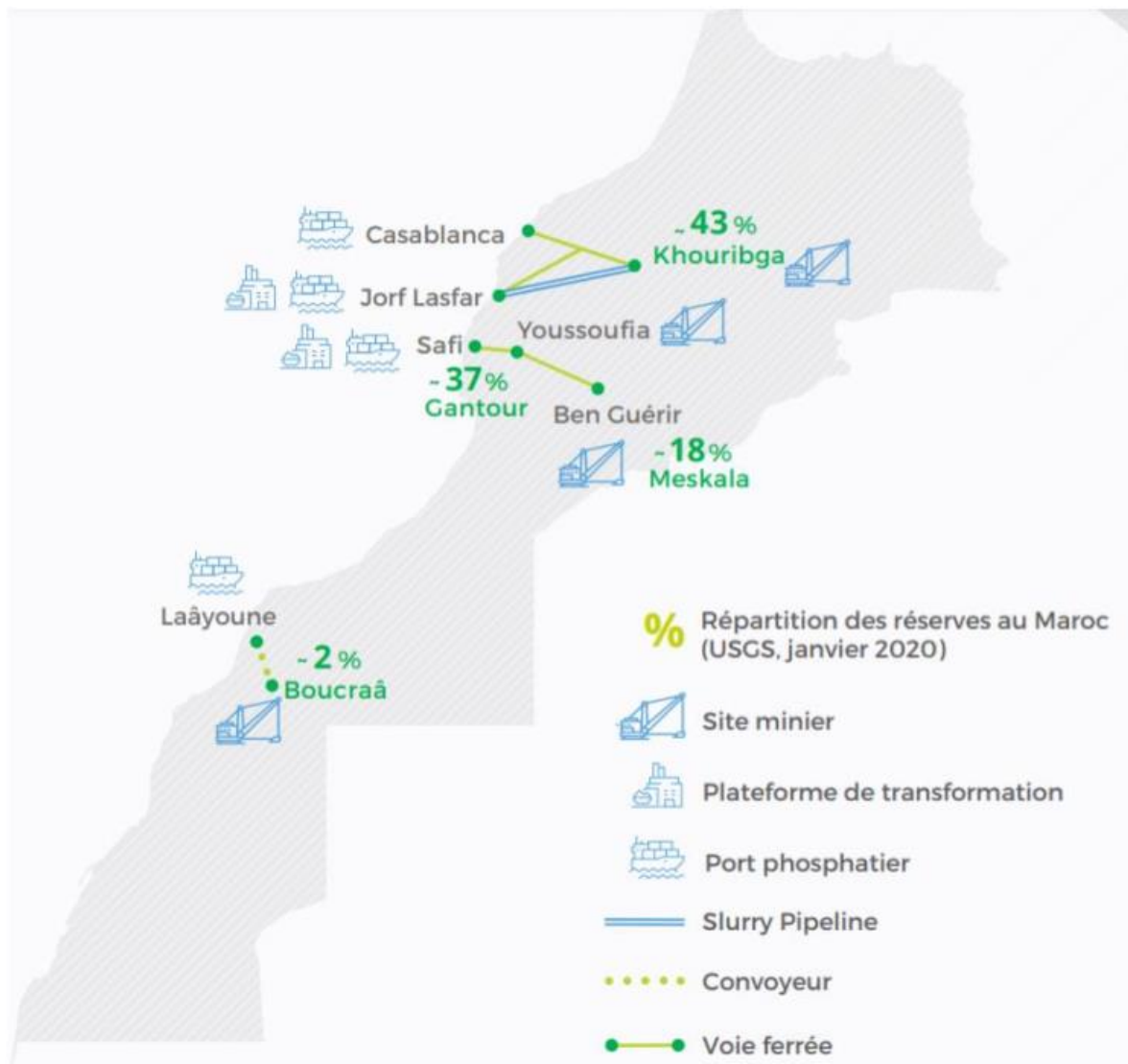


Figure 5: les trois chaînes intégrées du groupe OCP au Maroc

La problématique étudiée dans le cadre de notre travail de recherche porte sur l'axe centre (Figure 6), avec le site minier de Ben Guérir comme mine d'étude. Cet axe est composé des sites miniers de Ben guérir, Bouchane et M'zinda qui s'occupent de l'extraction et mélanges des couches sources phosphatées extraites du gisement, pour

obtenir des qualités marchandes (TBT, BT, MT, AD, Stand et Tess). Ces qualités marchandes sont ensuite valorisées sur le site de Youssoufia (G10) ensuite transformée en acide (ACP) et engrais (MCP, DCP, TSP) au site de Safi, ou directement transformée (Tess, Stand) / valorisée (YCC). Nous nous concentrons par la suite sur l'axe centre, plus précisément sur le processus d'extraction détaillé dans la mine de Ben Guérir.

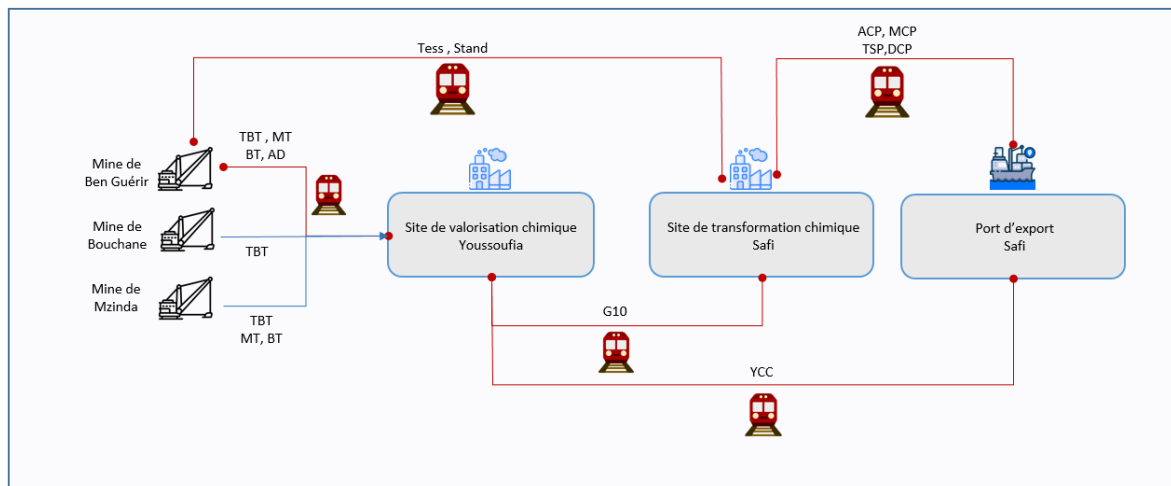


Figure 6: Cartographie de l'Axe centre

4.3. Site minier de Ben Guérir – Axe centre de Gantour

Les réserves de l'axe centre de Gantour sont estimées à environ 31 milliards de m³, représentant 35% des réserves reconnues à l'échelle nationale, soit environ 24% des réserves mondiales connues. La mission principale de la direction des exploitations minières de Gantour consiste à extraire, traiter et livrer le phosphate du gisement de Gantour. Ce gisement est décomposé en 3 sites miniers :

- **Bouchane (BO)** : gisement découpé en 2 sous mines avec une réserve globale de 205 MTSM. Il est présent à une distance de 35km de Youssoufia. Les couches les plus fréquentes sur ce gisement sont : SA2, SA3, DSP2, DSP1, C1, SX, C2 sup.
- **M'Zinda (MZ)** : gisement avec une réserve de 115 MTSM à une distance de 15 km de Youssoufia. Les couches existantes moyennement sont C3, C4, C5 et C6.
- **Ben Guérir (BG)** : est situé à une distance de 77km de Youssoufia. Ce gisement représente une variété beaucoup plus importante en matière de qualités sources

(QS), nous y trouvons les couches suivantes : SB, SA2, C0, C1, C2sup, C3 sup, C3 inf, C4 sup, C4 inf, C5 sup, C5 inf, C6. Les QS extraits de ce gisement font l'objet d'un processus de blending (mélange) pour obtenir des qualités marchandes (QM) ensuite acheminées par train vers les unités de traitement à Youssoufia ou les usines chimiques de transformation à Safi.

Notre périmètre d'étude se concentre sur le site de Ben Guérir. Nous décrivons par la suite les caractéristiques géologiques du gisement de Ben Guérir, la méthode d'extraction utilisée, le processus d'extraction minière et le parc de machine d'extraction sur le site.

4.3.1. Caractéristiques géologiques du gisement

L'exploitation d'un gisement minier, qu'elle soit souterraine ou à ciel ouvert, représente un projet de grande envergure. Dans les faits, cette exploitation suit un cycle dit minier qui respecte une série d'étapes à franchir, de la découverte du gisement à la fermeture de la mine. La première étape de tout cycle minier est l'exploration géologique du gisement. Dans le gisement étudié, cette exploration a été effectuée à partir de puits qui représentent des ouvrages de prospection permettant d'extraire des échantillons et de les analyser pour établir le volume et la teneur du gisement, ainsi que délimiter les couches phosphatées et les intercalaires en matière de nature et d'épaisseur. Les puits sont répartis tout au long du gisement permettant ainsi une décomposition du gisement.

À Ben guérir, la mine est décomposée en 8 panneaux (P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8) (Annexe 2). Chaque panneau est divisé en plusieurs parcelles selon les points d'entrées et de sorties possibles des machines d'extraction (e.g : $P1 = \{P_{\text{Nord}}, P_{\text{Sud}}\}$). Un panneau est également composé d'un nombre variable de tranchées de longueurs différentes, mais conservant une largeur de 40m chacune (la largeur est fixe à la suite de la largeur maximale de la pelle des machines d'extraction utilisée dans cette mine). La plus petite unité de la décomposition horizontale du gisement est la case de largeur égale à 40 m et longueur égale à 100m. Chaque tranchée est composée d'un ensemble contigu de cases (Figure 7).

À la suite de la nature sédimentaire du gisement phosphaté. Une découpe verticale, nous montre que chaque case regroupe une alternance de couches stériles (intercalaires) et de couches de minerai aussi nommé qualité source (QS). Le nombre et la nature de couches diffèrent d'une case à une autre, d'une tranchée à une autre et donc d'un panneau à un autre. Cela est dû aux variations géologiques en profondeur de la terre. Une QS peut donc exister dans une case et disparaître dans les cases adjacentes. L'ensemble des différents QS de minerai présent dans le gisement de Ben Guérir est de 12 (SB, SA2, C0, C1, C2sup, C3 sup, C3 inf, C4 sup, C4 inf, C5 sup, C5 inf, C6). Un exemple d'une coupe lithologique moyenne du panneau 5 du gisement de Ben Guérir est illustré sur la Figure 8.

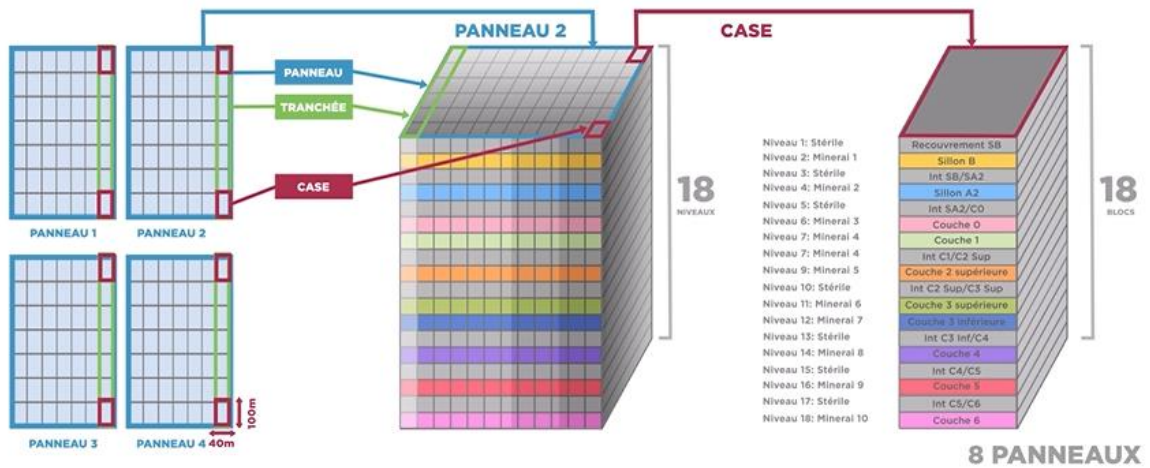


Figure 7 : Décomposition du gisement en panneau, parcelle, tranchée

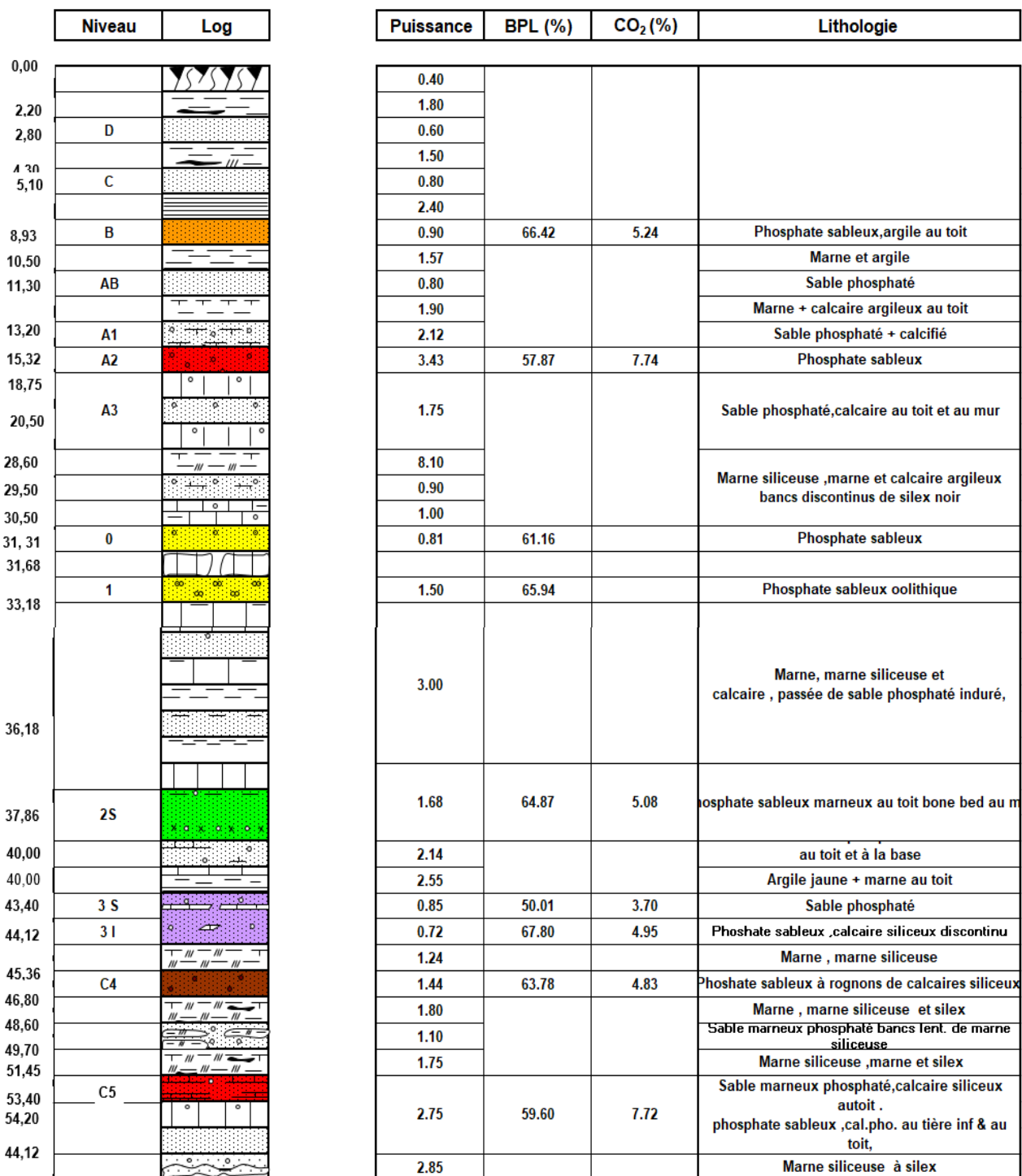


Figure 8 : Coupe lithologique moyenne du panneau 5, gisement de Ben Guérir (source interne OCP)

4.3.2. Méthode et processus d'extraction minière

La mine étudiée est une mine à ciel ouvert dont la nature est sédimentaire. Au sein du groupe OCP, nous distinguons trois méthodes d'extraction employées dans les sites miniers :

- **La méthode sélective** : méthode la plus méticuleuse permettant d'extraire les couches sources en accédant aux niveaux phosphatés après enlèvement des intercalaires stériles qui les précèdent. Cette méthode est employée dans le site de Ben Guérir.
- **La méthode semi-globale** : consiste à extraire un ensemble de couches phosphatées superposées n'ayant pas d'intercalaire les séparant (e.g : C3sup, C3inf). Cette méthode est souvent utilisée dans l'axe nord, site de Khouribga.
- **La méthode globale** : permet d'extraire un bloc de couches phosphatées et du stérile les séparant, précisément dans le cas des couches inférieures de faible teneur, cette méthode est souvent utilisée dans le site minier de Khouribga.

D'un autre côté, le processus d'extraction minière est composé de 6 opérations élémentaires qui sont effectuées dans un ordre bien précis (Figure 9) :

- **L'aménagement de foration** : étape préparatoire du terrain, qui consiste à enlever les obstacles existant sur la terre et de rendre la surface du terrain plus appropriée pour le déplacement des machines de la foration qui vont suivre. Les machines qui peuvent effectuer cette opération sont les niveleuses, les Paydozers et parfois les Bulldozers D9R. Ces machines sont dotées d'une flexibilité de déplacement considérable.
- **La foration** : cette opération consiste à confectionner des trous dans le stérile pour y loger l'explosif. Elle tient en compte plusieurs paramètres : la maille de foration, le diamètre des trous et le fonçage qui dépendent de la nature du terrain. Cette opération peut être effectuée par l'une des quatre sondeuses dont les caractéristiques sont différentes.
- **Sautage** : Cette étape a comme objectif la fragmentation du stérile par des charges explosives. Les trous forés sont remplis par l'explosif (Ammonix) qui permet de fragmenter les intercalaires durs pour qu'ils puissent être enlevés par les engins de décapage.

- **L'aménagement décapage** : est aussi une étape préparatoire du terrain suivant le même principe de l'aménagement de foration, qui consiste à enlever les obstacles générés cette fois-ci à la suite de l'opération du sautage de manière à rendre la surface du terrain plus appropriée pour le déplacement des machines de décapage qui vont suivre.
- **Décapage** : une fois, le terrain fragmenté par le sautage, les engins du décapage ont la mission d'enlever les fragments du stérile pour pouvoir accéder à la couche phosphatée. Le stérile décapé est transporté ou déposé soit au niveau du Box-Cut (ouverture créée pour diviser un nouveau panneau et donc assurer l'accès des machines aux tranchées) ou au niveau des sorties d'un panneau, ou encore à côté de la tranchée en cours d'extraction. Cette opération est assurée par 5 Draglines et 7 Bulldozers de type D11. Il existe trois types de décapage sur les sites miniers OCP utilisés selon le cas en question :
 - *Décapage par poussage* : cette opération consiste à pousser le niveau stérile de la tranchée en cours d'extraction vers la tranchée adjacente épuisée auparavant par des Bulldozers.
 - *Décapage par casement* : le terrain stérile est casé par les Draglines dans la tranchée adjacente déjà exploitée.
 - *Décapage par chargement et transport* : le stérile décapé par des bulles ou dragline est chargé et transporté par des camions vers des zones déjà exploitées. Nous avons recours à ce type de décapage lors de l'ouverture d'un panneau en raison d'absence de tranchée adjacente. Il faut mentionner que cette méthode est très coûteuse en matière de temps et de carburant.
- **Gerbage** : C'est la phase de récupération de la couche phosphatée. Ensuite, de ramasser le phosphate au milieu de la tranchée d'une façon diagonale afin de faciliter le chargement et l'acheminement du phosphate par des camions qui vers le stock épierré. Cette opération est effectuée par des 9 Bulldozers de type D9R.

Après l'extraction, les couches phosphatées issues du chantier passent par une étape d'épierrage, qui a comme rôle de séparer le minerai de phosphate des débris du stérile volumineux par des cribles présentant des mailles différentes. Les couches de

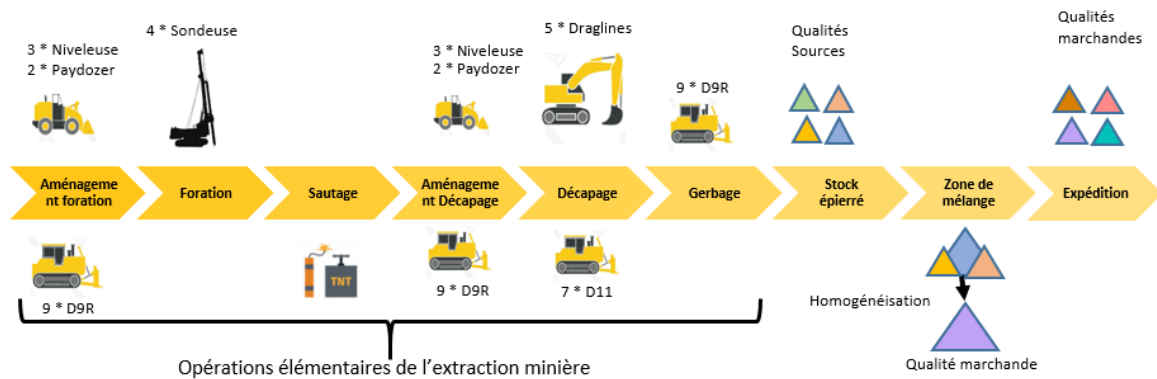


Figure 9 : Processus d'extraction minière

phosphate criblées subissent aussi une série de traitements mécaniques visant à réduire la quantité de stérile des couches avant d'être stockés en tas pour ensuite servir d'entrées pour le processus de blending (mélange) qui va nous permettre d'obtenir les qualités marchandes demandées.

5. DEFINITION DES QUESTIONS DE RECHERCHES

Le contexte de nos travaux est caractérisé par son cadre pluridisciplinaire et se déroule sous les thématiques de l'aide à la décision et du management logistique pour le cas d'une entreprise d'extraction minière. Plusieurs questions de recherche peuvent être soulevées, selon le référentiel pris (la pluridisciplinarité du cadre scientifique ? La complexité du secteur d'application et du problème de planification traité ? Le caractère multidimensionnel de la notion d'aide à la décision ?). Une des premières questions qui vient à l'esprit est de se demander :

- **QR 3.** Pourquoi souhaitons-nous concevoir des systèmes d'aide à la décision dédié au contexte de la Supply Chain minière? Qu'est-ce que ce contexte amène à la connaissance en général ?

La réponse ici vient du terrain. Le secteur minier a toujours été considéré comme un secteur particulier à la fois riche et complexe. Les modes et méthodes d'exploitation d'un minerai diffèrent selon sa nature, sa rareté, ses caractéristiques géologiques et

chimiques, son terrain d'exploitation, l'étendue et la durée de vie de cette ressource naturelle, etc., les entreprises exploitant ces ressources naturelles ont donc une grande responsabilité non seulement vis-à-vis de la satisfaction du marché national et international, mais également en matière d'exploitation durable et du respect des exigences environnementales.

L'activité de la planification de l'exploitation minière étant de nature lourde, onéreuse et chronophage ; mobilise avec constance des ressources matérielles, humaines et financières pour réussir l'extraction, le traitement et l'acheminement des minerais en question. La maîtrise du processus décisionnel et de sa cohérence et la fiabilité des données tout au long de ce processus sont par conséquent une affaire délicate et difficile à entreprendre. Il nous paraît donc judicieux de proposer des modèles décisionnels qui répondent aux besoins spécifiques de cette activité. Cette contribution aura des retombées pratiques sur la recherche industrielle et des enrichissements au plan scientifique. Cette question de recherche, prenant ses racines dans ce constat, nous amène ensuite à notre deuxième question de recherche.

- **QR4.** Comment concevoir un outil complet, adapté et efficace permettant d'accompagner les décideurs miniers dans la construction rapide et cohérente des programmes de planification de l'extraction ?

Si l'intérêt de proposer et concevoir un système d'aide à la décision pour la planification minière s'avère fondé, la question de la nature et des caractéristiques de l'outil d'aide à la décision qui doit être conçu et implémenté dans le processus de planification minière n'est pas évidente. L'outil doit automatiser la construction cohérente des programmes d'extraction dans un premier lieu. Explorer, analyser et évaluer ces programmes en matière d'efficacité et d'efficience dans un deuxième lieu. Et finalement, permettre une meilleure prise de décision, alignant et réconciliant les différents objectifs qui découlent des trois niveaux décisionnels. Il en découle par conséquent plusieurs questions qui sont enchâssées aux deux premières :

- **QR5.** Comment peut-on proposer une architecture du système d'aide à la décision adapté aux besoins décisionnels du contexte minier, en matière de

fiabilité des données, fidélité de la modélisation au réel, comparaison et sélection des scénarii performants ?

Si l'intérêt de proposer un système d'aide à la décision pour la planification minière s'avère fondé, si le besoin des responsables miniers, la nature du problème de planification traité ainsi que la nécessité de l'investigation scientifique concernant le processus d'évaluation d'un programme d'extraction exigent une adaptation ou une construction d'un système d'aide à la décision, notre proposition doit prendre racine d'une observation perspicace du terrain d'étude, de l'état d'art de la littérature et des raisonnements en collaboration avec les responsables miniers. Ceci dans le but de définir les composantes de l'outil souhaitées, ainsi que les rôles et les interdépendances entre ces derniers. Dès lors, nous nous posons les questions suivantes :

- **QR6.** Comment simplifier la construction rapide et cohérente des programmes d'extraction à moyen et court terme en assurant le respect des contraintes techniques du gisement minier ?
- **QR7.** Comment évaluer et analyser l'ensemble des programmes d'extraction générés ? Quels sont les critères de sélection du programme d'extraction le plus performant qu'il convient d'adopter sur le terrain ?

L'ensemble des travaux de ce document essaie de répondre à ces différentes questions.

6. FACTEURS DE COMPLEXITE

À la suite de l'étude et l'analyse approfondie du terrain, nous avons pu identifier plusieurs facteurs de complexité liés au contexte étudié :

- L'activité de l'exploitation minière d'une mine à ciel ouvert, nécessite l'enlèvement des couches superposées de stériles et de minerai. La mine étudiée est exploitée « en découverte », une méthode d'exploitation qui suppose un enchaînement cyclique d'opérations liées principalement à l'extraction et l'évacuation du minerai, cette méthode s'applique aux gisements stratiformes. La complexité réside dans la nature géologique du gisement, constitué d'une

alternance de couches de minerais et de stériles. Cette nature impose des contraintes techniques d'extraction liées à l'interdépendance des couches phosphatées, l'ordre des opérations dans le processus d'extraction, l'affectation des machines d'extraction selon leurs caractéristiques techniques.

- La modélisation fiable et précise du processus d'extraction minière avec un niveau de granularité souhaité est un autre facteur de complexité. En effet, la construction d'un programme de planification sous-entend la précision du choix des cases à extraire, leurs appartenances par rapport aux zones du gisement, et l'affectation des machines traitant la case ou l'ensemble des cases tout au long du processus d'extraction.
- L'enjeu de la fiabilisation des données est souvent négligé. Cependant, dans de nombreux cas même la meilleure des modélisations peut sembler inefficace, non pas par manque de justesse, mais plutôt par manque de cohérence des données d'entrées. Le principe du « Garbage in Garbage out » est une réalité. Il est donc fondamental, pour évaluer la pertinence des modèles conçus, de s'assurer que les données structurelles et dynamiques du gisement minier, des ressources et de l'évolution sur le chantier d'exploitation sont cohérentes.
- L'aspect opérationnel tactique du problème de planification de l'extraction ressort plusieurs critères conflictuels concernant les intérêts des décideurs du top-management de la chaîne logistique minière confrontés à ceux des dirigeants opérationnels de la mine. La réconciliation de ces facettes décisionnelles et le besoin d'approfondir la compréhension des enjeux de la planification minière nécessitent donc une réflexion profonde pour choisir une méthode permettant de raffiner le processus décisionnel.

7. CONCLUSION

Nous avons décrit dans ce chapitre le cadre global de notre travail de thèse. Tout d'abord, nous avons situé notre travail vis-à-vis des postures épistémologiques, nous nous inscrivons dès lors dans une recherche à caractère constructiviste, pragmatique. Nous nous considérons une partie intégrante de la réalité du terrain que nous étudions. Cette posture nous permet d'agir de façon intentionnelle sur l'amélioration de

l'évolution de notre terrain autant que partie active. Nous avons privilégié cette posture due au fait que la connaissance élaborée est fondée sur l'expérience active ainsi que les itérations entre théorie et terrain, afin de tenir en compte les recommandations pertinentes et la réintégration des besoins qui se clarifient au fil du temps et à la suite de la mise en épreuve des modèles et du DSS développés.

Nos valeurs se trouvent ainsi refléter par notre travail qui a pour objectif de comprendre et d'expliquer comment le processus de planification dans le cas de l'extraction minière à ciel ouvert se structure. Ensuite, de reconstruire et valider un outil qui représente fidèlement et finement ce processus et tient en compte les enjeux décisionnels opérationnels et tactiques des acteurs. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous expliquons les rapports entre les centres d'études doctorales et le partenaire industriel dans le cadre d'une collaboration entre le centre d'étude doctorale de l'université Mohammed 6 polytechnique (UM6P) au sein du laboratoire du management industriel et logistique (EMINES), au sein du laboratoire de recherche en sciences de gestion Panthéon-Assas (LARGEPA) ainsi que le partenaire industriel OCP (office chérifien du phosphate). Nous décrivons de plus près dans la troisième partie la nature de notre terrain d'étude pour faciliter la compréhension et l'immersion dans ce contexte particulier. Et finalement, nous exposant nos questions de recherches, qui s'inscrivent dans une perspective qui se situe entre génie industriel et Sciences de Gestion, au cœur du Supply Chain Management. Nous poursuivons dans le chapitre deux la contextualisation, cette fois-ci auprès de la revue de littérature scientifique. Nous expliquons comment nous avons procédé à situer notre travail et à discerner ses points de similitude, différence et originalité par rapport aux différents travaux effectués par d'autres chercheurs au sein de la communauté scientifique.

Chapitre II

Les modèles de planification et d'aide à la décision dans la Supply Chain minière

1. Introduction.....	46
2. Les modèles de la planification minière.....	48
2.1. Modèles stratégiques miniers.....	49
2.2. Modèles tactiques de séquençage de blocs minier	50
2.3. Modèles tactiques opérationnels d'allocation d'équipements miniers.....	51
3. Les modèles de décision et les systèmes d'aide à la décision.....	53
3.1. DSS caractéristiques et typologie.....	53
3.2. DSS et amélioration de la performance industrielle minière.	57
3.3. DSS pilotés par un modèle de la simulation à évènement discret	61
3.4. DSS orientés vers la sélection des scénarios performants	65
4. Approche de recherche ascendante et descendante	73
4.1. Approche descendante, ascendante et hybride : avantages et limites	74
4.2. Applications des approches dans le secteur minier	80
4.3. La recherche action et les approches ascendantes et descendantes	83
5. Conclusion	87

1. INTRODUCTION

Généralement, un modèle est développé dans le prolongement d'une théorie, dont il est en fait une projection [Simon, 1957]. La production d'un modèle est fondée sur le principe d'objectivité, d'intelligibilité et de rationalité. Il agit comme un outil de description, de représentation et d'analyse, et constitue donc un moyen de découvrir de nouvelles relations, d'établir de nouveaux faits, d'énoncer de nouvelles hypothèses, de définir des méthodes novatrices d'intervention, de corriger certaines erreurs ou insuffisances par rapport à la perception et à la compréhension d'une partie du réel, et enfin de prévoir, si cela est possible, le cours des événements. Autrement dit, un modèle est une représentation systématique, simple et provisoire relative à des observations et à des mesures. Cette représentation est constituée de signes, de symboles, de formes géométriques ou graphiques, et de mots. Selon [Willett, 1996], les caractéristiques d'un modèle sont les suivantes.

- Un modèle ne représente que certaines caractéristiques de l'objet ou du phénomène étudié.
- Ces caractéristiques sont énoncées sous la forme d'un ensemble de propositions systématiques relatives aux observations et aux mesures faites sur certains aspects d'un objet ou d'un phénomène.
- Un modèle est toujours plus simple que l'objet, le phénomène ou le processus qu'il est supposé représenter et expliquer. C'est un moyen servant tant à la représentation qu'à l'étude d'un phénomène. C'est également un outil intellectuel ou concret.
- Un modèle est provisoire en ce sens que l'évolution des connaissances et de la compréhension de ce qu'il représente mène à sa transformation ou à son rejet.

Cette section est consacrée à la discussion des modèles de la planification minière, des modèles de décision et de l'intégration décisionnelle dans la chaîne logistique. Elle est divisée en trois sections : la section (2) définit et présente les caractéristiques des modèles de la planification dans le secteur minier en trois sous-sections : les modèles stratégiques, tactiques et tactiques opérationnelles. Elle discute également le travail de plusieurs chercheurs sur les différents niveaux. La section (3) porte sur la définition

des modèles de décision et la description d'un système d'aide à la décision en quatre sous-sections : les systèmes d'aide à la décision et l'amélioration de la performance industrielle, les systèmes d'aide à la décision dédiés à l'industrie minière plus particulièrement, les systèmes d'aide à la décision basés sur la simulation comme module de résolution et finalement les systèmes d'aide à la décision conçus pour la comparaison des scénarios alternatifs. Ensuite, la dernière section (4) parle des défis de l'intégration, la cohérence et la réconciliation décisionnelle dans les chaînes logistiques et définit les approches décisionnelles Top-Down et Bottom-Up. Dans trois sous-sections, nous explorons les avantages et inconvénients d'application des deux approches, discutons les travaux des chercheurs et décrivons le point de réconciliation décisionnelle passant par une approche hybride entre les approches ascendantes et descendantes. Nous expliquons également le lien entre ses approches et la recherche-action, nous discutons l'intérêt de concevoir une démarche globale visant l'intégration décisionnelle en se basant sur la conception de(s) modèle(s) décisionnel(s) assurant la prise en compte des défis des différents niveaux de décision et ces parties prenantes.

Après plusieurs lectures exploratoires, nous avons sélectionné pour synthétiser cette revue de littérature un ensemble de 100 articles. Dans la grille d'analyse (voir **Annexe 1**), nous précisons quelques attributs que nous avons utilisés dans notre analyse de la revue. Les mots clés utilisés pour chaque partie de la revue de littérature sont rassemblés dans le tableau suivant :

Table 1 : Mots clés utilisés pour effectuer la revue de littérature

PARTIE CONCERNEE	MOTS CLES UTILISES
LES MODELES DE LA PLANIFICATION MINIERE	Scheduling ; Planning ; Open-pit mine, Ore extraction ; Extraction process ; Scheduling programs ; Mining industry ; Mining process ; Modeling ; Scheduling models ; Mining Models; Tactical bloc sequencing ; Strategic mine models; Decision making in mines; etc.

**LES MODELES DE DECISION
ET LES SYSTEMES D'AIDE A
LA DECISION**

Decision models ; Decision support systems, Decisional typology; Taxonomy of decisions; DSS characteristics; DSS roles; DSS and supply chain management performance; Model based DSS ; Optimization DSS; Simulation DSS; Discrete event simulation, Alternative solutions; Multi-criteria decision making; DSS for solution selection; Selection of alternatives; Solution comparison; Multi-criteria DSS; Multi-criteria decision models; DSS architecture ; DSS conceptual frameworks; etc.

**APPROCHE DE RECHERCHE
ASCENDANTE ET
DESCENDANTE**

Bottom-up ; Top-down ; Decisions reconciliation ; Trade-off Decisions ; research decision approaches; action-research; Top-management and operational decision makers ; confronting decisions; Operational and tactical decisions; Hierarchical decision making; ascending and descending decision making; etc.

2. LES MODELES DE LA PLANIFICATION MINIERE

Nous nous concentrons ici sur l'exploration de la littérature sur la planification minière dans les mines à ciel ouvert. L'extraction à ciel ouvert est utilisée lorsque le minerai est proche de la surface de la terre. Les caractéristiques des mines à ciel ouvert diffèrent selon le minerai à extraire et les débris à enlever pour accéder au minerai. Après l'étude du terrain, si les prospecteurs jugent viable l'extraction d'un minerai particulier. Ils doivent déterminer la conception de la mine à ciel ouvert et le plan d'exploitation qui y sera exécuté [Newman et al, 2010]. Nous distinguant ici trois principaux niveaux de planification dans une mine : stratégique, tactique et tactique opérationnelle.

2.1. Modèles stratégiques miniers

Au niveau de la planification stratégique, les décideurs sont confrontés à différentes décisions. Tout d'abord, un modèle de corps minéralisé doit être développé dans lequel le gisement est discrétisé en une grille de blocs. Ce premier modèle offre une visibilité sur le volume de matériaux minéralisés que le dépôt minier contient et ses propriétés minérales correspondantes [Bednarczyk, 2017]. Ensuite, la valeur de chaque bloc est évaluée en utilisant les prix du marché du minerai avec les coûts d'extraction et de traitement [Cao et al, 2023]. À ce stade, une modélisation géométrique du gisement minier peut être synthétisée. Les blocs sont utilisés comme points de référence pour ajouter des contraintes géométriques afin d'assurer la stabilité du processus d'extraction et la capacité des équipements d'extraction à accéder à l'espace minier [Tabesh et al, 2023]. Deux méthodes classiques sont utilisées pour déterminer la surface de la mine : i) la méthode du cône flottant présentée par [Laurich, 1990] ; et ii) la méthode exacte et traçable informatiquement pour la conception de mines à ciel ouvert présentée par les travaux de [Lerch et Grossmann, 1965], étendue par la suite et présentée comme un programme entier par [Hochbaum et Chen, 2000]. La première méthode repose sur une expansion vers le haut en prenant un bloc comme point de référence pour agrandir la mine vers le haut en fonction des contraintes de la fosse. Dans ce cas, la conception finale de la fosse est basée sur un choix séquentiel de blocs comme point de référence pour l'expansion, afin d'atteindre une conception de fosse raisonnable, mais pas nécessairement optimale. La deuxième méthode est la plus utilisée, pour des raisons principales d'exactitude et d'intégration des contraintes de préséance des blocs en amont de la formulation du problème. [Lerch et Grossmann, 1965] ont utilisé un algorithme de fermeture à poids maximum pour produire une conception optimale. Leurs travaux ont été revus et raffinés par la suite par différents auteurs [Bradley et al., 1985], [Wright, 1989], [Underwood et Tolwinski, 1998], [Hochbaum et Chen, 2000], [Frimpong et al., 2002], [Jalali et al., 2006].

2.2. Modèles tactiques de séquençage de blocs minier

La principale différence entre la planification stratégique des blocs valables pour l'extraction en fonction de leur valeur économique et le problème de planification de l'enchaînement des blocs à l'échelle tactique est l'introduction du paramètre temporel. En fait, la résolution du problème de planification de séquençement de blocs tactiques permet non seulement de déterminer quels blocs doivent être extraits, mais également quand et comment les traités. Ainsi, incluant encore des contraintes supplémentaires concernant les ressources en équipements, les objectifs de production et de transformation. La tendance à agréger les blocs en entités a été fortement présente dans le processus de résolution d'un tel problème. Les premiers travaux de [Busnach et al., 1985] ont résolu le problème en agrégeant des blocs en strates, ou couches horizontales, en simplifiant les contraintes de terrain dans une mine de phosphate en Israël. [Klingman et Phillips, 1998] résolvent un problème similaire, également pour le phosphate, ils notent que leur modèle a été utilisé pour prendre de meilleures décisions tactiques. [Gershon et Murphy, 1989] agrègent les strates à extraire entièrement, y compris le minerai et les débris. [Tan et Ramani, 1992] utilisent une programmation linéaire et dynamique pour traiter les blocs en ignorant leur nature, minerai ou déchet. Tandis que [Samantha et al., 2006] utilisent un algorithme génétique pour proposer une extraction de couches en minimisant l'écart entre l'oxyde de silicium et l'oxyde d'aluminium, deux caractéristiques du minerai.

À partir des années 1990, les chercheurs, tout en essayant de résoudre le problème de planification, sont devenus de plus en plus conscients que les décisions de séquençement devaient être prises au niveau du bloc afin de ne pas compromettre la fidélité de la planification. Mais ceci est venu avec la prise de conscience que ce problème était difficile à résoudre dans un tel contexte en raison de sa structure et de sa taille complexes. La programmation mathématique a continué d'évoluer par les travaux de [Akaike et Dagdelen, 1990] utilisant des multiplicateurs lagrangiens. Élargie par une procédure de relaxation lagrangienne [Kawahata, 2006]. Qui conduisent selon l'auteur à des difficultés à obtenir une solution réalisable à moins que des ajustements sur les limites de capacité ne soient effectués. [Cai, 2001] a également travaillé différemment sur la relaxation lagrangienne en incluant les phases d'extraction dans

une mine à ciel ouvert et en ajoutant des contraintes de capacité de production. Mais il conçoit, après une utilisation pratique sur une mine d'or, que sa solution pourrait représenter des écarts palpables lors du traitement des fosses imbriquées.

Pour résumer, bien que les auteurs aient utilisé la programmation linéaire et dynamique pour résoudre ce problème sur de petites instances, la méthode ne pouvait pas capturer de manière réaliste le séquençement des blocs sur des instances plus large. Cela a amené les auteurs à réorienter leurs travaux vers des techniques de décomposition et des heuristiques conduisant à des améliorations dans la prise de décision concernant l'intégration de la préséance dans le séquençage des blocs. Néanmoins, le résultat présentait toujours des lacunes dans l'affinité et la granularité précise qui rend les solutions pratiques à adopter par les praticiens sur le terrain. La seule utilisation de la programmation mathématique et des techniques heuristiques s'est révélée encore insuffisante. Tandis que l'utilisation de techniques de simulation, offrant une approche plus détaillée et pratique, semblait être survolée tout en se fixant sur l'optimalité théorique pour résoudre le problème. Nous avons alors observé l'existence d'un vide bibliographique abordant ce problème tactique à l'aide de la simulation du processus minier. L'urgente nécessité de produire des travaux de recherche qui puissent s'aligner avec la réalité des décideurs et des praticiens sur les terrains, a soulevé la question de l'applicabilité d'une telle avancée théorique dans la résolution de problèmes sur le terrain et la compréhension des contraintes qui doivent être incluses pour qu'une telle faisabilité soit accessible et efficace à l'usage.

2.3. Modèles tactiques opérationnels d'allocation d'équipements miniers

L'affectation des équipements va de pair avec la détermination d'un planning de production. Dans la littérature nous observons que ces deux problèmes sont généralement traités séparément. Cependant, en théorie, il n'est pas concevable de suivre une telle séparation, du fait que ces décisions sont intimement liées. La faisabilité d'un planning de production est rendue possible par la détermination même des ressources adéquates pour exécuter les tâches. Un problème tactique d'allocation des équipements porte souvent sur la taille et les caractéristiques techniques de la flotte

requis. Ces caractéristiques ne peuvent être déterminées sans connaissance des caractéristiques géologiques de la mine et des capacités techniques des équipements. D'autre part, le problème opérationnel consiste à planifier les stratégies de répartition des équipements en fonction des routes, des réseaux de transport, des objectifs et des limites des équipements.

À ce niveau, nous observons que deux méthodes fondamentales sont utilisées pour résoudre le problème d'allocation tactique opérationnelle : la théorie des files d'attente et la simulation [Smith et al., 2021]. [Weintraub et al., 1987] utilisent une heuristique basée sur la programmation linéaire pour acheminer plusieurs camions avec des capacités variables, ce modèle a été utilisé sur une grande mine à ciel ouvert au Chili. [Goodman et Sarin, 1988] présentent un programme optimal d'équipement et de distribution des déchets en utilisant une programmation en nombres entiers couplée à un modèle de transport. [Kappas et Yegulalp, 1991] proposent un modèle basé sur la théorie des files d'attente pour évaluer la performance des équipements miniers à ciel ouvert intégrant les contraintes de capacité, de réseau de transport et de maintenance. Les auteurs s'assurent ensuite de l'exactitude de la solution par simulation. [Oraee et Asi, 2004] présentent une étude de cas sur la mine de cuivre de Songun en Iran, utilisant l'optimisation et la simulation pour la planification des équipements afin d'atteindre les niveaux de production souhaités. Tandis que des résultats numériques ont été présentés par [Najor et Hagan, 2006] concernant l'application du modèle de la théorie des files d'attente sur la mine de Pilbara, en Australie.

De nombreux autres travaux, basent leur résolution sur des modèles de programmation et d'optimisation linéaires ou entiers pour résoudre ce problème en ajoutant des spécificités de leurs domaines d'application correspondants [Naoum et Haidar, 2000], [Alarie et Gamache, 2002], [Burt et al., 2005], [Ta et al., 2005], [Mackenzie et al., 2008], [Tan et Takakuwa, 2016], [Chaowasakoo et al., 2017], [Paravarzar et al., 2020], [Mohtasham et al., 2022] etc. Nous avons observé à la lumière de la littérature qu'il existe peu de travaux de recherche utilisant des techniques de simulation pour résoudre l'allocation d'équipements tactiques opérationnels dans le contexte minier. En plus, ceux qui utilisent des techniques de simulation choisissent principalement la simulation comme outil pour tester et valider les solutions données par les modèles d'optimisation.

Nous discutons plus loin dans la section § 3.3 le fossé observé dans la littérature concernant le rôle de la simulation dans la résolution des problèmes de planification.

3. LES MODELES DE DECISION ET LES SYSTEMES D'AIDE A LA DECISION

Dans la théorie de la décision, un modèle de décision est le point de départ d'une méthode de décision dans un système formel. Il peut également être un réseau de décisions, d'informations et de connaissances connectées qui représente une approche décisionnelle pouvant être utilisée de manière répétée. Le modèle décisionnel sert, d'une part, à clarifier, formuler et transposer mathématiquement ce qui est décrit de manière diffuse dans les décisions prises par un ou plusieurs décideurs, d'autre part, à représenter par des figures géométriques ou par différents types de symboles les diverses propositions ou scénarios possibles. Il offre donc des réponses plus claires et structurées sur la manière dont les décisions sont prises par les acteurs.

3.1. DSS caractéristiques et typologie

Chaque organisation a une grande variété de décisions à prendre, allant des décisions hautement structurées aux décisions non structurées. Les décisions structurées sont répétitives et routinières, et les décideurs peuvent suivre une procédure définie pour les gérer pour être efficace. C'est une décision qui est dans la plupart des cas prise sur une base assez fréquente et est basée directement sur les intrants. Dans le cas des décisions structurées, avoir les informations nécessaires est suffisant pour connaître également la décision qui doit être prise. En revanche, les décisions non structurées et semi-structurées sont celles dans lesquelles le décideur doit fournir un jugement, une évaluation des solutions alternatives et un aperçu de la définition du problème. Une décision non structurée comporte beaucoup d'inconnues. Tandis qu'une décision semi-structurée est une décision dans laquelle la plupart des facteurs nécessaires à la prise de décision sont connus, mais l'expérience humaine et d'autres facteurs extérieurs peuvent encore avoir un impact sur la décision.

D'un point de vue structurel [Gorry et Morton, 1971] et [Keen et Morton, 1978] ont posées les bases des systèmes d'aide à la décision (Décision support system : DSS) en expliquant le rôle d'un système d'aide à la décision à aider une organisation à prendre une décision spécifique ou un ensemble de décisions. Ces systèmes sont conçus pour recueillir des données concernant un processus décisionnel connu (ou partiellement connu) et fournir les informations nécessaires à la prise de décision. Par conséquent, un DSS fonctionne mieux lorsque les décideurs doivent prendre des décisions semi-structurées. Il peut soutenir ces types de décisions en fournissant aux décideurs des outils de collecte d'informations et des capacités de collaboration. En revanche, les décisions structurées représentent de bons candidats pour l'automatisation, mais les systèmes d'aide à la décision ne sont généralement pas conçus pour elles.

Un DSS peut exister à différents niveaux de prise de décision : opérationnelle, tactique ou stratégique. Il concerne tous les types de décideurs du PDG aux gestionnaires de premier niveau et existe pour assister les gestionnaires dans le processus de prise de décision en identifiant, communiquant et coordonnant les informations nécessaires au processus décisionnel, encore plus en offrant une construction cohérente des compromis possibles. Nous retrouvons donc des modèles de décision encapsulés dans les DSS.

Chronologiquement, les bases des systèmes d'aide à la décision ont été posées par [Gorry et Morton, 1971] avant d'être transformées en une approche structurée par [Keen et Morton, 1978]. En outre, les développements des technologies de l'information (TI) ont considérablement augmenté le potentiel des DSS [Shim et al., 2002], [Eom et Kim, 2006], [Bhargava et al., 2007] sans changer les bases. Un DSS peut être décomposé génériquement en :

- Une interface formulant une question complexe partiellement structurée afin de définir un problème structuré.
- Un ou plusieurs modèles de décisions pour résoudre le problème structuré, généralement basé sur un modèle d'optimisation ou de simulation [Power et Sharda, 2007].
- Une interface pour explorer toutes les conséquences d'une solution donnée ainsi que pour la valider ou l'ajuster.

- Une interface de redéfinition du problème lorsqu'aucune solution acceptable n'est trouvée et que la formulation actuelle n'a pas réussi à fournir une solution satisfaisante.

La littérature nous présente une pléthore de définition des DSS qui évoluent au fur et à mesure de leurs développements et utilisations. [Alter, 1980] et [Sprague et Carlson, 1982] ont identifié les caractéristiques majeures auxquelles nous pouvons nous attendre à observer dans un DSS :

- Les systèmes d'aide à la décision sont conçus spécifiquement pour faciliter, clarifier et structurer les processus de prise de décision.
- Les systèmes d'aide à la décision doivent soutenir plutôt qu'automatiser la prise de décision en fournissant aux décideurs les informations et les visualisations nécessaires pour alimenter leurs capacités de collaboration et de jugement.
- Les DSS s'adressent souvent aux problèmes semi-structurés dans lesquelles la plupart des facteurs nécessaires à la prise de décision sont connus, mais le décideur doit fournir un jugement, une évaluation des solutions alternatives et/ou un aperçu de la définition du problème.
- Les DSS doivent pouvoir répondre rapidement aux besoins changeants des décideurs et faire preuve de flexibilité et d'adaptabilité.
- [Holsapple et Whinston, 1981] ajoutent que les DSS doivent posséder un dispositif interactif, avec un langage facile à apprendre et à utiliser.

Dans le but d'améliorer la prise de décision, de nombreux types de DSS ont été construits pour aider les équipes et les individus à prendre des décisions. Certains systèmes fournissent des informations structurées directement aux gestionnaires. D'autres systèmes peuvent aider les responsables et les spécialistes à analyser les situations à l'aide de différents genres de modèles décisionnels. Certains DSS stockent les connaissances et les mettent à la disposition des gestionnaires. D'autres soutiennent la prise de décision des clients et fournisseurs. Selon [Power, 2002], ils peuvent être classés en cinq catégories :

- **DSS axés sur la communication (Communications-Driven DSS) :** sont destinés aux décideurs travaillant en groupe, leur objectif est de faciliter la

conduite d'une réunion ou de permettre aux utilisateurs de collaborer. La technologie la plus couramment utilisée pour déployer le DSS est un serveur web ou client.

- **DSS axé sur les données (Data-Driven DSS) :**
s'adressent aux responsables, au personnel et aux fournisseurs de produits/services. Il est utilisé pour interroger une base de données afin de rechercher des réponses spécifiques à des fins spécifiques.
- **DSS axé sur les documents (Document-Driven DSS) :**
sont plus courants et s'adressent à un large éventail de groupes d'utilisateurs. L'objectif d'un tel DSS est de rechercher des pages web et de trouver des documents à partir d'un ensemble spécifique de mots-clés ou de termes de recherche.
- **DSS axé sur la connaissance (Knowledge-Driven DSS) :**
Les DSS axés sur la connaissance ou "bases de connaissances" sont une catégorie fourre-tout qui couvre un grand nombre de systèmes destinés aux utilisateurs de l'organisation qui les met en place, mais qui peuvent également inclure d'autres personnes interagissant avec l'organisation - par exemple, les consommateurs d'une entreprise. Il est essentiellement utilisé pour fournir des conseils de gestion ou pour choisir des produits/services.
- **DSS piloté par un modèle (Model-Driven DSS) :**
Les DSS pilotés par des modèles sont des systèmes complexes qui aident à analyser les décisions ou à choisir entre différentes options. Ils sont utilisés par les responsables et utilisent des modèles financiers, des modèles de représentation, des modèles d'optimisation et de simulation. ils mettent l'accent sur l'accès et la manipulation d'un modèle décisionnel à partir du DSS.

[Marakas, 2003] souligne que les systèmes d'aide à la décision jouent un rôle important dans toute industrie et deviennent essentiels dans les activités de décision d'investissement industriel. La manière dont un DSS amène les utilisateurs à prendre une décision devrait permettre une flexibilité tout en réduisant l'ambiguïté et en facilitant la compréhension des recommandations et des solutions données. Dans ce qui suit, nous décrivons le lien étroit entre l'utilisation des DSS et l'amélioration de la

performance au sein des industries. Ensuite, nous convergeons en particulier vers l'utilisation des DSS dans le contexte minier.

3.2. DSS et amélioration de la performance industrielle minière.

Les DSS sont installés pour améliorer la productivité [Felsberger et al., 2022], collecter des données provenant de diverses sources et fournir une prise de décision plus rapide et meilleure [Psarommatis et Kiritsis, 2021]. En littérature, nous trouvons des applications diverses sur plusieurs domaines et traitent des problèmes nombreux. Par exemple, nous avons « Le Dispatcher », un DSS d'ordonnancement développé par [Freed et al., 2007] pour une installation de test de dispositifs à semi-conducteurs. Les auteurs discutent de la manière dont une des installations de l'entreprise utilise le DSS construit en interne de manière stratégique, pour augmenter ses performances et sa capacité concurrentielle. Ensuite [Krishna et al., 2009] présentent la conception d'un DSS dans le but d'augmenter l'efficacité et l'efficacité du processus de planification et d'ordonnancement. Ce système intègre la planification et l'ordonnancement des machines avec la gestion des stocks pour une industrie de fabrication multiproduit. Le DSS visuel basé sur le web développé par [Krishnaiyer et Chen, 2017] dans un publipostage vise à aider l'organisation avec la fonction d'ordonnancement et de planification de la capacité tout en étendant le succès au service client, à la qualité et aux opérations d'entrepôt. Tandis que, un autre DSS développé par [Torres-Sanchez et al., 2020], utilise la régression linéaire (LR), la régression par forêt aléatoire (RFR), et la régression par vecteur de support (SVR) comme moteurs du système d'aide à la décision en matière d'irrigation. Dans le but de résoudre le problème de programmation automatique de l'irrigation, le secteur agricole, gérant ainsi les stratégies d'irrigation déficitaire et économisant l'eau. Dans l'industrie textile, [Ribeiro et al. 2021] ont implémenté un DSS pour la planification de la production en utilisant un algorithme d'optimisation évolutionnaire multi objectif (NSGA-II) pour déterminer le meilleur plan d'allocation de la production.

[Jie, 2022] a conceptualisé un DSS agricole précis et intelligent basé sur la combinaison de la technologie du Big Data pour effectuer une extraction des données agricoles et un algorithme d'arbre de décision pour traiter la classification des données. Le DSS effectue un traitement précis des données agricoles, fait des prévisions efficaces et synthétise les décisions pour obtenir les meilleurs résultats. Les résultats montrent une augmentation notable des performances concernant la précision des prédictions et les décisions à appliquer pour s'y aligner. Alors que [Khanna et al., 2022] ont conçu un DSS intégré pour lier les performances des processus de la chaîne logistique (CL) au délai de mise sur le marché. Ils visent à évaluer l'importance relative des processus CL performants essentiels à la réduction du Time To Market (TTM) d'une entreprise en prenant le cas d'une entreprise de vêtements. Le DSS proposé est basé sur le système d'inférence floue (FIS) et le processus de hiérarchie analytique (AHP). La contribution de ces DSS peut se résumer à guider les gestionnaires et les décideurs pour identifier les domaines clés au niveau opérationnel qui doivent être améliorés et qui ont un impact sur la performance au niveau stratégique.

Mais quand est-il de l'industrie minière ? L'utilisation des DSS est-elle aussi bien ancrée dans un environnement aussi complexe ? Nous parcourons et discutons particulièrement les DSS conçus pour faire face aux défis du secteur minier.

En effet, l'industrie minière est une industrie immergée dans un marché caractérisé par un grand nombre d'intervenants aux objectifs souvent contradictoires. Il représente un contexte à la fois extrêmement riche, complexe et dynamique. L'évolution de cette industrie selon [Carter, 2012] a été plutôt erratique caractérisée par des cycles de volatilité, d'instabilité et de manque de durabilité. D'un point de vue purement logique, l'exploitation minière est par essence une série d'opérations qui ont une durée de vie finie, elle offre des ressources non renouvelables qui créent une dépendance humaine qui ne peut pas durer indéfiniment comme l'affirme [Stermann et al. 2012]. Cependant, un autre point de vue serait de considérer la capacité d'une telle activité à fournir des opportunités durables de croissance et de développement économiques et sociétaux, si elle est bien gérée avec un minimum de dommages environnementaux. En fait, selon [Bruno et al. 2016]. Bien que les projets miniers soient des entreprises temporaires, leur impact économique génère et induit un développement social durable à long terme pour les communautés le long de la chaîne de valeur. Compte tenu des caractéristiques

fondamentales complexes de l'industrie minière, du marché minier et puisqu'il semble y avoir un conflit sans fin entre les objectifs à court et à long terme dans un tel contexte [Sterman et al., 2015], il faut être particulièrement attentif à la possibilité d'un échec de la mise en œuvre de la décision, lorsque le besoin de maintenir la performance l'emporte sur le besoin d'apprendre sur un état donné, le paradigme du pire avant le meilleur peut être particulièrement gênant dans de tels contextes. Ainsi, l'importance de la mise en œuvre de systèmes d'aide à la décision à différents niveaux de décision monte en flèche et offre de nombreux avantages de réfléchir, d'explorer et d'analyser en profondeur les possibilités avant de prendre des décisions irrévocables ou du moins éprouvantes sur le chemin de l'exécution sur le terrain.

Une structure de niveau de décision [Anthony, 1965], serait utile pour comprendre le dilemme des décisions dans le contexte de l'industrie minière, deux clusters fondamentaux émergent : le niveau de décision stratégique puis le niveau de décision tactique et opérationnel.

▪ *Perspective stratégique*

Le niveau de décision stratégique traite des décisions à long terme impliquant des politiques de gestion et le développement des ressources [Bruno et al. 2016]. Les impacts de telles décisions doivent être pris en compte lors de la conception d'investissements environnementaux et sociaux irréversibles qui dépendent incontestablement des investissements productifs [Pimentel et al, 2013]. Les décisions au niveau stratégique englobent la capacité d'extension d'une mine, la conception du réseau minier, la technologie des équipements miniers, etc. ces décisions sont fortement et généralement influencées par les cycles économiques, bien que des travaux récents mettent l'accent sur l'intégration de l'évaluation des impacts afin de maintenir des stratégies de durabilité cohérentes [Aldy et Stavins, 2012]. Les systèmes d'aide à la décision offrent alors une sélection de solutions et d'alternatives en équilibrant les objectifs économiques, environnementaux et sociaux pour les entreprises minières. De plus en plus de recherches s'élèvent à ce niveau, y compris les travaux de [Vergara-zambano et al, 2022] concernant l'intégration des énergies renouvelables comme un aspect clé de la décarbonation de l'industrie minière du tonnelier. Où il y a un compromis entre les coûts et les émissions de GES, en plus d'une analyse plus

approfondie de l'impact environnemental des systèmes énergétiques. [Collins et Kumlar, 2020] utilisent les cadres de la théorie des jeux pour analyser et améliorer la gestion environnementale dans l'industrie minière et une approche décisionnelle multicritère est recommandée pour les fonctions de gain.

▪ ***Perspective tactique et opérationnelle***

L'objectif principal du niveau de décision tactique est l'efficacité de l'allocation des ressources pour satisfaire les exigences de la demande tout en respectant les contraintes d'exploitation sur un horizon temporel donné [Bruno et al., 2016], ainsi que l'efficacité de la production et du transport des opérations minières [Absi et al., 2013]. Le niveau de décision opérationnel est plus concerné par la planification des décisions à court terme. Selon [Newman et al, 2010], les outils basés sur la recherche opérationnelle soutenant la production et la planification des mines ont encore de nombreuses lacunes pour intégrer des objectifs conflictuels. Les opérations minières qui fonctionnent sur de gros camions tout-terrain peuvent être intéressées par l'optimisation non seulement de la distance parcourue et de la productivité, mais aussi des objectifs spécifiques de consommation d'énergie et des émissions. La même approche pourrait être envisagée pour les opérations de transport ferroviaire du minerai. [Gupta et al., 2021] proposent le développement d'un modèle d'optimisation multi objectif intégré pour le transport durable dans l'industrie minière où la hiérarchisation des véhicules basée sur les attributs de durabilité est effectuée à l'aide de la technique AHP et les scores d'efficacité des types de véhicules sur les itinéraires de transport sont obtenus à l'aide de la technique DEA. En fait, le routage durable des véhicules [Lin et al, 2014] est une tendance importante pour la recherche et la pratique sur les opérations minières. Un autre défi concernant les opérations minières serait l'intégration adéquate des contraintes géologiques et d'équipements dans un ordonnancement à court terme afin d'assurer une réelle faisabilité sur le terrain [Alaoui et al, 2019]. Une poignée d'articles de recherche commencent à aborder ces aspects dans le domaine minier, mais il faut éclairer davantage les décisions tactiques et opérationnelles dans l'industrie minière pour la principale raison d'acquérir une compréhension suffisante des complexités en jeu et de fournir une base solide pour l'alignement futur entre les niveaux de décision stratégique, tactique et opérationnelle dans l'industrie minière. Les impacts environnementaux à ce niveau sont associés à l'utilisation de l'énergie et de l'eau.

Plusieurs opportunités existent donc ici aussi pour développer des approches d'optimisation des réseaux d'eau et d'énergie, de recirculation et de régénération. [Herrera-Leon et al, 2019], proposent une nouvelle approche d'optimisation pour la conception de systèmes intégrés d'approvisionnement en eau sur le cas d'étude du Chili, introduisant le compromis entre les aspects économiques et environnementaux.

Cette section de la revue de littérature nous a permis de voir au plus clair que les enjeux de planification montent en complexité dans le contexte minier. La structuration des problèmes de planification sous un point de vue décisionnel nous a permis de constater que peu de DSS traitent les problématiques de planifications dans le secteur minier, encore moins lorsqu'il s'agit du niveau tactique opérationnel. Ceci est dû principalement à la complexité des contraintes du terrain (nature géologique du dépôt minier, séquençement et interdépendances des opérations dans le processus d'extraction et de transformation des minerais, criticité des enjeux de déplacement des équipements d'extraction lourde et coûteuse, etc.). Notre travail, ayant comme terrain d'application réel une mine à ciel ouvert d'extraction du phosphate permettra donc, avec le peu de travaux de recherche ayant la même orientation, de démystifié la réalité concrète d'un tel secteur et ses besoins. Ainsi qu'approfondir notre compréhension collective des enjeux de l'utilisation des DSS pour la planification tactique opérationnelle minière.

En raison de la pénurie des travaux de recherche concernant les DSS tactiques opérationnels appliqués au secteur minier, nous examinons dans les deux prochaines sections l'utilisation de la simulation comme modèle décisionnel encapsulé dans les DSS. Nous enquérons des DSS faisant rupture avec l'architecture classique en boucle et s'orientant vers des architectures, plus innovantes et adéquates aux problèmes traités, permettant la comparaison et le choix entre des solutions multiples selon les critères des décideurs.

3.3. DSS pilotés par un modèle de la simulation à évènement discret

L'approche de simulation à évènement discret (SED) est l'une des techniques de modélisation les plus populaires [Jeffrey et Seaton, 1995] ; [Fildes et Ranyard, 1997] ;

[Clark, 1999]. Elle a été utilisée dans le domaine industriel pour aborder différents problèmes pour diverses raisons. En effet, plusieurs DSS axés sur l'ordonnancement et la planification sont orientés optimisation [Keskinocak et al, 2002] ; [Freed et al, 2007] ; [Galasso et al, 2009] ; [Krishnaiyer et Chen, 2015] ; [Ardjmand et al., 2016]. En revanche, très peu de DSS sont basés sur la simulation. En parcourons la littérature, nous avons pu extraire quelques DSS de planification qui encapsulaient un modèle de simulation, pour effectuer des rôles différents. Selon [Figueira et Lobo, 2014], il faut distinguer les différents rôles et objectifs de l'utilisation du SED. Pour ce faire, ils ont constitué une taxonomie qui repose sur quatre catégories principales :

- **Catégorie 1** : Fonction d'évaluation - où la simulation est utilisée pour évaluer des solutions,
- **Catégorie 2** : Construction d'un modèle de substitution - qui applique la simulation pour la construction d'un modèle de substitution, utilisé pour guider la recherche de solutions,
- **Catégorie 3** : Amélioration du modèle analytique - où la simulation améliore un modèle analytique donné en affinant ses paramètres ou en l'étendant,
- **Catégorie 4** : Génération de solutions - où la fonction principale d'un modèle de simulation est de générer des solutions.

Par exemple dans la première catégorie [Heilala et al, 2010] ont développé un DSS d'ordonnancement basé sur la simulation pour la planification des opérations de fabrication axée sur le client. Les auteurs discutent aussi comment la simulation à événements discrets a été principalement utilisée seulement comme outil d'analyse du système de production pour évaluer de nouveaux concepts de système de production. Cependant, ils défendent que les développements récents aient rendu les modèles SED utilisables dans la production opérationnelle quotidienne et la planification des installations de fabrication comme outil de résolution et non seulement d'évaluation et de test de validité. Selon eux, un DSS basé sur la simulation peut être utilisé pour aider les planificateurs à organiser la production plus efficacement dans une fabrication mondiale turbulente. Cet article présente les défis pour le développement et les efforts pour surmonter ces défis pour le DSS basé sur la simulation. Leur approche suit des étapes définies : intégration des données, l'alimentation et l'automatisation du modèle de simulation, la visualisation des résultats et la prise en charge des changements

interactifs pour une prise de décision interactive et efficace. [Vieira et al., 2000] présentent un DSS basé sur un algorithme de planification utilisant une règle de répartition du premier entré, premier sorti pour séquencer les travaux et il regroupe également les travaux avec des types similaires pour gagner du temps de configuration. Cet algorithme est ensuite couplé à une simulation pour valider et montrer que le modèle analytique prédit avec précision la performance sous l'algorithme de planification proposé.

Nous illustrons la deuxième catégorie par le travail de [Cho et al, 2019] qui ont proposé un cadre d'aide à la décision pour le planning d'un clinicien en utilisant une analyse de simulation. Dans le cadre proposé, un modèle de simulation axé sur les données est construit sur la base d'une analyse d'exploration de processus, qui comprend la découverte de processus, l'analyse du taux d'arrivée des patients et l'analyse du temps de service, guidant ainsi la recherche de solutions. En revanche dans la troisième catégorie, nous discutons le travail de [Fanti et al, 2014], où les auteurs traitent la conception et le développement d'un DSS qui gère les flux de marchandises et les transactions commerciales entre un port et un port sec à un niveau de décision tactique et opérationnel. Une architecture DSS intégrée est présentée et basée sur des modules de simulation et d'optimisation, où le modèle de simulation est utilisé pour fournir les mesures de performance pour le module d'optimisation. [Fanti et al, 2015] ont proposé une extension du DSS précédemment développé tout en intégrant les transactions commerciales. De la même manière [Comi et Rosati, 2015] fournissent un DSS pour comprendre et simuler la structure du système de fret urbain et pour calculer certains indicateurs qui, comparés aux valeurs cibles et de référence, permettent d'identifier son niveau de service. Tandis que, [Turker et al, 2019] ont proposé un DSS pour l'ordonnancement dynamique de job-shop en utilisant des données en temps réel avec la simulation. Ce DSS vise à augmenter la performance des règles de dispatching en définissant, lorsque le nombre de travaux en attente dans la file d'attente d'un poste de travail quelconque du job-shop tombe à une valeur critique, l'ordre des planifications dans ses postes de travail précédents pour alimenter le poste de travail le plus rapidement possible. [Galasso et al, 2009] proposent un cadre d'aide à la décision qui vise à ordonnancer la chaîne d'approvisionnement en fonction d'une demande flexible. En conséquence, un modèle de planification linéaire en nombres entiers mixtes intégrés

est utilisé avec un cadre simulant le processus de planification à horizon mobile est proposé. Il prend en compte les capacités de réaction du système planifié et de son environnement (fournisseurs, sous-traitants et clients), ainsi que les coûts correspondants. La simulation suggérée est utilisée comme outil d'amélioration des solutions proposé par le modèle d'optimisation. Elle peut dès lors aider le décideur à faire face à une demande incertaine ou flexible, en utilisant diverses stratégies de planification. Dans l'ensemble des articles analysés, la simulation prend le rôle d'amélioration du modèle d'optimisation ou d'analyse lié en affinant ses paramètres. Alors que, le travail de [Buddea et al, 2022] s'inscrit dans la quatrième et dernière catégorie. Les auteurs développent un DSS basé sur un modèle de simulation d'événements discrets comme modèle de résolution, qui s'appuie sur une étude de cas réelle englobant une approche multi-items et multi étapes avec des contraintes de capacité. La simulation du processus de production : entrées, schéma de processus, décisions et sorties ; génère différentes solutions et offre une transparence sur les effets des différentes techniques de dimensionnement des lots sur les facteurs de performance. Les gestionnaires sont alors équipés pour visualiser les effets, les compromis, modifier les hypothèses et les calculs, discuter des alternatives et éventuellement sélectionner la taille de lot la mieux adaptée à leur stratégie. Les auteurs testent huit scénarii de dimensionnement de lot différents pour en déduire des tailles de lot optimales. Dans ce cas la simulation est utilisée comme générateur de solution. Nous observons que, non seulement, les DSS basés sur la simulation sont moins fréquents que les DSS basés sur des modèles d'optimisation. Mais encore plus, la plupart des DSS fondés sur un modèle de simulation ne l'utilisent pas pour la résolution et la génération des solutions alternatives. Cependant, dans le cas où le module de résolution donne lieu à plusieurs solutions alternatives, faisant ainsi rupture avec le schéma classique d'un DSS où nous avons affaire à une seule solution à la sortie du modèle de résolution, comment les DSS s'ont prennent à la continuité du processus décisionnel permettant la sélection et la validation de la solution adéquate parmi un ensemble de solutions suggérées ?

3.4. DSS orientés vers la sélection des scénarios performants

La plupart des DSS suivent l'architecture classique [Keen et Morton, 1978] consistant à produire une solution à la fois. Très peu traitent de la génération et de la sélection de solutions alternatives. Dans de tels cas, d'autres composants doivent être intégrés dans le DSS afin d'analyser simultanément les différentes alternatives, et des critères doivent être définis pour mesurer l'efficacité de l'alternative. De plus, chaque problème a ses caractéristiques et ses spécificités. Selon [Felsberger et al., 2016], afin de comparer des alternatives, il est nécessaire de construire et d'intégrer un composant dans le DSS qui permettra d'atteindre les objectifs et les critères sélectionnés et d'offrir une analyse alternative qui conclut l'évaluation des alternatives par rapport aux critères sélectionnés.

Un DSS multicritère précoce est présenté par [Adhikaria et al, 2021] pour assurer la sélection de méthodes de réparation de pente appropriées. Dans leur cas, l'expérience limitée de quelques membres du personnel d'entretien domine le choix des méthodes de réparation des pentes pour restaurer les pentes défailtantes. Par conséquent, certaines méthodes potentielles qui peuvent avoir de meilleures performances pourraient être négligées. Le DSS proposé vise à hiérarchiser et à recommander des méthodes de réparation de talus basées sur l'expérience collective et les connaissances d'experts. Le DSS évalue les méthodes potentielles en fonction de plusieurs critères de sélection, tels que l'impact sur le trafic, la durée de vie des méthodes de réparation et la rapidité de réparation, pour recommander les méthodes les plus appropriées à choisir. La complexité de l'analyse et de la comparaison de scénarios alternatifs multidimensionnels conduit à considérer explicitement plusieurs critères et objectifs à optimiser simultanément dans l'analyse des préférences. Le DSS pour l'ordonnancement de la production de papier présenté par [Keskinocak et al, 2002] est basé sur un système multi agent travaillant de manière asynchrone : les agents « constructeurs », « améliorateurs » et « destructeurs ». La tâche de l'agent « Constructeur » est de définir le problème et de créer de nouvelles solutions. L'agent « Improver » améliore l'ensemble des solutions en modifiant et en combinant les solutions existantes, l'agent « Destroyer » élimine les mauvaises solutions et concentre les efforts des « Improvers » afin de limiter le nombre de solutions. Le but de ce DSS est de prendre en

compte les interactions entre les différentes étapes du processus de fabrication et de distribution. À l'aide d'une approche d'optimisation multicritères, le système génère plusieurs programmes de planification de l'entreprise pour révéler les compromis entre les objectifs multiples, souvent concurrents.

[Teniwut et Hasyim, 2020] ont affirmé que, sur la base de la revue systématique de la littérature menée, l'approche largement utilisée dans la chaîne logistique est la prise de décision multicritère (MCDM) et l'approche du système de décision multi objectif (MODM) comme c'est le cas dans les travaux de [Karthik et al., 2015] ; [Boonsothonsatit et al., 2014] ; [Miah et al., 2011]. Dans la revue de littérature, nous trouvons aussi la méthodologie de surface de réponse statistique (RSM), les méthodes d'agrégations et la méthode Pareto comme principales catégories d'optimisation multi objective (MOO) [Alaoui et al., 2021].

La RSM vise à évaluer l'impact des variables de décision en entrée sur la réponse obtenue en sortie, afin de déterminer l'ensemble des paramètres de décision optimaux permettant d'aboutir au meilleur scénario considérant comme une fonction objective [Mongometry, 2014]. [Khuri, 2017] définit la RSM comme une approche statistique expérimentale dans le but est d'apporter une réponse exacte à un problème approximatif. Une première étape dans cette approche est le « screening » des entrées afin de déterminer les variables les plus importantes en termes d'influence sur la réponse, ensuite un modèle de surface de réponse doit être ajusté à la sortie ne variant que les variables "importantes" déterminées, pour enfin parvenir à définir la surface de réponse permettant de calculer l'ensemble optimal des données d'entrée. Pour illustrer le principe, nous examinons quelques travaux de recherche. [Zermane et al., 2016] ont appliqué cette technique pour la détermination des valeurs optimales de paramètres opératoires tels que la température et la pression, qui donne la valeur maximale du rendement d'extraction d'huile essentielle issue de la plante de romarin. [Morovat et al., 2015] présentent une étude visant à prévoir et à développer les conditions de fermentation optimales tout en maintenant l'excrétion d'acétate comme la quantité la plus faible. D'un autre côté [Cassatari et al., 2013], [Desai et al., 2008] et [Downing et al., 1985] ayant utilisés et comparés la méthode RSM avec d'autres méthodes, expliquent que cette technique représente aussi multiples limitations à considérer. [Mosca et al., 2010] expliquent qu'il ne faut pas négliger la présence d'une double

composante d'erreur supplémentaire, la première est directement liée à la transcription de la réalité en modèle de simulation. La deuxième est due à la transformation de l'erreur pure qui passe du temps invariant au temps variant dans le temps simulé. [Downing et al, 1985] expliquent que l'incertitude que nous avons sélectionné les variables les plus importantes, en particulier lorsque les interactions entre les variables ne peuvent être négligées, est un problème majeur. Encore plus, après avoir sélectionné les variables importantes et ajusté une surface de réponse à la sortie ne variant que ces variables, la question portant sur l'effet cumulatif sur la sortie pour ces variables qui étaient tenues fixes reste légitime. Un modèle de surface de réponse (RSM) de second ordre peut dans plusieurs cas, ne pas être une approximation acceptable. Nous comprenons, dès lors, que si la relation entrée-output est un peu faible ou difficile à déterminer avec certitude due aux interactions ou interdépendance entre les paramètres d'entrées, cela peut facilement mener à une difficulté supplémentaire de choisir les entrées importantes sans tomber dans l'insignifiance de cette restriction. D'où l'intérêt d'analyser d'autres techniques qui ne s'intéressent qu'aux scénarios alternatifs, les considérant comme un point de départ vers l'évaluation, la sélection et le choix des scénarios les plus performants.

Nous examinons alors les approches MOO. Selon [Weck, 2004], il existe un consensus sur le fait qu'elles peuvent être largement divisées en deux catégories de base : les méthodes d'agrégation et les méthodes Pareto.

Dans la première catégorie, la formulation de la fonction objective agrégée nécessite l'attribution de préférences ou de poids à des critères convergeant vers le choix d'un scénario unique. [Munda, 2006] explique que, ce qui définit formellement une méthode multicritère d'agrégation est l'ensemble des propriétés sous-jacentes à sa convention d'agrégation. [Guo et al, 2013] quant à lui, confirme que dans le monde de la production industrielle et lors de la prise de décision, il est courant que plusieurs objectifs de production soient considérés et atteints simultanément. Par exemple, certains auteurs [Ishibuchi et Murata, 1998], [Guo et al, 2008] utilisent la méthode de la somme pondérée pour transformer des problèmes à objectifs multiples en problèmes à objectif unique. D'un autre côté, afin d'évaluer des scénarios concernant l'énergie de chauffage résidentiel et la consommation d'électricité domestique dans une région irlandaise. [Brown et al, 2009, 2010] proposent d'abord de comparer les scénarios en se basant sur

la technique de l’empreinte écologique (EF), qui par la suite leurs semblent insuffisante pour évaluer et analyser le caractère multidimensionnel des scénarios. Ils s’orientent alors vers une autre approche utilisant une version modifiée de l’analyse multicritères des décisions (MCDA) basées sur le NAIAD (Novel Approach to Imprecise Assessment and Decision Environments). Dans leur processus décisionnel, les auteurs utilisent un mélange de critères d’évaluation qualitative et quantitative, en offrant un classement des scénarios à la fin. Ces critères sont de nature biophysique telle que l’empreinte écologique et les polluants atmosphériques localisés ainsi que socio-économiques, notamment, la compétitivité économique, la sécurité d’approvisionnement, le coût pour le consommateur et le coût pour la création d’emplois.

Le processus de hiérarchie analytique (AHP) est l’une des techniques utilisées fréquemment dans la catégorie des méthodes d’agrégation. Selon [Saaty, 1980] l’AHP compte parmi les plus simples à mettre en œuvre. Elle se base sur des comparaisons par paires pour évaluer les préférences des décideurs. Elle permet de calculer une note synthétique (valeur comprise entre 0 et 1) agrégée sur la base d’une hiérarchisation et d’une pondération de l’ensemble des critères entrant en compte dans la décision [Piton et al, 2018]. Par exemple [Tabucanon et al, 1994] proposent une approche de la conception et du développement d’un système intelligent d’aide à la décision destiné à faciliter le processus de sélection de machines alternatives pour les FMS (Flexible Manufacturing Systems). Le processus consiste en une série d’étapes commençant par une analyse des informations et aboutissant à une conclusion - une sélection parmi plusieurs alternatives disponibles et une vérification de l’alternative sélectionnée pour résoudre le problème. L’approche présentée combine la technique AHP pour la prise de décision multicritères. Similairement [Chan et al, 2000] proposent une approche intégrée pour la conception automatique de FMS qui utilise des techniques de simulation et de prise de décision multicritères. Le processus de conception consiste à construire et à tester des conceptions alternatives à l’aide de méthodes de simulation. La sélection et l’analyse des résultats sont basées sur la technique AHP de prise de décision multicritères.

D’autres chercheurs ont utilisé la méthode du Ranking and Selection (R&S) pour c’est le cas pour [Goldsman et al., 1999] qui présentent dans leur étude un module appelé «

scenario selector » basé sur des techniques de sélection et de classement des solutions alternatives, dont le but est de déterminer le meilleur scénario simulé, ou un sous-ensemble réduit contenant le meilleur, avec des garanties statistiques précises sur la validité du choix. Les auteurs précisent que le système de simulation utilisé pour générer les scénarios est AweSim. Les auteurs expriment que pour une utilisation pratique des techniques du R&S, il est pertinent d'invoquer une procédure de « screening » pour réduire un grand nombre d'alternatives en un nombre acceptable, suivie par l'utilisation d'une procédure de sélection et de classement pour faire le choix le plus fin des meilleurs. Trois exemples d'application du « scenario selector » sont fournis dans cette étude. Le premier, porte sur un problème de définition d'un niveau de contrôle des stocks, d'un point de réapprovisionnement et du temps entre les révisions pour un système de contrôle des inventaires pour un seul produit. Le critère synthétique pour mesurer la performance est le bénéfice hebdomadaire moyen. L'objectif est de sélectionner un sous-ensemble des scénarios alternatifs qui génèrent le profit hebdomadaire moyen le plus élevé, avec un niveau de différence significative pratique et un nombre initial de simulations de 20 scénarios alternatifs. Le deuxième exemple porte sur un système bancaire, où le problème est de déterminer la meilleure façon d'estimer le nombre attendu de clients en régime permanent sur la base d'une simulation à temps limité. Tandis que le troisième exemple consiste en la comparaison de plusieurs designs alternatifs des ponts de lancement de véhicules blindés. De leur côté [Nelson et al, 2001] souligne que lorsque le nombre d'alternatives est fini, mais grand, les procédures de R&S nécessitent trop de calcul pour être pratiques. Ce qui a poussé les auteurs à proposer un compromis entre les procédures R&S standard, qui sont faciles à mettre en œuvre, mais qui peuvent être inefficaces, et les procédures entièrement séquentielles, qui peuvent être statistiquement efficaces, mais sont plus difficiles à mettre en œuvre et dépendent d'hypothèses plus restrictives. Cette approche comporte deux étapes. La première étape tirée des approches R&S standard, porte sur la technique du « screening » permettant l'élimination des scénarios manifestement inférieurs du groupe de scénarios simulés initialement afin de ne laisser que ceux qui sont concurrents. Ensuite, la deuxième étape de la sélection utilisant la technique de la zone d'indifférence (IZ) basée sur des moyennes pondérées.

Cependant, la méthode d'agrégation n'est pas adaptée à tous les problèmes multicritères. Il est parfois difficile de déterminer les poids des différents critères pour certains problèmes. Il est également impossible d'avoir une solution unique capable d'optimiser simultanément tous les objectifs lorsque plusieurs objectifs sont en conflit. Pour faire face à ce problème, certains chercheurs ont utilisé le concept d'optimalité au sens Pareto pour fournir des solutions plus réalisables. [Henggeler et al, 2016] expliquent que le besoin et les avantages reconnus d'utiliser explicitement plusieurs objectifs/critères ont fourni une valeur ajoutée dans l'exploration d'un plus grand éventail de décisions alternatives incorporant différents compromis entre les axes d'évaluation concurrents. En effet, l'avantage de la méthode Pareto est sa capacité à garder les éléments du vecteur objectif séparés tout au long du processus d'optimisation permettant de prendre en compte les différents critères, souvent conflictuels, d'une manière indépendante afin de conserver le caractère multidimensionnel du problème traité et utilisant le concept de dominance pour distinguer les solutions dominées et non dominées. [Sanchez et al, 2016] définissent le front de Pareto comme l'ensemble des solutions parmi lesquelles aucun critère ne peut être amélioré sans en aggraver un autre. En outre, la forme du front quantifie l'étendue du comportement conflictuel entre les critères. [Jozefwska et al, 2008], [Liu et al, 2009], [Zhang et Gen, 2010], [Chitra et al., 2011] et [Yan et al, 2017] attestent dans leurs travaux divers que la méthode Pareto permet une analyse critique plus riche des scénarios alternatifs. Nous examinons le travail de [Guo et al, 2013] qui aborde un problème d'ordonnancement multi objectif dans la planification de la production dans un environnement complexe, prenons en compte plusieurs usines, départements de production et processus de production. Le simulateur est développé pour simuler le processus de production et l'heuristique évolutive (NSGA-II) basée sur le principe Pareto est utilisée pour sélectionner la solution d'ordonnancement d'ordre final à partir de l'ensemble des solutions optimales du Pareto. Les auteurs mènent des expérimentations basées sur des données industrielles pour valider l'approche proposée. Quant à [Qian et al., 2015], ils proposent l'approche POSS constituée d'un algorithme génétique basé sur l'optimisation Pareto, le but étant de parvenir à définir un sous-ensemble performant réduit. [Gunantara et Hendranto., 2013] ont appliqué la méthode Pareto pour les réseaux ad hoc sans fil pour les configurations extérieure et intérieure sur la base de trois critères ou

indicateurs de performance : consommation d'énergie, débit et équilibrage de charge entre les réseaux. Le travail de [Gordano et al, 2020] porte sur la concentration de lipides microbiens, matière première pour la production de biodiesel, la première étape a été modélisée par la méthodologie RSM, puis par l'application de la méthodologie d'optimisation de Pareto basée sur un algorithme génétique (POF-GA), les auteurs inspectent que l'approche est efficace par une étude de cas s'appuyant sur six facteurs différents. Deux catégoriques (agitation (S) et type source d'azote (NS)) et quatre numériques (temps de culture (TC), rapport carbone / azote (C / N), concentration (M) et pH).

En guise de synthèse, le besoin de comparer les scénarios alternatifs émane, souvent, d'un problème décisionnel multicritère. Ce dernier, n'ayant pas de solution optimisant tous les critères à la fois (solution utopique) exige la sélection des solutions de compromis parmi un ensemble plus large de scénarios alternatifs. En effet, dans l'évaluation d'un problème décisionnel multicritères, la construction du processus de prise décision est considérée plus importante que le ou les scénarios choisis, car ce choix n'a de valeur qu'en tant que produit du processus de prise de décision conçu et n'est donc pas une « vérité ultime ». Chaque DSS faisant face à une problématique avec un ensemble suffisamment large de scénarios alternatifs à la sortie du module de résolution doit donc s'accompagner et encapsuler un module complémentaire de sélection et de comparaison de ces dernières. Plusieurs techniques d'aide à la décision appliquées à la comparaison des scénarios alternatifs ont été élaborées pour faire face à cette catégorie de problème. Cependant, toutes les techniques ont comme objectif de guider les parties prenantes, implicitement ou explicitement, dans le processus décisionnel en offrant une analyse permettant dans un premier temps d'approfondir la réflexion sur le développement des scénarios étudiés et dans un deuxième temps de dégager un consensus sur le choix d'un ou plusieurs meilleurs scénarios.

Cette revue de littérature nous a fait comprendre deux aspects globalement essentiels :

- Au cours des 50 dernières années, le spectre des applications des méthodes visant la comparaison des scénarios alternatifs n'a cessé de s'élargir, apportant ainsi des réponses pertinentes à plusieurs problèmes industriels très complexes. Cependant, malgré la diversité des approches, des méthodes et des techniques, les principes de base d'un problème décisionnel multicritère restent les mêmes.

En général, il s'agit d'un ensemble fini ou infini de solutions alternatives, d'au moins deux critères d'évaluation significatifs, et d'au moins un décideur final pour valider ou choisir parmi un ensemble réduit de meilleurs scénarios. La complexité du processus de la prise de décision multicritères ne peut donc être contournée sans la prise en compte explicite des avantages et des inconvénients d'une pluralité de points de vue, dans le but d'aider à prendre des décisions principalement en termes de choix, de classement ou de tri des solutions alternatives.

- Dans notre cas, comme nous allons le voir plus loin (chapitre 4 section §2.3). Il est crucial, avant de passer au choix des meilleurs scénarios parmi les scénarios générés par la simulation, de ne comparer que les scénarios qui sont faisables vis-à-vis la demande du client. Il s'agit donc d'une étape de « screening », que nous gardions de la procédure R&S standard, permettant de réduire le nombre de scénarios à comparer en éliminant ceux ne parvenant pas à franchir l'étape de la satisfaction de la demande. Dans un deuxième temps, la méthode RSM, ne s'avère pas pertinente ni facile à implémenter dans notre cas ; puisque la relation entre, les entrées et la réponse (scénario généré) s'avère faible d'un côté, à la suite de la relaxation de la contrainte de la demande qui n'est intégrée qu'après la génération des scénarios. De l'autre côté, les relations entre les entrées (paramètres de pilotages à l'entrée de la simulation) sont difficiles à distinguer, dues à l'interdépendance entre les couches phosphatées et l'influence complexe entre eux ; rendant encore plus difficile la détermination des paramètres les plus influents sur la réponse afin de les optimiser. La discussion suivante porte sur les méthodes d'agrégation. En effet, trouver un indicateur synthétique pouvant exprimer la complexité multidimensionnelle d'un scénario de planification de l'extraction minière, sans mener vers une évaluation globale insignifiante de sa performance basée de nature sur des critères conflictuels, fait que ces méthodes d'agrégation ne sont pas adaptées à ce problème décisionnel. Nous soulignons que la performance en termes d'efficacité et d'efficience d'un scénario de planification de l'extraction est représentée par la prise en compte de plusieurs critères conflictuels tels : la robustesse face aux fluctuations de la demande, le temps de déplacement et d'occupation des machines d'extractions, les volumes

résiduels en stocks et leurs natures, ainsi que la variété en quantité et en qualité de couches extraites proposées dans chaque scénario. Dès lors, nous pensons qu'afin d'effectuer une comparaison multidimensionnelle de l'ensemble des scénarios faisables tout en considérant les critères d'une manière indépendante, la méthode Pareto semble être la meilleure à conserver cette complexité tout en déterminant un sous-ensemble réduit des meilleurs scénarios.

Nous concluons que plusieurs chercheurs ont été menés à affronter des problèmes décisionnels avec plusieurs scénarios alternatifs. Différentes méthodes ont été mises en place pour permettre la sélection et le choix du ou des meilleurs scénarios à adopter. Cependant, le caractère délicat de la prise de décision multi objective et l'interdépendance entre les critères qui peuvent être considérés comme significatifs et leurs domaines d'application fait appel à des conceptions nouvelles, hybrides et adaptées des DSS.

Nous proposons donc par la suite dans le chapitre V une vue détaillée de la conception et la mise en œuvre de l'architecture du DSS. Ensuite dans le chapitre IV nous expliquons le Framework de notre heuristique de filtrage multicritère, une heuristique hybride adaptant l'étape du « screening » faisant référence à la méthode R&S standard couplée avec un filtrage se basant sur la méthode Pareto pour guider la sélection des meilleurs scénarios sans négliger le caractère conflictuel des critères, encore mieux les explorer pour une meilleure compréhension des enjeux décisionnels des responsables miniers..

4. APPROCHE DE RECHERCHE ASCENDANTE ET DESCENDANTE

Les approches top-down et Bottom-up sont considérés être à la fois des stratégies de traitement de l'information et de classement des connaissances, utilisées dans une variété de domaines, notamment les logiciels, les théories humanistes et scientifiques ainsi que la gestion et l'organisation. Dans les domaines de la gestion et de l'organisation, les termes « Top-down » (approche descendante) et « Bottom-up » (approche ascendante) sont utilisés pour décrire la manière dont les décisions sont prises et / ou la façon dont les changements sont mis en œuvre. Les aspects positifs des approches descendantes incluent leur efficacité et une vue remarquable des niveaux

supérieurs. Tandis qu'une approche ascendante permet plus d'expérimentation et donne une meilleure idée de ce qui est nécessaire à la base. D'autres preuves suggèrent qu'il existe une troisième approche combinant les deux. Par la suite, nous examinons plus finement les avantages et les limites de chaque approche. Nous discuterons aussi, à la lumière des articles étudiés, l'intérêt de chaque approche et ses applications. Nous explorons dans un deuxième temps l'application dans le secteur minier en particulier.

4.1. Approche descendante, ascendante et hybride : avantages et limites

D'un point de vue décisionnel, les approches ascendantes et descendantes ont toutes les deux des avantages palpables et incontournables pour l'amélioration de la prise de décision. Afin d'analyser les deux approches, il est crucial de passer par les travaux des représentants originaux dans le domaine de prise de décision politique. Notamment, [Sabatier et Mazmanian, 1979, 1980] pour les top-downers et [Hjern et al, 1982] pour les bottom-uppers. Respectivement, les auteurs expliquent l'efficacité et les limites de chaque approche dans un long débat de travaux et d'étude de cas à l'appui des Framework décisionnel développés dans, [Sabatier et Klosterman, 1981], [Sabatier et Mazmanian, 1983a, 1983b], [Sabatier, 1984], [Cerych et Sabatier, 1986] pour l'approche descendante et [Hjern and Hull, 1982], [Hanf, 1982], [Barrett et Fudge, 1981] concernant l'approche ascendante. En guise de synthèse de cette évolution dans les années 70-80, nous retenons ci-dessus les caractéristiques fondamentales des deux approches et les failles qu'elles contiennent.

En effet, l'approche top-down, aussi nommée approche descendante ou également conception par étapes, consiste essentiellement à décomposer un système pour obtenir un aperçu de ses sous-systèmes de composition de manière inversée. Dans une approche descendante une vue d'ensemble du système est formulée, spécifiant, mais ne détaillant pas, les sous-systèmes de premier niveau. Chaque sous-système est ensuite affiné de manière encore plus détaillée, parfois dans de nombreux niveaux de sous-système supplémentaires, jusqu'à ce que la spécification entière soit réduite à des éléments de base. Un modèle descendant est souvent énoncé à l'aide de "boîtes noires", ce qui facilite sa manipulation. Cependant, les boîtes noires peuvent ne pas clarifier les

mécanismes élémentaires ou être suffisamment détaillées pour valider le modèle de manière réaliste. En général, l'approche descendante commence par la vue d'ensemble. Il se décompose à partir de là en plus petits segments.

L'approche Bottom-up (ascendante) quant à elle, consiste à reconstituer des systèmes pour créer des systèmes plus complexes. Le traitement ascendant est un type de traitement de l'information basé sur les données entrantes provenant de l'environnement pour former une perception. Du point de vue de la psychologie cognitive par exemple, les informations pénètrent les yeux dans une direction (entrée sensorielle), puis sont transformées en une image par le cerveau qui peut être interprétée et reconnue comme une perception ou image "construite". Dans une approche ascendante, les éléments de base individuels du système sont d'abord spécifiés de manière très détaillée. Ces éléments sont ensuite reliés entre eux pour former des sous-systèmes plus grands, qui le sont à leur tour, parfois à plusieurs niveaux, jusqu'à la formation d'un système complet de niveau supérieur. Cette stratégie ressemble souvent à un modèle de graine « Seed », selon lequel les débuts sont petits mais se compliquent à la longue. Cependant, ces stratégies peuvent aboutir à un enchevêtrement d'éléments et de sous-systèmes, développés isolément et soumis à une optimisation locale au lieu de servir un objectif global.

Nous remarquons qu'une stratégie descendante peut être distinguée d'une stratégie ascendante en ce qui concerne deux caractéristiques : l'origine de l'initiative et la séquence des événements entre intentions, actions et résultats. La stratégie descendante est déclenchée par les intentions de la direction générale et se manifeste dans les résultats de performance des actions stipulées. La stratégie ascendante est initiée par les actions des dirigeants du terrain, qui représentent leurs propres interprétations des orientations de l'activité, souvent partiellement différentes des intentions antérieures de la direction. Autrement dit, une des failles fondamentales des modèles descendants réside dans le fait de partir du point de vue des décideurs (centraux) en ayant tendance à négliger les autres acteurs de base, cela engendre une vision macro brouillée dans ces échelons inférieurs, plusieurs écarts entre la réalité et les objectifs s'ensuivent. Tandis que, l'application de l'approche Bottom-up peut générer dans plusieurs cas, un manque de vision globale et d'orientation future, vu qu'en partant du bas et en descendant, nous

pouvons avoir une meilleure maîtrise sur des parties en sous-groupe mais ces dernières peuvent être déconnectés des autres parties dans une logique de flux globale.

Cette analyse séparée des deux approches, nous a permis d'avancer et de comprendre l'idée qui stipule qu'au milieu des limites de chaque approche, il est impossible de ne pas pouvoir discerner le potentiel flagrant de complémentarité. L'intérêt de réconcilier et combiner les deux approches pour émerger une approche hybride, nous semble désormais justifiée. Les approches descendante et ascendante ne représentent véritablement que deux facettes de la même pièce.

Plusieurs travaux se sont orientés par la suite, vers une vision de complémentarité entre les deux approches. Nous examinons, par exemple, le travail de [Wing, 2008] qui présente une approche hybride entre le top-down et le Bottom-up, pour la simulation des politiques climatiques qui réduit l'écart entre les résultats de l'ingénierie ascendante et des modèles macroéconomiques descendants en intégrant le détail de la technologie d'énergie qui fait partie de l'approche ascendante dans le Framework macroéconomique. Les résultats montrent comment les incohérences entre les données d'ingénierie et les données macroéconomiques peuvent être réconciliées de manière transparente et transférable entre diverses applications de modélisation. [Tuladhar et al, 2009], [Allen, 2014] [Chena et al, 2017] ont à leur tour présenté une approche hybride intégré qui associe des modèles ascendants, d'évaluation technique des technologies a adopté dans des industries chimique et énergétique, aux modèles descendants d'équilibre général dynamique orienté vers l'avenir des entreprises et marché économique. Selon eux les modèles ascendants fournissent un cadre de modélisation unique, fiable et cohérent pour l'analyse, la confrontation et la complétude avec les modèles macro-économiques dérivants des approches descendantes. Les résultats démontrent systématiquement que les décisions qui combinent les incitations et l'intégration des recommandations des dirigeants et décideurs plus proche des terrains d'étude permettent d'augmenter la flexibilité totale ainsi que choisir les décisions les plus rentables. Une des expériences qui ont été faite par [Gelly, 2000] qui déploient les deux approches, est nommée l'expérience « Ocean spray ». L'auteur explique que durant l'implémentation d'un processus de prévision de la demande des ventes l'une des questions fondamentales qui se posent est quelle approche faut-il adopter ? Ceci est bien sur lié à une série de départements où la prise de décisions

repose sur les prévisions fournies. L'auteur investigate alors les avantages et limites des deux approches. Il explique que l'approche Top-down est une approche commune et simple à implémenter à un problème de prévision, cependant l'expérience montre que cette approche est mieux adaptée aux produits qui ne sont pas souvent sujet à des promotions et dans le motif des ventes est prédictible au niveau d'une région. La présence d'une influence politique au sein de l'organisation peut aussi suggestionner les décisions au niveau des prévisions surtout lorsqu'il s'agit d'un quota à respecter. D'un autre côté, l'approche Bottom up a ces propres limitations, ces prévisions sont souvent effectuées par les agents de planification en collaborations avec les dirigeants du terrain. Mais pour que cette approche soit effective, il faut que plusieurs agents de planifications et d'autres départements s'engagent pour enrichir ce processus. En effet, l'approche ascendante permet d'utiliser les prévisions des ventes d'une manière efficace pour les plans de répartition d'espace de stockage, de production et de transport, puisqu'ils se basent dans cette approche sur un niveau de détail important. Cependant plusieurs opportunités dans le marché national peuvent être perdues en se focalisant sur un niveau plus local. Et parfois, la qualité des données dans les plus bas niveaux peut être sporadique et irrégulière, ce qui implique qu'une attention particulière doit être portée au management des données et aux paramètres statistiques utilisés. [Gelly, 2000] développe ensuite que selon le cas traité, combiner les deux approches prouve être plus efficace que de subir les limitations d'une seule.

Dans une autre expérience, [Creutzig et al, 2012] essayent de réconcilier la modélisation descendante et ascendante sur le futur déploiement de la bioénergie. Les auteurs déclarent qu'on se basant sur un modèle d'évaluation intégrés qui combine les deux approches ascendante et descendante, le SRREN (The Intergouvernemental Panel on Climate Change's Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation) indique que la bioénergie déployée contribuera à la plus grande proportion d'énergie primaire parmi les énergies renouvelables et entraînera une réduction des émissions de gaz à effet de serre. Ils montrent par la suite la contribution de chaque approche dans la construction du modèle hybride d'évaluation. L'approche Top-down par exemple permet d'explorer de manière exhaustive l'espace de la solution, ainsi que d'assurer la transparence sur l'incertitude et les hypothèses sous-jacentes. Tandis que l'approche Bottom-up permet d'augmenter le niveau de détail à travers les

échelles temporelles et spatiales, la résolution du marché et les compromis. Les auteures fournissent par le biais de leur modèle un aperçu de la manière dont un cadre de modélisation modulaire, intégrant des perspectives inductives ascendantes et déductives descendantes, peut combler l'écart entre l'application séparée des deux approches. En effet, ils arrivent à conclure que l'amélioration des échanges entre les communautés du Bottom-up et du Top-down est une condition préalable à une meilleure compréhension.

[Kim et al, 2014] s'inscrivent dans la même perspective intégrative traitant la formation de la stratégie opérationnelle. Les auteurs définissent la stratégie des opérations comme étant formée par le biais de processus complexes qui se déroulent dans plusieurs directions et à différents niveaux organisationnels. Bien que la plupart des études se concentrent sur le processus « macro-économique » de formulation de stratégie du point de vue dominant descendant, cette étude examine le processus « micro-économique » de formation de stratégie qui régit les interactions entre les priorités, les objectifs et les plans d'action compétitifs au sein de la société. Les auteurs proposent donc un modèle de processus intégré de formation de stratégies d'exploitation qui englobe à la fois la planification descendante et la formation ascendante. Les auteurs expliquent que le processus descendant, peut être décrit comme la coordination planifiée des intentions et des actions visant à atteindre les résultats spécifiques imposés par une autorité centrale, comme décrit par [Kim et Arnold, 1996]. Certaines stratégies peuvent ne pas être exécutées comme prévu alors que d'autres stratégies reflètent avec précision les intentions mais n'atteignent pas les résultats souhaités. Sur la base des résultats initiaux, la direction renforce ou modifie ses plans de manière appropriée. En revanche, une stratégie ascendante peut émerger comme un ensemble d'actions non planifiées et peut permettre d'obtenir des résultats qui ne sont pas initialement prévus par la direction. Aucune action ne se traduit par une absence totale d'intention. En effet, la direction peut proposer une orientation générale tout en évitant de spécifier des actions détaillées pour chaque décision opérationnelle. Dans ce contexte, les cadres moyens peuvent entreprendre de manière autonome des initiatives stratégiques pour identifier des actions spécifiques qui serviront leurs objectifs conformément à la direction générale du cabinet et / ou rechercheront de nouvelles opportunités qui pourraient améliorer leurs perspectives de carrière au sein de l'organisation. En générale, le principe qui

régit une stratégie ascendante de la stratégie opérationnelle est décrit par [Slack et Lewis, 2011] comme « une définition des objectifs et de l'action, du moins en partie par les connaissances acquises au cours de ses activités quotidiennes ».

Nous retrouvons aussi le travail de [Stewart et al., 2015] dans le domaine de la santé. Les auteurs ont créé le programme TeamSTEPPS conçu pour accroître la coordination entre le personnel et améliorer les soins dédiés aux patients et réduire les événements indésirables. Selon les auteurs la combinaison entre les deux approches à donner meilleurs résultats. Ces résultats illustrent spécifiquement comment ajouter une influence ascendante à l'approche transformationnelle descendante peut être utile pour engager le personnel de première ligne. [Stewart et al, 2015] proclament que généralement les meilleurs leaders équilibrent ces forces émergentes ascendantes avec une vision globale et une direction émanant du sommet. L'équilibre optimal dépend en grande partie du contexte et des besoins de la situation, l'accentuation descendante étant efficace pour inciter à un changement rapide mais efficace. Tandis que l'accentuation ascendante a potentiellement un effet plus durable.

Les deux approches ont également été appliquées au niveau académique, en définissant différentes formes d'acquisition de connaissances et de compétences. Selon [Rouvrais, 2012] la méthode traditionnelle consiste à adopter des approches descendantes pouvant être résumées par la définition d'un programme générique que tout étudiant est censé apprendre. Tandis que l'introduction d'une approche ascendante permet aux étudiant de définir leurs propres programmes compte rendu des compétences qu'ils ont déjà acquis, des domaines ou disciplines qui leurs intéressent ainsi que leurs points faibles. Les résultats montrent que l'approche top-down repose sur des terminologies et les concepts qui sont parfois sujets à des ambiguïtés, le programme en lui-même est parfois générique et trop abstrait pour un candidat. L'approche Bottom-up quant à elle est beaucoup plus consommatrice en matière de temps que la précédente et nécessitant des compétences analytiques et systémiques, Cependant cette approche est plus riche en ce qui concerne les taxonomies d'apprentissage éducatif, une fois qu'un programme personnel est défini et structuré, un candidat est beaucoup plus à l'aise avec l'alignement de ces compétences via le programme construits. [Rouvrais, 2012] discute à partir des résultats de son étude l'intérêt de l'approche Bottom-up dans un domaine qui repose généralement sur l'approche top-down.

4.2. Applications des approches dans le secteur minier

Après avoir mieux compris les principes et caractéristiques des approches ainsi que l'étendue de leurs domaines d'application. Nous nous focalisons sur les travaux traitant l'application de ces approches dans le secteur minier. Un exemple de l'application de l'approche Top-down dans le secteur minier est présenté par [Xu et al, 2018] où, ils partent d'un modèle de planification déjà établie et intègrent l'aspect des coûts écologiques dans ce modèle macro-économique afin de quantifier l'impact. Dans ce cas il s'agit d'affiner un sous-système déjà conçu selon le besoin et tout en gardant l'approche de vue globale. Généralement, dans l'optimisation du programme de planification de l'extraction d'une mine à ciel ouvert, les coûts écologiques de l'exploitation minière sont généralement traités comme des externalités et évalués en dehors du schéma d'optimisation. Cependant, les coûts écologiques peuvent avoir des effets importants sur le résultat de la planification stratégique globale et devraient être internalisés dans des modèles d'optimisation. Cependant les actions réellement apportés sur le terrain pour appuyer cette intégration ne sont pas mentionnés dans leur article.

Un des cas particuliers de l'extraction minière est présenté par [Hinton et al, 2003]. Il s'agit du cas de l'extraction minière artisanale (ASM), un secteur qui constitue une source importante de moyens de subsistance pour les communautés rurales du monde entier. Dans leur article, les auteurs se concentrent sur la description de la nature de l'ASM et sa fondation sur une approche ascendante (Bottom-up) en plus d'offrir des solutions techniques potentielles pour la minimisation des impacts écologiques et sur la santé humaine dérivés de l'exploitation minière artisanale. L'ASM repose sur une approche ascendante, ou un groupe d'artisans s'organisent entre eux afin d'extraire l'or d'une manière simple mais bénéfique, en précisant des objectifs court termes d'abord puis s'étendant par la suite vers des objectifs annuels ajustés selon l'évolution en pratique. Les auteurs ont remarqué que proposer des technologies développées utilisé par les mines les plus structurés n'aboutissait pas à une concrétisation en pratique, ils ont donc procédé de la même façon pour répondre à ses problèmes, en partant de ce qui est pratiqué et en proposant des solutions abordables et simple à implémenter.

[O'Sullivan et Newman, 2014] utilisent l'optimisation mathématique pour déterminer le programme de production d'une mine souterraine complexe en Irlande. La planification dans cette mine repose sur une construction manuelle d'un programme d'extraction du minerai, cela représente un défi pour les ingénieurs et les managers, engendrant ainsi des résultats inconsistants en forme de programmes de planification parfois efficaces et parfois non satisfaisants. Les auteurs décrivent la complexité du processus de construction d'un programme d'extraction en expliquant les différentes contraintes du terrain qui doivent être tenues en compte afin de parvenir à construire un programme satisfaisant. En effet, la qualité d'un programme d'extraction est un facteur important de rentabilité de l'exploitation minière. Ce processus difficile est d'autant plus compliqué car l'exploitation minière suit plusieurs veines étroites de minerai à haute teneur situées le long des lignes de faille entre des plaques de roches différentes.

Chaque panneau à Lisheen (Irlande) a des exigences minières spécifiques telles qu'il est impossible d'élaborer des règles minières générales. Un autre point à signaler est que la création de programme est particulièrement difficile en raison des effets inter temporels sur chaque activité minière future associés à chaque décision d'extraction. Ces effets deviennent particulièrement importants à l'approche de l'épuisement des réserves minières et de la diminution de la variété du minerai disponible pour répondre aux besoins de la minoterie. Pour ce faire, les auteurs proposent une procédure de planification automatisée utilisant la programmation par nombres entiers (IP) pour déterminer une planification presque optimale. Leur modèle fait la résolution en se basant sur une heuristique afin de produire un programme qui ajoute de la valeur à l'exploitation minière en reportant l'extraction de métaux, en réduisant les délais d'exploitation minière, en évitant les chutes coûteuses de production de minerai et en permettant une gestion plus fluide de la main-d'œuvre. En résolvant le modèle IP sur un horizon de 104 semaines, ils ont comparé leur solution avec le programme de planification construits manuellement, en termes de la production de minerai.

[O'Sullivan et Newman, 2014] soulignent fortement que le passage par le Bottom-up via l'observation *in situ* du terrain et le recueil de l'expérience des agents de planification de la mine été une étape incontournable pour la bonne formulation de l'outil. Ils ont ensuite formulé le problème et les contraintes adaptés du chantier d'extraction pour proposer un modèle adapté au besoin de la mine. Ils expliquent que

bien que plusieurs logiciels d'optimisation et de planification de l'activité minière soient sur le marché, les particularités des opérations ont jusqu'à présent rendu trop difficile la création d'un logiciel aussi général pour l'exploitation minière. Ils ont donc privilégié l'adoption d'une approche Bottom-up qui consiste à reconstituer les pratiques manuelles des planificateurs et des ingénieurs de géologie pour créer un seul système plus complexe et qui prend en compte la globalité des contraintes de planification. Ils se sont basés sur les données entrantes provenant de l'environnement pour former une perception/formulation et résolution systématique du problème.

Dans un autre cas, [Epstein et al, 2010] proposent une méthodologie pour la planification minière à long terme basée sur une formulation générale capacitaire du flux de réseaux multi commodités. Cette formulation considère les gisements de minerais souterrains et à ciel ouvert partageant plusieurs usines de traitement en aval sur un long horizon. Le modèle a pour objectif d'optimiser plusieurs mines de manière intégrée, tout en intégrant la phase d'extraction aux processus en aval, en montrant les avantages de l'intégration de la planification tout au long de la chaîne de production jusqu'à l'obtention du produit final. Traditionnellement, les processus d'extraction minière et la gestion macro des différentes mines étaient résolus séparément, en alternant les deux problèmes pour faire correspondre l'offre à la demande. Cependant, les auteurs proposent une approche hybride associant la stratégie descendante de l'ensemble des mines à l'intégration du problème de l'extraction dans chacune d'entre elles, augmentant ainsi le niveau des détails obtenues d'une perspective ascendante tout en restant plus fidèles aux valeurs cibles émanant de l'approche descendante et en créant un lien entre les deux approches autrefois distinctes. Le modèle a été mis en œuvre chez Codelco, le plus grand producteur de cuivre au monde.

Un autre article basé sur une approche hybride est celui de [Yaylacı et Düzgün, 2017]. Les auteurs proposent une approche quantitative et intégrée de l'évaluation de la durabilité pour le secteur minier, applicable aux niveaux du projet et de la stratégie. Les auteurs déclarent qu'elle est mise en œuvre avec une étude de cas Afşin-Elbistan (AECB) en Turquie. L'approche proposée implique un cadre d'évaluation quantitative basé sur des indicateurs permettant d'intégrer systématiquement les préoccupations et les priorités des parties prenantes locales dans l'évaluation de la durabilité dans les opérations et les plans du secteur minier. Il s'agit également de déterminer en quoi les

résultats de l'évaluation de la durabilité peuvent différer si les préoccupations et les priorités spécifiques au projet sont déterminées par les parties prenantes locales (niveau local) ou par la partie faisant le rapport opérationnelle (niveau régional / national), comme la société minière ou l'autorité de planification. En conséquence, les préoccupations et priorités spécifiques au projet et au point de vue des deux groupes d'intérêts sont pris en considération dans le cadre comme deux critères de durabilité différents, à savoir les critères de durabilité des sections locales et des décideurs, qui peuvent également être considérés comme des critères de durabilité ascendants et descendants. Selon [Yaylacı et Düzgün, 2017], L'approche ascendante est définie comme la détermination d'un ensemble de critères par le biais de l'engagement des parties prenantes locales ensuite la modification et l'adaptation sont conduites en fonction de leur perception. Tandis que l'approche descendante est décrite comme utilisant un ensemble de critères préalablement déterminés. Par conséquent, les approches ascendantes et descendantes peuvent également être simplement exprimées en approches dirigées par la communauté et par des experts dans le but de trouver des compromis entre les deux communautés. Les résultats obtenus des deux approches sont comparés pour comprendre comment l'impact de l'intégration des critères de durabilité locaux dans la présente étude met en évidence les problèmes liés à la dégradation des terres et à l'acquisition de terres et de peuplements en raison des activités minières. En outre, les critères de durabilité descendants de cette étude reflètent les priorités de la politique énergétique de la Turquie qui souligne l'exploitation des réserves de charbon nationales pour la production d'électricité.

4.3. La recherche action et les approches ascendantes et descendantes

Nous avons vu auparavant que l'approche ascendante permet d'augmenter les données disponibles sur les milieux étudiés et d'enrichir le contenu des modèles sur des bases fiable et réelles. Tandis que, l'approche descendante se maintient sur la modélisation des effets des entités d'un système ou écosystème étudié, les uns sur les autres. La démarche hybride combinant l'approche Bottom up et top down, repose sur les études de terrain, les modèles et les expériences afin de valider des relations causales entre

l'ensemble des entités et les décisions prises [Pradervand et al, 2014]. Ainsi, Les résultats obtenus façonnent les protocoles et tirent des efforts d'observations de terrains. Cette démarche devient donc un point de rencontre et de réconciliation décisionnelle entre recherche et expertise. Elle caractérise la recherche-action qui selon [Ardoino, 2003], vise la construction de savoirs utiles à une action déterminée, des savoirs éventuellement transférables moyennant des précautions qu'il s'agit de définir. Dans leur introduction au « Sage Handbook of Action Research » [Reason et Bradbury, 2008], déterminent les caractéristiques générales de la recherche-action à travers cinq axes qui font système : i) une forme de développement émergente, ii) participation et démocratie, iii) problèmes pratiques de l'action, iv) le savoir dans l'action et v) l'épanouissement humain. [Morin, 1992] constate que l'enjeu se situe dans un rapport à construire entre acteurs et chercheurs. Selon l'auteur, une définition de la recherche-action s'impose, opérationnellement elle est une recherche dans laquelle les acteurs s'ouvrent à la recherche et les chercheurs à l'action. De plus, [Desroche, 1981], spécifie que la recherche-action est conçue pour équiper d'une pratique rationnelle les pratiques spontanées des acteurs et qu'elle est assumée par ces acteurs eux-mêmes tant dans ses conceptions que dans son exécution et ses suivis. Elle cherche, dès lors, autant « l'explication, l'application que l'implication » [Morin, 2010]. La recherche-action est une approche de recherche alignée avec le paradigme pragmatique jaillissant du principe de l'action pour le bâtissage des connaissances scientifiques utiles. [Prévost et Roy, 2013]. Le chercheur entreprend sa recherche avec cette intention de créer le changement et mieux comprendre la réalité.

Nous comprenons donc que l'approche hybride combinant l'approche ascendante et descendante discutée auparavant donne lieu à un point de réconciliation et de confrontation qui émane de l'essence même de la recherche-action. De plus, cette recherche-action qui s'intéresse à entreprendre la recherche dans un contexte réel s'inscrive dans la posture pragmatique que nous adoptons et nous avons décrit dans le chapitre 1 section § 2 notre posture ontologique, épistémologique et axiologique. Pour appréhender les motifs à la base de la création de la recherche-action, nous retraçons d'abord les travaux à l'origine de cette approche, ensuite nous investiguons les caractéristiques qui la distingue en science de gestion et la différencie des pratiques professionnelles des experts consultants sur le terrain.

Dans la revue de littérature, nous attribuons la première instance d'utilisation du terme recherche-action à [Collier, 1945] dans ces travaux sur la résolution des problèmes sociaux et ethniques vécus aux États-Unis, selon [Neilsen, 2006]. L'auteur démontre que le besoin d'agir sur des problèmes d'ordre social en utilisant une approche de recherche-action engendre des résultats plus fiable, efficace et véridique par rapport à la réalité vécu. À la même époque, [Lewin, 1946] simultanément voulait promouvoir en psychologie sociale cette approche en tant qu'approche scientifique légitime pour l'étude des dynamiques des groupes [Neilsen, 2006]. Les travaux de [Lewin, 1946], [Bargalet al., 1992] et [Greenwood et Levin, 2007] ont été à l'origine de la formulation des principes et caractéristiques clés de la recherche-action qui peuvent être synthétiser en six caractéristiques de base : i) la nature du processus cyclique plutôt que linéaire de la planification, l'action et l'observation, ii) la rétroaction des résultats à tous les groupes impliqués dans la recherche, iii) la coopération continue et ininterrompue entre chercheurs, praticiens et clients, la recherche-action étant réalisée avec les gens et non sur les gens iv) l'application de la prise de décision suite à un consensus du groupe, soulignant la nécessité de l'action collective, v) la prise en compte des différences de pouvoir et des systèmes de valeurs des toutes les parties prenantes et finalement vi) l'utilisation simultanée de la recherche-action pour la résolution et la génération de nouvelles connaissances.

En analysant ces caractéristiques, il nous semble judicieux que la consultation en gestion, basé sur le mouvement du développement organisationnel (DO), et la recherche-action soient ainsi confondue à la suite des similarités indéniables. En effet, les deux prennent racine dans les travaux initiaux [Lewin, 1946] et ses premiers successeurs [Bargalet al, 1992] et [Baskerville, 1999]. Cependant, malgré les points communs, nous affirmons qu'ils existent des aspects permettant la distinction des deux formes pour le lecteur averti. Ces aspects peuvent être décortiqué comme suit : i) les finalités, ii) les exigences méthodologique, iii) les rapports avec les participants et iv) la portée et la diffusion des résultats. En effet, le premier aspect, souligne la différence des objectives entre un chercheur et un consultant. Le chercheur entreprend sa recherche pour la finalité ultime de générer dans un contexte réel des connaissances scientifiques, en passant par des changements de la réalité organisationnelle décrite comme insatisfaisante par les membres du système en question. Tandis que, du point

de vue du consultant, la réalisation d'un gain économique est primordiale en vendant des services d'expertise ou de facilitation dans une organisation cliente. Le deuxième aspect éclair le degré de rigueur méthodologique dans les solutions proposées par les deux parties. Pour un consultant, il suffit d'accomplir un diagnostic suffisamment robuste pour permettre une meilleure prise de décision par rapport à l'actuel. Puisque la continuité de l'opportunité économique des services repose sur ce qui est suffisamment robuste, le juste nécessaire, pour résoudre le problème jusqu'à nouvel ordre. Le rapport du chercheur à son sujet de recherche le pousse à répondre aux critères de qualité scientifique de la recherche en sciences de la gestion en plus de permettre la prise de décision. Ce qui nous ramène au troisième aspect de rapport avec les participants. Le chercheur en coopération avec les membres de l'organisation d'une entité, contribuent librement au processus de résolution et de production de connaissances transférables et utiles. Tandis que, la nature du lien collaboratif entre le consultant et les membres de l'organisation est régie par un mandat de la direction pour résoudre le problème en question. Le dernier aspect de la portée et la diffusion des résultats tranche amplement cette confusion. Les résultats à la suite d'une consultation d'expertise sont confinés par l'exécution du mandat. La diffusion est limitée à l'organisation et la firme de consultants, constituent ainsi un pouvoir concurrentiel pour les deux dans leurs secteurs respectifs. Tandis que les valeurs éthiques intrinsèques à la connaissance scientifique font que, dans sa mission, le chercheur et l'organisation s'inscrivent d'emblée dans une aventure scientifique dont les résultats sont transférables à d'autres situations comparables. Le problème est résolu, formulé génériquement et les résultats diffusés le plus largement possible auprès de la communauté scientifique et professionnelle, dans le but de l'évolution collective de la connaissance scientifique. Ces particularités de la recherche-action font en sorte que l'appréciation des risques et avantages associés à l'aventure de la recherche scientifique doivent être avancée publiquement avec les parties prenantes. De même, l'obligation du chercheur est de se prononcer sur la vérité même si celle-là n'est pas toujours positive ou favorable [Brydon-Miller et Greenwood, 2006]. Ceci renforce le lien de confiance entre les participants et contribue à la création d'un environnement adéquat pour mener à bien les recherches.

5. CONCLUSION

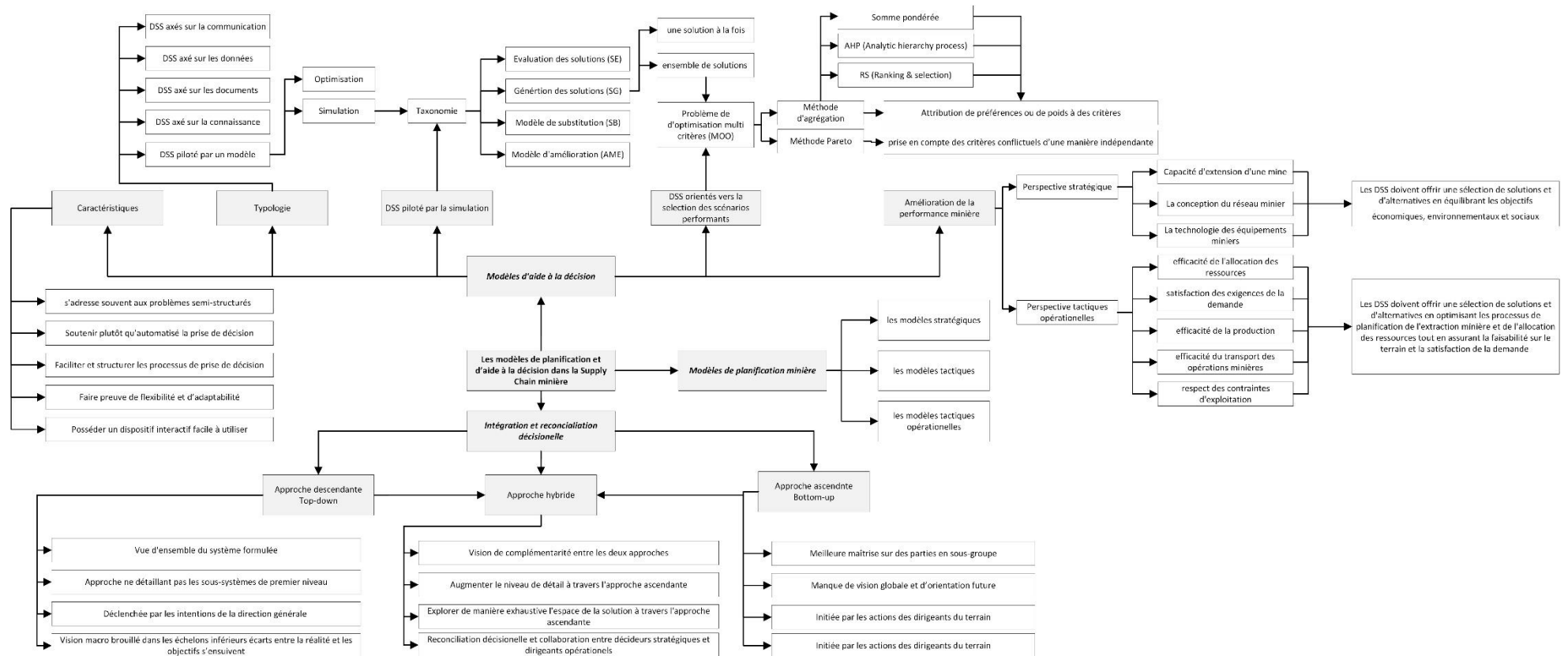


Figure 10 : Synthèse de la revue de littérature

La Figure 10 synthétise l'analyse large de la revue de littérature portant sur 3 axes différents et complémentaires. Cette analyse nous a permis de situer notre travail de recherche, identifier ces points d'originalité et d'enrichissement, souligné notre contribution scientifique et managériale et reconnaître également les défis et les opportunités pour la recherche scientifique future. Nous explicitons ci-après ces éléments de manière synthétique :

- La première partie de la revue porte sur le problème de la planification minière, et ses trois principaux niveaux décisionnels. Nous traitant spécifiquement un problème de planification de l'extraction minière opérationnelle-tactique dans une mine à ciel ouverte, proposant à la fois la résolution du problème tactique de séquençage des blocs extractifs et le problème tactique-opérationnel de l'allocation des équipements miniers à leurs tâches respectives, via une approche simulateur. La revue de littérature, nous a démontré que les problèmes de planification relevant du niveau décisionnel tactique-opérationnel dans le contexte minier sont peu représentés. Ce niveau encapsule une complexité qui dérive des contraintes géologiques, contraintes d'interdépendances spatiales et temporelles des couches de minerai, contraintes de méthode d'extraction adoptée par la mine ainsi que des contraintes techniques d'utilisation des équipements miniers sur le terrain. Nous considérons donc notre travail comme une contribution scientifique à l'enrichissement de la revue de littérature et à la bonne compréhension des enjeux décisionnels dans ce contexte.
- La deuxième partie de la revue de littérature, examine les systèmes d'aide à la décision comme outil de gestion et d'amélioration de la prise de décision. Après avoir retracé et défini les origines et les fondements d'un DSS classique en introduction, nous avons organisé l'analyse de cette partie autour de quatre dimensions principales : l'impact des DSS sur l'amélioration de la performance industrielle en général, puis particulièrement ses utilisations dans le secteur minier. Dans un premier temps, cette section de la revue de littérature nous a permis de voir que les enjeux de planification montent en complexité dans le contexte minier, compte tenu des caractéristiques fondamentales de l'activité de l'extraction, du marché minier et de la nature conflictuelle des objectifs à court et à long terme. Nous avons également identifié qu'il existe peu de travaux de

recherche utilisant des techniques de simulation pour résoudre les problèmes de planification dans le contexte minier. et si la simulation est utilisée, son rôle se limite souvent à tester la validité d'une solution fournie par un modèle d'optimisation. Nous avons pu constater, en s'appuyant sur la taxonomie permettant de spécifier les différents rôles et objectifs de l'utilisation des techniques de la simulation, que les DSS basés sur la simulation sont moins fréquents que les DSS basés sur des modèles d'optimisation et la plupart des DSS basés sur un modèle simulateur rentrent dans les catégories où la simulation joue un rôle de support pour des fins d'évaluation, de validation ou d'amélioration des paramétrages et non pas comme générateur de solution. Il en est là une deuxième contribution concernant l'intégration des techniques de SED comme générateur de solutions dans des conceptions nouvelles des DSS.

- D'un point de vue architectural. Nous avons examiné les travaux sur l'architecture classique des DSS et nous avons constaté que lorsque le module de résolution donne lieu à plusieurs solutions alternatives qui doivent être traitées simultanément. Nous faisons rupture avec ce schéma classique qui ne permet que le traitement d'une solution à la fois. Dans ce cas, les DSS peuvent se doter d'un module complémentaire de sélection et comparaison de ces solutions alternatives. Ce module ajoute l'aspect séquentiel à l'architecture classique et donne lieu à une nouvelle architecture adaptée.
- Dans la troisième et dernière partie, Nous discutons les approches de recherche ascendantes et descendantes d'un point de vue décisionnel. Nous expliquons les approches hybrides qui réconcilient les avantages et les limites des deux approches et nous inscrivons notre travail sous une approche de recherche hybride où le partenaire industriel utilise une approche descendante et nous visant la construction d'une base ascendante, permettant de tenir en compte les contraintes issues du terrain d'étude dans la résolution du problème de planification tactique-opérationnel via le modèle de simulation du processus d'extraction minière. Ensuite, nous nous orientons vers la constitution d'un point de reliance entre les deux approches descendante et ascendante par le biais du système d'aide à la décision dans son intégralité.

Chapitre III

Développement du simulateur comme modèle décisionnel pour le pilotage opérationnel tactique de l'extraction minière

1. Introduction.....	91
2. Modélisation du processus d'extraction minière par le modèle SED.....	91
2.1. Notations.....	94
2.2. Formulation du gisement minier et des paramètres de pilotages du modèle SED	95
2.3. Niveaux conceptuels du modèle SED.....	96
2.4. Contraintes techniques intégrées.....	98
2.5. Données de sortie.....	100
3. Validation industrielle du modèle SED.....	101
3.1. Description de la construction d'un programme d'extraction annuel	101
3.2. Génération d'un ensemble de scenarios alternatifs	112
4. Conclusion	116

1. INTRODUCTION

Ce troisième chapitre a pour objectif d'introduire, dans son premier axe de modélisation du processus d'extraction minière, le formalisme avec lequel a été appréhendé cette modélisation par la simulation à événements discrets, explicitant ainsi les différentes contraintes intégrés, les paramètres de pilotages et les données d'entrée (inputs) alimentant le modèle de simulation ainsi que les éléments obtenus à la sortie (output) et ce qu'ils représentent. Ce modèle de simulation à événement discrets est encapsulé comme module de résolution du système d'aide à la décision proposé dans ce travail de recherche. Plusieurs expérimentations qui ont fait objet d'une validation industrielle sont donc présentées dans l'objectif de mettre en évidence les apports managériaux de l'outil développé dans le cadre de cette thèse. En plus, pour favoriser une meilleure compréhension d'un programme de planification tactique-opérationnel dans le contexte de l'extraction minière à ciel ouverte, nous présentant, dans la section § 3.1 de l'axe validation industrielle du modèle SED, une description détaillée d'un programme d'extraction minière basé sur des données réelles. Ensuite, nous enchaînons dans la section § 3.2 avec un exemple de génération de plusieurs scénarios alternatifs cohérents techniquement que nous avons effectué en collaboration avec les dirigeants du pôle planification au sein de la mine étudiée à Ben Guérir. Nous souhaitant éclaircir dans ce chapitre la démarche que nous avons effectué pour répondre en partie à la troisième et à la cinquième question de recherche, : *Comment mettre à disposition des responsables miniers un outil complet, adapté et efficace pour les accompagner, d'abord dans la construction rapide et cohérente des programmes d'extraction ? Et comment automatiser et simplifier la construction des programmes d'extraction à moyen et court terme tout en assurant le respect des contraintes techniques du gisement minier ?*

2. MODELISATION DU PROCESSUS D'EXTRACTION MINIERE PAR LE MODELE SED

Les décisions tactiques qui doivent être prises par les industries minières dans le cadre de la planification sont liées à l'extraction du minerai et dépendent de deux critères,

comme expliqué dans [Azzamouri et al, 2018] : le choix de la parcelle à extraire et l'affectation des machines pour effectuer les opérations. Dans ce contexte, la solution proposée à un problème de planification de l'extraction doit être capable de : i) identifier les parcelles à extraire pour obtenir une couche spécifique de minerai QS requis et ii) allouer les machines d'extraction. En effet, les QS extraits correspondent au minerai nécessaire tant en nature qu'en volume pour produire et répondre à la demande future de QM par un procédé de production par blending. Cependant, du fait de sa taille, le modèle de programmation mathématique de l'extraction minière est difficilement résoluble compte tenu du niveau de finesse des contraintes pris en compte par les décideurs industriels. Par conséquent, nous avons opté pour et conçu un modèle SED pour la planification de l'extraction du minerai, visant à générer plusieurs scénarios de planification techniquement cohérents compte tenu des contraintes de la mine. Le modèle SED est basé sur un ensemble de processeurs parallèles représentant les machines qui peuvent être spécialisées pour exécuter une OE unique ou polyvalentes pouvant exécuter plusieurs types d'OE. Les processeurs sont reliés par des stocks contenant les items (blocs) disponibles pour une OE donnée. Ils passeront, une fois le traitement terminé, au stock suivant d'items en attente de l'OE suivante. (Voir Figure 11)

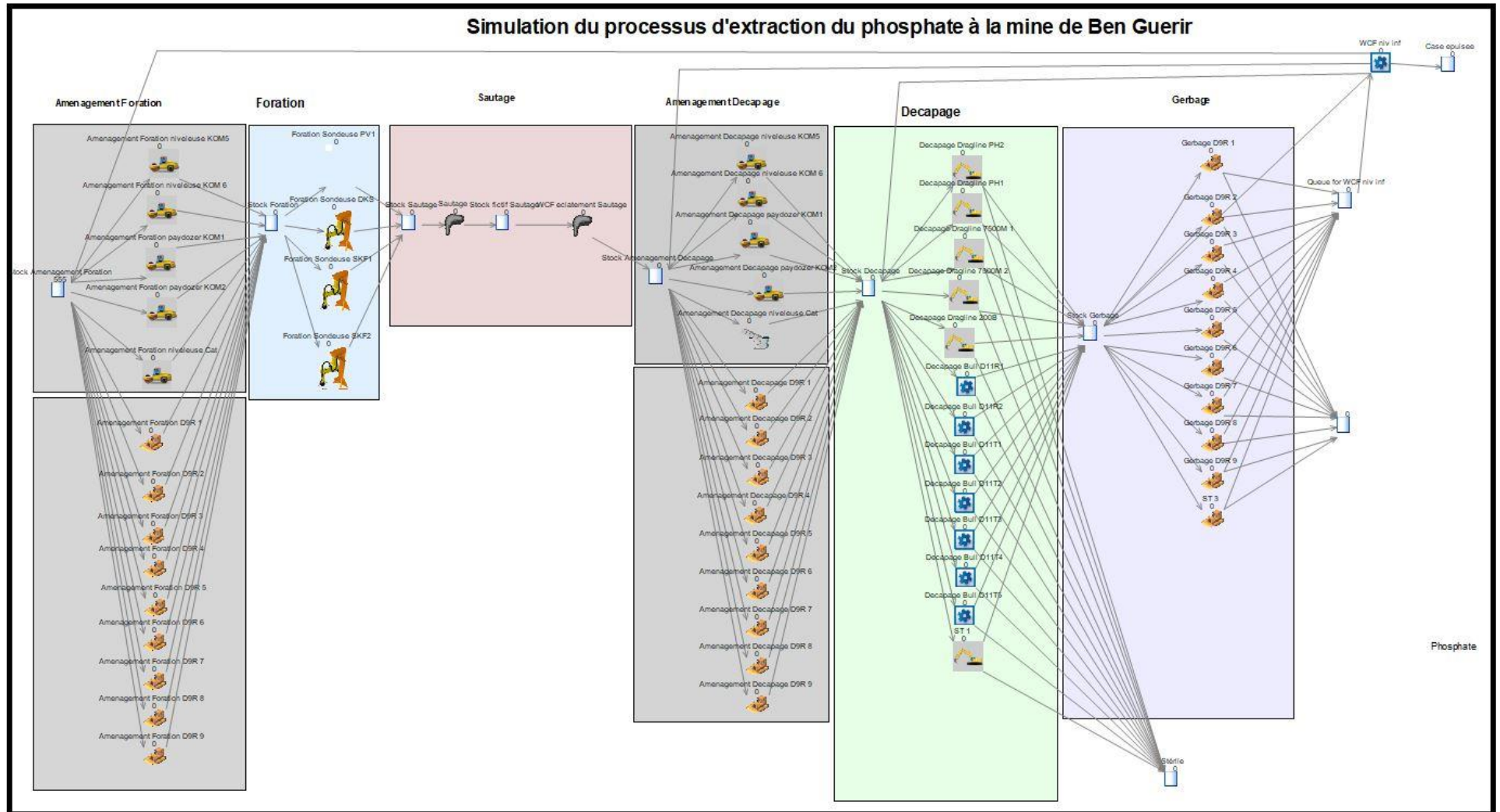


Figure 11 : Simulation du processus d'extraction du phosphate à la mine de Ben Guerir sous Simul8

2.1. Notations

L'intégralité des notations introduites et utilisées tout au long de ce chapitre sont définies dans le Tableau ci-dessous. Nous avons distingué les ensembles, les indices, les paramètres de pilotages, les paramètres du processus d'extraction, les paramètres des machines d'extraction ainsi que les variables comme illustré dans ce qui suit.

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des notations retenues pour la modélisation du modèle SED

Ensembles et indices	
P	Ensemble des panneaux, $p \in P$
R_p	Ensemble des parcelles, $r_p \in R_p$
T_p	Ensemble des tranchées, $t_p \in T_p$
B_p	Ensemble des blocs, $b_p \in B_p$
L_p	Ensemble des couches, $l_p \in L_p$
S_p	Ensemble des couches sources de minerai, $ls_p \in S_p$
M	Ensemble des machines d'extraction, $m \in M$
i	Indice du bloc B_p ou blocs contigus Lot à traiter
j	Indice de l'opération élémentaire à exécuter
m	Indice de la machine exécutant l'opération
Paramètres de pilotage du modèle SED	
P_{ls_p}	Indice de priorité de la couche source s_p , $ls_p \in S_p$
H	Horizon de planification
dc	Coefficient de distance
ac	Coefficient d'accessibilité
Paramètres du processus d'extraction	
O_{ij}	Opération élémentaire j à exécuté sur le bloc ou l'ensemble de blocs i
t_{ij}	Temps de début d'exécution de l'opération O_{ij}
$t_{i(j-1)}$	Temps de début d'exécution de l'opération $O_{i(j-1)}$
T_{ijm}	Temps nécessaire pour l'exécution de l'opération O_{ij} par la machine $m \in M$

T_{l_pjm}	Temps nécessaire pour traiter une couche l_p, j opération à exécuter sur l_p, m la machine affectée
Paramètres des machines d'extraction	
M_{ij}	Sous-ensemble de machines pouvant être affecté au bloc i et exécuter l'opération j
Variables de décisions	
Lot	Variable de blocs contigus, $i \in Lot$
x_{ijm}	Variable binaire prenant la valeur 1 si l'opération O_{ij} est affectée à la machine m ; 0 sinon.

2.2. Formulation du gisement minier et des paramètres de pilotages du modèle SED

Pour formuler le problème, nous considérons que le gisement de la mine à ciel ouverte dans notre étude est composé verticalement de P panneaux ($p = 1..P$). Chaque panneau est divisé en parcelles R_p ($r_p = 1..R_p$), définissons les points d'entrée et de sortie possibles des machines d'extraction. Chaque panneau P est également composé de tranchées T_p ($t_p = 1..T_p$) avec des longueurs différentes mais conservant une largeur fixe de 40m chacune. Une tranchée T_p combine des blocs contigus B_p ($b_p = 1..B_p$) de 40m x 100m. Le bloc constitue la plus petite unité d'un gisement minier, chaque bloc B_p contient plusieurs couches verticalement L_p ($l_p = 1..L_p$). Il s'agit d'une alternance de couches de stériles et de couches de minerai QS. Le nombre et la composition chimique des couches peuvent différer d'un bloc à l'autre en raison des variations géologiques. Une QS peut être présente dans un bloc et absente dans le bloc suivant. L'ensemble des différentes couches de minerai QS au nombre de 12 est appelé S_p ($ls_p = 1..S_p$). Le processus d'extraction d'un bloc B_p , ou de plusieurs blocs contigus appelé Lot ($i = 1..Lot$) est composé d'une succession d'OE. Chaque opération j sur des blocs contigus i , à savoir O_{ij} peut être traitée par la machine M ($m = 1..M$) du sous-ensemble M_{ij} capable d'exécuter cette opération.

La génération d'un scénario de planification repose sur la définition des données d'entrées suivantes :

- Indices de priorité pour chaque couche de QS : chaque indice de priorité P_{ls_p} ($ls_p = 1..S_p$), peut prendre des valeurs sur une échelle de 1 à 10 ;
- Coefficient de distance dc , spécifiant le périmètre de déplacement dans lequel les machines sont autorisées à se déplacer (rappelons qu'un bloc mesure 100m de long) et coefficient d'accessibilité ac , compris entre 0 et 1, où la valeur de 1 reflète une grande importance de l'accès au maximum de minerai en fonction de la priorité. La variation de ces coefficients dans le modèle affecte l'arbitrage entre le choix de maximiser les volumes extraits sans se soucier des déplacements des machines, de minimiser les déplacements des machines au détriment des volumes extraits ou de trouver un compromis entre les deux. Pour illustrer, voir les trois cas ci-dessous :
 - *Cas 1*- Extraction urgente de volumes ($ac = 1, dc = 10000$): la machine est autorisée à se déplacer avec un périmètre de 100 blocs et à l'extérieur du panneau ;
 - *Cas 2*- Compromis entre distance à parcourir et accessibilité des couches ($ac = 0.5, dc = 1000$): la machine est autorisée à se déplacer avec un périmètre de 10 blocs les plus proches dans le même panneau ;
 - *Cas 3*- Limitation des mouvements des machines ($ac = 0.1, dc = 10$): la machine est autorisée à se déplacer vers le bloc le plus proche dans la même tranchée.
- Horizon de planification H : horizon court à moyen terme (1 heure à 12 mois);
- État initial de la mine (données dynamiques définies par l'équipe de planification et importer directement dans le DSS) ;
- Données géologiques de la mine (données structurelles intégrées dans le volet gestion des données du DSS).

2.3. Niveaux conceptuels du modèle SED

Le modèle SED lui-même peut être décomposé en trois niveaux conceptuels interconnectés. D'abord, il est alimenté par plusieurs entrées, puis respecte différentes contraintes, pour finalement produire des sorties représentant les scénarios d'extraction, comme expliqué dans la Figure 12 ci-dessous.

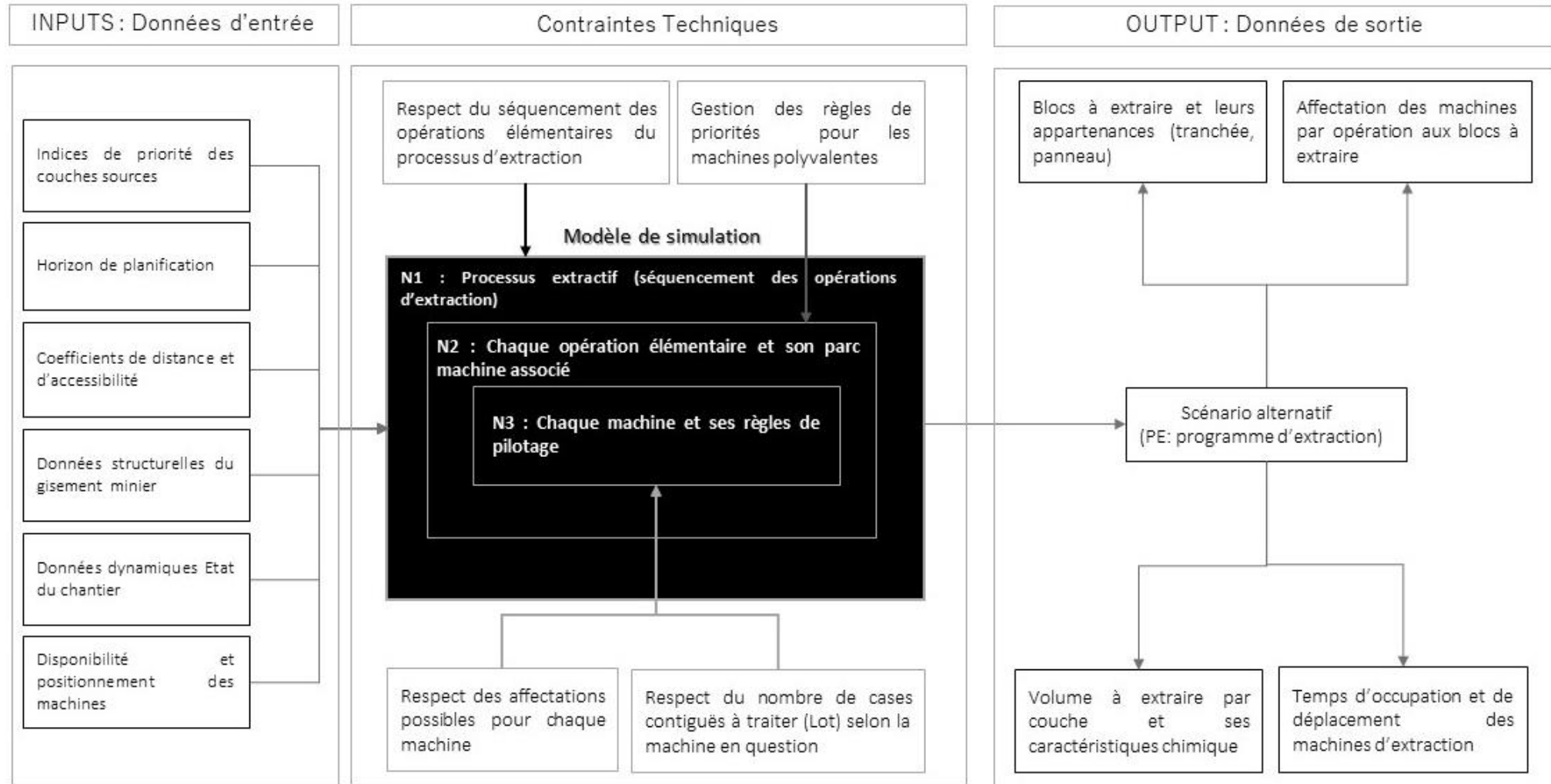


Figure 12 : Framework du modèle SED (Inputs, niveaux conceptuels, contraintes technique et output)

Il est important de noter que les niveaux conceptuels du modèle de SED fonctionnent simultanément, et non séparément, pour assurer la cohérence globale du scénario généré. Par conséquent, cette décomposition ne fait que clarifier les interdépendances et le rôle de chaque niveau. Les trois niveaux conceptuels sont construits comme suit :

- **Le premier niveau (N1)** traite de l'ensemble des OE constituant le processus d'extraction du minerai. Nous retrouvons six opérations élémentaires distinctes dans le processus de l'extraction minière :
 - OE 1 : la préparation ou l'aménagement des blocs contigus à traiter pour la foration
 - OE 2 : L'opération de foration qui consiste à créer des trous dans les blocs pour contenir l'explosif.
 - OE 3 : l'opération du sautage, visant la fragmentation des déchets au-dessus de la couche de minerai.
 - OE 4 : la préparation et l'aménagement des blocs sautés pour le décapage en enlevant les débris de fragmentation obstruant le passage.
 - OE 5 : l'opération du décapage qui consiste à enlever le stérile fragmenté
 - OE 6 : l'opération du gerbage qui se focalise sur la récupération de la couche minerai et la stocker à côté de la tranchée pour être ensuite chargé et transporté aux stocks de minerais.
- **Le deuxième niveau (N2)** définit chaque OE et son parc de machines compatibles. Ainsi, nous déterminons les liaisons et les routages entre machines et opérations, en notant que les machines d'extraction contiennent à la fois des machines dédiées et polyvalentes ;
- **Le troisième niveau (N3)** est le niveau le plus bas et le plus détaillé, traitant les caractéristiques techniques de chaque machine, les niveaux sur lesquels elle peut travailler et ses règles de fonctionnement.

2.4. Contraintes techniques intégrées

Chaque simulation d'un scénario d'extraction se assure que ce dernier respecte plusieurs contraintes techniques. Ces contraintes sont programmées dans l'environnement de la simulation en utilisant les interfaces de visual logic encapsulé

dans le logiciel de simulation utilisé (simul8). Nous expliquons par le biais d'exemple les types de contraintes intégrés :

- **Contraintes géologiques** : un exemple de contrainte dans cette catégorie, serait l'alternance des couches dans un bloc. Considérons un bloc B_p avec des couches telles que $(l_p = 1..10)$, T_{l_pjm} le temps nécessaire pour traiter une couche l_p , j la ou les opérations à exécuter sur l_p , m la ou les machines affectées). On ne peut commencer le traitement d'une couche inférieure ($l_p = 6$), que si l'on traite toutes les couches qui la précèdent. Ainsi pour simplifier le temps nécessaire à l'obtention ($l_p = 6$) se formule par l'équation (1) :

$$T_t = T_{l_pjm} + \sum_{l_p=1}^5 T_{l_pjm} \quad (1)$$

Notons ici qu'une couche peut être soit des du stérile, soit du minéral. Par conséquent, les opérations et les machines à affecter aux travaux seraient différentes selon la nature et les caractéristiques de la couche.

- **Contraintes du processus** : la succession d'opérations élémentaires dans le processus d'extraction comme expliqué précédemment impose un ordre précis à respecter. A titre illustratif, l'empilement de la couche de minéral ($l_p = 6$) ne peut être réalisé que si le décapage des stériles ($l_p = 5$) au-dessus d'elle est déjà terminé. L'équation (2) explique comment chaque opération O_{ij} est conditionnée par l'exécution de celle qui la précède O_{ij-1} .

$$t_{ij} \geq t_{ij-1} + \sum_{m \in M_{ij-1}} T_{i(j-1)m} x_{i(j-1)m} \quad (2)$$

- **Contraintes des ressources** : Les affectations possibles d'une machine d'extraction $m \in M$ en fonction de ses caractéristiques techniques. Chaque machine m appartient à un sous-groupe M_j , reflétant si la machine peut exécuter une opération j . De plus, chaque sous-groupe M_j possède une matrice d'affectation M_x définissant les couches auxquelles les machines sont techniquement capables d'accéder et de traiter. Considérons deux machines

appartenant au même sous-groupe M_j où l'opération j en question est le décapage. Ce sous-groupe contient au total 12 machines d'éjection des déchets, 62 types de déchets distincts existent dans notre cas conduisant à une matrice d'affectation $M_x(12,62)$. Considérons deux machines (m_1) et la (m_2) avec le même rôle principal de décapage des couches de déchets afin d'accéder à la couche de minerai en dessous. La différence réside dans le fait que m_1 peut travailler sur des couches auxquelles m_2 ne peut pas accéder, et vice versa, avec $M_x(m_1,62)$ la matrice d'affectation de la machine m_1 avec 55 des 62 affectations possibles tandis que $M_x(m_2,62)$ affiche un total de 37 affectations possibles sur 62.

- **Contraintes de gestion de priorité des ressources :** La priorisation de l'affectation des machines dans le cas des machines d'extraction polyvalentes est un aspect important de la gestion des machines. Nous prenons l'exemple des Bulldozers D9R par le décompte de 9 machines. Ce groupe de machines d'extraction appartient simultanément à trois sous-groupes M_j où les opérations j sont $\{1 : \text{Aménagement pour foration}, 4 : \text{Aménagement pour décapage}, 6 : \text{gerbage}\}$. Or, la règle opérationnelle indique la priorité pour ($j = 6$) suivie d'une priorité équivalente pour ($j = 1$) et ($j = 4$)

2.5. Données de sortie

Le modèle SED a été adapté pour répondre aux spécifications complexes du domaine minier afin de permettre une construction cohérente des programmes d'extraction sous forme de scénarios alternatifs. Le temps de calcul pour générer chaque scénario est inférieur à 2 minutes. Les résultats de la simulation sont des scénarios alternatifs, chacun spécifiant quatre aspects principaux :

- Une prévision horaire des volumes à extraire pour les 12 différentes couches de minerai évoluant le long de l'horizon de planification.
- La spécification des blocs à extraire et leur appartenance à quelle tranchée, parcelle et panneau dans le gisement minier sur l'horizon temporel.
- L'affectation des machines d'extraction par OE du processus d'extraction.
- Le temps d'occupation et de déplacement de chaque machine d'extraction.

3. VALIDATION INDUSTRIELLE DU MODELE SED

3.1. Description de la construction d'un programme d'extraction annuel

Afin d'expliquer la construction automatique d'un programme d'extraction cohérent. Nous allons décrire dans cette section les étapes de cette construction en se concentrant sur un seul scénario ou programme d'extraction (PE). Nous commençons par l'intégration des différents éléments de données d'entrée au moment de la planification. Pour faciliter cette intégration, nous avons établi un consensus avec les dirigeants du pôle planification sur la structuration des fichiers à emporter et la saisie des paramètres de pilotage directement sur l'interface de gestion des données constituant un module du DSS proposé, comme nous allons l'expliquer plus loin dans le chapitre V de l'architecture générale du DSS. Ensuite nous simulons le programme d'extraction via le module de simulation, la simulation d'un scénario prend environ 2min maximum. Une fois la simulation terminée nous obtenons un fichier Excel en sortie retraçant les choix décisionnels des blocs à extraire et des affectations des machines à leurs travaux respectives, ainsi que les volumes extraits en stérile et en couche source de minerais. Dans la proposition du DSS finale de notre travail, ce fichier est directement et implicitement sauvegardé dans la base de données des scénarios du DSS, pour l'intégrer automatiquement dans le module de filtrage suivant cette étape. Cependant pour illustrer cet exemple, nous allons procéder pas à pas à la décortication des étapes expliquées.

3.1.1. Structure et préparation des fichiers d'entrée (INPUTS)

Le modèle SED est alimenté par un fichier Excel comportant un ensemble de 25 feuilles nécessaires pour une simulation correcte du processus extractif. Ce fichier comporte les informations réelles liées aux différents aspects de l'extraction minière notamment, les données structurelles du gisement (panneaux, tranchées, cases, niveaux, coupe lithologique, coordonnées géographiques, etc.) et les données respectives aux machines

d'extraction ainsi que leurs caractéristiques (polyvalence et spécialité des machines par opération, les affectations possibles des machines par rapport au niveau traité, rendement variable, etc.). Nous allons expliquer ci-dessous le rôle des feuilles les plus importantes dans l'alimentation du modèle de simulation :

- Initialisation des avances de l'état du chantier ;
- Initialisation des processeurs de la simulation ;
- Détermination de la coupe lithologique ;
- Intégration des matrices des affectations possible des machines d'extraction ;
- Calcul des temps opératoires pour le traitement des blocs ;
- Saisie des paramètres de pilotage.

▪ *Initialisation des avances de l'état du chantier (Données dynamiques)*

Cette feuille, représente l'initialisation du système à l'état actuel du gisement, elle contient l'ensemble des cases en précisant leurs appartenances aux panneaux et tranchées ainsi que leurs coordonnées géographiques, niveau apparent, opération suivante à subir, les machines mobilisées, et le travail restant pour chaque machine, etc. il faut noter que cette feuille est dynamique, elle est mise à jour selon l'état de chantier au moment de la planification pour tenir en compte l'évolution de l'extraction minière sur le terrain dans le modèle de la simulation

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Num case chant	Num panneau	Nom tranch	Nom niveau	nature nive	Num p	Num tranch	Id nive	Num groupe	Num lot	Num d'ordre chronologique	Num de niveau	Num d'opération élémentaire
17	18	5 E1	Recouvrement Couche 0.1	1	13	3	20	205	575	1	1	1	
18	19	5 E1	Recouvrement Couche 0.1	1	13	3	20	206	575	1	1	1	
19	20	5 E1	Recouvrement Couche 0.1	1	13	3	20	205	575	1	1	1	
20	21	5 E1	Recouvrement Couche 0.1	1	13	3	20	205	575	1	1	1	
21	22	5 E1	Recouvrement Couche 0.1	1	13	3	20	207	575	1	1	1	
22	23	5 E1	Recouvrement Couche 0.1	1	13	3	20	207	575	1	1	1	
23	24	5 E1	Recouvrement Couche 0.1	1	13	3	20	208	575	1	1	1	
24	25	5 E1	Recouvrement Couche 0.1	1	13	3	20	208	575	1	1	1	
25	26	5 E1	Recouvrement Couche 0.1	1	13	3	20	209	575	1	1	1	
26	17	5 E4	Recouvrement Couche 0.1	1	13	4	20	220	739	1	1	1	
27	18	5 E4	Recouvrement Couche 0.1	1	13	4	20	205	739	1	1	1	
28	19	5 E4	Recouvrement Couche 0.1	1	13	4	20	206	739	1	1	1	
29	20	5 E4	Recouvrement Couche 0.1	1	13	4	20	206	739	1	1	1	
30	1	5 E5	Recouvrement SA2	1	14	5	2	253	1067	1	1	1	
31	2	5 E5	Recouvrement SA2	1	14	5	2	254	1067	1	1	1	
32	3	5 E5	Recouvrement SA2	1	14	5	2	255	1067	1	1	1	
33	4	5 E5	Recouvrement Couche 0.1	1	13	5	20	212	985	1	1	1	
34	5	5 E5	Recouvrement Couche 0.1	1	13	5	20	201	985	1	1	1	
35	6	5 E5	Recouvrement Couche 0.1	1	13	5	20	201	985	1	1	1	
36	7	5 E5	Recouvrement SA2	1	14	5	2	248	1067	1	1	1	
37	8	5 E5	Recouvrement SA2	1	15	5	2	270	1149	1	1	1	
38	9	5 E5	Recouvrement SA2	1	15	5	2	275	1149	1	1	1	
39	10	5 E5	Recouvrement SA2	1	15	5	2	271	1149	1	1	1	
40	11	5 E5	Recouvrement SA2	1	15	5	2	271	1149	1	1	1	
41	12	5 E5	Recouvrement SA2	1	15	5	2	268	1149	1	1	1	
42	13	5 E5	Recouvrement SA2	1	15	5	2	272	1149	1	1	1	

Figure 13 : initialisation des avances de l'état du chantier

▪ *Initialisation des processeurs de la simulation*

La feuille initialisation processeurs représente l'initialisation des machines d'extraction selon l'état de chantier. Nous précisant ici les machines qui sont en cours d'extraire certaines cases et doivent finir leurs travaux avant de pouvoir se déplacer ailleurs. Ainsi ces machines ne seront disponibles pour une nouvelle affectation qu'après une période équivalente au temps nécessaire pour finir le travail en cours due à une affectation préalable. La Figure 14 montre par exemple que la sondeuse DKS doit terminer la foration de 6 cases avant de d'être réaffecter.

	A	B	C	D	E
1	Component	Nom machine (Work center)	Num_Id	Nombre case reste à traiter	Num lot
30	Bulldozer D9 Gerbage	Gerbage D9R 1	29		
31		Gerbage D9R 2	30		
32		Gerbage D9R 3	31		
33		Gerbage D9R 4	32		
34		Gerbage D9R 5	33		
35		Gerbage D9R 6	34		
36		Gerbage D9R 7	35		
37		Gerbage D9R 8	36		
38		Gerbage D9R 9	37		
39	Foration sondeuse	Foration Sondeuse PV1	38		
40		Foration Sondeuse DKS	39	6	590
41		Foration Sondeuse SKF1	40	2	4776
42		Foration Sondeuse SKF2	41	11	32
43	Sautage	Sautage	42	2	4759
44	Bulldozers D11	Decapage Bull D11T1	43		
45		Decapage Bull D11T2	44		
46		Decapage Bull D11T3	45		
47		Decapage Bull D11T4	46		
48		Decapage Bull D11T5	47		
49		Decapage Bull D11R 1	48		
50		Decapage Bull D11R 2	49		
51	Draglines	Decapage Dragline 7500M 1	50	3	4522
52		Decapage Dragline 7500M 2	51	3	5595
53		Decapage Dragline PH 1	52	2	593
54		Decapage Dragline PH 2	53	7	35
55		Decapage Dragline 200B	54		

Figure 14 : Initialisation des processeurs de la simulation

▪ Détermination de la coupe lithologique (Données structurales)

Le gisement de phosphate est de nature hétérogène, cela fait que les cases appartenant au même panneau ou même à la même tranchée n'ont pas nécessairement la même coupe lithologique. Il est important de noter qu'une coupe lithologique définit la succession des niveaux de phosphate et de stérile présents ainsi que leurs épaisseurs. Cela dit, il est nécessaire de prendre compte cette hétérogénéité pour être en mesure de garantir une prévision correcte des volumes de minerais à extraire. Dans cette optique, nous avons développé une programmation permettant de consolider les données pour

regrouper les cases contiguës ayant exactement les mêmes caractéristiques. Il s'ensuit la déduction d'un nombre de structures uniques en termes de succession des niveaux et d'épaisseurs. Toutes les cases traitées sont par la suite associées à une des structures définies. La Figure 15 représente la feuille « coupe lithologique » où nous pouvons distinguer différentes structures déduites.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O			
1	Structure 1										Structure 2							
2	Nom niveau	Num niveau	Amenagement	Foration	Foration	Sautage	Amenagement	Decapage	Decapage	Défruitage	Charg/Tra	Nom niveau	Num niveau	Amenagement	Foration	Sautage	Amenagement	Decapage
3	Recouvrement SA2	1		1	2	3		4	5			Recouvrement SA2	1		1	2	3	
4	Sillon A2	2								6		7 Sillon A2	2					
5	Intercalaire SA2/C0	3		8	9	10		11	12			Intercalaire SA2/C0	3		8	9	10	
6	Couche 0	4								13		14 Couche 0	4					
7	Intercalaire C0/C1	5		15	16	17		18	19			Couche 1	5					
8	Couche 1	6								20		21 Intercalaire C1/C2	6		17	18	19	
9	Intercalaire C1/C2	7		22	23	24		25	26			Couche 2 supérieure	7					
10	Couche 2 supérieure	8								27		28 Intercalaire C2/C3	8		24	25	26	
11	Intercalaire C2/C3	9		29	30	31		32	33			Couche 3 inférieure	9					
12	Couche 3 inférieure	10								34		35 Intercalaire C3/C4	10		31	32	33	
13	Intercalaire C3/C4	11		36	37	38		39	40			Couche 4	11					
14	Couche 4	12								41		42 Intercalaire C4/C5	12		38	39	40	
15	Intercalaire C4/C5	13		43	44	45		46	47			Couche 5	13					
16	Couche 5	14								48		49 Intercalaire C5/C6	14		45	46	47	
17	Intercalaire C5/C6	15		50	51	52		53	54			Couche 6	15					
18	Couche 6	16								55	56							
19																		
20																		
21																		
22																		
23																		
24																		
25																		
26																		
27																		
28																		
	«	»	Etat de chantier_23_04_2019	Initialisation des avances	Initialisation processeurs	Coupes litho	Num niveau	Excel affecta possible machine	Num niveau	Volume	Idee ...	⊖	⊕	⌂				

Figure 15 : Coupe lithologique

■ Intégration des matrices des affectations possible des machines d'extraction (Données structurelles)

Les machines d'extraction ont des caractéristiques différentes en termes de polyvalence et de spécialité vis-à-vis des opérations élémentaires mais aussi en termes de niveaux à traité. Les Draglines par exemple ne travaillent pas sur les recouvrements, tandis que les Bull D11 peuvent travailler sur toute sorte de recouvrement. La Figure 16 montre un exemple d'une matrice d'affectations possible pour les machines du décapage.

Num panneau	Id stérile	Panneau 2	Panneau 2	Panneau 2	Panneau 2	Panneau 2	Num panneau	Id stérile	Panneau 3	Panneau 3
Nom niveau / Machine		Dragline 7500M	Dragline PH	Bulls D11	Sous traitance	Surface Miner	Nom niveau / Machine		Dragline 750	Dragline 750
Recouvrement Sillon B	1	0	0	1	0	0	Recouvrement Sillon B	1	0	0
Recouvrement SA2	2	0	0	1	0	0	Recouvrement SA2	2	0	0
Recouvrement C0	3	0	0	1	0	0	Recouvrement C0	3	0	0
Recouvrement C1	4	0	0	1	0	0	Recouvrement C1	4	0	0
Recouvrement C2	5	0	0	1	0	0	Recouvrement C2	5	0	0
Recouvrement C3	6	0	0	1	0	0	Recouvrement C3	6	0	0
Recouvrement C4	7	0	0	1	0	0	Recouvrement C4	7	0	0
Recouvrement C5	8	0	0	1	0	0	Recouvrement C5	8	0	0
Recouvrement C6	9	0	0	1	0	0	Recouvrement C6	9	0	0
Intercalaire SB/SA2	10	0	0	1	0	0	Intercalaire SB/SA2	10	0	0
Intercalaire SA2/C0	11	0	0	1	0	0	Intercalaire SA2/C0	11	0	0
Intercalaire C0/C1	12	0	0	1	0	0	Intercalaire C0/C1	12	0	0
Intercalaire C1/C2	13	1	1	1	0	0	Intercalaire C1/C2	13	1	1
Intercalaire C2/C3	14	1	1	1	0	1	Intercalaire C2/C3	14	1	1
Intercalaire C3/C4	15	0	1	1	0	0	Intercalaire C3/C4	15	0	0
Intercalaire C3/C5	16	1	1	1	0	0	Intercalaire C3/C5	16	1	1
Intercalaire C4/C5	17	1	1	1	0	0	Intercalaire C4/C5	17	1	1
Dalle Couche 5 inférieure	18	0	0	0	0	1	Dalle Couche 5 inférieure	18	0	0
Intercalaire C5/C6	19	1	1	0	1	0	Intercalaire C5/C6	19	1	1

Figure 16 : Matrices des affectations possibles des machines

- **Calcul des temps opératoires pour le traitement des blocs**

Cette feuille permet de calculer le temps nécessaire pour effectuer les opérations élémentaires en fonction du volume du niveau à extraire et les rendements moyens des machines de chaque opération. Dans la Figure 17 ci-dessous, le premier tableau permet de calculer le temps en heure de chaque opération par niveau, le deuxième est un calcul de cumul du temps permettant de quantifier le temps nécessaire pour accéder à une couche précise, ou même le temps total requis pour exploiter tout le bloc jusqu'au dernier niveau, selon sa coupe lithologique.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	T(n.o)	Epaisseur	Num d'opération						T(n.o)
2	Num de niveau structure 1		1	2	3	4	5	6	Num de niveau structure 2
3	Recouvrement SA2	2	5	6	10	5	21		Recouvrement SA2
4	Sillon A2	4.9						98	Sillon A2
5	Intercalaire SA2/C0	8	5	26	40	5	82		Intercalaire SA2/C0
6	Couche 0	1						20	Couche 0
7	Intercalaire C0/C1	0.5	5	2	3	5	5		Couche 1
8	Couche 1	1.2						24	Intercalaire C1/C2
9	Intercalaire C1/C2	3.2	5	10	16	5	33		Couche 2 supérieure
10	Couche 2 supérieure	1.15						23	
11	Intercalaire C2/C3	2.4	5	8	12	5	25		
12	Couche 3 inférieure	0.8						16	
13	Intercalaire C3/C4	1.28	5	4	6	5	13		
14	Couche 4	1.2						24	
15	Intercalaire C4/C5	5.2	5	17	26	5	53		
16	Couche 5	2						40	
17	Intercalaire C5/C6	2.4	5	8	12	5	25		
18	Couche 6	0.4						8	
19									
20									
21	1								2
22	TCUM(n.o)		Num d'opération						
23	Nom niveau n	Num de niveau	1	2	3	4	5	6	Nom niveau n
24	Recouvrement SA2	1	5	11	21	26	47		Recouvrement SA2
25	Sillon A2	2						145	Sillon A2
26	Intercalaire SA2/C0	3	150	176	216	221	303		Intercalaire SA2/C0
27	Couche 0	4						323	Couche 0
28	Intercalaire C0/C1	5	328	330	332	337	342		Couche 1
29	Couche 1	6						366	Intercalaire C1/C2
30	Intercalaire C1/C2	7	371	381	397	402	435		Couche 2 supérieure
31	Couche 2 supérieure	8						458	Intercalaire C2/C3
32	Intercalaire C2/C3	9	463	471	483	488	513		Couche 3 inférieure
33	Couche 3 inférieure	10						529	Intercalaire C3/C4
34	Intercalaire C3/C4	11	534	538	544	549	562		Couche 4
35	Couche 4	12						586	Intercalaire C4/C5
36	Intercalaire C4/C5	13	591	608	634	639	693		Couche 5
37	Couche 5	14						733	Intercalaire C5/C6
38	Intercalaire C5/C6	15	738	745	757	762	787		Couche 6
39	Couche 6	16						795	

Figure 17 : Calcul des temps opératoires pour le traitement des blocs

L'alimentation du modèle de simulation par les données d'entrées expliquées préalablement, se fait au niveau de visual logic à l'entrée du modèle SED. Ceci permet d'importer l'ensemble des feuilles sur des spreadsheet interne à l'environnement de la simulation (Figure 18 ci-dessous). Il faut noter ici, que la gestion de ces données se fait dorénavant directement à partir de l'interface de gestion des données intégrée au DSS.



Figure 18 : brique d'intégration des données d'entrée à l'environnement de simulation

▪ Saisie des paramètres de pilotage

À cette étape, nous devons spécifier les indices de priorités des QS sur un intervalle de [1,10], 1 étant la couche la moins prioritaire et 10 la couche la plus prioritaire. Ensuite nous nous situons dans le cas de limitation des mouvements des machines pour la définition des coefficients d'accessibilité et de déplacement ($ac=0.1$, $dc=10$), avec un horizon annuel de planification ($H = 12$ mois). Ensuite nous lançant la simulation directement du DSS, qui va se charger de faire appel au modèle SED encapsulé et de recueillir le fichier de sortie correspondant à notre programme d'extraction annuel.

VISUALISATION

- Display Results
- Compare Results

STRUCTURAL DATA

- Panels/Trenches
- Machines/Operations
- Profiles
- QM/Matrice de fabrication

UTILITAIRES

Définition d'un scenario

Name Add

Détails des scenarii

Scenarii scenario delete

	Indice de priorité															
Name	SB	SA2	C0	C1	C0_1	C2S	C3S	C3I	C3	C4S	C4I	C4	C5S	C5I	C5	C6
Scenario 04	3	2	6	6	6	10	10	10	10	3	3	3	8	8	8	8

Figure 19 : spécification des indices de priorité des QS

3.1.2. Récupération du programme d'extraction simulé

Une fois le scénario simulé, nous obtenons le fichier de sortie de la simulation et nous visualisons les résultats via le module de visualisation du DSS. En effet, le fichier de sortie de la simulation est en forme de fichier Excel. Ce fichier retrace les affectations des ressources et explicite les décisions prises lors de la simulation en matière de choix des cases à extraire pour répondre à la demande ainsi que la gestion des machines d'extraction disponibles. Ce fichier est la base exploitée pour formuler graphiquement le programme de planification. La Figure 20 ci-dessous montre la structure du fichier de sortie.

#	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Simulation time	Num panneau	Num tranchée	Num case	Nom niveau	Début / Fin	Opération	Machines	Volume	Temps de traitement(H)	Num lot	Indice priorité 1	Indice priorité 2	temps de déplacement (H)
2	3299.11644	5	7	14	Intercalaire C3/C4	Fin	Decapage	Dragline PH2	5600	14	1335	12.864	12.865	9
3	3299.11644	5	7	13	Intercalaire C3/C4	Debut	Decapage	Dragline PH2	4720	12	1335	12.408	12.432	0
4	3314.35453	5	7	13	Intercalaire C3/C4	Fin	Decapage	Dragline PH2	4720	12	1335	12.408	12.432	0
5	3314.35453	5	7	12	Intercalaire C3/C4	Debut	Decapage	Dragline PH2	4720	12	1335	12.408	12.435	0
6	3325.59263	5	7	12	Intercalaire C3/C4	Fin	Decapage	Dragline PH2	4720	12	1335	12.408	12.435	0
7	3325.59263	5	7	11	Intercalaire C3/C4	Debut	Decapage	Dragline PH2	4320	11	1335	12.408	12.434	0
8	3339.87834	5	7	11	Intercalaire C3/C4	Fin	Decapage	Dragline PH2	4320	11	1335	12.408	12.434	0
9	3339.87834	5	7	10	Intercalaire C3/C4	Debut	Decapage	Dragline PH2	4400	11	1335	12.408	12.434	0
10	3350.35453	5	7	10	Intercalaire C3/C4	Fin	Decapage	Dragline PH2	4400	11	1335	12.408	12.434	0
11	3350.35453	5	7	9	Intercalaire C3/C4	Debut	Decapage	Dragline PH2	4400	11	1335	12.408	12.408	0
12	3355.83041	7	9	42	Recouvrement SA2	Fin	Foration	Sondeuse PV1	100000	61	2625	3.960	3.960	1
13	3355.83041	7	9	43	Recouvrement SA2	Debut	Foration	Sondeuse PV1	20000	13	2625	3.960	3.986	0
14	3364.83072	5	7	9	Intercalaire C3/C4	Fin	Decapage	Dragline PH2	4400	11	1335	12.408	12.408	0
15	3364.83072	5	7	8	Intercalaire C3/C4	Debut	Decapage	Dragline PH2	4400	11	1335	12.408	12.408	0
16	3371.98846	7	9	43	Recouvrement SA2	Fin	Foration	Sondeuse PV1	20000	13	2625	3.960	3.986	0
17	3371.98846	7	9	1	Recouvrement SA2	Debut	Foration	Sondeuse PV1	8000	5	2625	3.960	4.209	0
18	3375.30692	5	7	8	Intercalaire C3/C4	Fin	Decapage	Dragline PH2	4400	11	1335	12.408	12.408	0
19	3375.30692	5	7	7	Intercalaire C3/C4	Debut	Decapage	Dragline PH2	4400	11	1335	12.408	12.409	0
20	3376.85168	7	9	1	Recouvrement SA2	Fin	Foration	Sondeuse PV1	8000	5	2625	3.960	4.209	0
21	3376.85168	7	9	7	Recouvrement SA2	Debut	Foration	Sondeuse PV1	14000	9	2625	3.960	3.960	0
22	3389.36232	7	9	7	Recouvrement SA2	Fin	Foration	Sondeuse PV1	14000	9	2625	3.960	3.960	0
23	3389.78311	5	7	7	Intercalaire C3/C4	Fin	Decapage	Dragline PH2	4400	11	1335	12.408	12.409	0
24	3398.44182	2	1	7	Intercalaire C2/C3	Debut	Foration	Sondeuse SKF1	10160	12	1	11.852	11.874	1

Figure 20 : Structure du fichier de sortie du modèle SED

Nous avons expliqué dans la section § 2.5 que chaque scénario simulé permet de spécifier quatre aspects principaux. Ces aspects sont synthétisés sous deux formes graphiques correspondants au besoin d'analyse du pôle planification de la mine : la courbe cumulatif des volumes extraits par couche source QS tout au long de l'horizon de planification et le Gantt d'affectation des machines d'extraction.

■ Courbe cumulatif des volumes extraits par couche source QS

Le graphique présenter dans la Figure 21 , permet de déterminer la prévision par pas de temps choisi (horaire, journalière, hebdomadaire, mensuelle, trimestrielle) des volumes à extraire pour les différentes couches sources de minerai évoluant le long de l'horizon de planification. En plus de la spécification des blocs à extraire et leur appartenance à quelle tranchée, parcelle et panneau dans le gisement minier sur l'horizon temporel en pointant sur la courbe de la couche en question.

▪ ***Gantt d'affectation des machines d'extraction***

Le graphique mentionné dans la Figure 22, permet de décrire l'affectation des machines d'extraction par opération élémentaire du processus d'extraction (couleurs distinctes dans le graphique). Ainsi que, la date de début et de fin d'affectation, le temps d'occupation et de déplacement de chaque machine d'extraction en pointant sur la machine et l'opération en question. Il est aussi possible de filtrer les affectations par opération ou par type de machine.

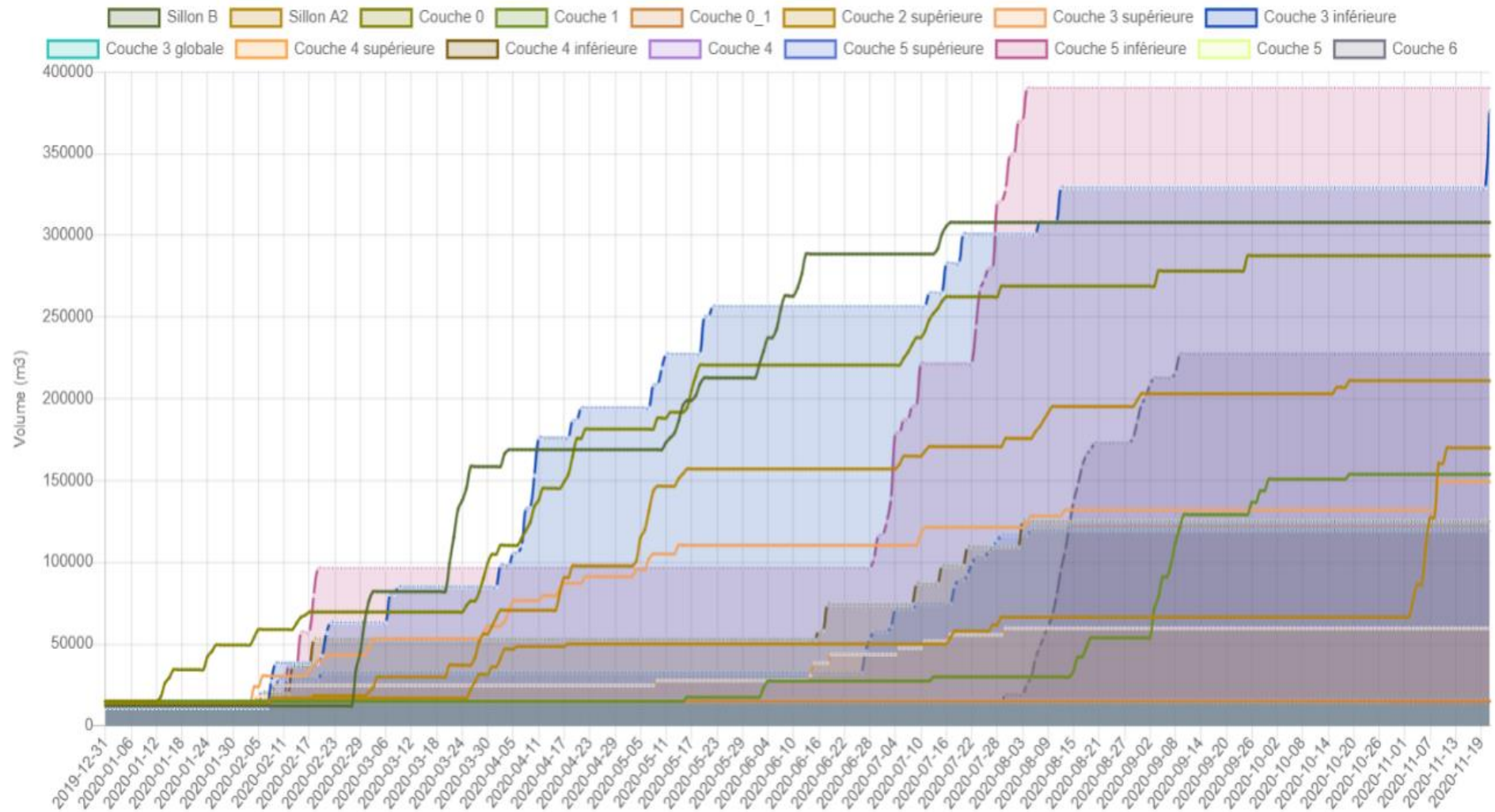


Figure 21 : Courbe cumulatif des volumes extraits par couche source QS

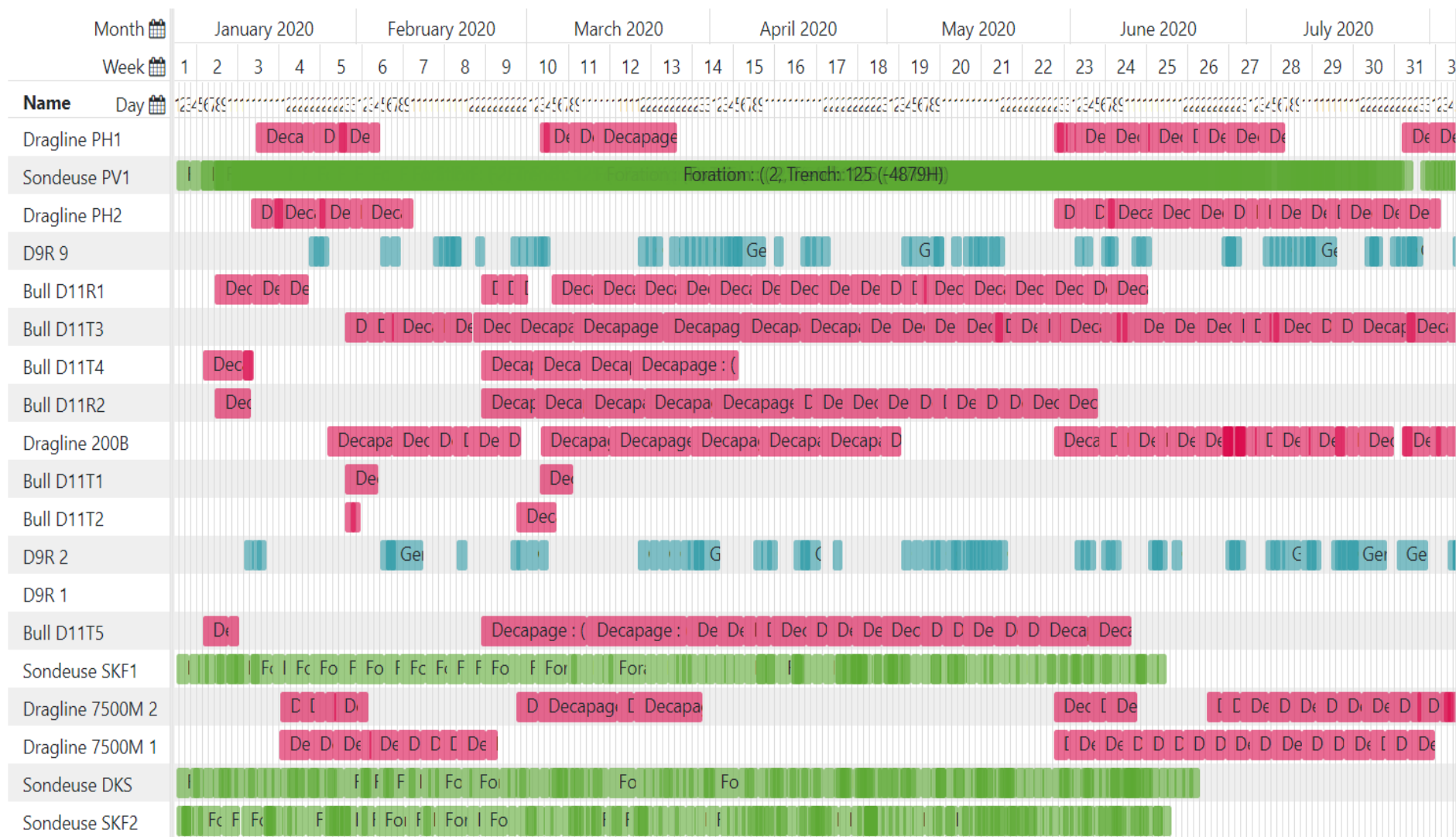


Figure 22 : Gantt d'affectation des machines d'extraction

3.1.3. Validation de la construction d'un programme d'extraction cohérent

La description des étapes de construction d'un programme d'extraction cohérent que nous venons d'expliquer est, en effet, le fruit d'une collaboration continue avec le pôle planification de la mine. Nous avons animé plusieurs workshops continus s'étalons sur une année et demie pour en arriver à ce résultat. Nous avons cherché dans cette phase de prendre en considération les problèmes techniques identifiés lors des workshops effectués avec les responsables du pôle de planification et de géologie, afin d'ajuster et améliorer les règles de pilotage du modèle de simulation. Le but étant de valider dans un premier temps, la cohérence technique et le respect des contraintes intégrés, d'un programme de planification généré par la simulation pas à pas.

Ensuite nous nous sommes rendu compte que la qualité des données d'entrées structurelles constituait un point de blocages pour une simulation correcte. Généralement, les données ne sont pas toujours identifiées comme un enjeu de grande importance. Pourtant, la cohérence et la finesse des données jouent un rôle fondamental dans la pertinence de la solution proposée. En effet, afin d'automatiser l'alimentation du modèle de la simulation, tout en assurant la cohérence du problème de planification formulé à l'entrée, il est nécessaire d'assurer un niveau de cohérence des données. Le pôle géologique nous a donc confié la mission de collaborer avec un responsable géologique pour procéder à une mise à jour de la base de données structurelles du gisement minier (sous le logiciel Arc GIS). Nous soulignons donc que cette base de données a été intégrée par la suite dans le premier module de gestion de données du DSS, offrant une gestion plus fluide et fiable des données à partir de l'outil, ainsi qu'une alimentation automatique de la simulation.

Le problème de la fiabilité des données et de l'intégration des contraintes résolues, nous a permis de passer à l'étape de la construction complète d'un programme de planification en s'appuyant sur les données réelles portant sur la demande annuelle 2020 et l'état d'évolution du gisement au moment de la planification. Nous avons pu suivre, la construction manuelle du programme de la mine et travailler simultanément sur le nôtre, afin de pouvoir évaluer la pertinence du programme généré.

Dans ce processus de réflexion et de concrétisation simultanés, nous nous sommes rendu compte que les indices de priorités spécifiés par les dirigeants du pôle de

planification reposaient toujours sur une logique de matrice figée pour fabriquer les QM demandés en aval. Le travail de [Hilali, 2020] a pourtant démontré le manque de pertinence et d'exactitude de cette approche vis-à-vis la production des QM en aval de l'extraction et de l'utilisation (blending) des QS extraites. Ce qui a résolu le problème au niveau de l'unité de production en proposant des matrices dynamiques pour la production des QM, soulignant ainsi qu'il n'existe pas un seul mélange pour produire une qualité marchande, mais plusieurs en fonction de la disponibilité en stocks des couches extraites par la mine. Nous avons donc compris qu'il fallait briser encore une fois cette barrière due à l'expérience cumulé des pratiques minières, cette fois-ci en amont, à sa source même : l'extraction. En effet, comme il y a plusieurs possibilités de mélanges pour produire une QM, ils existent plusieurs scénarios d'extraction qui peuvent être cohérent techniquement et proposés des volumes différents, en quantité et en qualité, à extraire en QS. La liaison entre les indices de priorités fixes et la satisfaction de la demande été donc faible à la suite de l'interdépendance des couches à extraire et la non-disponibilité instantané de celle-ci. La variation de ces indices pouvait alors ouvrir les champs d'exploration des scénarios alternatifs techniquement cohérents et faire rupture avec cette logique figée à une seule possibilité. Nous avons dès lors introduit un générateur automatique des indices de priorité des couches afin de construire plusieurs scénarios alternatifs cohérents et les évaluer ensuite vis-à-vis leur capacité de répondre à la demande sur le court et moyen terme, en réintroduisant la contrainte de la demande au niveau de notre heuristique de filtrage.

3.2. Génération d'un ensemble de scenarios alternatifs

La construction de plusieurs scénarios alternatifs cohérents est donc rendue possible par la variation les indices de priorités des QS. En effet, les données d'entrée structurelles et dynamiques formalisent un problème semi-structuré qui permet de définir un problème structuré en relaxant la contrainte de prise en compte de la demande en QM. Le problème structuré est par la suite introduit dans le modèle de simulation qui assure une reproduction fidèle du fonctionnement du processus d'extraction et propose ainsi des scénarios variés. Pour expliquer le principe, nous nous appuyant sur une étude simplifiée portant sur un ensemble de 20 variations des indices de priorités

des couches, décrit dans le Tableau 2. Nous simulons ensuite le processus extractif et nous obtenons les volumes totaux proposés par les scénarios alternatifs comme décrit dans le Tableau 3. Il est également important de noter que le gisement étudié contient 7 panneaux avec 321 tranchées, 11050 blocs actifs pour l'extraction, et 50 machines d'extraction pouvant être affectées à l'exécution des opérations élémentaires d'extraction. Nous intégrons aussi le volume proposé par le programme construit manuellement par la mine. Nous remarquons dans un premier temps que les volumes totaux proposés par chaque scénario sont distincts, puisqu'ils reflètent intrinsèquement des choix d'extraction différents et des plans d'affectations de machines variables. Certains scénarios proposent des volumes plus importants ou moins importants que celui de la mine. En fait, les choix des blocs à extraire affectent aussi la variété en termes de quantité et de qualité des volumes extraits. Pour rendre cet aspect visible, nous proposons des graphiques dans la Figure 25, Figure 24 et Figure 25, illustrant l'évolution par couche des volumes à extraire dans quatre cas différents, le scénario 4 proposant le volume maximal à extraire, le scénario 15 représentant le volume minimal à extraire, et le scénario 17 proposant un volume s'approchant au plus près du volume du programme de la mine. (Voir les notations PE_mine, SC_4, SC_15 et SC_17).

Tableau 2 : génération des indices de priorités pour 20 scénarios

QS/SC	S B	S A2	C 0	C 1	C0_1	C 2 S	C 3 S	C 3 I	C 3	C 4 S	C 4 I	C 4	C 5 S	C 5 I	C 5	C 6
SC_1	2	10	6	8	3	1	4	5	5	6	7	5	1	3	7	1
SC_2	6	2	7	10	6	5	4	6	8	10	5	6	9	6	1	3
SC_3	6	10	9	8	6	10	1	8	6	10	1	3	5	8	10	8
SC_4	10	1	7	5	4	1	3	1	6	7	5	9	3	5	9	6
SC_5	9	3	3	4	10	10	4	7	4	3	3	1	8	7	2	1
SC_6	3	8	1	7	1	4	7	3	2	10	5	10	3	1	7	8
SC_7	9	4	4	5	6	1	8	9	3	3	2	7	10	6	7	9
SC_8	4	1	5	2	6	8	7	10	10	9	7	5	5	6	4	5
SC_9	4	5	8	1	7	9	4	1	6	6	6	2	4	9	3	6
SC_10	1	1	9	3	10	1	2	10	10	4	9	1	2	1	2	6
SC_12	6	10	1	9	1	7	4	3	0	4	6	0	1	1	0	8
SC_13	6	8	6	9	1	9	7	7	0	10	8	0	9	8	0	9
SC_14	0	10	3	3	3	3	10	10	10	3	3	3	10	10	10	10
SC_15	10	0	5	5	5	5	0	0	0	5	5	5	10	10	10	0
SC_16	8	0	8	8	8	8	0	0	0	8	8	8	0	0	0	0
SC_17	8	10	3	4	3	3	8	8	8	7	6	7	5	4	5	3
SC_18	10	9	7	9	4	2	9	7	8	9	3	4	8	6	6	8
SC_19	7	8	8	1	5	9	9	5	2	3	7	7	6	10	5	4
SC_20	10	3	9	1	6	7	6	4	1	3	3	7	2	9	1	2
SC_21	5	1	9	1	10	9	8	2	1	5	10	9	9	1	10	2

Tableau 3 : Volumes à extraire par scénario

Scenarios	Total à extraire en Tonne	Scenarios	Total à extraire en Tonne
PE_mine	6710201	SC_12	5513077
SC_1	7568463	SC_13	6320863
SC_2	7832252	SC_14	6122243
SC_3	7421259	SC_15	5408977
SC_4	9250042	SC_16	6530549
SC_5	6958000	SC_17	6722573
SC_6	5461205	SC_18	6653157
SC_7	6957403	SC_19	6572820
SC_8	7651803	SC_20	6555116
SC_9	7178000	SC_21	6523830
SC_10	7651803		

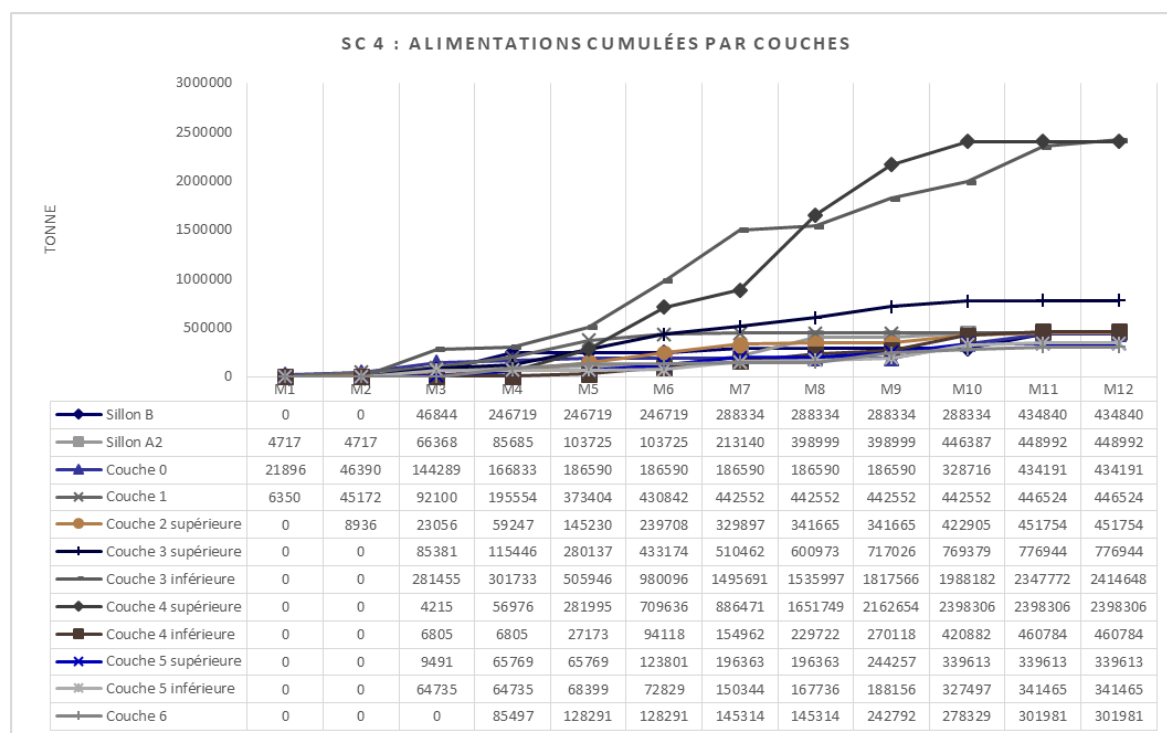


Figure 23 : courbes alimentations cumulées par couches proposées par le scénario 4

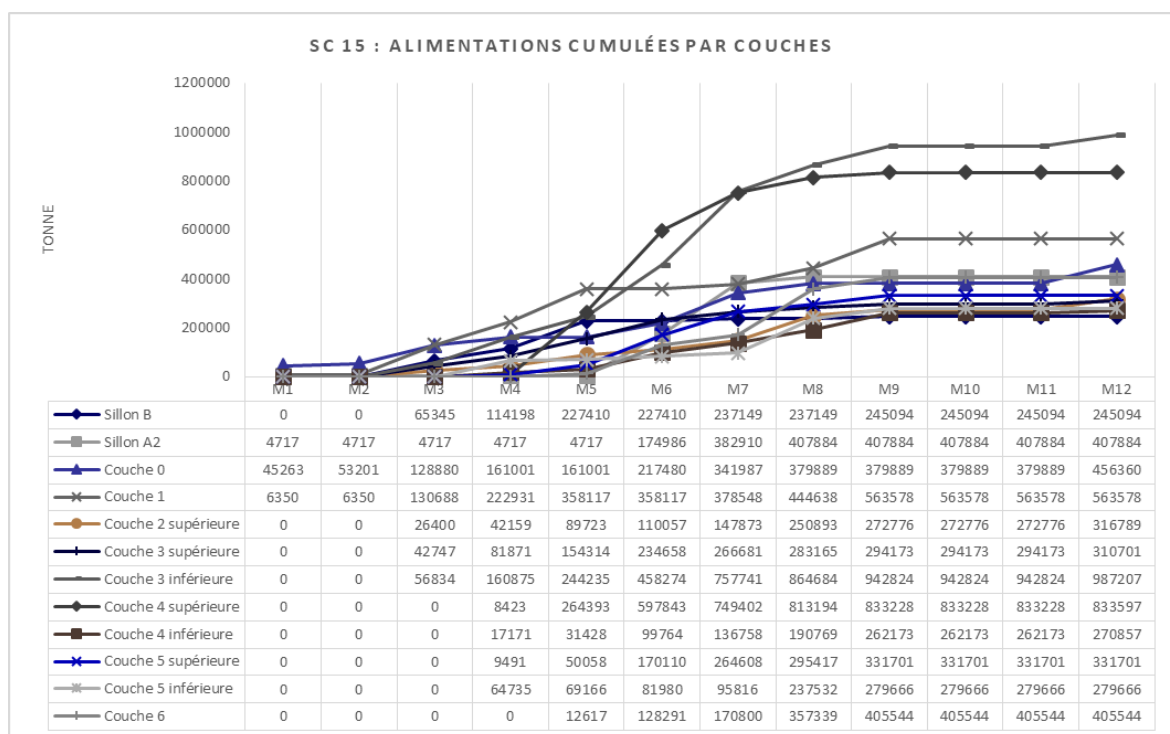


Figure 24 : courbes alimentations cumulées par couches proposées par le scénario 15

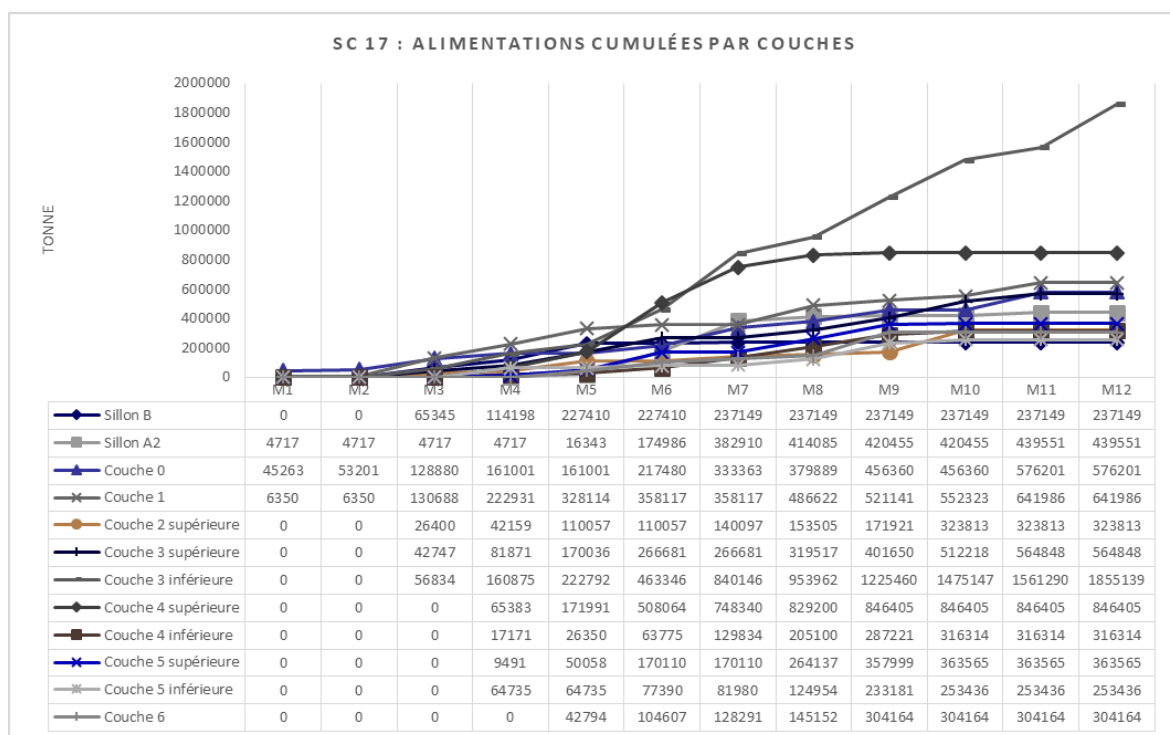


Figure 25 : courbes alimentations cumulées par couches proposées par le scénario 17

4. CONCLUSION

En guise de conclusion, Ce chapitre encapsule notre réponse en partie à notre troisième et cinquième question de recherche portant sur l'accompagnement des responsables minier dans la construction rapide, automatique et cohérente des programmes d'extraction. Nous avons expliqué comment nous avons amélioré, étendue et validé en pratique le modèle SED initial issu (d'Azzamouri et al, 2018) pour tenir compte des contraintes techniques, des recommandations des dirigeants miniers, de la fiabilisation des données d'entrée, de l'automatisation du processus de construction d'un programme d'extraction ainsi que d'offrir la possibilité de générer plusieurs scénarios alternatifs cohérents techniquement. La Figure 26 résume les apports et les aspects génériques du modèle SED conçu dans notre travail de thèse. Nous montrons que ce modèle nous a permis représenter scrupuleusement le processus d'extraction minière et d'offrir aux dirigeants opérationnels une granularité fine permettant d'assurer le respect des contraintes techniques complexes de ce processus, mais également aussi de construire rapidement un programme d'extraction, de proposer plusieurs scénarii alternatifs et d'améliorer la qualité des résultats obtenus en termes de précision et de pertinence. Nous en déduisons ensuite que le modèle reste valable d'abord pour la représentation des autres mines du partenaire industriel, puis plus généralement pour la modélisation d'autres mines à ciel ouvert par la simulation à événement discrets. Les choix conceptuels sur lesquelles se base le modèle SED permettent une grande flexibilité et adaptabilité à d'autres problèmes de planification opérationnelles tactiques en modifiant le nombre, les caractéristiques et les règles de pilotage des opérations et des équipements utilisés.

Nous avons aussi discuté dans ce chapitre, les décisions prises lors de la simulation et leurs impacts sur les résultats en sortie. Cependant, la condition de la cohérence technique n'est pas suffisante pour sélectionner à programme d'extraction à adopter. Plusieurs critères de décisions sont importants pour la bonne prise de décisions, parmi ces critères la capacité du programme choisi à satisfaire la demande en QM sur le court et moyen terme. Nous allons proposer par la suite le choix des critères de sélection et d'évaluation des programmes d'extraction les plus performants. Nous focalisons notre

attention, dans le chapitre suivant, sur le processus décisionnel émanant du choix du meilleur programme d'extraction en matière d'efficacité et d'efficience, qu'il convient d'adopter sur le terrain.

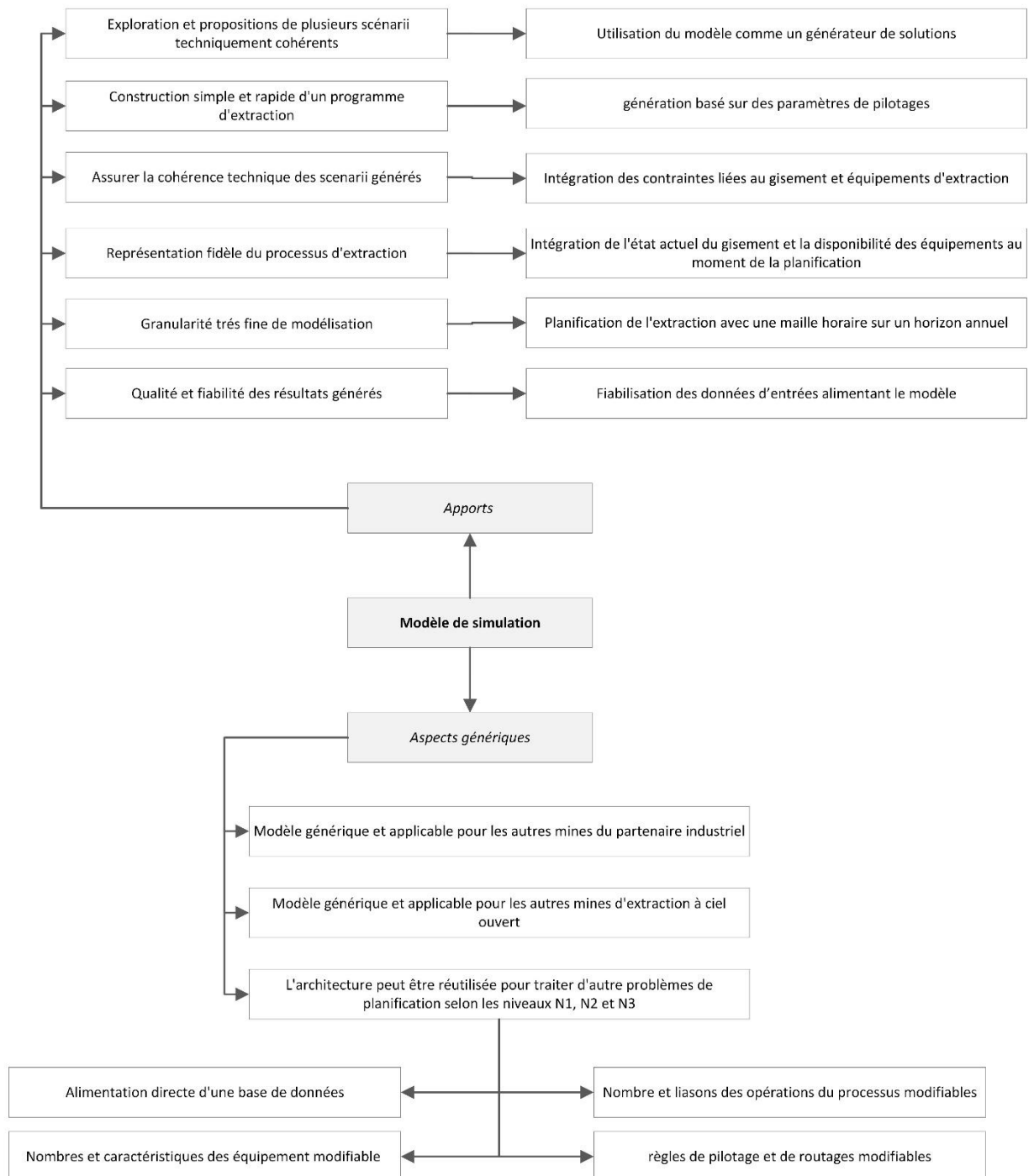


Figure 26 : Apports et aspects génériques du SED

Chapitre IV

Sélection et comparaison des scénarii alternatifs par une heuristique de filtrage multicritères

1. Introduction	119
2. Conception de l'heuristique de filtrage multicritères	120
2.1. Notations	121
2.2. Niveau 1 : Le traitement des données de sortie générées par la simulation	122
2.3. Niveau 2 : L'étude de faisabilité comme étape de « screening » des scénarios	123
2.4. Niveau 3 : L'étude de robustesse pour faire face à la fluctuation de la demande	125
2.5. Niveau 4 : la dominance Pareto comme méthode de comparaison des scenarios.	127
3. Analyses expérimentales et discussions des résultats.....	128
3.1. Exemple d'application du niveau 1 : Description des données synthétisées	128
3.2. Exemple d'application du niveau 2 : étude de faisabilité	129
3.3. Exemple d'application du niveau 3 : étude de robustesse	136
3.4. Exemple d'application du niveau 4 : sélection, comparaison et analyse multicritère ..	138
4. Conclusion	154

1. INTRODUCTION

Le modèle SED a permis l'automatisation de la construction d'un programme d'extraction, a assuré le respect des contraintes techniques, et la génération rapide d'un ensemble de scénarios alternatifs acceptables. Cependant, trouver le meilleur scénario reste difficile en raison de la complexité multidimensionnelle que renferme un scénario d'extraction, en plus des nombreux critères qui sont d'une grande importance pour les décideurs industriels.

Dans le contexte minier, la cohérence technique d'un programme d'extraction ne constitue pas une raison suffisante pour l'adopter sur le terrain. Un PE construit, techniquement réalisable, peut très bien satisfaire la demande en QM sur le court terme (1, 2 jusqu'à 3 mois au mieux) mais ne parvient pas à satisfaire la demande sur un horizon moyen terme (3, 6 à 12 mois). Assurer la capacité du PE à satisfaire la demande en QM sur le court et moyen terme, est l'un des défis affrontés par l'équipe de la planification minière. Cette demande annuelle en QM, peut aussi être sujette à des fluctuations ou perturbations au cours de l'horizon de planification. Un deuxième défi de robustesse émerge donc de la réflexion sur la capacité des scénarios alternatifs à faire face aux éventuelles perturbations de la demande en QM. De plus, trouver le meilleur scénario reste difficile en raison de la complexité multidimensionnelle que renferme un scénario d'extraction et des critères qui sont d'une grande importance pour les décideurs.

Le problème, dans notre cas, découle de la nature contradictoire des critères en question. Lorsque plusieurs objectifs sont en conflit, il est difficile d'avoir une solution unique optimisant simultanément tous les objectifs. Ainsi, nous devons explorer cet aspect tout en conservant la possibilité de considérer plusieurs critères contradictoires dans l'évaluation et la sélection des meilleurs scénarios, permettant une analyse critique plus riche des scénarios potentiellement performants.

Pour toutes ces raisons, il est apparu nécessaire d'accompagner le modèle SED d'une approche heuristique complémentaire pour i) éliminer les scénarios qui ne peuvent pas répondre à la demande de QM sur l'horizon de planification défini, ii) évaluer si les scénarios restants peuvent contourner les éventuelles fluctuations de la demande, et iii)

analyser la performance des scénarios sur une base des critères d'efficience et d'efficacité.

Nous répondons dans ce chapitre à cinquième question de recherche, à savoir : *Comment évaluer et analyser l'ensemble des programmes d'extraction générés ? Quels sont les critères de sélection du programme d'extraction le plus performant qu'il convient d'adopter sur le terrain ?*

2. CONCEPTION DE L'HEURISTIQUE DE FILTRAGE MULTICRITERES

Pour répondre aux défis formulés dans l'introduction, nous avons conçu une heuristique de filtrage multicritère adapté aux besoins décisionnels des dirigeants et décideur minier. Nous décrivons dans la Figure 27 , ci-dessous, les niveaux essentiels qui composent notre heuristique, les liens entre ces niveaux et leurs rôles dans le processus décisionnel de sélection des scénarios alternatifs performants.

Chaque niveau de l'heuristique de filtrage multicritère a été adapté pour guider la prise de décision vers le choix des scénarios d'extraction les plus performants sans compromettre l'exploration du potentiel des scénarios générés. Nous décrivons et expliquons ci-après le rôle de chaque niveau. Mais tout d'abord, nous dressons le Tableau des notations introduites et utilisées tout au long de ce quatrième chapitre pour faciliter la compréhension de la suite des explications.

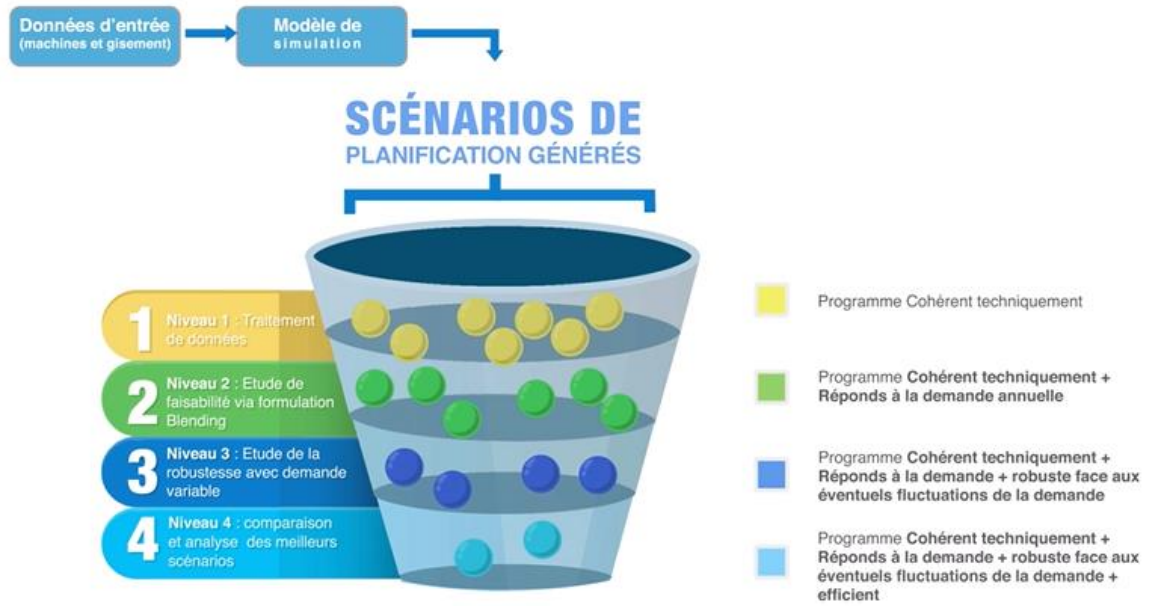


Figure 27 : Niveaux de l'heuristique de filtrage conçue

2.1. Notations

Tableau 4 : Tableau récapitulatif des notations retenues pour la formulation de l'heuristique

Ensembles et indices	
S	Ensemble des scénarios alternatifs générés techniquement cohérents, $sc \in S$
$S(f)$	Ensemble des scénarios alternatifs faisables/réalisables, $sc \in S(f) / SR_{sc} = 100\%$
$S(f, r)$	Ensemble de scénarios alternatifs suffisamment robustes, $sc \in S(f, r) / RR_{sc} \geq 80\%$
$S(f, r, p)$	Ensemble réduit des scénarios performants finaux
P_{ls_p}	Indice de priorité de la couche source $ls_p \in S_p$, $P_{ls_p} \in [1, 10]$
pt	Indice du vecteur de la demande perturbée sur la période t
q	Indice du "test bundle" (ensemble de vecteur de test)
T	Ensemble des périodes mensuelles, $t \in T$
K'	Ensemble des sorties en qualités marchandes (QM), $k' \in K'$
K	Ensemble des entrées en qualités sources (QS), $k \in K$
C	Ensemble des composants chimiques, $c \in C$
N	Nombre de période t testés
Paramètres du niveau 2 : étude de faisabilité	
$\beta_{ck'}$	Pourcentage du poids du composant c dans le poids total de la sortie k'
$\beta_{ck'}^{max}$	Pourcentage maximal du poids du composant c dans le poids total de la sortie k'
$\beta_{ck'}^{min}$	Pourcentage minimal du poids du composant c dans le poids total de la sortie k'

x_{ko}	Quantité en mélange d'entrées k pour la commande o
D_o	Quantité de demande à produire pour la commande o
α_{ck}	Pourcentage du poids du composant c dans le poids total de l'entrée k
SR_{sc}	Taux de satisfaction de la demande en QM sur l'ensemble des périodes T
Paramètres du niveau 3 : étude de robustesse	
$\varphi_{k'}$	Pourcentage d'augmentation de chaque output k' de la demande $D_{k't}$
$\phi_{k'}$	Pourcentage de réduction de chaque output k' de la demande $D_{k't}$
γ	Ensemble d'output k' concernés par la fluctuation de la demande D_t , $\gamma \in (1..K)$
δ	Nombre de mois d'anticipation/retardation de la fluctuation temporelle
η	Période t où la fluctuation prend place, $\eta \in (1..T)$
N	Nombre des tests bundles
w_{pt}	Poids attribué au vecteur de la demande perturbée D_{pt} .
Paramètres du niveau 4 : Analyse multicritères	
Td_m	Total du temps de déplacement de la machine m dans le scenario SC
To_m	Total du temps d'occupation de la machine m dans le scenario SC
V_{ls}	Volume total de minerai de la couche ls dans le scenario SC
Variables de décisions	
$F_{sc,t}$	Variable binaire prenant la valeur 1 si le scénario sc testé sur la période t est faisable, 0 sinon.
F_{ptq}	Variable binaire, égale à 1 si le scenario testé sur la demande perturbée D_{pt} , appartenant au test bundle q est faisable, 0 sinon.

2.2. Niveau 1 : Le traitement des données de sortie générées par la simulation

La génération d'un ensemble de scénarios alternatifs $S(sc = 1..S)$ peut être effectuée en définissant le nombre d'essais (trials) dans le modèle de simulation. Chaque scénario sera basé sur une variation distincte des indices de priorité P_{lsp} pour chaque couche source lsp . L'ensemble de scénarios alternatifs est introduit dans l'heuristique

multicritère via le premier niveau qui a comme rôle la structuration des données nécessaires pour les niveaux suivants.

Comme nous l'avons précisé auparavant la structure du fichier de sortie spécifie le temps de simulation, l'opération en cours, la case choisie pour l'extraction ainsi que son appartenance par rapport au panneau et à la tranchée, le niveau à extraire, l'opération en cours et la machine effectuant ce travail, le numéro du lot auquel appartient cette case, l'indice de priorité relative à l'accessibilité de la couche et à la proximité de la case par rapport à la dernière position de la machine, le temps de déplacement et d'occupation de la machine, ainsi que les volumes à extraire en terme de stérile et de couches sources. Ce fichier représentant en brute un scénario d'extraction, retraçons en quelque sorte, tous les éléments simulés dans un intervalle de temps précis (horizon de planification). Pour pouvoir effectuer l'étude de faisabilité et de robustesse représentant le niveau 2 et 3 de l'heuristique. Il est nécessaire de synthétiser à partir des fichiers de sorties de la simulation, les tableaux des alimentations par couche source et par période ainsi que cumulatif proposés dans chaque scénario généré. D'un autre côté, pour le niveau 4 de comparaison des scénarios alternatifs à la base des critères choisis, nous synthétisons pour cette analyse le total du temps de déplacement des machines d'extractions.

2.3. Niveau 2 : L'étude de faisabilité comme première étape de « screening » des scénarios

L'étude de faisabilité est réalisée en fonction de la satisfaction de la demande. Il est basé sur la programmation linéaire adaptée (PL) du problème de mélange tel que spécifié par [Azzamouri et al, 2020]. Pour réaliser ce test, nous disposons d'un vecteur initial de demande de QM attendu, découpé en périodes T ($t = 1..T$) reflétant des périodes mensuelles sur un horizon annuel ($T=12$). Plusieurs unités de mélange parallèles peuvent produire un ensemble de sorties K' ($k' = 1..K'$), à savoir des QM, en mélangeant des entrées à partir d'un ensemble d'entrées K ($k = 1..K$), à savoir des QS extraites. Les entrées (QS) et les sorties (QM) sont caractérisées par des composants chimiques C ($c = 1..C$), Une charte de qualité basée sur des contraintes d'intervalle

pour chaque composant c , est introduite pour chaque sortie k' , formulé par l'équation suivante :

$$(\beta_{ck'}^{\min} \leq \beta_{ck'} \leq \beta_{ck'}^{\max}) \quad (3)$$

Où $\beta_{ck'}$ est défini comme le pourcentage du poids de composant c dans le poids total de sortie k' .

Sur une période t , plusieurs sorties k' sont à produire simultanément, formant une commande o . Cette commande sera produite à partir d'un mélange x_{ko} d'entrées k , en tenant compte des stocks disponibles de chaque entrant k en plus de l'extraction proposée de QS dans chaque scénario alternatif. Ainsi pour chaque scénario sc_i , la structure pour chaque sortie k' est formulé par l'équation (4) :

$$\beta_{ck'} = \sum_c \alpha_{ck} \cdot \left(\frac{x_{ko}}{D_o} \right) \quad (4)$$

Où D_o est la quantité à produire liée à la commande o et α_{ck} est définie comme le pourcentage du poids du composant c dans le poids total de l'entrée k . Désormais, l'équation (3) régissant le respect de la charte qualité devient l'équation (5) :

$$\beta_{ck'}^{\min} \cdot D_o \leq \sum_i \alpha_{ck} \cdot x_{ko} \leq \beta_{ck'}^{\max} \cdot D_o, \forall c, \forall o \quad (5)$$

Un scénario alternatif sc_i est considéré comme faisable, s'il existe pour chaque période t un mélange permettant de produire l'ordre o de sorties k' , basé sur les stocks disponibles et les entrées k de QS à extraire proposés par le scénario sc_i . Nous calculons selon l'équation (6) le taux de satisfaction de la demande SR_{sc} , par scénario comme premier critère éliminatoire de sélection des scénarios à la fois cohérent et faisable :

$$SR_{sc} = \frac{\sum_t F_{sc,t}}{N} \cdot 100 \quad (6)$$

La sortie de ce niveau ne conserve que les scénarios alternatifs avec un $SR_{sc} = 100\%$. L'ensemble des scénarios alternatifs générés S est ainsi réduit à un sous-ensemble de scénarios alternatifs réalisables, à savoir $S(f)$.

2.4. Niveau 3 : L'étude de robustesse pour faire face à la fluctuation de la demande

L'étude de robustesse traite la capacité d'un scénario à répondre à la demande, lorsque celle-ci est sujette à des fluctuations imprévues. L'aspect stochastique de la demande en QM peut perturber l'exécution du programme de planification dans la mine. D'après l'étude de l'historique de la planification de l'extraction et des discussions menées avec les dirigeants minier au terrain, nous identifions quatre principaux types de perturbations de la demande (voir Figure 28) :

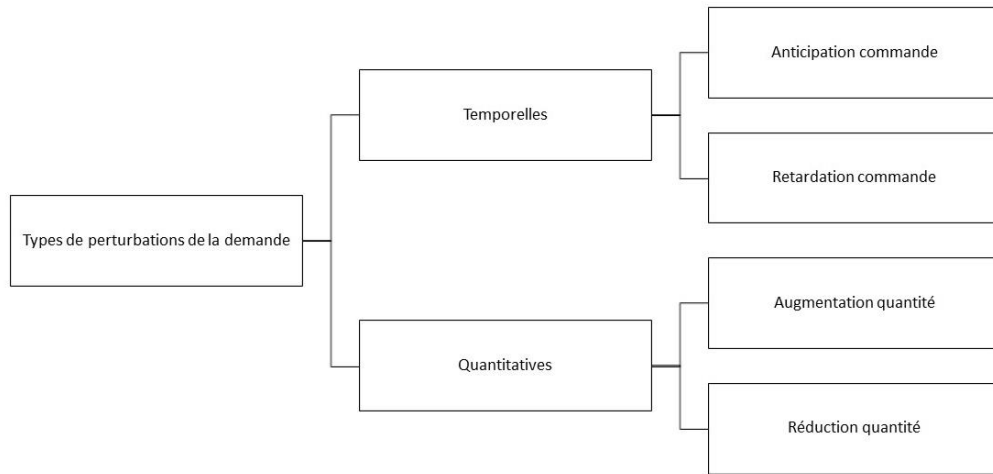


Figure 28 : Types de perturbations de la demande

Ainsi, les types d'anticipation temporelle et d'augmentation quantitative sont considérés comme les perturbations les plus critiques par les décideurs et les dirigeants miniers. Pour chaque scénario alternatif réalisable $S(f)$, nous considérons la demande initiale D_k pour la production attendue de QM. Fractionné par périodes t , la demande par période est notée D_t . Nous générons différents types de perturbations D_{pt} pour nous aider à percevoir le comportement des scénarios face à des vecteurs de demande perturbés. Pour intégrer ces perturbations dans notre heuristique, nous introduisons cinq paramètres suivants $(\varphi_k, \phi_k, \gamma, \delta, \eta)$ (voir Tableau 4). La constitution des

vecteurs de demande perturbés D_{pt} dans le cas de chaque type de perturbation est formulée par les équations synthétisés dans le Tableau 5.

Tableau 5 : équations de formulation des demandes perturbées par type

<i>Type 1</i>	<i>Type 2</i>
• for $\eta + \delta \leq t$: ➤ $D_{ptk'} = D_{(\eta+\delta)k'}, k' \in \gamma, \eta \leq t \leq \eta + \delta$ ➤ $D_{ptk'} = D_{tk'}, k' \in K'/\gamma, t < \eta, t > \eta + \delta$	• for $\eta - \delta \geq 1$: ➤ $D_{ptk'} = D_{(\eta-\delta)k'}, k' \in \gamma, \eta - \delta \leq t \leq \eta$ ➤ $D_{ptk'} = D_{tk'}, k' \in K'/\gamma, t < \eta - \delta, t > \eta$
<i>Type 3</i>	<i>Type 4</i>
• for $\eta \in (1..T)$: ➤ $D_{ptk'} = D_{tk'} \cdot (\alpha_{k'} + 1), k' \in \gamma, t \geq \eta$ ➤ $D_{ptk'} = D_{tk'}, k' \in K'/\gamma, t \geq \eta$	• for $\eta \in (1..T)$: ➤ $D_{ptk'} = D_{tk'} \cdot (1 - \beta_{k'}), k' \in \gamma, t \geq \eta$ ➤ $D_{ptk'} = D_{tk'}, k' \in K'/\gamma, t \geq \eta$

Nous procédons à la composition des « Test bundles », à savoir des ensembles de tests, chacun composé de 16 vecteurs de demande perturbés mélangeant les quatre formes de perturbations expliquées ultérieurement. Le test de robustesse est basé sur la même formulation de programmation linéaire du problème de blending décrit au niveau 2, la différence est le vecteur de demande variable qui été fixe auparavant au vecteur de la demande initiale.

Pour évaluer la capacité de répondre aux vecteurs de demande perturbée, chaque scénario alternatif va parcourir au moins trois ensembles de tests. Ensuite nous synthétisons le deuxième critère de taux de robustesse (RR_{sc}) calculé par l'équation (7)

:

$$RR_{sc} = \frac{\sum_q (\sum_t F_{ptq} \cdot w_{pt})}{N} \quad (7)$$

La sortie du niveau 2 ne conserve que des scénarios alternatifs réalisables avec un $RR_{sc} \geq 80 \%$ représentant un niveau de robustesse tolérée fixé par les décideurs et dirigeants minier. L'ensemble des scénarios alternatifs $S(f)$ est ainsi réduit une

seconde fois à un sous-ensemble de scénarios alternatifs cohérents, réalisables et suffisamment robustes, à savoir $S(f, r)$.

2.5. Niveau 4 : la dominance au sens Pareto comme méthode de comparaison des scenarios alternatifs.

Ce niveau sera utilisé pour sélectionner des scénarios Pareto-optimaux tout en explorant l'ensemble restant de scénarios alternatifs $S(f, r)$ grâce à la méthodologie de dominance de Pareto. Nous considérons un scénario alternatif sc où $sc \in S(f, r)$. Nous identifions nos critères comme des fonctions conflictuelles où :

$$f_1(sc) = RR_{sc} \quad (8)$$

$$f_2(sc) = \sum_{l_s \in S} V_{l_s}(sc) \quad (9)$$

$$f_3(sc) = \sum_{m \in M_{critical}} Td_m(sc), \quad M_{critical} \in M \quad (10)$$

$$f_4(sc) = \sum_{l_s=5} V_{l_s}(sc) \quad (11)$$

$$f_5(sc) = \sum_{l_s \in S} V_{l_s}(sc) \quad (12)$$

En effet, les fonctions (8), (9), (11) et (12) sont à maximiser, tandis que la fonction (10) est à minimiser.

Dans la définition de l'optimalité au sens Pareto et en considérant deux fonctions $f_1(sc)$ et $f_2(sc)$, un scénario sc domine un autre scénario sc' si :

- sc est au moins aussi bon que sc' concernant la fonction f_1 et f_2 ,
- sc est strictement meilleur que sc' concernant la fonction f_1 ou f_2 .

Lorsqu'il n'y a pas d'autre scénario qui domine un scénario sc donné, nous étiquetons sc comme une solution non dominée. L'ensemble des solutions non dominées parmi l'ensemble des scénarios alternatifs $S(f, r)$ est appelé le front de Pareto. C'est donc l'ensemble des scénarios parmi lesquels aucune fonction ne peut être améliorée sans en aggraver une autre. Nous obtenons, par conséquent, un ensemble de scénarios performants finaux $S(f, r, p)$ respectant la variété parmi les scénarios.

3. ANALYSES EXPERIMENTALES ET DISCUSSIONS DES RESULTATS

Nous continuons dans cette partie notre analyse expérimentale tenant compte des 20 scénarios générés par la simulation dans le chapitre III section §3.2. Ces scénarios alternatifs sont considérés comme données d'entrée pour l'heuristique. Nous allons tout d'abord synthétiser à partir des fichiers de sorties de la simulation, les tableaux des alimentations par couche source et par période ainsi que cumulatif proposés dans chaque scénario généré. Ensuite nous allons effectuer l'étude de faisabilité, pour éliminer les scénarios non faisables. Puis continuer avec l'étude de robustesse nous permettons de déduire un taux de robustesse pour chaque scénario. Ce critère de robustesse fera partie des critères décisionnels sur lesquelles se basera l'analyse multicritère de dominance au sens Pareto. Nous discutons dans chaque partie les résultats et décrivons le processus de raffinement de la décision au fur et à mesure des expérimentations.

3.1. Exemple d'application du niveau 1 : Description des données synthétisées

Le Tableau 6 présente un exemple de la synthèse des alimentations par couche source et par période (mois). Tandis que le Tableau 7 décrit les alimentations cumulées par couche proposés dans le cas du scénario 17. Ce niveau de traitement de données permet de synthétiser de la même manière les données respectives pour les autres scénarios.

Tableau 6 : Alimentations par QS et par période T proposées par le scénario 17

QS/T	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
SB	0	0	65345	48853	113212	0	9739	0	0	0	0	0
SA2	4717	0	0	0	11625	158643	207924	31176	6370	0	19097	0
C0	45263	7938	75679	32121	0	56480	115882	46527	76470	0	11984 1	0
C1	6350	0	124338	92243	105183	30002	0	128505	34519	31182	89664	0
C2S	0	0	26400	15759	67898	0	30041	13407	18416	151892	0	0
C3S	0	0	42747	39124	88165	96645	0	52836	82133	110567	52631	0
C3I	0	0	56834	104041	61918	240554	376800	113816	271498	249687	86143	293849
C4S	0	0	0	65383	106608	336074	240275	80861	17205	0	0	0
C4I	0	0	0	17171	9179	37426	66058	75266	82121	29093	0	0
C5S	0	0	0	9491	40567	120053	0	94026	93862	5566	0	0
C5I	0	0	0	64735	0	12655	4589	42975	108227	20255	0	0
C6	0	0	0	0	42794	61813	23684	16861	159013	0	0	0

Tableau 7 : Alimentations cumulés par QS proposées par le scénario 17

QS/T	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
SB	0	0	65345	114198	227410	227410	237149	237149	237149	237149	237149	237149
SA2	4717	4717	4717	4717	16343	174986	382910	414085	420455	420455	439551	439551
C0	45263	53201	128880	161001	161001	217480	333363	379889	456360	456360	576201	576201
C1	6350	6350	130688	222931	328114	358117	358117	486622	521141	552323	641986	641986
C2S	0	0	26400	42159	110057	110057	140097	153505	171921	323813	323813	323813
C3S	0	0	42747	81871	170036	266681	266681	319517	401650	512218	564848	564848
C3I	0	0	56834	160875	222792	463346	840146	953962	1225460	1475147	1561290	1855139
C4S	0	0	0	65383	171991	508064	748340	829200	846405	846405	846405	846405
C4I	0	0	0	17171	26350	63775	129834	205100	287221	316314	316314	316314
C5S	0	0	0	9491	50058	170110	170110	264137	357999	363565	363565	363565
C5I	0	0	0	64735	64735	77390	81980	124954	233181	253436	253436	253436
C6	0	0	0	0	42794	104607	128291	145152	304164	304164	304164	304164

3.2. Exemple d'application du niveau 2 : étude de faisabilité

Nous souhaitons mettre en test la capacité des scénarios générés à satisfaire la demande annuelle en QM. Cette demande est décomposée en périodes T (Mois) pour les sorties K' (QM) comme indiqué dans le Tableau 8. La charte qualité à respecter pour les sorties K' par composants chimique C est mentionnée dans le Tableau 9.

Tableau 8 : Demande annuelle en QM par période

PERIODE T/ OUTPUT K'	K' = 1	K' = 2	K' = 3	K' = 4	K' = 5
T= 1	190932	132682	13441	25641	1282
T= 2	381865	265364	26882	51282	2564
T= 3	572797	398046	40323	76923	3846
T= 6	1145596	796092	80645	153846	7693
T= 9	1718394	1194137	120968	230769	11539
T= 12	2291191	1592183	161290	307692	15385

Tableau 9 : Charte qualité des QM par composant chimique

BOUNDS K' / C	MAX					MIN				
	c = 1	c = 2	c = 3	c = 4	c = 5	c = 1	c = 2	c = 3	c = 4	c = 5
K' = 1	65,12	6,5	0,75	9,9	8	59,24	5	0	5,5	0
K' = 2	65,12	6,5	0,75	9,9	6,5	60,9	5	0	5,5	0
K' = 3	67	7	1	8	12	64	5	0	0	0
K' = 4	65	7	1	8	12	64	5	0	0	0
K' = 5	65,12	6,5	0,75	9,9	8	58,78	5	0	5,5	0

Nous réalisons l'étude de faisabilité basée sur la formulation LP classique de mélange multi produits à période unique, intégrant comme contraintes à respecter la satisfaction de la demande par période et la charte de qualité. Nous utilisons les volumes des QS proposées par chaque scénario, en plus des volumes en QS initialement disponibles en stock (Tableau 10), pour voir s'il existe un mélange permettant de répondre à la demande exprimée sur chaque période tout en respectant la charte qualité client.

Tableau 10 : Stock initial en QS

QS	STOCK INITIAL
SB	50000
SA2	50000
C0	30000
C1	50000
C0_1	30000
C2S	50000
C3S	50000
C3I	50000
C3	30000
C4S	50000

C4I	30000
C4	30000
C5S	50000
C5I	30000
C5	50000
C6	50000

Pour illustrer la nature du résultat du mélange, nous présentons les instances des mélanges proposés pour satisfaire la demande par période, en utilisant les alimentations du scénario 17 (Tableau 11, Tableau 13, Tableau 15, Tableau 17, Tableau 19 et Tableau 21). Ainsi que les tableaux récapitulatifs des caractéristiques chimique des mélanges, reflétant le respect de la charte qualité (Tableau 12, Tableau 14, Tableau 16, Tableau 18, Tableau 20 et Tableau 22). Nous effectuons l'étude de faisabilité sur les 12 périodes, mais en guise d'exemple nous illustrons les résultats sur 6 périodes. Les trois premiers portant sur le court terme (1, 2, 3 mois) puis les trois derniers sur le moyen terme (6, 9, 12 mois).

Tableau 11 : Mélange proposé pour la période T = 1 mois

QS / QM	K' = 1	k' = 2	k' = 3	k' = 4	k' = 5
SB	20000	0	0	0	0
SA2	19356	0	0	15362	0
C0	0	73201	0	0	0
C1	31867	3202	0	0	1282
C0_1	20000	0	0	0	0
C2S	20000	0	0	0	0
C3S	30000	0	0	0	0
C3I	0	19557	443	0	0
C3	0	20000	0	0	0
C4S	30000	0	0	0	0
C4I	0	7002	12998	0	0
C4	0	9721	0	10280	0
C5S	19710	0	0	0	0
C5I	0	0	0	0	0
C5	0	0	0	0	0
C6	0	0	0	0	0
TOTAL	190932	132682	13441	25641	1282

Tableau 12 : Caractéristiques chimiques du mélange proposé à T =1

C/ QM	K' = 1	k' = 2	k' = 3	k' = 4	k' = 5
c = 1	64,4	62,4	58,8	64,1	67,0
c = 2	5,5	5,1	6,0	5,6	5,1
c = 3	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8
c = 4	7,7	6,6	7,7	7,3	6,0
c = 5	6,5	6,7	6,0	7,2	10,0

Tableau 13 : Mélange proposé pour la période T = 2 mois

QS / QM	K' = 1	k' = 2	k' = 3	k' = 4	k' = 5
SB	20000	0	0	0	0
SA2	34717	0	0	0	0
C0	0	164289	0	0	0
C1	76217	79557	0	0	0
C0_1	0	0	0	20000	0
C2S	34580	0	0	0	0
C3S	55237	0	26882	0	0
C3I	115458	0	0	0	0
C3	0	20000	0	0	0
C4S	2933	0	0	31282	0
C4I	25287	1518	0	0	0
C4	17436	0	0	0	2564
C5S	0	0	0	0	0
C5I	0	0	0	0	0
C5	0	0	0	0	0
C6	0	0	0	0	0
TOTAL	381865	265364	26882	51282	2564

Tableau 14 : Caractéristiques chimiques du mélange proposé à T =2

C/ QM	K' = 1	k' = 2	k' = 3	k' = 4	k' = 5
c = 1	65,1	63,2	64,2	64,0	65,7
c = 2	5,3	5,1	5,5	5,6	5,0
c = 3	0,7	0,7	0,7	0,6	0,9
c = 4	7,5	6,1	8,1	8,0	6,0
c = 5	6,4	7,5	4,4	5,7	9,0

Tableau 15 : Mélange proposé pour la période T = 3 mois

QS / QM	K' = 1	k' = 2	k' = 3	k' = 4	k' = 5
SB	64278	0	0	65089	3846
SA2	34717	0	0	0	0
C0	0	164289	0	0	0
C1	0	204519	0	0	0
C0_1	20000	0	0	0	0
C2S	41190	0	0	0	0
C3S	23957	26490	40323	0	0
C3I	154258	0	0	0	0
C3	20000	0	0	0	0
C4S	34215	0	0	0	0
C4I	14970	0	0	11834	0
C4	20000	0	0	0	0
C5S	39491	0	0	0	0
C5I	34785	0	0	0	0
C5	20000	0	0	0	0
C6	50936	2748	0	0	0
TOTAL	572797	398046	40323	76923	3846

Tableau 16 : Caractéristiques chimiques du mélange proposé à T = 3

C/ QM	K' = 1	k' = 2	k' = 3	k' = 4	k' = 5
c = 1	64,2	64,7	64,2	64,0	65,0
c = 2	5,4	5,1	5,5	5,3	5,2
c = 3	0,7	0,8	0,7	0,7	0,8
c = 4	7,9	6,1	8,1	8,0	8,0
c = 5	6,3	7,9	4,4	6,0	6,0

Tableau 17 : Mélange proposé pour la période T = 6 mois

QS / QM	K' = 1	k' = 2	k' = 3	k' = 4	k' = 5
SB	0	0	0	0	0
SA2	0	0	0	0	0
C0	0	368066	0	0	0
C1	2170	0	0	0	0
C0_1	0	0	0	20000	0
C2S	244416	0	0	0	0
C3S	220109	0	0	0	0
C3I	526901	0	0	86606	4978
C3	20000	0	0	0	0
C4S	0	428026	80645	0	0
C4I	112000	0	0	47240	2715
C4	20000	0	0	0	0

C5S	0	0	0	0	0
C5I	0	0	0	0	0
C5	0	0	0	0	0
C6	0	0	0	0	0
TOTAL	1145596	796092	80645	153846	7693

Tableau 18 : Caractéristiques chimiques du mélange proposé à T =6

C/ QM	K' = 1	k' = 2	k' = 3	k' = 4	k' = 5
c = 1	64,6	63,1	64,0	64,0	64,0
c = 2	5,3	5,6	6,0	5,4	5,4
c = 3	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
c = 4	7,9	7,0	8,0	7,9	7,9
c = 5	5,5	6,1	6,2	5,1	5,2

Tableau 19 : Mélange proposé pour la période T = 9 mois

QS / QM	K' = 1	k' = 2	k' = 3	k' = 4	k' = 5
SB	0	0	0	0	0
SA2	0	0	0	0	0
C0	473260	94494	0	0	0
C1	0	0	0	0	0
C0_1	0	0	0	0	0
C2S	0	0	0	0	0
C3S	664376	0	100968	0	0
C3I	349345	0	0	176470	0
C3	0	0	0	20000	0
C4S	0	1099643	0	0	11539
C4I	231413	0	0	34299	0
C4	0	0	20000	0	0
C5S	0	0	0	0	0
C5I	0	0	0	0	0
C5	0	0	0	0	0
C6	0	0	0	0	0
TOTAL	1718394	1194137	120968	230769	11539

Tableau 20 : Caractéristiques chimiques du mélange proposé à T =9

C/ QM	K' = 1	k' = 2	k' = 3	k' = 4	k' = 5
c = 1	63,4	63,8	64,5	65,0	64,0
c = 2	5,4	5,9	5,4	5,2	6,0
c = 3	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
c = 4	7,4	7,8	7,8	7,9	8,0
c = 5	5,1	6,2	5,2	5,4	6,2

Tableau 21 : Mélange proposé pour la période T = 12 mois

QS / QM	K' = 1	k' = 2	k' = 3	k' = 4	k' = 5
SB	0	0	0	0	0
SA2	0	0	0	0	0
C0	0	683940	0	0	0
C1	0	0	0	0	0
C0_1	0	0	0	20000	0
C2S	0	0	0	0	0
C3S	1289733	0	0	0	0
C3I	919553	0	0	0	15385
C3	0	0	0	0	0
C4S	0	908243	0	287692	0
C4I	81904	0	141290	0	0
C4	0	0	20000	0	0
C5S	0	0	0	0	0
C5I	0	0	0	0	0
C5	0	0	0	0	0
C6	0	0	0	0	0
TOTAL	2291191	1592183	161290	307692	15385

Tableau 22 : Caractéristiques chimiques du mélange proposé à T =12

C/ QM	K' = 1	k' = 2	k' = 3	k' = 4	k' = 5
c = 1	65,1	63,1	59,4	64,0	67,0
c = 2	5,3	5,6	5,9	5,9	5,1
c = 3	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
c = 4	8,0	7,1	7,5	8,0	8,0
c = 5	4,6	6,1	6,4	6,1	4,7

Après avoir effectué le test de faisabilité pour tous les scénarios générés, nous synthétisons les résultats dans le Tableau 23. Où, la mention « F » signifie Faisable et « NF » signifie Non-Faisable. Les résultats obtenus montrent que six scénarios sur vingt sont efficaces à court terme, mais ne répondent pas à la demande initiale à moyen terme. Ces six scénarios sont considérés comme non pertinents et sont donc éliminés pour le reste de l'étude. L'ensemble des scénarios restants est considéré comme cohérent et réalisable.

Tableau 23 : Synthèse de l'étude de faisabilité par scénario

SC / T	T = 1	T = 2	T = 3	T = 6	T = 9	T = 12	SR (%)
SC1	F	F	F	F	F	F	100
SC2	F	F	F	F	F	F	100
SC3	F	F	F	F	F	F	100
SC4	F	F	F	F	F	F	100
SC5	F	F	F	F	F	F	100
SC6	F	F	F	F	F	F	100
SC7	F	F	F	F	F	F	100
SC8	F	F	F	F	F	F	100
SC9	F	F	F	F	F	F	100
SC10	F	F	F	F	F	F	100
SC11	F	F	F	NF	NF	NF	50
SC12	F	F	F	F	NF	NF	66,7
SC13	F	F	F	F	F	NF	83,3
SC14	F	F	F	NF	NF	NF	50
SC15	F	F	F	F	F	NF	83,3
SC16	F	F	F	F	F	F	100
SC17	F	F	F	F	F	F	100
SC18	F	F	F	F	F	F	100
SC19	F	F	F	F	F	F	100
SC20	F	F	F	F	F	NF	83,3

3.3. Exemple d'application du niveau 3 : étude de robustesse

Nous avons effectué l'étude de robustesse de niveau 2 pour déterminer un nouveau sous-ensemble de scénarios robustes pour un $RR_{sc} = 80\%$ fixé par les dirigeants du pôle planification. Dans le Tableau 24, nous illustrons la création des demandes perturbées en donnant deux vecteurs différents. Le premier représente un mois d'anticipation ($\delta = 1$) sur le volume de production demandé initialement. Le deuxième vecteur ($\eta = 2$) reflète une augmentation de la quantité de la demande initiale de $\alpha_1 = 15\%$ et $\alpha_4 = 10\%$, respectivement, concernant $k' = \{1, 4\}$ prenant place en ($\eta = 9$). .

Tableau 24 : Création de deux vecteurs de demandes perturbés

DEMANDE INITIALE DK'	K' = 1	K' = 2	K' = 3	K' = 4	K' = 5
T = 1	190932	132682	13441	25641	1282
T = 2	381865	265364	26882	51282	2564
T = 3	572797	398046	40323	76923	3846
T = 6	1145596	796092	80645	153846	7693
T = 9	1718394	1194137	120968	230769	11539
T = 12	2291191	1592183	161290	307692	15385
DEMANDE PERTURBÉE DP1	Anticipation temporelle du volume demandé pour le 3^{ème} mois, requis pour le 2^{ème} mois concernant la QM {2,3}				
T = 1	190932	132682	13441	25641	1282
T = 2	381865	398046	40323	51282	2564
T = 3	572797	398046	40323	76923	3846
T = 6	1145596	796092	80645	153846	7693
T = 9	1718394	1194137	120968	230769	11539
T = 12	2291191	1592183	161290	307692	15385
DEMANDE PERTURBÉE DP2	Augmentation quantitative de la demande initiale par 15% et 10% respectivement pour la QM {1,4}				
T = 1	190932	132682	13441	25641	1282
T = 2	381865	265364	26882	51282	2564
T = 3	572797	398046	40323	76923	3846
T = 6	1145596	796092	80645	153846	7693
T = 9	1976153	1194137	120968	253846	11539
T = 12	2548950	1592183	161290	330769	15385

Pour cette étude, nous générons 3 ensembles de test (Tableau 25) chacun contenant 16 vecteurs de demandes perturbées des quatre types. Les poids attribués à chaque type de perturbation sont définis par les décideurs en tenant compte du facteur de criticité des fluctuations de la demande. Le test de robustesse est donc effectué pour chaque scénario 48 fois. Le RR_{sc} est ensuite calculé pour chaque scénario. Nous remarquons que parmi les 14 scénarios restants, seuls 5 ont un RR_{sc} supérieur à 80 % pour cette étude. Mais ce critère n'est pas éliminatoire, nous conservons donc tous les scénarios pour la prochaine étape de l'analyse multicritères.

Tableau 25 : Synthèse de l'étude de robustesse par scénario

SCENARIO SC / TEST BUNDLE	TEST_BUNDLE_1	TEST_BUNDLE_2	TEST_BUNDLE_3	RR (%)
SC1	92,5	76,5	60,5	76,5
SC2	100	70	55,5	75,17
SC3	100	85	77,5	87,5
SC4	100	100	92,5	97,5
SC5	92,5	76,5	55,5	74,83
SC6	100	85	77,5	87,5
SC7	92,5	56,5	63,5	70,83
SC8	92,5	76,5	77,5	82,17
SC9	92,5	63,5	80,5	78,83
SC10	80,5	76,5	77,5	78 .17
SC17	92,5	76,5	77,5	82,17
SC18	92,5	76,5	63,5	77,5
SC19	60	50,5	50,5	53,67
SC20	72	76,5	63,5	70,67

3.4. Exemple d'application du niveau 4 : sélection, comparaison et analyse multicritère des scénarios

En fait, nous définissons l'ensemble des critères comme des fonctions multiples qui maximisent le volume annuel d'extraction en termes de quantité mais aussi de qualité (diversité des couches extraites) et maximisent le taux de robustesse de chaque scénario alternatif. Nous précisons ici que le taux de robustesse (RR_{sc}) reflète la capacité d'un programme de programmation à gérer des fluctuations de la demande qui se présentent sous différentes formes (anticipation/retard lié au temps programmé, augmentation/réduction en termes de quantité). D'autre part, nous cherchons la minimisation du temps de déplacement des machines d'extraction.

A cette étape, nous avons le sous-ensemble des scénarios alternatifs acceptables (techniquement cohérent et réalisable) décrit dans le Tableau 23. Nous les analysons à travers le concept de dominance Pareto et orientons notre recherche des scénarios les plus performants. Cette analyse repose sur la confrontation de plusieurs critères liés à l'efficience et à l'efficacité. A savoir :

- **CR1** : Taux de robustesse ;
- **CR2** : Quantité d'extraction annuelle ;
- **CR3** : Temps de déplacement ;
- **CR4** : Quantité d'extraction de la couche 5 ;
- **CR5** : Quantité d'extraction de la couche 6 ;

Pour rendre l'analyse plus claire, nous découpons la confrontation des critères en ensembles tridimensionnel et nous procédons à déduire les scénarios non dominés dans chaque cas. Cela nous permettra aussi d'aborder et de discuter les résultats.

3.4.1. Robustesse, quantité d'extraction annuelle et temps de déplacement

Dans la Figure 29, nous commençons par confronter le taux de robustesse, la quantité d'extraction annuelle proposée par chaque scénario alternatif, et réduisons le calcul du temps de déplacement au temps total de déplacement des machines d'extraction les plus critiques (à savoir Draglines et Bulldozers utilisés pour la cinquième opération du processus d'extraction, permettant d'enlever le stérile fragmenté pour accéder à la couche de minerai). Ces machines sont considérées comme critiques dans le cas des draglines en raison de leur taille, consommation d'énergie, lenteur de mouvement et difficulté à se déplacer sur le terrain. Alors que dans le cas de l'ensemble des Bulldozers utilisés, la criticité n'est pas liée à leur flexibilité mais plutôt à la quantité de charge de travail dans cette opération spécifique.

Dans ce cas, le scénario 4 présente le meilleur taux de robustesse face aux fluctuations de la demande avec un score de 98%. Ce qui signifie une grande capacité à faire face aux fluctuations critiques et imprévues de la demande au cours de l'horizon de planification. En revanche, ce scénario a le temps de déplacement maximal des machines d'extraction avec un total de 46902 heures annuelles. En revanche, l'analyse du scénario 18 montre un taux de robustesse très faible d'un score de 54%, ce qui signifie que près de la moitié du temps, ce scénario conduira à une non-satisfaction de la demande perturbée des clients. La quantité annuelle d'extraction de ce programme est d'environ 6,6 millions de tonnes, ce qui est considéré par l'équipe de planification comme satisfaisant à leur objectif annuel de 6 millions de tonnes. Le temps de

déplacement est également meilleur que le scénario 4, avec un total de 44539 heure annuel, mais pas nécessairement bon compte tenu des autres scénarios.

Quant aux scénarios 16 et 9, ils présentent de meilleurs résultats sur ces trois aspects avec un taux de robustesse égal de 82 %, ce qui est supérieur au seuil acceptable de robustesse (80 %) spécifié par les décideurs. De plus, à une meilleure gestion des machines d'extraction avec un temps de déplacement total respectif de 43327 et 43151 heures. En termes de quantité d'extraction annuelle, le scénario 16 propose un total de 6,5 millions de tonnes, tandis que le scénario 9 génère 7,1 millions de tonnes, tous deux adéquats avec l'objectif de la mine.

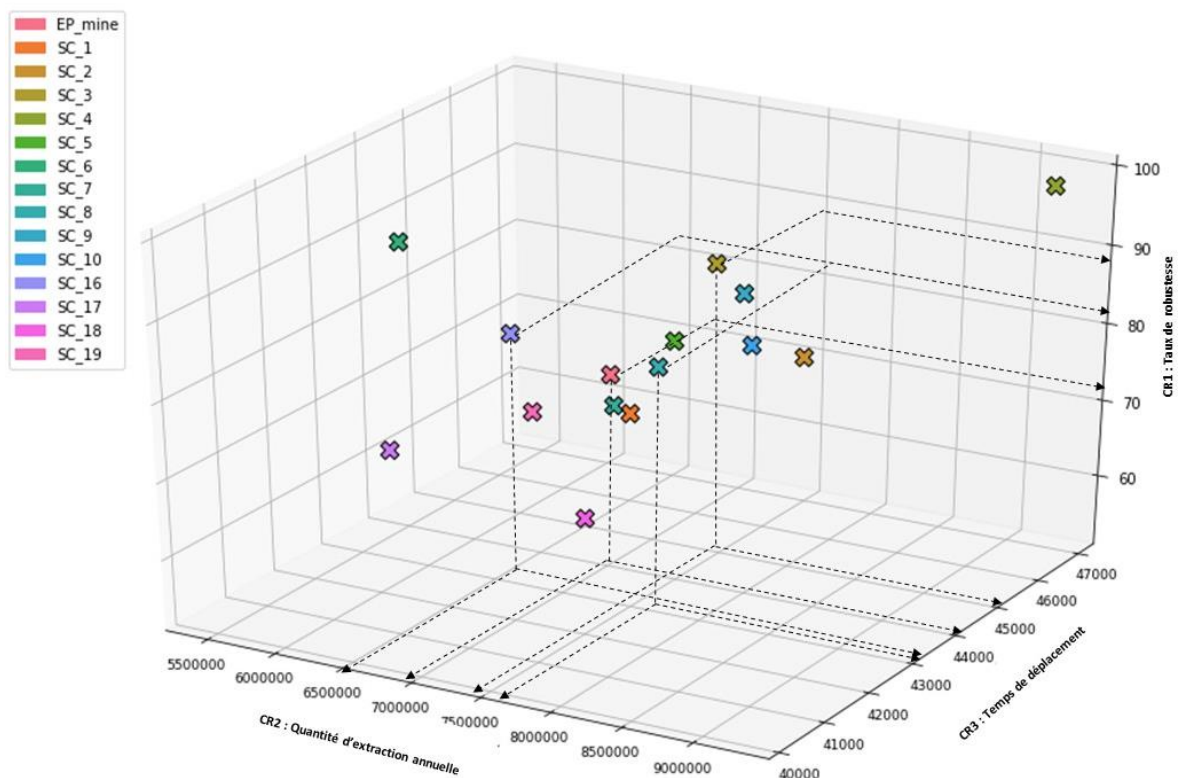


Figure 29 : Diagramme de dispersion 3D des scénarios dans l'espace de décision concernant les critères {CR1, CR2, CR3}

En comparaison avec le programme proposé par la mine. Nous remarquons que, par exemple, le scénario numéro 3 est meilleur que le PE de la mine en ce qui concerne la robustesse et le volume d'extraction proposé. Pourtant, les choix intégrés dans ce scénario concernant le déplacement de la machine ont conduit à un déplacement des machines supérieur au PE de la mine. Le scénario numéro 16, en revanche, offre une meilleure robustesse et des performances de temps de déplacement. Mais, il permet un

volume d'extraction plus faible avec un écart de 179652 tonnes. Cependant, compte tenu de l'objectif annuel de 6 millions de la mine, ce scénario s'aligne sur l'objectif d'un volume total d'extraction de 6,5 millions de tonnes. C'est donc un meilleur scénario compte tenu de ces critères.

Néanmoins, une meilleure alternative dans cette étude serait le scénario numéro 8 qui constitue la seule solution non dominée, proposant les meilleures valeurs des 3 critères sont que l'augmentation de l'un des critères cause une dégradation des autres valeurs. Ce scénario offre le meilleur compromis, où la robustesse est de 82% par rapport à un taux de robustesse de 72% pour le PE de la mine. Le taux de robustesse de ce scénario est également supérieur au seuil de tolérance de 80 % spécifié par l'équipe de planification. De plus, le volume d'extraction annuel pour le scénario 8 est de 7,6 millions de tonnes contre 6,7 millions de tonnes pour l'EP de la mine, ce qui est également supérieur à l'objectif de 6 millions de tonnes. De plus, sur les programmes discutés, le scénario 8 offre le temps de déplacement minimum avec une valeur de 43151 heures. Alors que l'EP de la mine est jusqu'à 44951 heures. Ainsi, le scénario 8 est non dominé par le PE de la mine ainsi que les autres scénarios, sur les 3 angles d'analyse. Également, il s'aligne avec les objectifs de l'équipe de planification en termes de quantité et de robustesse. Alors que d'autres scénarios comme les numéros 4 et 16 offrent également un bon compromis acceptable.

3.4.2. Robustesse, quantité d'extraction de la couche 5 et 6

Dans un autre exemple (Figure 30), nous comparons la robustesse proposée pour chaque scénario avec la quantité annuelle extraite spécifique des couches 6 et 5. D'un côté, ces deux couches sont considérées comme les plus critiques à extraire en raison des interdépendances géologiques entre les couches du gisement minier. Quant à la nature sédimentaire de la mine, les couches 6 et 5 sont situées au fond du gisement minier. Par conséquent, il est nécessaire d'extraire toutes les couches et les déchets au-dessus d'eux pour accéder à ces couches. D'un autre côté, ces deux couches ont des caractéristiques chimiques riches et le maintien de la diversité dans les couches extraites rend plus possible d'avoir différents mélanges pour produire la demande en QM plus tard.

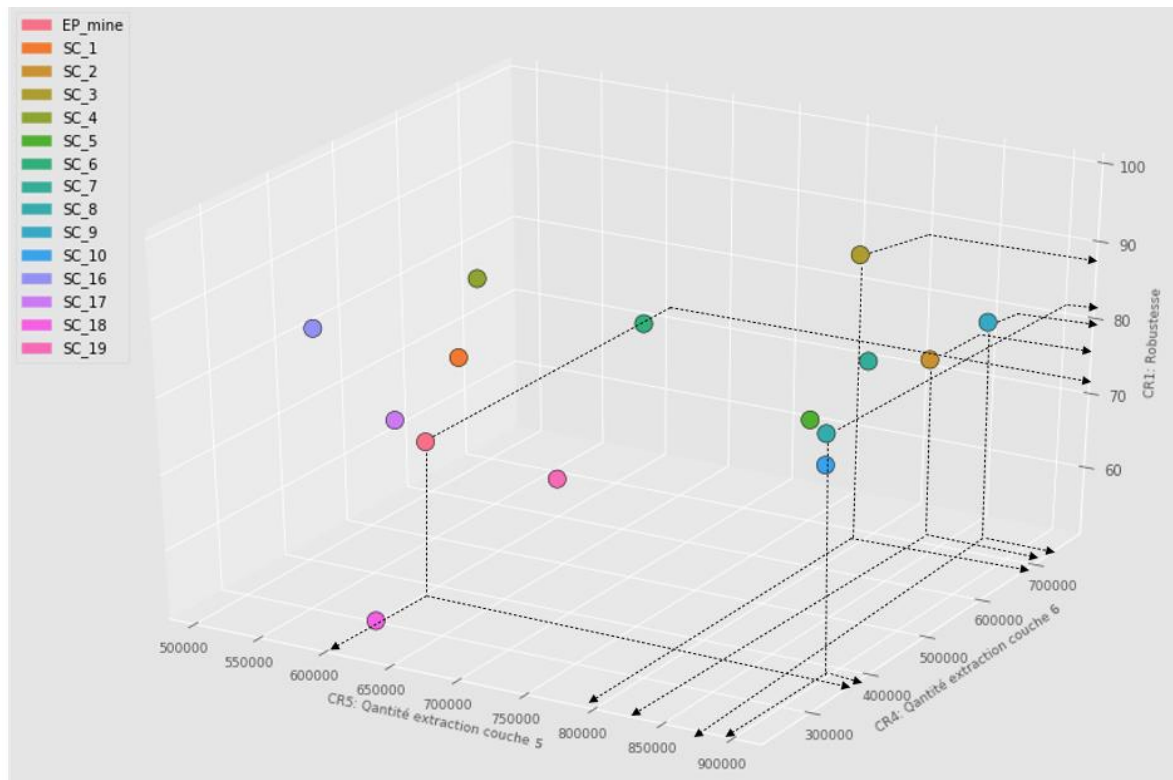


Figure 30 : Diagramme de dispersion 3D des scénarios dans l'espace de décision concernant les critères {CR1, CR4, CR5}

En confrontant ces trois critères, nous remarquons que le scénario 8 propose la quantité la plus élevée de la couche 5, avec un total de 892 mille tonnes. Le taux de robustesse est acceptable avec 82%. Bien que, la quantité à extraire de la couche 6 est de 383 mille tonnes face à 367 mille tonnes proposée par le PE de la mine, ce scénario reste des plus faibles concernant le volume à extraire de la couche 6. En contraste, le scénario 2 présente un volume élevé de la couche 6, allant jusqu'à 711 mille tonnes. Ainsi que le troisième volume le plus important de la quantité à extraire de la couche 5, avec 832 mille tonnes. Cependant la robustesse est à 75%, comptant parmi les 5 valeurs les plus faibles du taux de robustesse dans cette étude.

Nous observons le scénario 9 qui représente le deuxième volume le plus important concernant la couche 5, avec un total de 858 mille tonnes face à 608 mille tonnes donné par le PE de la mine. Mais également, la quantité la plus élevée de la couche 6, à savoir 752 mille tonnes accompagné d'une robustesse de 79%. Un autre scénario très intéressant est le scénario 3 offrant un volume total de 785 mille tonnes en couche 5 et 694 mille tonnes en couche 6, avec un taux de robustesse s'élevant à 88% contre 72% pour le PE de la mine. En effet les scénarios 9 et 3 sont considérés ici les scénarios non

dominés, ils représentent tout deux les meilleurs compromis pour les 3 critères étudiés. Nous notons aussi que la performance de ces deux scénarios sur les 3 aspects est beaucoup plus intéressante que la performance du programme minier.

3.4.3. Quantité d'extraction annuelle, quantité de la couche 5 et 6

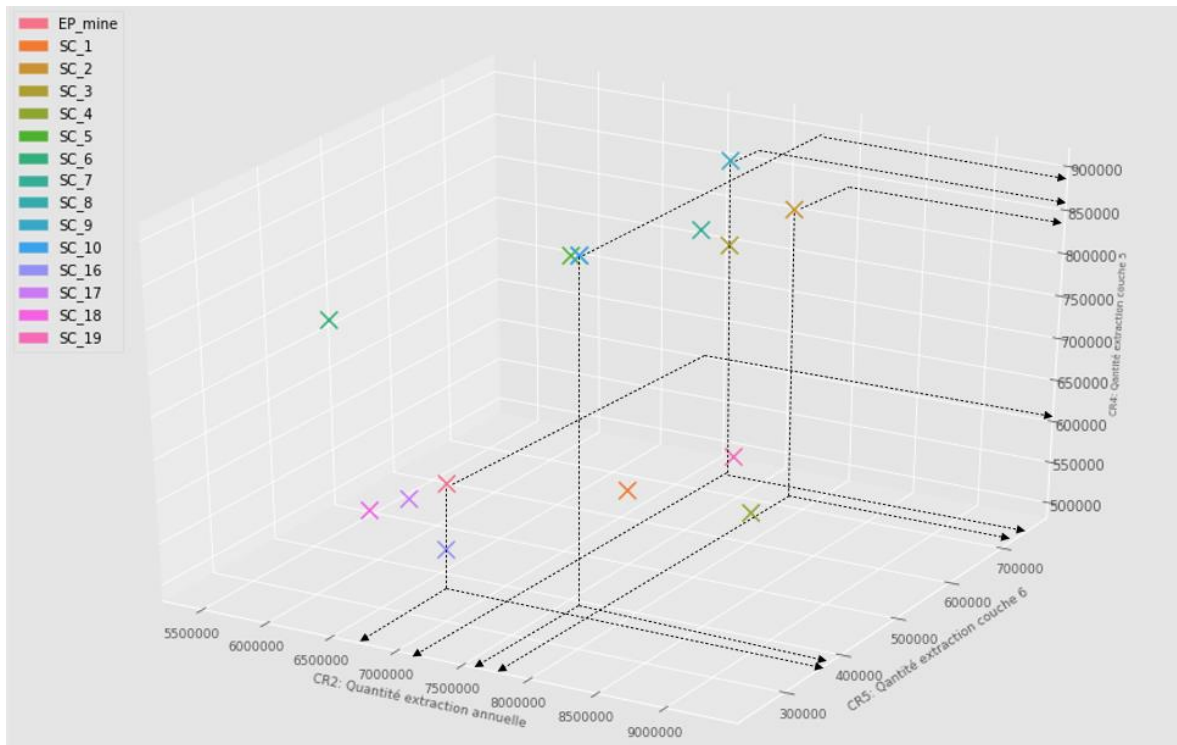


Figure 31 : Diagramme de dispersion 3D des scénarios dans l'espace de décision concernant les critères {CR2, CR4, CR5}

Nous remarquons que le scénario 18 a la plus faible quantité de la couche 6, la plus difficile à atteindre, avec un total de 255 milles tonnes, même avec une valeur d'extraction totale de 6,6 millions de tonnes. D'un autre côté la quantité la plus faible de la couche 5 est présentée par le scénario 1, avec une valeur d'extraction totale de 7,5 millions de tonnes.

En revanche, le scénario numéro 2 présente le deuxième volume le plus élevé de la couche 6 avec un total de 711 milles tonne, ainsi que la troisième valeur la plus élevée pour la couche 5 atteignant 832 mille tonnes avec une quantité d'extraction annuelle de 7,8 millions de tonnes. Faisant ainsi de ce scénario une solution non dominé. D'autres scénarios même si dominés, s'avèrent intéressants compte tenu de la comparaison avec le programme de la mine. En effet, face au programme minier qui stipule un volume

total de 6,7 millions de tonnes annuel, 608 mille tonnes en couche 5 et 367 mille tonnes en couche 6. Nous retrouvons, les scénarios 3, 8 et 9 proposons dans cet ordre 7,4 ; 7,6 et 7,1 millions de tonnes annuel. Ensuite, concernant le volume de la couche 5 nous obtenons 785 ; 892 et 858 mille tonnes. Tandis que le volume de la couche 6 est 694 ; 383 et 752 mille tonnes, dans le même ordre. Ces trois scénarios sont donc tous meilleur que le PE de la mine concernant les critères étudiés.

3.4.4. Quantité d'extraction annuelle, couche 5 et temps de déplacement

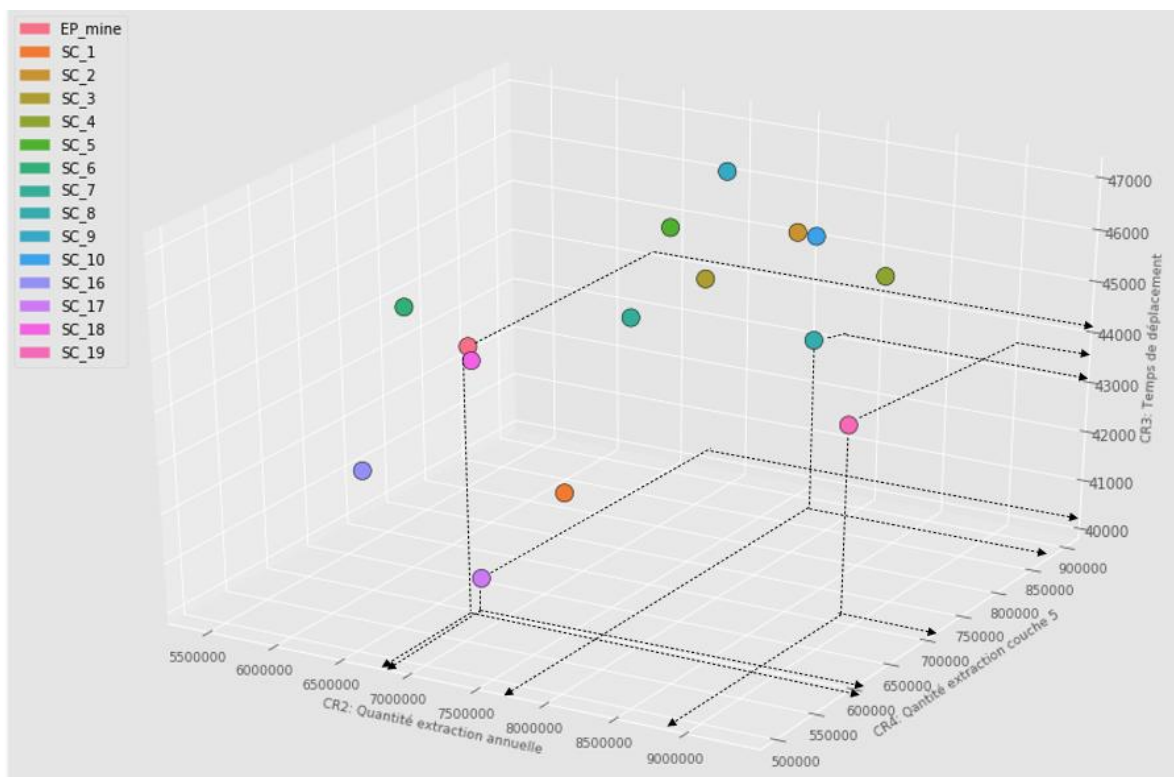


Figure 32 : Diagramme de dispersion 3D des scénarios dans l'espace de décision concernant les critères {CR2, CR3, CR4}

Nous examinons le scénario 17 qui propose le temps de déplacement le plus réduit avec une valeur de 40276 heures, une extraction annuelle allant jusqu'à 6,7 millions de tonnes et un volume d'extraction de la couche 5 à 617 milles tonnes. Le scénario 19, propose à son tour la deuxième valeur la plus élevée de l'extraction annuelle avec 8,8 millions de tonnes, une quantité d'extraction de 710 milles tonne de la couche 5 ainsi qu'un temps de déplacement de 43656 heures. Ces deux scénarios représentent des scénarios acceptables et meilleurs que le programme de la mine, procurant quant à lui une quantité annuelle de 6,7 millions de tonnes, un volume de 608 mille tonnes de la

couche 5 et un temps de déplacement allant à 44951 heures. Cependant ces deux scénarios, ainsi que l'ensemble des scénarios étudiés, sont dominés par un seul scénario présentant la meilleure performance compte tenu des 3 critères. Le scénario 8 est la solution non dominée dévoilant un temps de déplacement de 43151 heures avec un volume total d'extraction de 7,6 millions de tonnes et 892 mille tonnes en couche 5.

3.4.5. Quantité d'extraction annuelle, couche 5 et robustesse

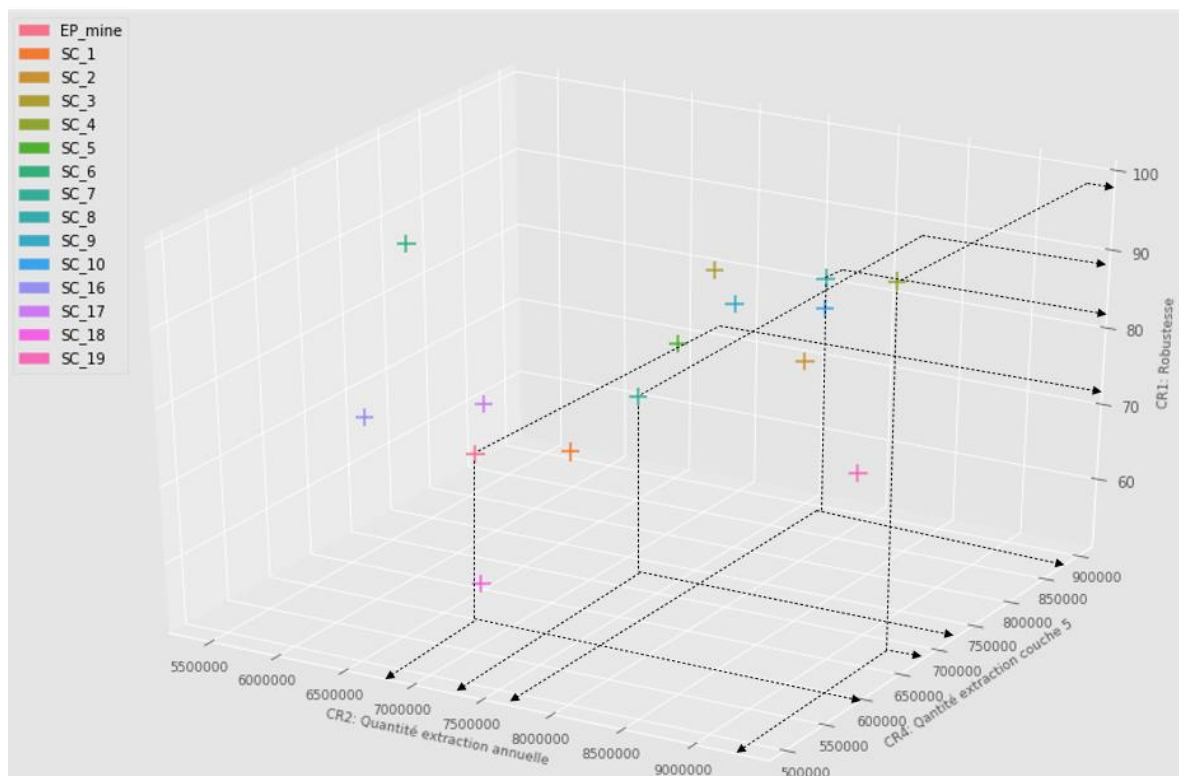


Figure 33 : Diagramme de dispersion 3D des scénarios dans l'espace de décision concernant les critères {CR1, CR2, CR4}

Le scénario 8 est la solution non dominée dans ce cas. Il présente un compromis équilibré entre les 3 critères avec un volume d'extraction annuelle de 7,6 millions de tonnes, 892 mille tonnes de volume pour la couche 5 et un taux de robustesse de 82%. D'autres scénarios sont aussi significativement meilleurs en comparaison avec le programme minier comme c'est le cas pour le scénario 3 et 4, proposons chacun un volume d'extraction plus important que le programme minier avec un taux de robustesse plus élevé. Tels que le scénario 3 et 4 offrent simultanément un volume total de 7,4 et 9,2 millions de tonnes face à 6,7 ; un volume de couche 5 équivalent à 785 et 681 mille tonnes en comparaison avec 608 pour le PE de la mine.

3.4.6. Quantité d'extraction annuelle, couche 6 et robustesse

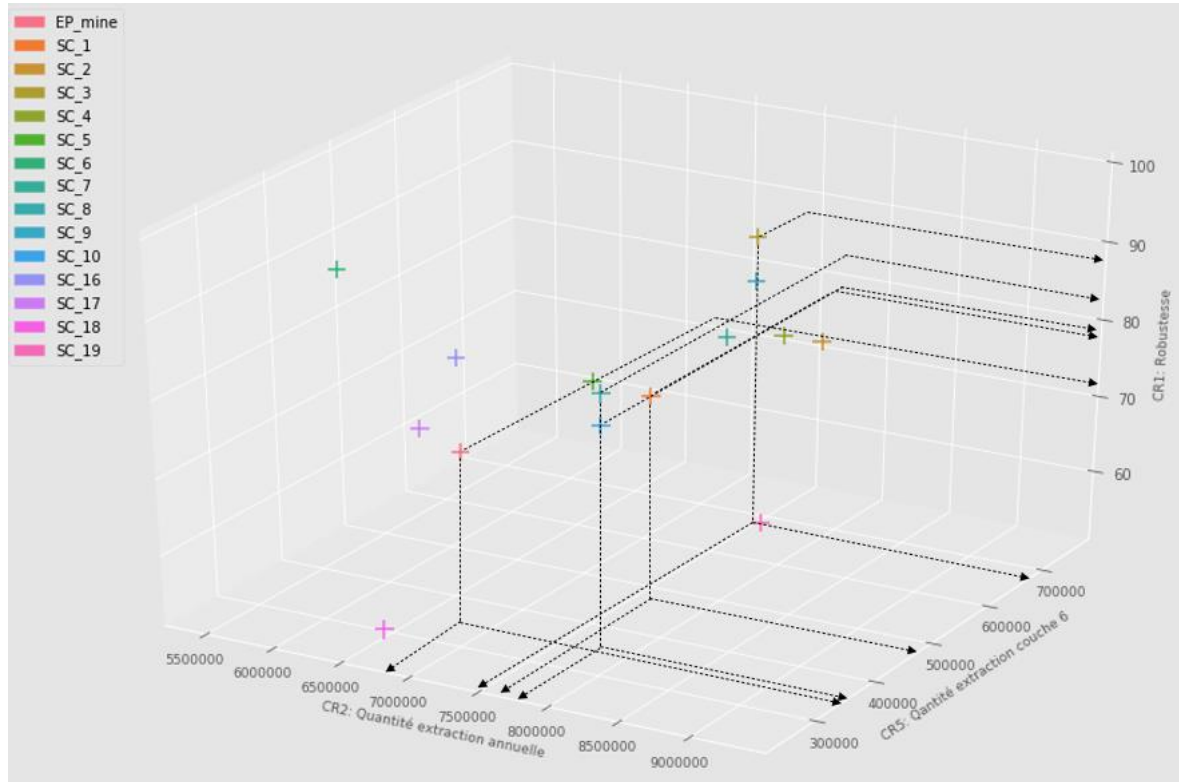


Figure 34 : Diagramme de dispersion 3D des scénarios dans l'espace de décision concernant les critères {CR1, CR2, CR5}

Dans ce cas nous obtenons 2 scénarios non dominés, le scénario 1 et 3. Ainsi que deux scénarios pertinents en comparaison avec le programme de la mine, à savoir le scénario 8 et 10. En effet, le scénario le plus privilégié est le scénario 3 donnant un taux de robustesse de 88%, un volume d'extraction annuelle de 7,4 millions de tonnes ainsi que 694 mille tonnes de la couche 6. Le scénario 1 propose quant à lui un taux de robustesse de 77% qui peut être moins pertinent, bien que non dominé, pour le décideur en raison de seuil de préférence de 80%. Mais un volume total d'extraction de 7,5 millions de tonnes ainsi que 483 mille tonnes de la couche 6. Ces deux solutions sont toutes les deux meilleures que le PE de la mine ainsi que l'ensemble des scénarios étudiés.

3.4.7. Temps de déplacement, quantité d'extraction de la couche 5 et 6

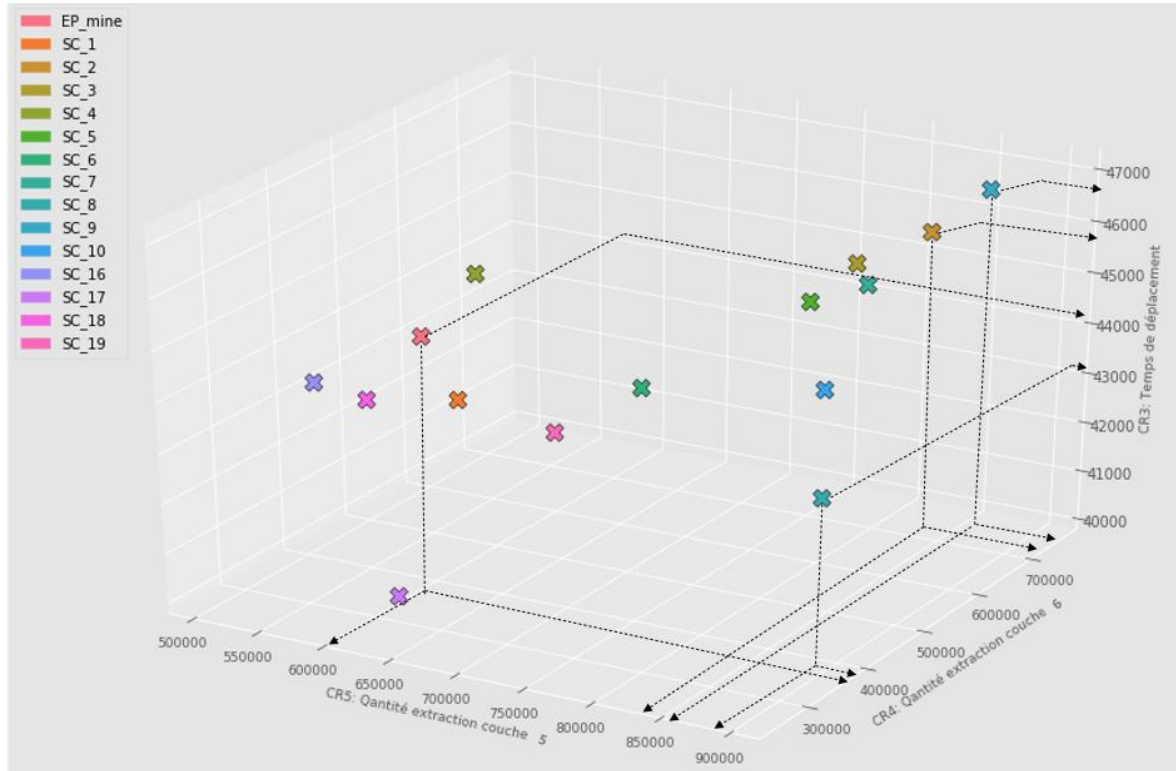


Figure 35 : Diagramme de dispersion 3D des scénarios dans l'espace de décision concernant les critères {CR3, CR4, CR5}

Dans cette analyse, nous n'avons pas trouvé des scénarios non dominés. Tous les scénarios dominent les uns les autres sur l'un des aspects. Cependant, nous notons que parmi les scénarios dominés certains sont au moins meilleur que le programme de la mine compte tenu des trois critères, comme c'est le cas pour les scénarios 8 et 6. Nous trouvons les scénarios 8 et 6 qui proposent un temps de déplacement réduit de 43151 et 44061 heures contre 44951 heures dans le programme minier. Concernant les volumes à extraire des couches 5 et 6, le scénario 8 offre respectivement 892 et 383 mille tonnes, le scénario 6 offre respectivement 734 et 445 mille tonnes tandis que le PE de la mine propose 608 et 367 mille tonnes.

3.4.8. Temps de déplacement, quantité d'extraction annuelle et couche 6

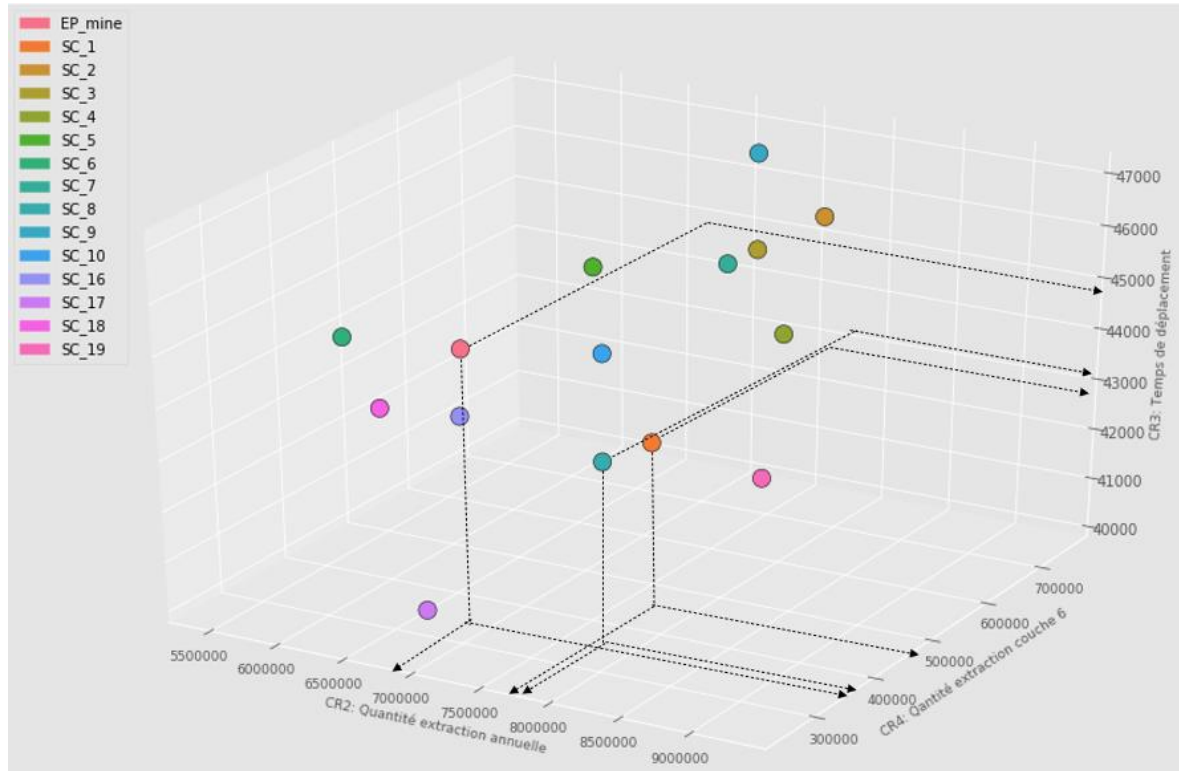


Figure 36 : Diagramme de dispersion 3D des scénarios dans l'espace de décision concernant les critères {CR2, CR3, CR5}

Le scénario non dominé ici est le scénario 1. Ce programme offre une extraction annuelle de 7,5 millions de tonnes, avec 483 milles tonnes de la couche 6 et une utilisation des machines en déplacement de 42796 heures. Le scénario en deuxième place de pertinence en comparaison avec le programme minier, même s'il est dominé par le scénario 1, est le scénario 8. Ce scénario propose un total d'extraction de 7,6 millions de tonnes, 383 mille tonnes de la couche 6 et un temps de déplacement réduit à 43151 heures, face à un volume d'extraction annuel de 6,7 millions de tonnes, 367 mille tonnes de la couche 6 et un temps de déplacement de 44951 heures, pour le PE de la mine. Le scénario 1 est donc la meilleure solution équilibrant les 3 critères dans l'ensemble de solutions étudiés, le scénario 8 est un bon scénario qui est meilleur que le PE de la mine même s'il est dominé par d'autres solutions.

3.4.9. Temps de déplacement, quantité d'extraction couche 6 et robustesse

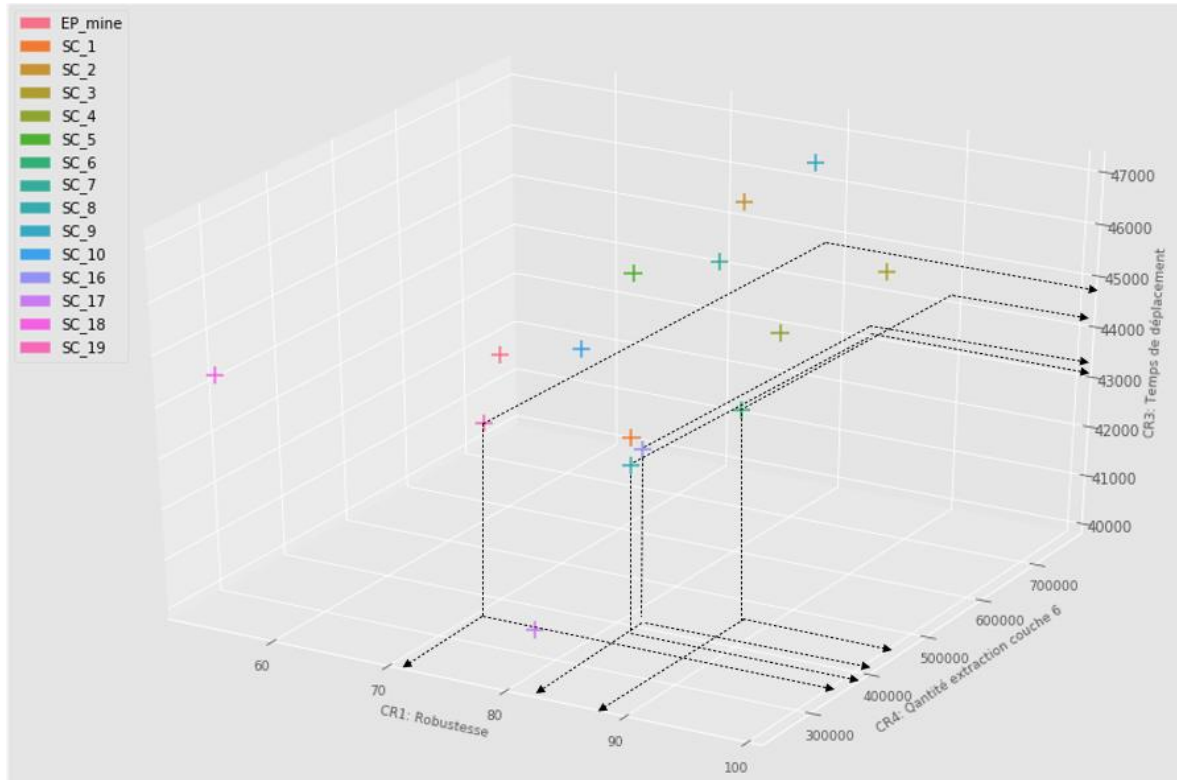


Figure 37 : Diagramme de dispersion 3D des scénarios dans l'espace de décision concernant les critères {CR1, CR3, CR5}

Nous n'avons trouvé aucun scénario non dominé dans ce cas. Toutes les solutions dominent les unes les autres sur un des aspects. Cependant, parmi les scénarios pertinents en comparaison avec le programme minier les scénarios 6,8 et 16 proposant successivement des taux de robustesses à 88%, 82% et 82% en comparaison avec 72% du PE de la mine. Ainsi qu'un temps de déplacement plus réduit à 44061, 43151 et 43327 heures face à un temps de 44951 heures. Le volume d'extraction de la couche 6 proposé s'élève à 445, 383 et 402 mille tonnes tandis que le programme minier propose un volume de 367 mille tonnes.

3.4.10. Temps de déplacement, quantité d'extraction couche 5 et robustesse

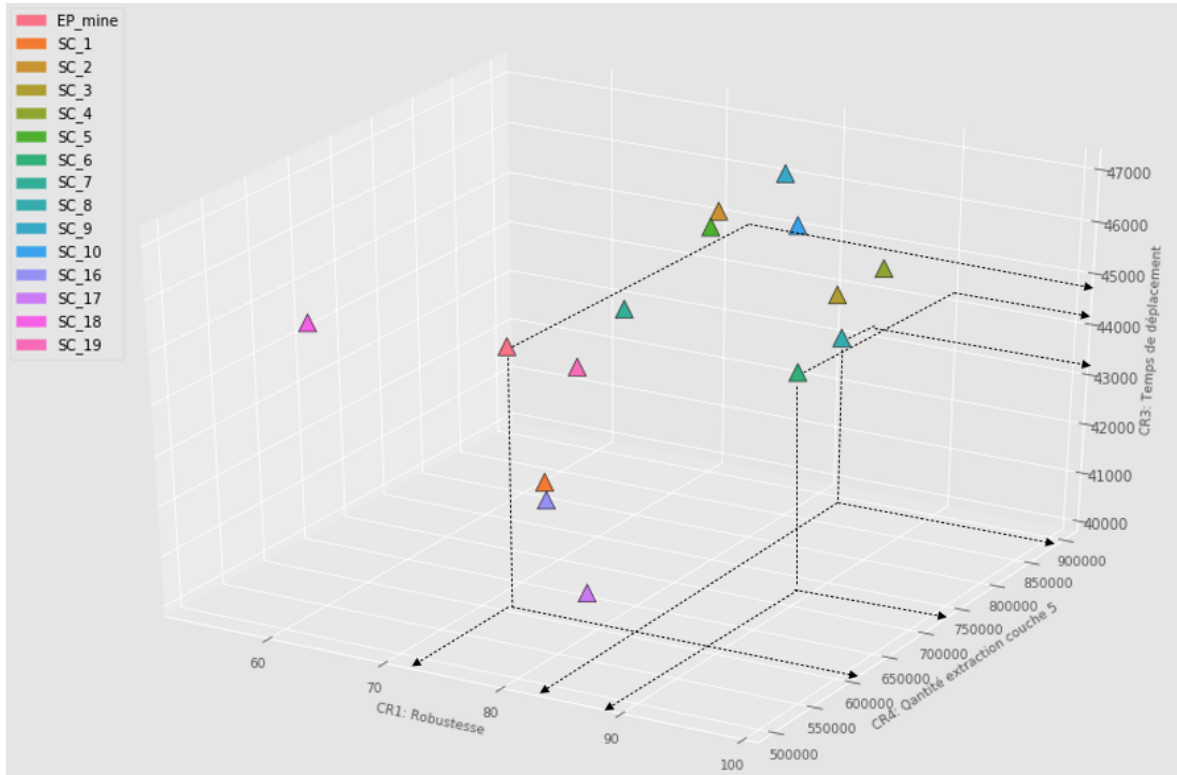


Figure 38 : Diagramme de dispersion 3D des scénarios dans l'espace de décision concernant les critères {CR1, CR3, CR4}

Nous examinons le scénario 8 qui propose un temps de déplacement d'une valeur de 43151 heures, une extraction de la couche 5 à 892 milles tonne ainsi qu'une robustesse de 82%. Ce scénario est la solution non dominée. Tandis que par exemple le scénario 6, propose à son tour un temps de déplacement de 44061 heures légèrement inférieur au temps de déplacement du programme minier qui a une valeur de 44951 heures. Mais qui reste plus performant que le programme minier concernant la quantité d'extraction de 734 mille tonnes, face à 608 mille tonnes de la couche 5 ainsi qu'une robustesse de 88% face à 72% pour le PE mine. Le scénario 6 est un scénario acceptable et meilleur que le programme de la mine.

3.4.11. Récapitulatif de l'analyse et la sélection des meilleurs scénarios

D'après les analyses multidimensionnelles effectuées, nous présentons le Tableau 26 qui synthétise l'ensemble des résultats obtenus. Pour explorer les différents combinaisons possibles tenons compte des critères choisis pour l'étude, nous

déterminons à chaque instance les solutions non-dominés et les solutions acceptables en comparaison avec le PE de la mine, afin de montrer la pertinence de l'approche.

Tableau 26 : Récapitulatif des résultats obtenus

CRITERES	SCENARIOS NON DOMINE	SCENARIOS ACCEPTABLES / PE MINE
{CR1, CR2, CR3}	8	4, 16
{CR1, CR4, CR5}	9, 3	8, 2
{CR2, CR4, CR5}	2	8, 3, 9
{CR2, CR3, CR4}	8	17, 19
{CR1, CR2, CR4}	8	3, 4
{CR1, CR2, CR5}	1, 3	8, 10
{CR3, CR4, CR5}	AUCUN	6, 8
{CR2, CR3, CR5}	1	8
{CR1, CR3, CR5}	AUCUN	6, 8, 16
{CR1, CR3, CR4}	8	6

Nous observons que le scénario 8 est présent comme solution pertinente dans toutes les combinaisons d'analyse, nous le conservons comme scénario central pour les décideurs et nous ajoutons le scénario 3 et 1, autant que scénarios performants pour enrichir la discussion et les comparaisons via la visualisation sur le DSS. Pour la visualisation synthétique des scénarios selon les 5 critères, à savoir dimension décisionnelle, à la fois, nous combinons les résultats des analyses tridimensionnelles dans un seul graphique 3D en ajoutons la dimension du temps de déplacement sous l'aspect d'une échelle en gradient de couleur et la dimension de la robustesse sous l'aspect de la grandeur de la forme représentant le scénario. Nous obtenons ainsi la Figure 39.

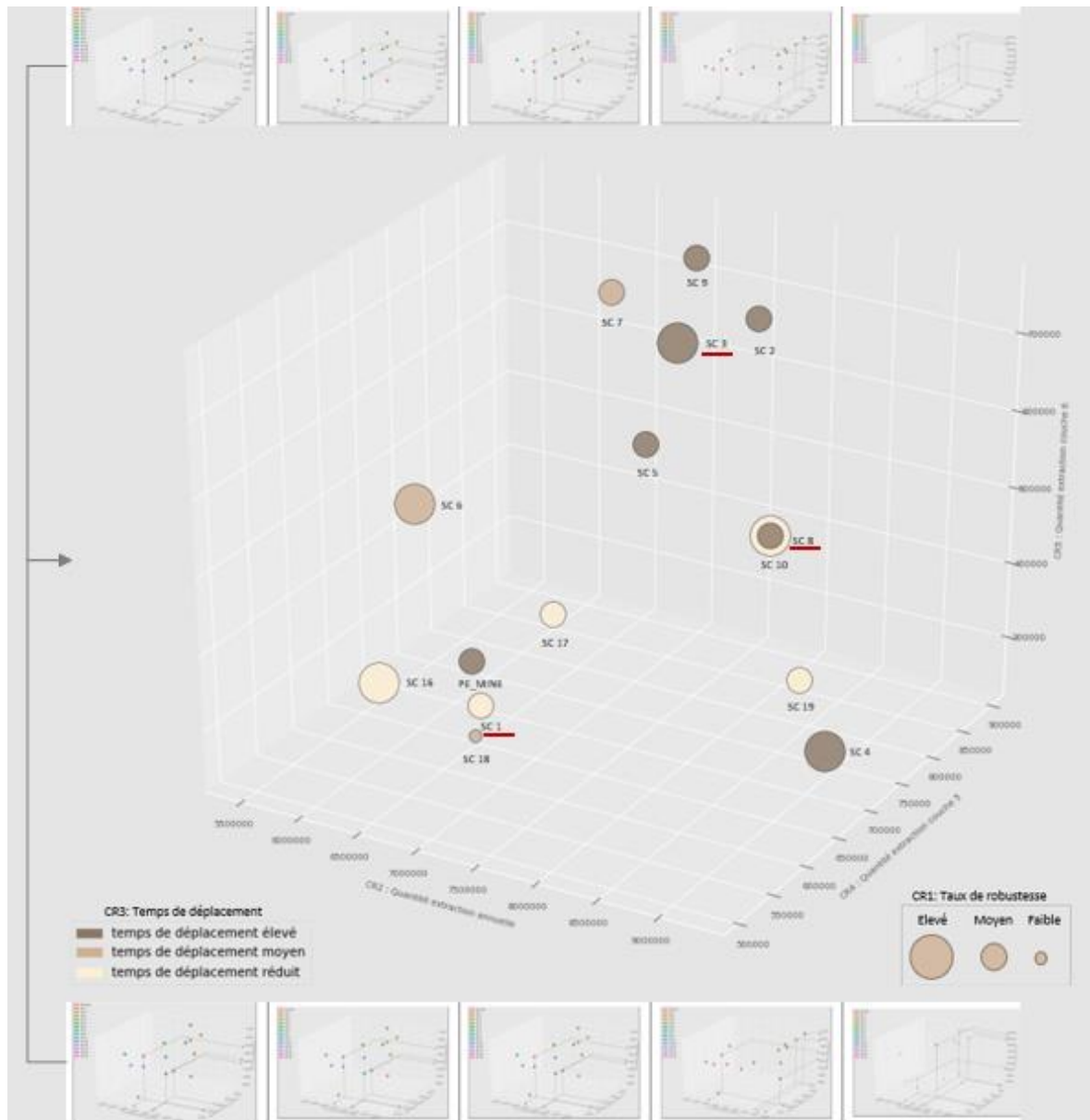


Figure 39 : Diagramme synthétique de dispersion 3D des scénarios intégrant les cinq dimensions {CR1, CR2, CR3, CR4, CR5}

Lors des discussions de validation du scénario à adopter sur le terrain, la diversité des couches à extraire est aussi considérée par les décideurs, un élément pertinent. La Figure 40 présente la quantité d'extraction par couche et permet de voir la diversité des couches à extraire en quantité et nature, proposée par chaque scénario ainsi que le PE de la mine. Notons que non seulement la quantité à extraire par couche est différente, mais le PE de la mine propose également une palette d'extraction de minerai moins diversifiée par rapport à la plupart des scénarios générés. Ceci est principalement dû au choix de modélisation dans le modèle de résolution SED encapsulé qui considère

l'importance de la diversité de l'extraction du minerai dans le choix des blocs à programmer pour l'extraction.

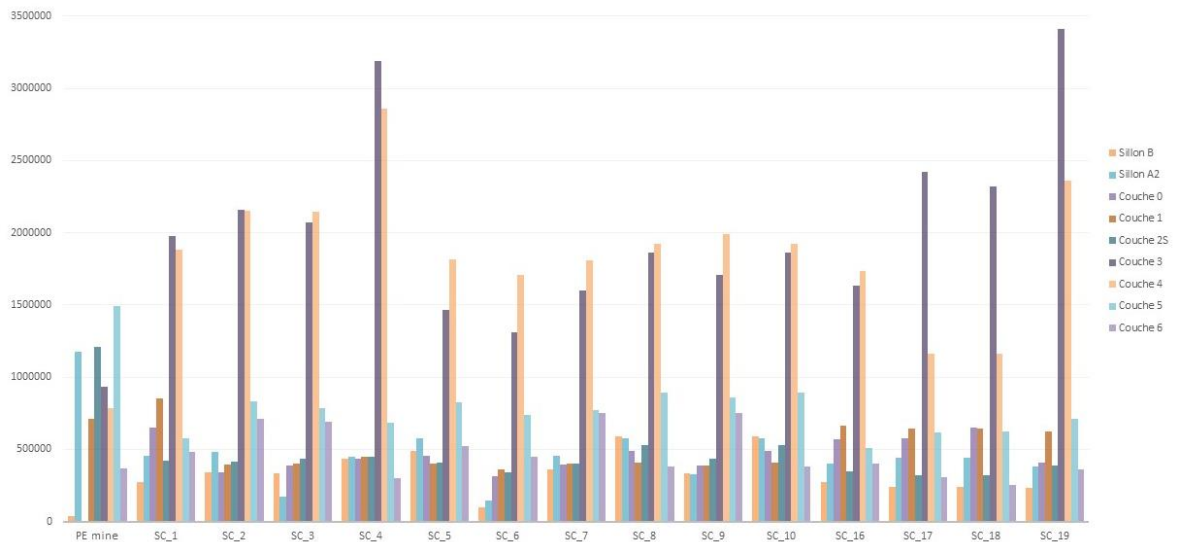


Figure 40 : Histogramme de la quantité d'extraction annuelle par couche pour les scénarios alternatifs et le PE de la mine

À partir des résultats ci-dessus, nous pouvons souligner que le choix d'un seul objectif d'optimisation, comme la maximisation de la quantité d'extraction, peut conduire à sélectionner le scénario le plus coûteux en termes d'utilisation non productive des machines. Ou encore un scénario moins polyvalent en termes de quantité extraite par couche pourrait affecter la robustesse d'une telle solution et causer des problèmes dans la production des QM sur le moyen terme. Parallèlement, certains scénarios peuvent offrir un meilleur compromis tout en respectant les objectifs et les préférences des décideurs. Par conséquent, une comparaison et une analyse approfondies des programmes d'extraction semble nécessaire pour prendre de meilleures décisions en fonction de la situation actuelle, et non dans l'absolue théorique. L'intégration de la comparaison de scénarios alternatifs assure l'agilité et l'efficacité de l'approche décisionnelle intégrée à notre DSS et considère les nombreux défis auxquels les décideurs du domaine minier sont confrontés dans un horizon opérationnel et tactique.

4. CONCLUSION

Cette analyse et cette comparaison de scénarios alternatifs ont permis de confirmer l'utilité et l'efficacité du DSS proposé. Mais aussi, de briser le paradigme de la construction d'un seul programme de planification acceptable sans chercher à voir les alternatifs possibles et ce qu'ils peuvent apporter. Certains scénarios alternatifs peuvent offrir de meilleurs compromis en présence de critères conflictuels. Cette approche facilite et favorise également les discussions des défis et des points de vue des différents décideurs sur la base d'un sous-ensemble réduit à un scénario centrale et deux scénarios considérés performants avant d'avancer le choix final sur une note plus concrète, en utilisant les graphiques et les données synthétisées.

Chapitre V

Aide à la décision dans un contexte de Supply Chain minière

1. Introduction.....	156
2. Architecture et composants du DSS.....	156
2.1. Architecture séquentielle et architecture classique	156
2.2. Les composants du DSS et leurs rôles respectifs.....	161
3. Le DSS comme point de réconciliation décisionnel.....	162
3.1. L'approche descendante dans la Supply Chain minière étudiée	162
3.2. L'approche ascendante grâce au model SED	165
3.3. L'approche hybride basé sur le DSS	167
4. Conclusion	171

1. INTRODUCTION

Ce chapitre décrit dans un premier temps l'architecture séquentielle du système d'aide à la décision adapté au problème de planification minière, faisant rupture avec l'architecture classique des DSS, pour faire face aux défis soulevés lors de la résolution. Ce DSS propose quatre composants complémentaires expliqués dans la section 2. Dans la section 3, nous nous infléchissons vers la décortication du rôle du DSS comme socle de l'approche de recherche hybride entre le Bottom-up et le top-down. Nous décrivons d'abord le schéma décisionnel du top-down instauré dans la chaîne logistique minière, ensuite nous détaillons la construction du Bottom-up via le modèle SED, pour en arriver à l'utilisation du DSS en tant que point de réconciliation et de confrontation des décisions prises par l'approche descendant et ascendante.

2. ARCHITECTURE ET COMPOSANTS DU DSS

2.1. Architecture séquentielle et architecture classique

Au début de la conception du DSS, nous nous sommes basés sur l'architecture traditionnelle d'un système d'aide à la décision comme décrite par ses fondateurs [Gorry et Morton, 1971]. Cette première tentative décrite dans la Figure 41 s'inscrit dans une logique en boucle, où l'utilisateur définit un ensemble de paramètres comme données d'entrées ; ensuite ces inputs vont alimenter un modèle de résolution (optimisation, simulation ou autres) qui à son tour va construire une solution. Cette solution considérée un output unique est analysée par le module de visualisation, après l'analyse l'utilisateur à un choix binaire : retenir la solution ou bien la rejeter et repartir à 0 pour une nouvelle simulation (voir Figure 42). Cette logique, peut être pertinente dans le cas d'un problème non complexe et facile à résoudre, où la notion d'optimalité de la solution retenu est exacte et unique ou encore dans le cas d'un nombre de possibilités réduits où l'utilisateur peut relancer la boucle trois à cinq fois pour retrouver la solution finale.

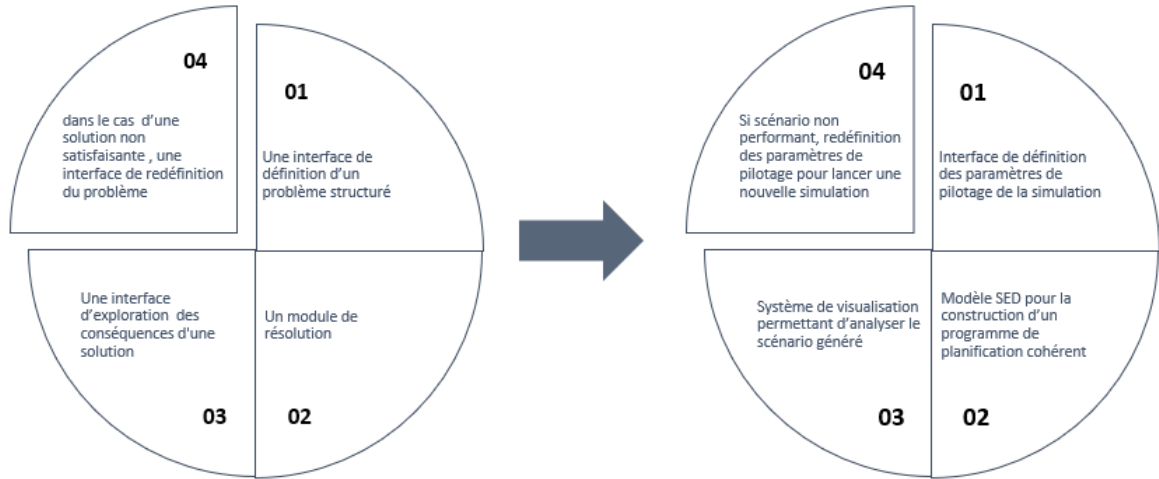


Figure 41 : Architecture classique selon [Gorry et Morton, 1971] et conception initiale du DSS proposé

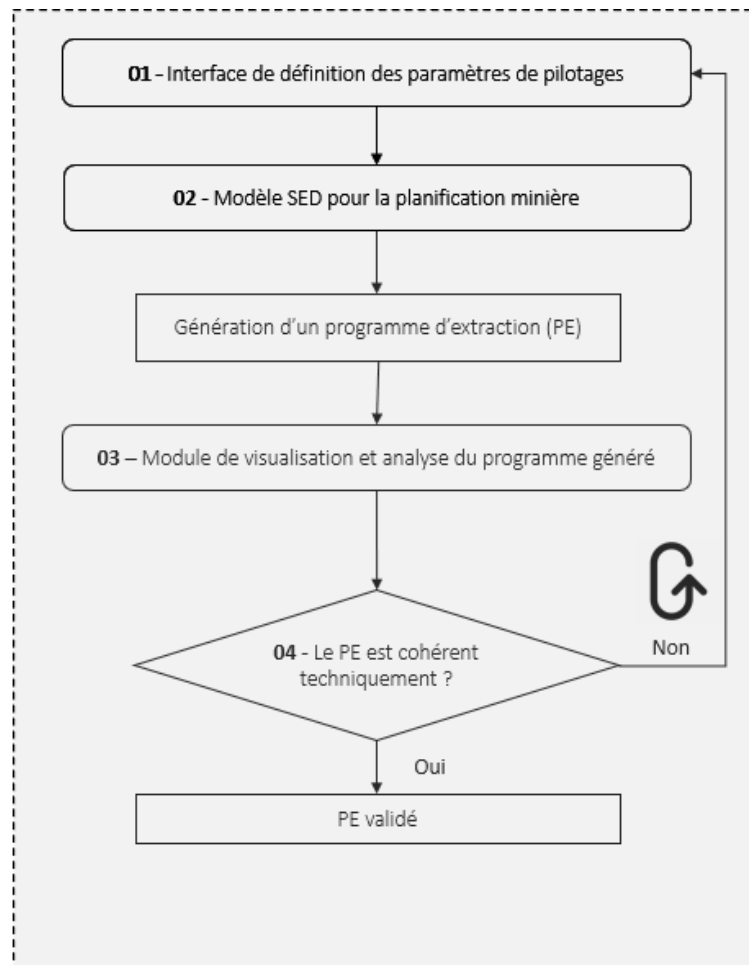


Figure 42 : Diagramme de flux DSS classique

Cependant, pour résoudre le problème de planification tactique-opérationnel dans le cas d'une mine à ciel ouvert, compte tenu de la complexité spatio-temporelle des contraintes minières, l'adoption de l'architecture classique du DSS s'est avérée insuffisante.

Dans notre cas, le modèle de résolution basé sur un SED agit comme un générateur de scénarios alternatifs. La sortie de ce composant est multiple constituée d'un ensemble de scénarios à analyser séquentiellement. Par conséquent, il était nécessaire d'étendre l'architecture classique du DSS afin de faire face aux enjeux de multiplicité et d'évaluation complexe de la performance des scénarios générés en termes d'efficacité et d'efficience.

L'architecture actuellement proposée est présentée dans la Figure 44 et son diagramme de flux dans la Figure 43, illustrant son concept de fonctionnement ainsi que les étapes permettant le raffinement du processus de décision au fur et à mesure jusqu'à obtenir un sous-ensemble réduit des scénarios les plus performants.

En effet, pour créer une structure permettant une interaction fluide entre les différents composants fonctionnels, le DSS repose sur une approche séquentielle originale et adaptée aux besoins soulevés par le problème en question. Il permet de traiter un ensemble de scénarios alternatifs et de sélectionner un sous-ensemble de deux à trois scénarios performants suivant les critères des décideurs, pour les visualiser, les analyser et enfin valider le scénario à appliquer comme programme d'extraction annuel.

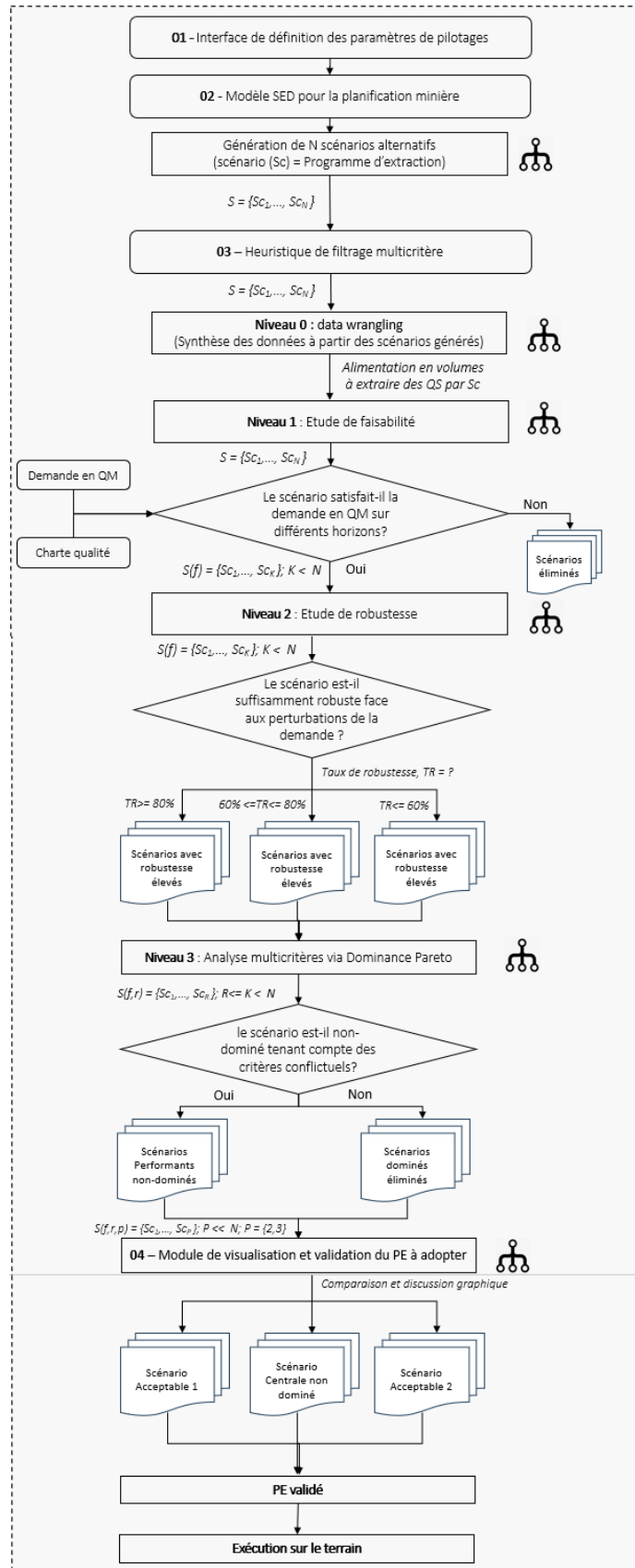


Figure 43 : Diagramme de flux DSS séquentiel proposé

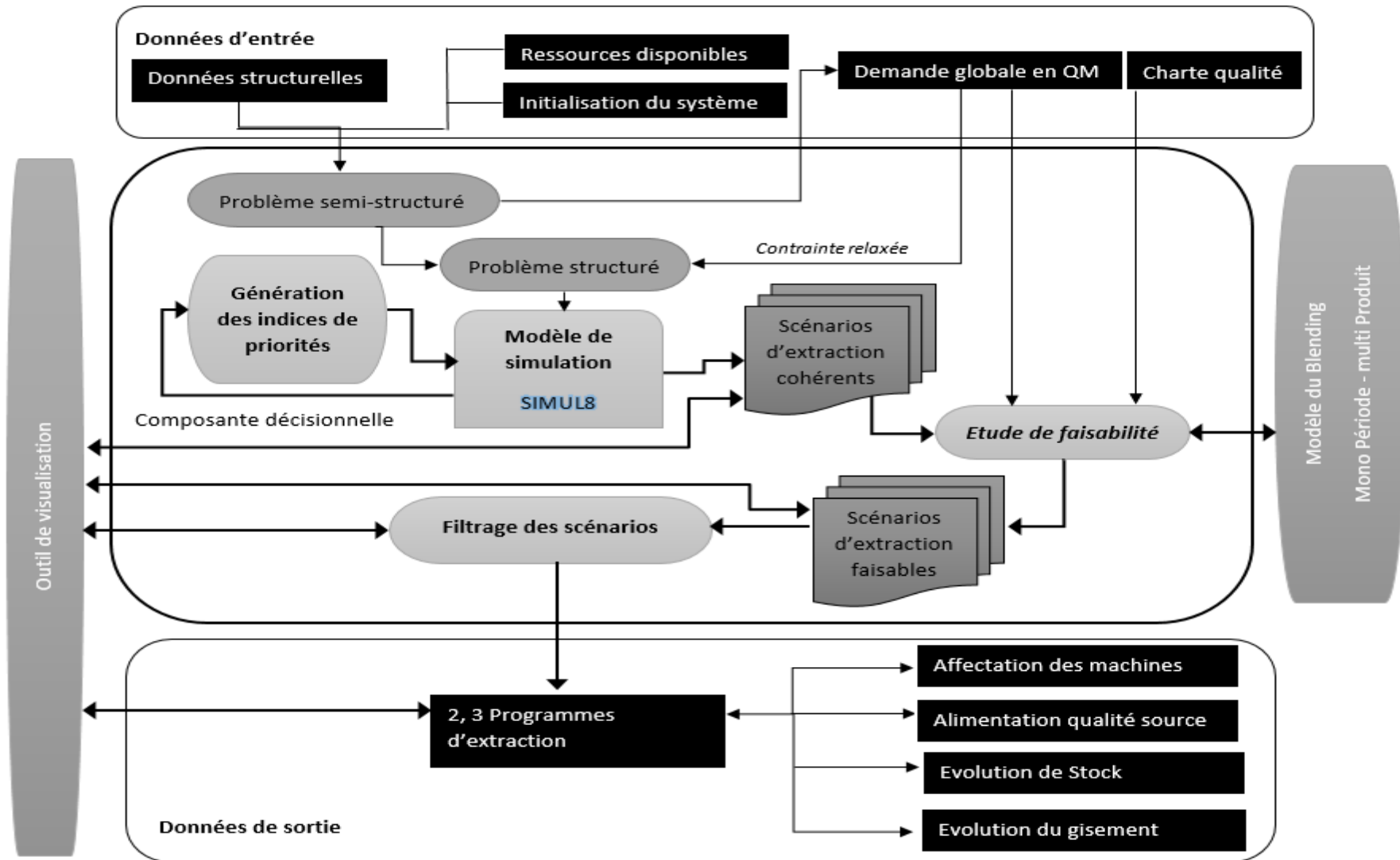


Figure 44 : Architecture du DSS

2.2. Les composants du DSS et leurs rôles respectifs

Ce DSS est composé de quatre composants interconnectés au service du processus décisionnel de programmation de la planification de l'extraction minière (Figure 44) :

- **Composant 1 - Gestion des données :** la structuration et l'intégration des données concrètes du terrain dans la composante gestion des données du DSS permettent d'avoir une base cohérente pour la construction du problème de planification. Ce composant s'appuie sur une base de données relationnelle contenant les différentes données liées à la définition du problème, qu'il soit structurel (gisement minier, machines d'extraction, etc.) ou dynamique (état initial du gisement, disponibilité des machines, etc.). Dans ce cas, les données d'entrée structurelles et dynamiques forment un problème semi-structuré qui permet de définir un problème structuré en relâchant la contrainte tenant compte de la demande en QM ;
- **Composant 2 - Modèle de simulation :** Le problème structuré sera introduit dans le modèle de simulation, considéré comme le composant de résolution. Il est piloté par des paramètres de contrôle et l'état concret initial de la planification de l'extraction de la mine pour générer plusieurs scénarios alternatifs ou planifications d'extraction. La variation des paramètres de contrôle conduit à simuler et à obtenir plusieurs scénarios distincts techniquement cohérents ;
- **Composante 3 - Heuristique de filtrage multicritère :** Elle assure, comme troisième composante, le choix de l'ensemble des scénarios les plus performants parmi l'ensemble des scénarios alternatifs précédemment générés à travers quatre niveaux de passage distincts. L'ensemble des scénarios alternatifs est considéré comme une entrée pour la composante heuristique. A ce stade, il faut non seulement que les scénarios soient techniquement acceptables, mais aussi assurer la satisfaction de la demande sur plusieurs périodes, avoir un niveau de robustesse considérable face aux éventuelles fluctuations de la demande, en plus d'être performants vis-à-vis les critères d'efficacité et d'efficience sélectionnés ;

- **Composant 4 - Visualisation** : Après filtrage, l'ensemble des meilleurs scénarios retenus est ainsi réduit à un minimum de 2-3 scénarios que l'équipe de planification peut analyser à travers un composant de visualisation spatio-temporelle. L'outil permet des manipulations interactives et automatiques, ce qui permet à l'équipe de planification de valider et d'adopter facilement un scénario comme programme d'extraction. De plus, il permet à l'utilisateur d'afficher le scénario à l'aide d'une interface conviviale. Celle-ci consiste à exploiter les résultats numériques du scénario de simulation sous des formes compréhensibles par les décideurs miniers. Par exemple, courbes d'alimentations en volumes cumulés extraits par couche, affectation Gantt des machines d'extraction avec la possibilité de filtrer (par horizon de planification, machine, opération, panneau, tranchée, etc.), en précisant les blocs à extraire, l'OE en cours, et la machine réalisant la tâche, etc. ces fonctionnalités d'affichage rend plus facile l'analyse et les discussions des résultats. Ce composant permet également de comparer deux scénarios contrastés concernant le choix des blocs à extraire, les volumes extraits par couches, les affectations des machines d'extraction et le temps de déplacement global des machines.

3. LE DSS COMME POINT DE RECONCILIATION DECISIONNEL

3.1. L'approche descendante dans la Supply Chain minière étudiée

En principe, l'approche descendante (top-down) se base sur un modèle décrivant la vue d'ensemble d'un système et cherchant à trouver des optimums globaux. Elle se décompose ensuite en éléments de bases qui constituent des boîtes noires, ces sous-systèmes ne sont donc pas détaillés suffisamment pour valider le modèle d'une manière réaliste. Les objectifs sont formulés et communiqués aux entités de base. Ces entités doivent faire en sorte d'atteindre ses objectifs sans les remettre en question, ce qui engendre inévitablement des écarts entre ce qui est prévue et ce qui est réalisé sur le

plan pratique. La Figure 45 présente synthétiquement les caractéristiques fondamentales de l'approche descendante.

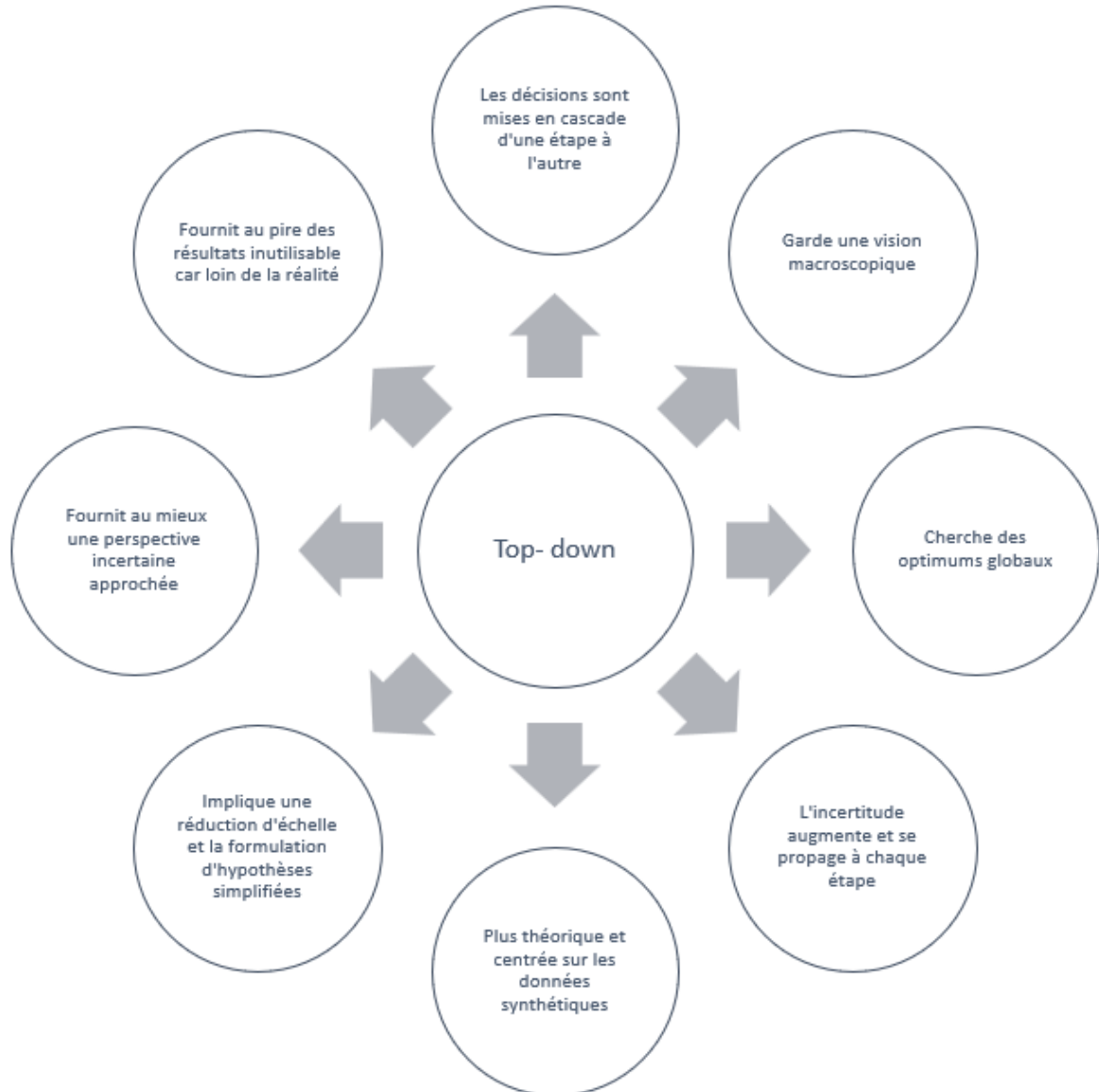


Figure 45 : Caractéristiques de l'approche descendante (Top-down)

La chaîne logistique minière commence par l'extraction des qualités sources dans les gisements miniers, ensuite ces QS produisent les QM demandés par les clients sur la base de divers mélanges selon la disponibilité en couches extraites et la charte qualité à respecter en termes de composition chimique. Ces QM sont acheminés vers les stations de traitement pour être transformés et/ou enrichie selon les besoins, ensuite transportés vers les unités portuaires pour être expédiés vers leurs clients respectives.

Cependant le schéma décisionnel pour le pilotage de cette chaîne s'appuie sur une approche descendante comme décrit dans la Figure 46.

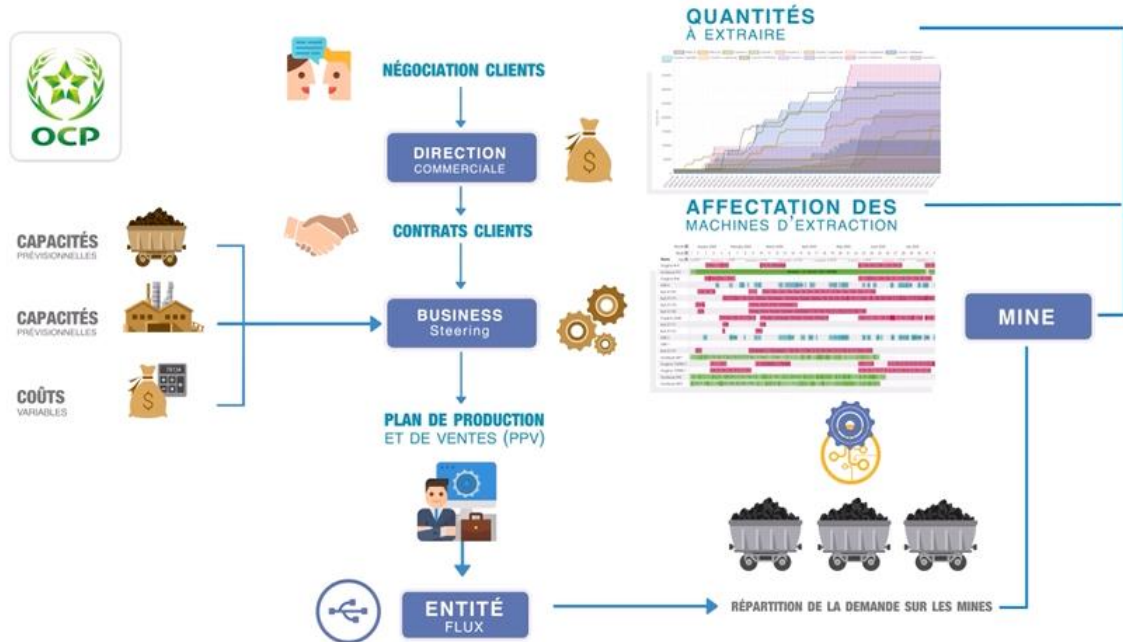


Figure 46 : schéma décisionnelle descendant de la chaîne minière OCP

Dans le schéma décisionnel du partenaire industriel, les premières décisions sont prises par la direction commerciale qui négocie avec les clients des contrats fermes. Ensuite l'entité business steering se charge de la formulation du plan de production et de vente (PPV) en intégrant les contrats du client précisant les QM souhaités en nature et en quantité, les capacités des mines et des unités de traitement ainsi que les coûts associés à l'exploitation et la transformation du phosphate. L'élaboration du plan PPV, constitue l'étape de formulation des objectifs dans une démarche descendante, ses objectifs sont ensuite ventilés vers les échelons inférieurs du système piloté. Dans notre cas, c'est l'entité flux qui se charge de la répartition de la demande ou besoins du client sur les mines d'extraction selon la nature des couches phosphatés dans chaque mine. Le but de l'approche top-down dans ce contexte consiste à garder une vision globale sur la chaîne logistique minière et transmettre les décisions formulées par le top-management aux dirigeants des mines pour exécution. L'échelon inférieur, dans ce cas, est représenté par une boîte noire ayant comme input les objectifs attribués et en output l'exécution de celle-ci. Aucun pouvoir n'est donné aux mines pour évaluer la faisabilité

pratique de ces objectifs, encore moins d'implémenter des changements ou des reformulations des objectifs. Aucune interface de confrontation de la réalité pratique avec les résultats d'optimisation globale n'est présente dans l'approche décisionnelle adoptée par le partenaire industriel. Nous considérons cet angle, un premier chantier de proposition alternative pour altérer la hiérarchie organisationnelle de prise de décision. Nous proposons donc dans un premier temps de construire le socle de l'approche ascendante au niveau de l'échelon inférieur source dans la chaîne logistique minière : la mine.

3.2. L'approche ascendante grâce au model SED

L'approche ascendante (Bottom-up) consiste à reconstituer des sous-systèmes pour créer des systèmes plus complexes. Elle se base sur les données entrantes (inputs) provenant de l'environnement (terrain) pour former une perception. Dans une approche Bottom-up, les éléments de base du système sont d'abord spécifiés de manière détaillée. Ils sont ensuite reliés entre eux pour former des sous-systèmes plus grands, jusqu'à la formation d'un système complet de niveau supérieur. Cependant, cela peut aboutir à un enchevêtrement de sous-systèmes, développés isolément et soumis à une optimisation locale au lieu de servir un objectif global. Les caractéristiques fondamentales de l'approche ascendante sont présentées dans la Figure 47.

Dans notre cas, l'approche descendante est déjà utilisée comme Framework décisionnel de base. Nous proposons donc l'intégration de l'approche ascendante au niveau de la mine d'extraction via le modèle de simulation à événements discrets. Ce modèle a comme objectif de reproduire fidèlement la réalité du processus d'extraction des minerais dans la mine en respectant et formulant au plus juste les contraintes opérationnelles du terrain (Figure 48). Il s'alimente de données réelles : structurelles, liées à la nature géologique du gisement, aux ressources matérielles utilisés pour l'extraction des minerais et aux opérations élémentaires constituant ce processus extractif en détails. Ainsi que des données dynamiques spécifiant l'évolution du gisement et de l'extraction au moment de la planification, les positions des machines dans le terrain et le temps opératoire qu'ils doivent respecter avant d'être disponible pour une prochaine affectation.

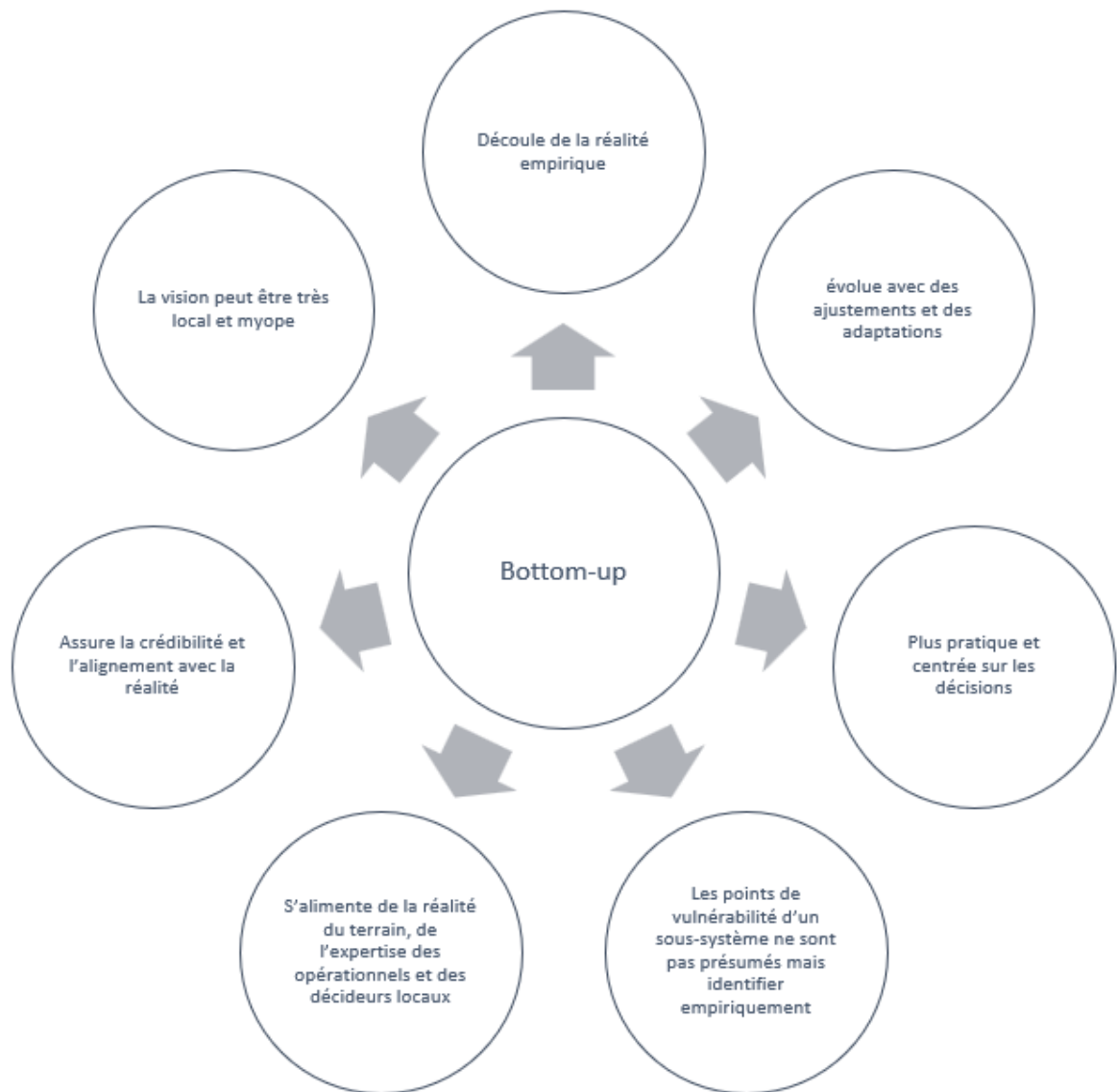


Figure 47 : Caractéristiques de l'approche ascendante (Bottom-up)

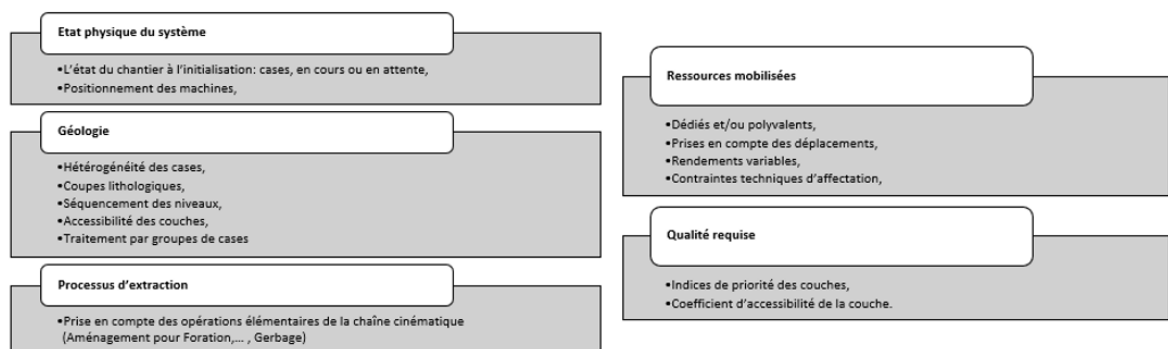


Figure 48 : Nature des données réelles provenant du terrain, intégrées dans le modèle SED

Toutes ces données entrantes provenant directement du terrain permettent de construire des programmes de planification cohérents techniquement et faisables pour les dirigeants de l'entité mine. Le modèle SED est donc utilisé dans notre contexte comme socle d'intégration de l'approche ascendante. La génération automatique de plusieurs scénarios de planification opérationnel-tactique permet d'offrir aux dirigeants minier un outil de gestion qui leurs ouvrent la porte de négociation et discussion des possibilités de planification de l'extraction pour aboutir aux objectifs formulés par l'approche descendante, ou bien de confronter très tôt l'infaisabilité pratique de ces derniers et proposer les ajustements nécessaires.

3.3. L'approche hybride basé sur le DSS

Après avoir analysé les deux approches, il est évident que chaque approche apporte la réponse aux failles de l'autre. La complémentarité décisionnelle entre les approches ascendantes et descendantes est indéniable. Dès lors, l'approche hybride porte les avantages de chaque approche à une fin de complémentarité. En effet, si le système suit une approche Bottom-up, il faut construire un modèle global qui relie les sous-systèmes et les évaluent globalement. Inversement, si le système suit une approche Top-down comme c'est le cas dans notre contexte, il s'avère pertinent de construire des modèles pour les sous-systèmes des échelons inférieurs, afin d'offrir plus de détails sur le fonctionnement de ces entités considérées comme des boîtes noires dans l'approche descendante. (Voir Figure 49)

Nous optons pour une approche hybride prenons base sur un DSS de planification minière tactique-opérationnel, dans le but de réconcilier le manque de détails sur les pratiques et les défis miniers opérationnels résultant d'une réalité vécue par les dirigeants minier. Le DSS constitue l'outil proposé aux décideurs miniers dans une optique d'affinement et d'amélioration du processus de prise de décision, il permet donc à l'entité mine d'adopter un programme de planification efficace et réaliste sur le court et moyen terme et qui assure aussi la satisfaction de la demande fournit par le business steering au cours de l'horizon de planification.

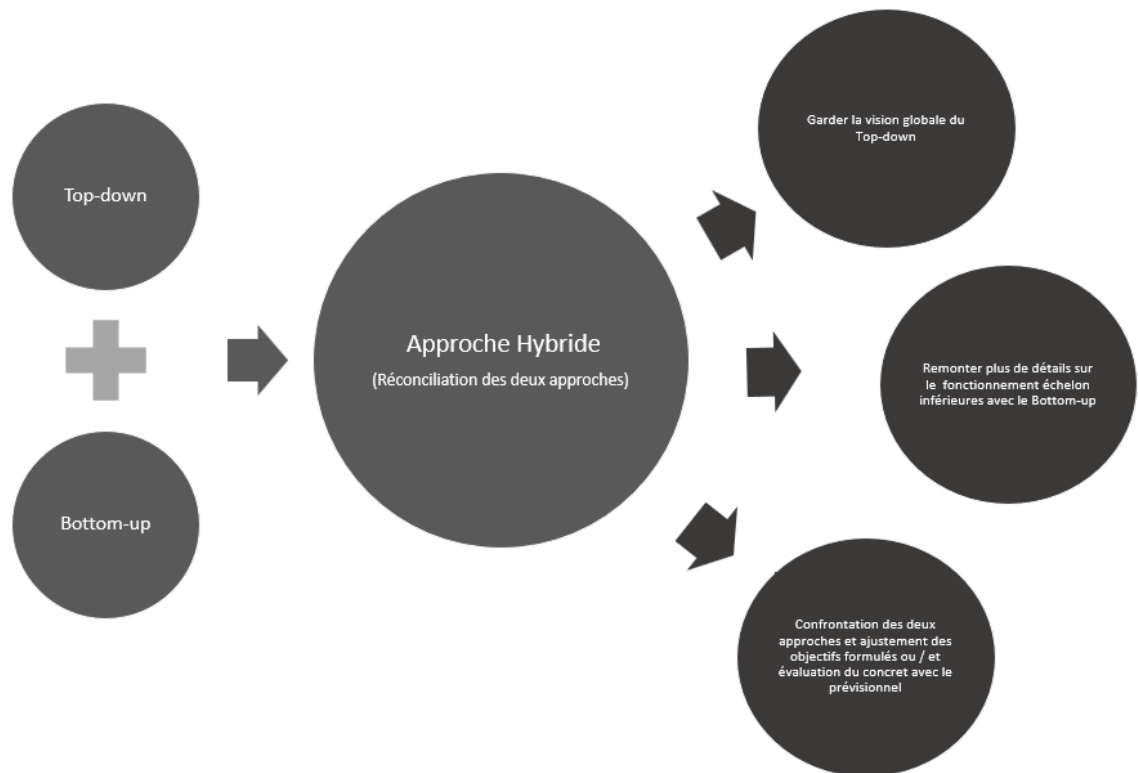


Figure 49 : schéma de l'approche hybride proposée

Il propose aussi l'étude de l'aspect stochastique de la demande en intégrant l'étude de robustesse permettant d'évaluer la capacité des programmes d'extraction générés à faire face aux éventuelles fluctuations de la demande et en présentant une analyse multicritère des scénarios alternatives au sens Pareto, offrant ainsi aux décideurs les 3 scénarios présentant les meilleurs compromis (Trade-off) entre les critères de décisions des dirigeants et décideurs de la mine. Comme la montre la Figure 50, le DSS est donc l'interface de réconciliation de décisions formulées par l'approche descendante et les critères de réalisabilité technique remontés par l'approche ascendante. Le SED agit comme un Bottom-up, il reproduit de manière fidèle la réalité du processus extractif en intégrant les contraintes du terrain, les règles de pilotage formulés et programmés dans la simulation à partir de l'expertise du pôle planification, l'état initial d'évolution du gisement au moment de la planification et le positionnement ainsi que la disponibilité des machines d'extraction. Cela permet de générer des scénarios alternatifs assurant la cohérence technique et la faisabilité pratique sur le terrain. Nous remontons ensuite vers la réconciliation avec les objectifs du top-down. En effet, nous retenons des

décideurs du top-management (entité nommé business steering) les quantités et la nature des qualités marchandes demandées par le client ainsi que la charte qualité que nous devons respecter pour assurer la faisabilité commerciale. Ensuite nous retenons du consensus entre les dirigeants de la mine le niveau de robustesse privilégié à 80%, le besoin de minimisation des déplacements des machines d'extraction critiques. Le top-management intègre aussi une préférence pour les scénarios qui maximise le volume d'extraction annuelle pour s'aligner avec l'objectif stratégique d'augmentation progressive des quantités d'extraction fixé actuellement à 6 millions de tonnes. Nous intégrons donc tous ces choix décisionnels comme des critères de sélection dans l'heuristique de filtrage multicritères pour aboutir au sous-ensemble réduit de choix des scénarios performants constitués de 3 ou 2 scénarios à comparer et valider par les dirigeants du Bottom-up et les décideurs du top-down.

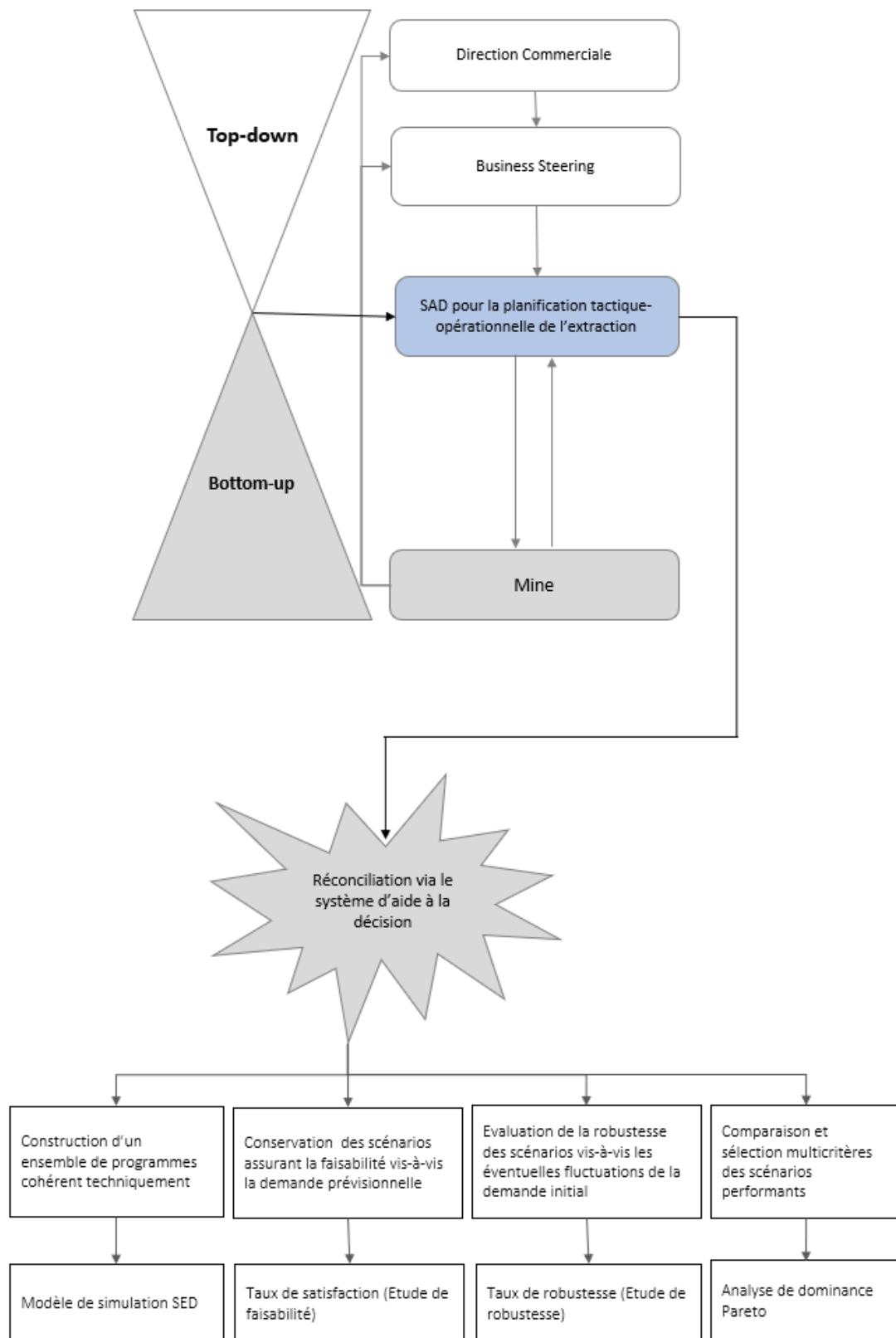


Figure 50 : Positionnement du DSS comme outil de réconciliation entre les décisions descendantes et ascendantes

4. CONCLUSION

Ce chapitre nous a permis de présenter le cadre de conception du système d'aide à la décision, d'expliquer les raisons qui nous ont poussés à faire rupture avec l'architecture classique des DSS, ainsi de mettre à l'avant notre propre architecture séquentielle conçue pour faire face aux enjeux décisionnels du problème traité. Dans un deuxième temps nous avons décrit les composants essentiels de ce système ainsi que leurs rôles respectifs. La troisième section s'est livrée à mettre en relief le rôle de l'outil proposé comme médiateur entre les intérêts décisionnels conflictuelles des dirigeants de la mine et des décideurs du top-management. En effet le DSS avec ses composants, permet d'arbitrer, de discuter et d'analyser les scénarios alternatifs pour converger vers des compromis sensé et pratique mais aussi optimal au sens Pareto, en conservant des scénarios performants et non dominés pour le choix final des décideurs.

Conclusion générale et perspectives de recherche

Les travaux de thèse présentés dans ce manuscrit s'inscrivent dans le cadre de la chaire OCP-SA du partenaire industriel, rattachée à l'EMINES School of Industrial Management -Université Mohamed VI Polytechnique et en collaboration avec le laboratoire de recherche LARGEPA en sciences de gestion. Ils visent la conception de modèles et d'outils managériaux d'aide à la décision permettant la résolution du problème de planification opérationnel tactique de l'extraction minière. Nos travaux sont dès lors rattachés à la thématique plurielle du Supply Chain Management (SCM). Nous mobilisons donc la modélisation mathématique, au service de l'aide à la décision en logistique, pour mettre en œuvre des outils pour la recherche opérationnelle et le management décisionnel. Les questions de recherche, enchâssées les unes aux autres dans cette thèse étaient formulées comme suite :

- **QR1** Comment peut-on produire une recherche qui alimente management logistique et ingénierie logistique dans le contexte de l'aide à la décision pour la chaîne logistique minière ?
- **QR2** Comment valoriser des travaux de recherche qui cherchent à la fois à améliorer la performance et la gestion décisionnelle tout en se basant sur une implémentation pratique et efficace de cette dernière dans la chaîne logistique minière ?
- **QR3.** Pourquoi souhaitons-nous concevoir des systèmes d'aide à la décision dédié au contexte de la Supply Chain minière? Qu'est-ce que ce contexte amène à la connaissance en général ?
- **QR4.** Comment concevoir un outil complet, adapté et efficace permettant d'accompagner les décideurs miniers dans la construction rapide et cohérente des programmes de planification de l'extraction ?

- **QR5.** Comment peut-on proposer une architecture du système d'aide à la décision adapté aux besoins décisionnels du contexte minier, en matière de fiabilité des données, fidélité de la modélisation au réel, comparaison et sélection des scénarii performants ?
- **QR6.** Comment simplifier la construction rapide et cohérente des programmes d'extraction à moyen et court terme en assurant le respect des contraintes techniques du gisement minier ?
- **QR7.** Comment évaluer et analyser l'ensemble des programmes d'extraction générés ? Quels sont les critères de sélection du programme d'extraction le plus performant qu'il convient d'adopter sur le terrain ?

Notre travail de recherche-action dans le contexte minier a donné lieu à une proposition d'un système d'aide à la décision multi-niveaux pour la planification tactique opérationnelle de l'extraction minière. La réalisation de cette proposition a nécessité une bonne compréhension des enjeux managériaux et ingénierique. Nous avons alors effectué une analyse des schémas décisionnels de la chaîne logistique minière pour comprendre les interconnexions organisationnelles, les objectifs des différentes parties décisionnelles, leurs besoins et les conflits qu'ils affrontent afin ensuite de proposer une approche hybride adaptée permettant la reliance entre les décideurs du top management et les dirigeants opérationnels. Nous avons également formulé les contraintes techniques et commerciales d'un système minier. Cette alimentation entre management logistique et ingénierie logistique, nous a permis de guider la construction du processus d'aide à la décision pour la chaîne logistique minière.

Notre démarche de recherche action cherche à comprendre, formuler, construire et tester un pilote logiciel en se basant sur une alimentation réelle et pratique du terrain d'étude, mais aussi sur des nombreuses collaborations continues (voir Annexe 3) avec les décideurs pour recueillir d'un côté leurs recommandations et validations au fur et à mesure de l'évolution du travail et d'un autre côté, les accompagner dans la réflexion collective et la conviction progressive par l'intérêt du travail de recherche et son rôle à la fois à améliorer la performance et la gestion décisionnelle.

En guise de synthèse, le chapitre 1 décrit le contexte général de notre projet de thèse sous trois angles nécessaires et complémentaires à la bonne compréhension du projet de thèse ; notamment le contexte scientifique, organisationnel et industriel. Nous spécifions aussi dans ce chapitre les questions de recherche et les facteurs de complexité identifiés. Ensuite le chapitre 2 dresse un état de l'art afin de positionner notre travail, identifier les gaps dans la littérature ainsi que mettre en valeur les apports scientifiques et managériales de nos travaux vis-à-vis les recherches existantes. Les chapitres 3,4 et 5 proposent, avec une approche du particulier au général, le modèle de simulation conçue pour reproduire fidèlement le processus d'extraction du phosphate en intégrant les contraintes techniques suivant une approche Bottom-up ainsi que pour automatiser et faciliter la génération automatique des scénarios alternatifs cohérents d'extraction. Ensuite nous exposons les niveaux de filtrage multicritères basé sur une heuristique, permettant de raffiner et structurer le processus de prise de décision concernant les meilleurs scénarios à valider comme programme d'extraction à adopter sur le terrain. Finalement, nous présentons la proposition fondamentale de ce travail de thèse dans son intégralité, en détaillant le système d'aide à la décision mis en œuvre pour accompagner les dirigeants miniers dans la planification de l'extraction opérationnel tactique. Nous décrivons donc les composants et l'architecture séquentielle du DSS et nous discutons du rôle du système d'aide à la décision proposé comme point médiateur de réconciliation et confrontation des objectifs.

De nombreux travaux en Sciences de Gestion distinguent les implications managériales des implications théoriques. Encore plus, la recherche action se rapporte à la compréhension et à l'amélioration du monde réel, où comme le spécifie [Hadorn et al, 2008] du « monde de la vie ». Ce type de recherche permet donc aux chercheurs de travailler de concert avec des praticiens pour explorer et résoudre des problèmes pratiques, dans ce sens les travaux de Science de Gestion basé sur une recherche action dépasse les frontières académiques et offre une recherche « sur, pour et avec » les praticiens [Cameron et al, 1992]. Nous analysons donc ci-dessous successivement les implications managériales représentant les éléments de la recherche applicable à l'entreprise puis les apports théoriques résultant de nos différentes propositions de

modèles et des outils pour résoudre le problème de planification opérationnel tactique. En guise de conclusions, nous explorant les perspectives de notre travail de thèse.

■ Implications managériales

L'environnement de planification et d'aide à la décision proposé offre aux industriels un outil complet et pertinent leur permettant un ensemble d'apports managériaux. Nous distinguons les implications managériales pour l'entité Mine d'une part puis pour la Supply Chain minière d'autre part.

➤ Implications pour l'entité Mine :

- Le modèle SED permet d'automatiser la construction d'un programme d'extraction reproduisant finement le fidèlement le processus d'extraction minière ; il apporte donc une approche d'intelligence artificielle permettant au décideur de comparer planification manuelle et planification assistée mais surtout d'accélérer la prise de décision en réunion.
- Le modèle SED respecte les contraintes techniques complexes du secteur minier (géologie et nature sédimentaire du gisement, succession des opérations élémentaires, capacités et règles d'affectations des machines d'extraction)
- Le modèle SED permet l'exploration des différentes possibilités des programmes cohérents techniquement par la génération d'un ensemble de scénarios alternatifs via la variation des paramètres de pilotage de la simulation.
- Le travail effectué en collaboration avec l'équipe géologique, sur la mise à jour globale de la base de données structurale du gisement minier qui au départ a été identifié lors des tests comme une source d'incohérence et de données non consistante, constitue actuellement à l'issue de son utilisation dans ce travail une base fiable non seulement pour le simulateur mais aussi pour l'utilisation en interne par l'équipe de planification et de géologie.

- Le composant de gestion des données faisant partie de l'architecture du DSS conçus, facilite la gestion des données structurelles mais aussi l'import et l'intégration des données dynamiques via des fichiers Excel au moment de la planification, afin de garantir la précision et la fidélité du passage de terrain réel vers l'environnement simulé.
- Le système d'aide à la décision proposé offre à l'équipe de planification la possibilité de comparer les meilleurs scénarios alternatifs et propose une base de discussions à la fois riche et pratique aux dirigeants miniers pour animer les réunions internes et les rendre plus efficace.
- Le système d'aide à la décision pour la planification de l'extraction minière permet aussi aux dirigeants miniers de visualiser dans des formes familières les résultats d'un scénario d'extraction, à savoir : les courbes d'alimentation par couche source, le Gantt d'affectation par machine d'extraction et par opération ainsi que la visualisation 3D de l'évolution prévue sur terrain à la suite de l'adoption d'un scénario.
- Le système d'aide à la décision encapsulant deux modèles complémentaires en plus d'une interface de gestion de données dynamiques et structurelles et d'une interface de visualisation des conséquences spatio-temporelle de chaque scénario généré ; permet aux utilisateurs d'avoir un outil complet, pratique et centralisé pour gérer, discuter et valider la tâche complexe de planification opérationnel tactique sur un même endroit.

➤ Implications pour la Supply Chain minière :

- La mine constitue l'échelon source de la Supply Chain minière, la planification de l'extraction et ses résultats sont donc fortement liés à la suite de la chaîne minière. L'élargissement des fonctionnalités du DSS proposé a été fait fondamentalement pour réussir à intégrer le nature multicritère du processus

décisionnel et comprendre les besoins des décideurs de la Supply Chain minière dans un cadre plus large.

- La conception de l'heuristique multicritère a permis d'étendre le rôle du DSS proposé, d'un système d'aide à la décision pour la l'ordonnancement technique opérationnel vers un système d'aide à la décision pour la planification opérationnel et tactique avec l'intégration de l'analyse multicritère des solutions pour raffiner le processus décisionnel. Autrement dit d'un simple Bottom-up vers un point de réconciliation hybride entre Bottom-up et top-down.
- Les niveaux conceptuels de l'heuristique ont été conçus pour répondre aux besoins d'évaluation des décideurs de la Supply Chain minière. Un bon programme d'extraction n'est donc pas réduit à sa cohérence technique et au respect des contraintes du terrain seulement mais aussi à sa capacité à satisfaire la demande sur le court terme et sur le long terme, sa capacité de faire face aux éventuelles fluctuations de la demande, le temps de déplacement annuel et le volume d'extraction annuel qu'il propose. Nous avons donc mis en place des niveaux conceptuels traitent l'étude de faisabilité commercial vis-à-vis la demande initial, l'étude de robustesse pour évaluer la capacité des scénarios à assurer la satisfaction de la demande en cas de perturbation et finalement nous avons fait en sorte de ne pas négliger un critère au dépend d'un autre en choisissant l'approche de dominance au sens Pareto permettant de sélectionner les meilleurs scénarios compte tenu des critères conflictuels.
- L'usage de cet outil d'aide à la décision peut sans doute montrer comment la collaboration permet de générer des externalités positives et convaincre les différents acteurs de la nécessité de collaborer, échanger et ajuster si besoin leurs objectifs pour trouver le meilleur Trade-off à appliquer. Il permet aussi d'améliorer la compréhension des enjeux décisionnels dans un tel contexte en explorant, comparant et évaluant plusieurs alternatives.

Le Tableau 27 reprend successivement les besoins constatés à la suite de l'analyse du terrain, spécifie le composant du DSS répondant à ce besoin et synthétise l'apport managérial.

Tableau 27 : Implications managériales des éléments constituant la proposition du système d'aide à la décision

Besoin constaté à la suite de l'analyse du terrain	Composant du DSS répondant au besoin	Apport managérial
Formalisation du processus de l'extraction et des contraintes techniques	Composant 2 du DSS / Modèle SED	La modélisation du processus extractif et de ces contraintes permet d'avoir une meilleure compréhension des enjeux opérationnels et de la complexité du problème de planification opérationnel tactique dans le contexte minier. Aussi elle offre aux dirigeants miniers un premier Framework du Bottom-up formalisé et fidèle à la réalité de leur terrain.
Automatisation de la construction d'un programme d'extraction	Composant 2 du DSS / Modèle SED	Le manque d'adaptation des outils de planifications générique commercialisés à la complexité du terrain minier, a fait que le pôle planification été condamné à la tâche chronophage de la planification manuelle et ensuite aux conséquences d'ajustements répétitives de correction au fur et à mesure de l'avancement de son exécution sur le terrain. L'automatisation et la digitalisation de ce processus permet donc un gain en temps et en structuration du processus de la planification minière.
Planification sur un horizon tactique annuel avec une maille de précision opérationnelle horaire	Composant 2 du DSS / Modèle SED	Le choix de la simulation permet de modéliser le processus d'extraction avec un degré de granularité très fine tout et donc offre la possibilité d'augmenter la précision sur le choix des cases à extraire et des affectations des machines aux opérations et aux blocs respectives à traité. Mais permet aussi de simuler un scénario d'extraction sur

		un horizon moyen terme de 12 mois, en liant le module de gestion de données au modèle de simulation pour l'alimentation directe en données d'entrées du gisement à l'instant de la planification.
Exploration de plusieurs scénarios d'extraction techniquement cohérents	Composant 2 du DSS / Modèle SED	Après l'automatisation, il été possible pour les dirigeants miniers de simuler la construction d'un programme d'extraction annuel cohérent en 2 min, cela a ouvert le champ d'exploration des scénarios alternatifs. Nous avons mis en place une interface permettant à l'utilisateur de lancer un ensemble petit d'instances en précisant lui-même les variations en termes de paramètres de pilotages de la simulation sur le DSS, ou mieux encore choisir juste le nombre d'instance voulu en cas de nombre important d'instances et choisir l'option de la génération automatique des paramètres de pilotages. Par exemple nous avons fait l'expérience de simulé 100 scénarios alternatifs annuels en 3h30 min. une demi-journée sera donc suffisante pour simuler, analyser et discuter sur le choix d'un PE Annuel.
Fiabilisation et mise à jour de la base de données structurée liée à l'étude géologique du gisement minier	Composant 1 du DSS / Module de gestion des données	Eliminer les sources d'incohérences et non consistance liée aux données structurées, éviter la dévalorisation de la modélisation du SED à la suite des risques du « Garbage in Garbage out ». Fiabilisation des données et intégration dans le module de gestion des données du DSS. Alimentation correcte du modèle de simulation et partage de la nouvelle data base avec les équipes internes de planification et de géologie pour d'autre utilisation.

Possibilité de comparaison entre deux programmes d'extraction	Composant 4 du DSS / Module de visualisation	Visualisation des résultats d'un scénario d'extraction dans des formes familières facilitant ainsi l'appropriation de l'outil. Proposition d'une base de discussions à la fois riche et pratique aux dirigeants miniers pour animer les réunions internes et les rendre plus efficace.
Visualisation 3D de l'évolution prévue de l'extraction sur le terrain	Composant 4 du DSS / Module de visualisation	Accentuer l'aspect virtuel visuel permettant d'imaginer l'évolution après un an sur le terrain et les retombés en espace-temps des choix des cases à extraire et du positionnement des machines au cours de l'extraction.
Possibilité de synthétiser des rapports globaux et spécifique sur une période précise spécifiant le choix des cases à extraire, le volume à extraire et le Gantt d'affectation des machines	Composant 4 du DSS / Module de visualisation	Ajouter de la flexibilité et de l'efficacité au processus décisionnel de la planification minière. Permettant à la fois d'avoir un programme d'extraction global sur l'année et des Zoom in d'ordonnancement de l'extraction par jour, semaine et mois.
Elimination préalable de tout scénario ne pouvant pas satisfaire la demande sur le court ou/et moyen terme	Composant 3 du DSS / Heuristique de filtrage multicritères	Assurer la satisfaction de la demande sur le court et moyen terme avant de commencer à exécuter un programme d'extraction sur le terrain. Cela permet d'éviter les ajustements répétitifs dus à la validation précoce d'un programme d'extraction en faisant une étude de faisabilité rapide et parfois incorrecte sur le court terme.
Evaluation du comportement des scénarios alternatifs face aux éventuelles fluctuations de la demande	Composant 3 du DSS / Heuristique de filtrage multicritères	Etudier le comportement et évaluer la capacité des scénarios à assurer la satisfaction de la demande en cas de perturbation
Prise en compte à la fois des objectifs stratégique et opérationnel dans le choix du scénario performant	Composant 3 du DSS / Heuristique de filtrage multicritères	Sélectionner les meilleurs scénarios compte tenu des critères conflictuels et permettre de confronter les objectifs différents des dirigeants opérationnel et décideurs

		stratégiques pour offrir des alignements, réconciliation ou ajustements possibles.
Garder une sauvegarde des scénarios alternatifs étudiés pour des analyses et suivie futures	Composant 1 du DSS / Module de gestion des données	Ouvrir la possibilité de l'apprentissage et de suivi des décisions prises concernant la planification opérationnel tactique et constituer une base de données des scénarios performants choisis avec une feed back Loop après l'exécution sur terrain qui peut donner la possibilité de faire un upgrade futur en matière d'utilisation de l'intelligence artificiel pour l'apprentissage des motifs décisionnels.

■ Implications scientifiques

Les contributions principales de nos travaux de recherche s'inscrivent dans le cadre de la planification opérationnelle tactique et de l'aide à la décision, et par extension concernent différents champs disciplinaires qui le composent, notamment la Science de Gestion, l'Ingénierie logistique et la science de l'information. Il s'agit tout d'abord d'une construction scientifique basé sur un besoin industriel. A partir de l'état de l'art avancé dans le chapitre 2, nous avons retenu que très peu de travaux traitent de manière détaillée les problèmes de planification dans le secteur minier, particulièrement la planification opérationnelle tactique. Ensuite le choix de l'approche de simulation comme module de résolution, conduit à l'enrichissement de la littérature due au fait que la majorité des systèmes d'aide à la décision traitant des problèmes de planification se basent sur un module d'optimisation. Encore moins de travaux, utilisent la simulation comme un générateur principal de solutions alternatives.

Le Tableau 28 formalise successivement les écarts constatés à la suite de l'état de l'art effectué, spécifie la couche de l'environnement proposé qui répondant à ce besoin et synthétise l'apport théorique qui s'ensuit.

Tableau 28 : Implications scientifique des éléments constituant la proposition du système d'aide à la décision

Besoins constatés à la suite de l'état de l'art	Couche de l'environnement répondant au besoin	Apport théorique
Formaliser concrètement le problème de planification opérationnel tactique de l'extraction manière avec une approche simulateur	Modélisation via une simulation à événement discrets	Enrichissement de la littérature traitant les problèmes de planification minière avec une approche simulateur en contraste avec les approches d'optimisation fréquemment utilisée
Exploration de l'espace de solutions possible pour améliorer la compréhension de la complexité dissoute dans un programme de planification et ses retombés	Extension et adaptation du modèle SED autant que générateur de solutions alternatives	Très peu de DSS se base sur le module simulateur comme module de résolution, souvent utilisé comme méthode de validation des solutions d'autres modèles d'optimisation ou encore de raffinement des paramètres d'optimisation. Nous proposons la construction d'un ensemble de solutions cohérentes via la simulation comme outil permettant une modélisation plus fine et fidèle à la réalité.
Concevoir une méthode permettant de traiter simultanément plusieurs scénarios alternatifs et en choisir les meilleurs	Elaboration d'une heuristique de filtrage multicritère adaptée et basé sur la dominance et l'optimalité au sens Pareto	Proposition d'un Framework des niveaux conceptuels d'une heuristique d'analyse multicritères permettant l'exploration des solutions et la convergence vers la sélection d'un sous ensemble performant

Expliquer la non-pertinence et les limites du schéma classique des DSS basé sur une Loop de redéfinition du problème structuré dans certains contextes et besoin d'adaptation et d'extension architecturale des DSS	Architecture séquentielle adaptée au problème décisionnel traité	Proposition d'une nouvelle architecture séquentielle permettant d'utiliser le module de résolution simulateur comme outil de génération de solutions et le couplé avec un heuristique multicritère pour assurer la convergence et la sélection des meilleurs scénarios.
Renforcer le rôle des systèmes d'aide à la décision dans l'alignement des décisions opérationnel, tactique et stratégique. Non seulement dans la maîtrise locale de la résolution d'un problème précis	Mise en valeur du DSS conçus comme point de réconciliation décisionnel entre le Bottom-up et le Top-down	Avancement d'un Framework organisationnel décisionnel permettant d'utiliser le DSS par les décideurs stratégiques et les dirigeants opérationnels comme un outil de confrontation des objectifs et des critères significatifs pour chaque partie.
Elargir les applications des systèmes d'aide à la décision dans divers domaines afin de mieux comprendre les enjeux décisionnels et l'impact de l'aide à la décision sur les Supply Chain étudiés	Introduction et description détaillé du contexte et des enjeux réels de la planification et l'aide à la décision dans le secteur minier, plus particulièrement dans le cas d'une mine à ciel ouverte	Enrichissement de la littérature en matière de travaux traitent la conception et mise en œuvre d'un DSS pour la planification opérationnelle tactique dans le contexte riche et complexe de l'activité minière
Introduction de nouveaux Framework des systèmes d'aide à la décision faisant rupture avec le schéma classique pour répondre à un problème réel	Architecture du DSS proposé	Le Framework séquentiel du DSS peut être générique et être utilisé sur d'autres problèmes de planification avec comparaison de

		solutions alternatifs multi-objectifs
Formalisation de la modélisation du processus d'extraction minière du phosphate sous un environnement simulateur	Modélisation avec simulation à événements discrets	Le modèle de simulation peut être extrapolé sur d'autres mines à ciel ouvert de phosphate, en éditant les règles de pilotages si nécessaire, les ressources utilisées et en important d'autres données structurales dans le cas de dépôts sédimentaires
Framework d'une heuristique d'analyse multicritère avec une étape de screening et une optimisation au sens Pareto	Niveaux conceptuels de l'heuristique de filtrage multicritère	L'heuristique de filtrage multi-objectifs peut être adaptée à de nouveaux critères de décision dans un autre problème visant à sélectionner les meilleures alternatives parmi un ensemble de solutions générées, en déterminant les critères d'élimination et les critères de comparaison par dominance de Pareto

■ Perspectives de recherche

Différentes perspectives d'évolutions de nos travaux de recherche peuvent être envisagées. Dans le cadre du partenariat industriel ainsi que dans la continuité du travail de recherche scientifique collective.

➤ *Perspectives vis-à-vis le terrain d'étude*

Dans la continuité du travail collaboratif avec le partenaire industriel, nous pouvons envisager les perspectives suivantes :

- Une intégration plus précise des perturbations de la demande, en suivant de plus près la fréquence de la variation de la demande sur au moins 5 ans de données collectés par maille mensuelle ainsi qu'en quantifiant cette variation par type. Cela peut nous offrir une piste d'amélioration de l'étude de robustesse incluse dans l'heuristique. L'intégration d'un modèle de prédiction des variations possibles sur un horizon de planification annuel conduira à raffiner et augmenter la précision du calcul du taux de robustesse pour chaque scénario et ensuite à une meilleure compréhension de la capacité des scénarios à contourner ces éventualités et garantir tout de même une satisfaction de la demande.
- L'extrapolation de la modélisation simulatoire du processus extractif dans une mine à ciel ouverte de phosphate est possible, en éditant les règles de pilotages si nécessaire, les ressources utilisées et en important d'autres données structurales dans le cas de gisement sédimentaire similaire. Cela permettra d'automatiser la construction des programmes d'extraction dans plusieurs sites similaire en nature et méthode d'exploitation. Il peut s'avérer aussi intéressant d'étendre les fonctionnalités de la modélisation pour traiter le cas de l'exploitation multi-sites.
- Après plusieurs itérations de planification en utilisant le DSS, il sera intéressant de collecter les données sur les scénarios choisis et analyser la pertinence des critères en fonction du poids d'intérêts susciter dans les échanges de comparaison des alternatifs, nous pouvons ensuite tenter de formuler une fonction d'agrégation et faire un Benchmark avec la méthode actuel.

➤ ***Perspectives vis-à-vis la recherche scientifique***

- Il sera intéressant d'intégrer une évaluation économique des scénarios proposés en introduisant un critère de coût dans l'analyse multicritère pour renforcer encore plus l'alignement entre décideurs stratégique et dirigeants opérationnels.
- Nous pouvons aussi appréhender, après appropriation de l'automatisation et de raffinement du processus de prise de décision de la planification de l'extraction

sur le terrain, la conception d'un modèle d'intelligence artificiel qui s'entraîne à prendre les décisions du choix automatique du meilleur scénario tenant compte de l'évolution sur le terrain et de l'historique des scénarios choisis et leurs niveaux de satisfaction après exécution.

- Tester l'outil d'aide à la décision et l'approche de réconciliation entre Bottom-up et top-down dans d'autres contextes similaires commençant par d'autres contextes miniers.
- La piste émergente de jumeau numérique ou digital twin est aussi à tester, comme une alternative de simulation avancée pour explorer le degré de pertinence et de viabilité à notre contexte d'étude.

En guise de conclusion, nous ouvrant le débat par les questions suivantes :

- Dans quelle mesure la conception des outils performants et adaptés aux besoins réels d'un contexte d'étude doit-elle s'aligner avec le niveau de maturité de l'entreprise pour assurer une assimilation et appropriation de la technologie associé par l'ensemble des utilisateurs d'un côté et améliorer la performance de l'entreprise et son processus de prise de décision de l'autre ?
- Les formes nouvelles émergentes des systèmes d'aide à la décision donnant réponse à des nouveaux besoins et des contextes plus complexes ne suscite-t-elle pas la création d'un consensus sur un nouveau Framework conceptuel générique et synthétique permettant de référencer l'évolution des systèmes d'aide à la décision faisant rupture avec l'architecture classique ?

Annexe 1 : Grille d'analyse de la revue de littérature (chapitre 2)

		Source	Année	Auteurs	Titre	N°
Modèle de planification	Stratégique				Overview of Surface Investigation Used in Truck Dispatching Systems for Open Pit Mines.	1
	Tactique					
	Tactique-opérationnelle	X				
	Communication-Driven					
	Model-Driven		X			
	Documents-Driven					
Typologie des DDS	Knowledge-Driven					
	Data-Driven	X				
	Design et analyse					
	Production et allocation	X	X	X		
	Distribution et transport	X		X		
	Gestion des stocks		X	X		
Fonctionnalités traitées par le DDS	Gestion des coûts			X		
	Gestion des risques		X			
	Marketing et ventes					
	Gestion de la qualité					
	Manufacturier					
	Minier	X	X	X	X	X
Domaine d'application	Santé					
	Construction					
	Maritime					
	énergie					
	environnement					
	Agriculture					
Modèle de résolution	Optimisation	X	X	X		
	Simulation					
	Autres			X		
	Une solution		X	X		
	ensemble de solutions	X		X		
	Evaluation des solutions (SE)					
Intérêt de la simulation	Génération des solutions (SG)					
	Modèle de substitution (SB)					
	Modèle d'amélioration (AME)					
	Predictives	X				
	Exploratives		X			
	Normatives		X	X		
Typologie des solutions générées	Somme pondérée					
	AHP					
	AG					
	RBS					
	Pareto					
	RSM					
Méthodes de solutions des solutions alternatives	autres	X				

Méthode de sélection des solutions alternatives	Typologie des solutions alternatives	Intérêt de la simulation	Outils	Méthode de résolution	Domaine d'application	Fonction traitée par le DSS	Typologie des DSS	Modèle de planification	Stratégique	Tactique	Auteurs	Titre	N°
											Chen, C. & Li, H.	Fuzzy Model for Truck Allocation in Surface Mines.	21
											Perron, S., Adam, N., & Desautels, Y.	Operational time planning in truck scheduling: A simulation-optimization approach.	22
											Savitskiy, A., & Gungor, H.	A genetic algorithm approach for truck control planning in a smart system.	23
											Tsai, C. H., & Chen, C. T.	A heuristic optimization approach for truck scheduling in a smart system.	24
											Tan, Y. & Tsalikis, S.	A genetic algorithm approach for an effective truck dispatching system of open pit mines using VBA.	25
											Tan, Y. & Tsalikis, S.	Optimization models for scheduling ore and waste production in open pit mines.	26
											Underwood, R. & Chowdhury, R.	A mathematical programming approach for scheduling the mine production.	27
											Wang, L. L.	Dynamic programming approach for mining optimization planning.	28
											Wang, L. L.	Optimization models for dynamic scheduling of mining resources.	29
											Wang, L. L.	A mathematical programming approach for scheduling the mine production.	30
											Wang, L. L.	A heuristic optimization approach for scheduling the mine production.	31
											Wang, L. L.	A heuristic optimization approach for scheduling the mine production.	32
											Wang, L. L.	A heuristic optimization approach for scheduling the mine production.	33
											Wang, L. L.	A heuristic optimization approach for scheduling the mine production.	34
											Wang, L. L.	A heuristic optimization approach for scheduling the mine production.	35
											Wang, L. L.	A heuristic optimization approach for scheduling the mine production.	36
											Wang, L. L.	A heuristic optimization approach for scheduling the mine production.	37
											Wang, L. L.	A heuristic optimization approach for scheduling the mine production.	38
											Wang, L. L.	A heuristic optimization approach for scheduling the mine production.	39
											Wang, L. L.	A heuristic optimization approach for scheduling the mine production.	40
											Wang, L. L.	A heuristic optimization approach for scheduling the mine production.	41
											Wang, L. L.	A heuristic optimization approach for scheduling the mine production.	42
											Wang, L. L.	A heuristic optimization approach for scheduling the mine production.	43
											Wang, L. L.	A heuristic optimization approach for scheduling the mine production.	44
											Wang, L. L.	A heuristic optimization approach for scheduling the mine production.	45
											Wang, L. L.	A heuristic optimization approach for scheduling the mine production.	46
											Wang, L. L.	A heuristic optimization approach for scheduling the mine production.	47
											Wang, L. L.	A heuristic optimization approach for scheduling the mine production.	48
											Wang, L. L.	A heuristic optimization approach for scheduling the mine production.	49
											Wang, L. L.	A heuristic optimization approach for scheduling the mine production.	50
											Wang, L. L.	A heuristic optimization approach for scheduling the mine production.	51
											Wang, L. L.	A heuristic optimization approach for scheduling the mine production.	52
											Wang, L. L.	A heuristic optimization approach for scheduling the mine production.	53
											Wang, L. L.	A heuristic optimization approach for scheduling the mine production.	54
											Wang, L. L.	A heuristic optimization approach for scheduling the mine production.	55
											Wang, L. L.	A heuristic optimization approach for scheduling the mine production.	56
											Wang, L. L.	A heuristic optimization approach for scheduling the mine production.	57
											Wang, L. L.	A heuristic optimization approach for scheduling the mine production.	58
											Wang, L. L.	A heuristic optimization approach for scheduling the mine production.	59
											Wang, L. L.	A heuristic optimization approach for scheduling the mine production.	60

- 189 -

Annexe 2 : Plan du gisement de Ben Guérir (source interne OCP) (chapitre 1)



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

Date	Durée	Intervenants	Point clés discutés
01/10/2018	Demi-journée	visite du terrain - initiation	Comprendre le processus de l'extraction minière via des visites in situ. Assister à toutes les opérations élémentaires sur le terrain. Visiter les stocks et les laboratoires. Comprendre la chaîne logistique minière
08/10/2018	Demi-journée	visite du terrain - initiation	
15/10/2018	Demi-journée	visite du terrain - initiation	
22/10/2018	Demi-journée	visite du terrain - initiation	
29/10/2018	Demi-journée	visite du terrain - initiation	
16/11/2018	Demi-journée	Directeur du site de l'axe centre Directeur production de la mine de Benguérir Responsable de l'entité planification et performance du site de Gantour Directeur de l'EMINES, UM6P Directeur de l'Enseignement et de la Recherche à l'EMINES, UM6P	Présentation de l'état d'avancement des travaux de recherche développés par l'EMINES-UM6P au sein du site de Gantour. Présentation du prototype du modèle de simulation sur un panneau avec intégration des contraintes techniques. Discussion autour de la généralisation de ce prototype à l'ensemble des panneaux de la mine de Benguérir
21/02/2019	Demi-journée	Directeur production de la mine de Benguérir Responsable de l'entité planification et performance du site de Gantour Directeur de l'EMINES, UM6P Directeur de l'Enseignement et de la Recherche à l'EMINES, UM6P Directeur de thèse	Faire le point sur la généralisation du modèle de simulation sur tout les panneaux. Validation d'un premier programme de planification cohérent généré sur un horizon annuel. Discussions sur la génération de plusieurs scénarios pour explorer les scénarios alternatifs
07/03/2019	Demi-journée	Responsable de l'entité planification	Animation de workshop de validation et de test pour recueillir les recommandations des dirigeants opérationnels et confirmer la pertinence des scénarios générés
22/04/2019	Demi-journée	Responsable de la production	
18/06/2019	Demi-journée	Responsable de l'entité géologie	
06/09/2019	Demi-journée	Directeur production de la mine de Benguérir Responsable de l'entité planification et performance du site de Gantour Directeur de l'Enseignement et de la Recherche à l'EMINES, UM6P	Présentation de la première proposition du système d'aide à la décision pour améliorer la performance du processus de planification mais aussi la gestion décisionnelle.
17/10/2019	Demi-journée	Directeur du site de l'axe centre Directeur production de la mine de Benguérir Responsable de l'entité planification et performance du site de Gantour Directeur de l'EMINES, UM6P Directeur de l'Enseignement et de la Recherche à l'EMINES, UM6P	Avancement et discussions autour des défis rencontrés sur les incohérences au niveau des données structurelles d'entrées affectant la qualité des scénarii.
29/11/2019	Demi-journée	Directeur production de la mine de Benguérir Responsable de l'entité planification et performance du site de Gantour Directeur de l'EMINES, UM6P Directeur de l'Enseignement et de la Recherche à l'EMINES, UM6P Directeur de thèse	Avancement du système d'aide à la décisions et réflexions autour de la définition d'un scénario performants pour les différents décideurs

Date	Durée	Intervenants	Point clés discutés
05/12/2019	Demi-journée	Responsable de l'entité planification	Animation de workshop de validation et de test pour recueillir les recommandations des dirigeants opérationnels et comparer les scénarii générés. Collaboration avec l'entité géologique pour une mise à jour des données structurelles du gisement miniers
17/12/2019	Demi-journée	Responsable de la production	
23/12/2019	Demi-journée	Responsable de l'entité géologie	
07/02/2020	Demi-journée	Directeur production de la mine de Benguérir Responsable de l'entité planification et performance du site de Gantour Directeur de l'Enseignement et de la Recherche à l'EMINES, UM6P	Démonstration de l'utilisation de l'interface d'analyse des résultats du système d'aide à la décision Discussions autour de l'organisation d'un workshop avec l'équipe de planification portant sur la validation et la comparaison, entre le programme d'extraction 2020 de la mine et le programme généré par le modèle de simulation avec les données 2020 du gisement
10/04/2020	Demi-journée	Responsable de l'entité planification et performance du site de Gantour	Workshop de Validation du programme de planification 2020 généré par la simulation à événement discret Comparaison avec le programme actuelle de la mine .
05/06/2020	Demi-journée	Responsable de la production	Discussions de l'utilité d'effectuer des tests de robustesses portant sur l'intégration du phénomène de fluctuations de la demande
02/09/2020	Demi-journée	Responsable de l'entité géologie	
03/11/2020	Demi-journée	Responsable de l'entité planification et performance	Evaluation de la robustesse de l'ensemble de scénarios faisables + programme de la mine après formulation des vecteurs de perturbations
19/02/2021	Demi-journée	Responsable de l'entité planification et performance	Analyse et comparaison des meilleurs scénarios via le système d'aide à la décision
05/07/2021	Demi-journée	Directeur du site de l'axe centre Directeur production de la mine de Benguérir Responsable de l'entité planification et performance du site de Gantour Directeur de l'EMINES, UM6P Directeur de l'Enseignement et de la Recherche à l'EMINES, UM6P	Présentation de l'outil et ses résultats managériaux et techniques

Bibliographie

- Absi, N., Dauzère-Pérès, S., Kedad-Sidhoum, S., Penz, B., & Rapine, C. (2013). Lot sizing with carbon emission constraints. *European Journal of Operational Research*, 227(1), 55-61. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.11.044>
- Adhikari, I., Baral, A., Zahed, E., Abediniangerabi, B., & Shahandashti, M. (2021). Early-stage multi-criteria decision support system for recommending slope repair methods. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 38(2), 127-144. <https://doi.org/10.1080/10286608.2021.1923699>
- Alaoui, N., Azzamouri, A., Elfirdoussi, S., & Fénies, P. (2020). Conception d'un SIAD pour la planification minière : mise en œuvre dans le contexte minier de l'extraction du phosphate.
- Alaoui, N., Azzamouri, A., Elfirdoussi, S., & Fénies, P. (2021). Multi-criteria Filtering Approach for Comparison and Analysis of Scheduling Alternative Scenarios: Case Study on an Open Pit Phosphate Mine (p. 117-126). https://doi.org/10.1007/978-3-030-85914-5_13
- Alaoui, N., Azzamouri, A., Elfirdoussi, S., Fénies, P., & Giard, V. (2019a). Interactive Scheduling Decision Support System for ore extraction at a phosphate mine (p. 6). <https://doi.org/10.1109/IESM45758.2019.8948146>
- Alaoui, N., Azzamouri, A., Elfirdoussi, S., Fénies, P., & Giard, V. (2019b). Système interactif d'aide à la décision pour la planification de l'extraction minière.
- Alarie, S., & Gamache, M. (2001). Overview of Solution Strategies Used in Truck Dispatching Systems for Open Pit Mines. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment* (16), 59-76. <https://doi.org/10.1076/ijsm.16.1.59.3408>
- Alter, S.L. (1980). *Decision Support Systems: Current Practice and Continuing Challenge*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Akaike, A., & K. Dagdelen. (1999). A strategic production scheduling method for an open pit mine. C. Dardano, M. Francisco, J. Proud, eds. *Proc. 28th International Application Computer Operational Research. Mineral Industry. (APCOM) Sympos., SME, Littleton, CO*, 729-738.
- Aldy, J. E., & Stavins, R. N. (2012). The Promise and Problems of Pricing Carbon: Theory and Experience. *The Journal of Environment & Development*, 21(2), 152-180. <https://doi.org/10.1177/1070496512442508>
- Alford, C., Brazil, M., & Lee, D. H. (2007). Optimization in Underground Mining. In A. Weintraub, C. Romero, T. Bjørndal, R. Epstein, & J. Miranda (Éds.), *Handbook of Operations*

- Research in Natural Resources (Vol. 99, p. 561-577). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-0-387-71815-6_30
- Allen, T. (2014). Information Frictions in Trade. *Econometrica*, 82(6), 2041-2083. <https://doi.org/10.3982/ECTA10984>
- Andres Weintraub, Epstein, R., Morales, R., Seron, J., & Traverso, P. (1996). A Truck Scheduling System Improves Efficiency in the Forest Industries.
- Anthony, R. N. (1965). Planning and Control Systems: A Framework for Analysis. Division of Research, Graduate School of Business Administration, Harvard University.
- Ardjmand, E., Ghalekhondabi, I., Weckman, G. R., & Young, W. A. (2016). Application of decision support systems in scheduling/planning of manufacturing/service systems: A critical review. *International Journal of Management and Decision Making*, 15(3-4), 248-276. <https://doi.org/10.1504/IJMDM.2016.080703>
- Azzamouri, A. (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>
- Bargal, D., Gold, M., & Lewin, M. (1992). Introduction: The Heritage of Kurt Lewin—Bargal—*Journal of Social Issues*. <https://doi.org/10.1111/j.1540-4560.1992.tb00879.x>
- Baskerville, R. L. (1999). Investigating information systems with action research. *Communications of the AIS*, 2(3es), 4-es.
- Bednarczyk, Z. (2017). Slope Stability Analysis for the Design of a New Lignite Open-Pit Mine, *Procedia Engineering*, (191) : 51-58, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.153>.
- Bhargava, H. K., Power, D. J., & Sun, D. (2007). Progress in Web-based decision support technologies. *Decision Support Systems*, 43(4), 1083-1095. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2005.07.002>
- Boonsothonsatit, G., S. Kara, S. Ibbotson and B. Kayis. (2015). Development of a Generic decision support system based on multi-Objective Optimisation for Green supply chain network design (GOOG). *Journal of Manufacturing Technology Management* 26 (septembre). doi: 10.1108/JMTM-10-2012-0102.
- Bradley, C. E., Taylor, S. G., & Grey, W. I. (1985). Sizing Storage Facilities for Open Pit Coal Mines: *IIE Transactions*: Vol 17, 320-326. <https://doi.org/10.1080/07408178508975310>
- Browne, D., O'Regan, B., & Moles, R. (2009). Use of ecological footprinting to explore alternative domestic energy and electricity policy scenarios in an Irish city-region. *Energy Policy*, 37(6), 2205-2213. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.01.039>

- Buddea, L., Liaob, S., Haenggib, R., & Friedli, T. (2022). Use of DES to develop a decision support system for lot size decision-making in manufacturing companies. *Production & Manufacturing Research*, 10 (1), 494–518. <https://doi.org/10.1080/21693277.2022.2092564>
- Burt, C., & Caccetta, L. (2014). Equipment Selection for Surface Mining: A Review. *Interfaces* Vol. 44, No. 2, Special Issue: Operation Research in Mining (March-April 2014), pp. 143-162
- Busnach, E., Mehrez, A., & Sinuany-Stern, Z. (1985). A Production Problem in Phosphate Mining. *The Journal of the Operational Research Society* Vol. 36, No. 4 (Apr., 1985), pp. 285-288. <https://doi.org/10.2307/2582414>
- Cao, D., Zhang, B., Zhang, X., Yin, L., Man, X. (2023) Optimization methods on dynamic monitoring of mineral reserves for open pit mine based on UAV oblique photogrammetry, *Measurement*, (207) <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112364>.
- Carter, B. (2012). Boom, Bust, Boom: A Story about Copper, the Metal That Runs the World.
- Cassettari, L., Mosca, R. N., Revetria, & Rolando, F. (2013). Effectiveness and limits of response surface methodology in application to discrete and stochastic simulation of manufacturing plants. *Applied Mathematical Sciences* 7(81):4137-4172. Doi : 10.12988/ams.2013.212634
- Catroux, M. (2002). Introduction à la recherche-action : Modalités d'une démarche théorique centrée sur la pratique. *Recherche et pratiques pédagogiques en langues de spécialité. Cahiers de l'Apliut*, Vol. XXI N° 3. <https://doi.org/10.4000/apliut.4276>
- Chan, F. T. S., Jiang, B., & Tang, N. K. H. (2000). The development of intelligent decision support tools to aid the design of flexible manufacturing systems. *International Journal of Production Economics*, 65(1), 73-84. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(99\)00091-2](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(99)00091-2)
- Chaowasakoo, P., Seppälä, H., Koivo, H., & Zhou, Q. (2017). Digitalization of my operations: Scenarios to benefit in real-time truck dispatching. *International Journal of Mining Science and Technology*, 27(2), 229-236. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.01.007>
- Chen, H., Kang, J.-N., Liao, H., Tang, B.-J., & Wei, Y.-M. (2017). Costs and potentials of energy conservation in China's coal-fired power industry: A bottom-up approach considering price uncertainties. *Energy Policy*, 104, 23-32. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.01.022>
- Chitra, P., Rajaram, R., & Venkatesh, P. (2011). Application and comparison of hybrid evolutionary multi objective optimization algorithms for solving task scheduling problem on heterogeneous systems. *Applied Soft Computing*, 11(2), 2725-2734. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2010.11.003>
- Cho, M., Song, M., Yoo, S., & Reijers, H. A. (2019). An Evidence-Based Decision Support Framework for Clinician Medical Scheduling. *IEEE Access*, 7, 15239-15249. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2894116>

- Clark, D. N., & Scott, J. L. (1995). Strategic Level MS/OR Tool Usage in the United Kingdom: An Empirical Survey. *The Journal of the Operational Research Society* (46), 1041-1051. <https://doi.org/10.2307/2584491>
- Collins, B., & Kumral, M. (2020). Game theory for analyzing and improving environmental management in the mining industry. *Resources Policy*, 69. doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101860
- Comi, A., & Rosati, L. (2015). CLASS: A DSS for the Analysis and the Simulation of Urban Freight Systems. *Transportation Research Procedia* (5), 132-144. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2015.01.007>
- Creutzig, F., Popp, A., Plevin, R., Luderer, G., Minx, J., & Edenhofer, O. (2012). Reconciling top-down and bottom-up modelling on future bioenergy deployment. *Nature Climate Change*, 2(5), 320-327. <https://doi.org/10.1038/nclimate1416>
- Dayou, L., Pu, Y., & Ji, Y. (2009). Development of a multiobjective GA for advanced planning and scheduling problem. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 42(9), 974-992. <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1653-8>
- DeJong, D. H. (2021). John Collier: Commissioner of Indian Affairs (April 21, 1933–January 22, 1945). In *Paternalism to Partnership* (p. 273-282). University of Nebraska Press.
- Desai, K. M., Survase, S. A., Saudagar, P. S., Lele, S. S., & Singhal, R. S. (2008). Comparison of artificial neural network (ANN) and response surface methodology (RSM) in fermentation media optimization: Case study of fermentative production of scleroglucan. *Biochemical Engineering Journal*, 41(3), 266-273. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2008.05.009>
- Downing, D. J., Gardner, R. H., & Hoffman, F. O. (1985). An Examination of Response-Surface Methodologies for Uncertainty Analysis in Assessment Models. *Technometrics*, 27(2), 151-163. <https://doi.org/10.1080/00401706.1985.10488032>
- Draperi, J.-F. (2014). Henri Desroche aurait cent ans. *Revue internationale de l'économie sociale : recma*, 334, 99-110. <https://doi.org/10.7202/1027279ar>
- Engelstad, & Hellums. (1993). Utilisation des phosphates naturels pour une agriculture durable. <https://www.fao.org/3/y5053f/y5053f05.htm>
- Eom, S., & Kim, E. (2006). A survey of decision support system applications (1995–2001). *Journal of the Operational Research Society*, 57(11), 1264-1278. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602140>
- Epstein, R., Goic, M., Weintraub, A., Catalán, J., Santibáñez, P., Urrutia, R., Cancino, R., Gaete, S., Aguayo, A., & Caro, F. (2012). Optimizing Long-Term Production Plans in Underground and Open-Pit Copper Mines. *Operations Research*, 60(1), 4-17.

- Fanti, M. P., Iacobellis, G., Ukovich, W., Boschian, V., Georgoulas, G., & Stylios, C. (2015). A simulation-based Decision Support System for logistics management. *Journal of Computational Science*, 10, 86-96. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2014.10.003>
- Féniès, P. (2006). Une méthodologie de modélisation par processus multiples et incrémentiels : Application pour l'évaluation des performances de la Supply Chain [Thèse de doctorat, Clermont-Ferrand 2]. <https://www.theses.fr/2006CLF21703>
- Felsberger, A., Oberegger, B., & Reiner, G. (2016). A Review of Decision Support Systems for Manufacturing Systems. Conference: i-KNOW, 8, Austria. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.495120>
- Figueira, G., & Almada-Lobo, B. (2014). Hybrid simulation–optimization methods: A taxonomy and discussion. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 46, 118-134. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2014.03.007>
- Fildes, R., & Ranyard, J. C. (1997). Success and Survival of Operational Research Groups-A Review. *The Journal of the Operational Research Society*, 48(4), 336-360. <https://doi.org/10.2307/3010262>
- Fraga-Levivier, A. P. V., & Tourrilhes, C. (2012). La recherche-action comme cadre de formation en travail social. *Pensée plurielle*, 30-31(2-3), 243-253. <https://doi.org/10.3917/pp.030.0243>
- Freed, T. (2007). In-house development of scheduling decision support systems: Case study for scheduling semiconductor device test operations. *International Journal of Production Research* (45), 5075-5093. <https://doi.org/10.1080/00207540600818351>
- Frimpong, S., Asa, E., & Szymanki, J. (2010). Intelligent Modeling: Advances in Open Pit Mine Design and Optimization Research: *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*: Vol 16, No 2.
- Galasso, F., Mercé, C., & Grabot, B. (2008). Decision support framework for supply chain planning with flexible demand: *International Journal of Production Research*: Vol 47, No 2.
- Gelly, P. (1999, 2000). Managing Bottom Up and Top-Down Approaches: Ocean Spray's Experience | Managing Bottom Up and Top-Down Approaches Ocean Sprays Experience 524
- Gershon, M. E., & Murphy, F. H. (1989). Optimizing single hole mine cuts by dynamic programming. *European Journal of Operational Research*, 38(1), 56-62. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(89\)90468-2](https://doi.org/10.1016/0377-2217(89)90468-2)
- Giordano, P. C., Pereyra, V., Beccaria, A. J., Vero, S., & Goicoechea, H. C. (2020). Application of pareto-optimal front as an option to desirability function for the optimization of a microbiological process. *Microchemical Journal*, 155, 104682. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.104682>

- Goldsman, D., Nelson, B., Opicka, T., & Pritsker, A. (1999). A ranking and selection project: Experiences from a university-industry collaboration. Winter Simulation Conference Proceedings. 'Simulation - A Bridge to the Future, IEEE, 92. <https://doi.org/10.1145/324138.324165>
- Goodman, G. V. R., & Sarin, S. C. (2007). Using mathematical programming to develop optimal overburden transport strategies in a surface coal mining operation: International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment: Vol 2, No 1.
- Gorry, G., & Morton, M. (2015, September 9). A Framework for Management Information Systems.
- Greenwood, D., & Brydon-Miller, M. (2006). A re-examination of the relationship between action research and human subjects review processes—Mary Brydon-Miller, Davydd Greenwood, 2006. <https://doi.org/10.1177/1476750306060582>
- Greenwood, D. J., & Levin, M. (2007). Introduction to Action Research: Social Research for Social Change. SAGE Publications.
- Gunantara, N., & Hendrantoro, G. (2013). Multi-objective cross-layer optimization with Pareto method for relay selection in multihop wireless ad hoc networks. Wseas transactions on communications. Volume 12.
- Guo, Z. X., Wong, W. K., Li, Z., & Ren, P. (2013). Modeling and Pareto optimization of multi-objective order scheduling problems in production planning. Computers and Industrial Engineering, 64(4), 972-986. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.01.006>
- Guo, Z. X., Wong, W., Leung, S., Fan, J., & Chan, S. (2008). Genetic optimization of order scheduling with multiple uncertainties. Expert Syst. Appl., 35, 1788-1801. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2007.08.058>
- Gupta, P., Mehlaawat, M. K., Aggarwal, U., & Charles, V. (2021). An integrated AHP-DEA multi-objective optimization model for sustainable transportation in mining industry. Resources Policy, 74, 101180. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.04.007>
- Hamrin, H. (1986). Guide to underground mining methods and applications ([3rd ed.]). Atlas Copco.
- Hanf, K. (1982). Regulatory Structures: Enforcement as Implementation—European Journal of Political Research.
- Heilala, J., Montonen, J., Järvinen, P., Kivikunnas, S., Maantila, M., Sillanpaa, J., & Jokinen, T. (2010). Developing simulation-based Decision Support Systems for customer-driven manufacturing operation planning. In Proceedings—Winter Simulation Conference (p. 3375). <https://doi.org/10.1109/WSC.2010.5679027>

- Henggeler, C., & Oliveira, C. (2016). Multi-Objective Optimization and Multi-Criteria Analysis Models and Methods for Problems in the Energy Sector. *International Series in Operations Research & Management Science*, (233): 1067-1165. https://doi/10.1007/978-1-4939-3094-4_25.
- Herrera-León, S., Lucay, F. A., Cisternas, L. A., & Kraslawski, A. (2019). Applying a multi-objective optimization approach in designing water supply systems for mining industries. The case of Chile. *Journal of Cleaner Production*, 210, 994-1004. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.081>
- Hethmon, T. A., & Dotson, K. B. (s. d.). Méthodes pour exploiter en mine à ciel ouvert—Métaux stratégiques R21.
- Hilali, H. (2020, décembre). Soutenance de thèse Hajar HILALI. IGR IAE Rennes. <https://www.igr.univ-rennes.fr/fr/soutenance-de-these-hajar-hilali/>
- Hillier, P. H., Jean. (2008). Susan Barrett and Colin Fudge (1981), « Examining the Policy-Action Relationship », in Susan Barrett and Colin Fudge, *Policy and Action*, London: Methuen, pp. 3-32. In *Foundations of the Planning Enterprise*. Routledge.
- Hinton, J. J., Veiga, M. M., & Veiga, A. T. C. (2003). Clean artisanal gold mining: A utopian approach? *Journal of Cleaner Production*, 11(2), 99-115. [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(02\)00031-8](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(02)00031-8)
- Hjern, B. (1982). Implementation Research: The Link Gone Missing. *Journal of Public Policy*, 2(3), 301-308.
- Hjern, B., & Hull, C. (1982). Implementation Research as Empirical Constitutionalism. *European Journal of Political Research*, 10(2), 105-115. <https://doi.org/10.1111/j.1475-6765.1982.tb00011.x>
- Hochbaum, D. S., & Chen, A. (2000). Performance Analysis and Best Implementations of Old and New Algorithms for the Open-Pit Mining Problem. *Operations Research*, 48(6), 894-914.
- Holsapple, C.W. & Whinston, A.B. (1996). *Decision Support Systems: A Knowledge-based Approach*. Minneapolis, MN: West Publishing Co.
- Hou, Y., Wu, N., Li, Z., Zhang, Y., Qu, T., & Zhu, Q. (2020). Many-objective optimization for scheduling of crude oil operations based on NSGA-III with consideration of energy efficiency. *Swarm and Evolutionary Computation*, 57, 100714. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2020.100714>
- Howe, K. R. (1988). Against the Quantitative-Qualitative Incompatibility Thesis or Dogmas Die Hard. *Educational Researcher*, 17(8), 10-16. <https://doi.org/10.2307/1175845>

- Ishibuchi, H., & Murata, T. (1998). A multi-objective genetic local search algorithm and its application to flow shop scheduling. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 28(3), 392-403. <https://doi.org/10.1109/5326.704576>
- Jalali, S. E., Ataee-pour, M., & Shahriar, K. (2006). Pit limits optimization using a stochastic process. *Canadian institute of mining, Bulletin*, Vol. 1, No. 6.
- Jeffrey, P., & Seaton, R. (1995). The Use of Operational Research Tools: A Survey of Operational Research Practitioners in the UK. *Journal of the Operational Research Society*, 46(7), 797-808. <https://doi.org/10.1057/jors.1995.113>
- Jie, Q. (2022). Precision and intelligent agricultural decision support system based on big data analysis. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science*, 72, 1-14. <https://doi.org/10.1080/09064710.2021.2008477>
- Józefowska, J., & Zimniak, A. (2008). Optimization tool for short-term production planning and scheduling. *International Journal of Production Economics*, 112(1), 109-120. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2006.08.026>
- Kappas, G., & Yegulalp, T. M. (1991). An application of closed queueing networks theory in truck-shovel systems. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 5(1), 45-51. <https://doi.org/10.1080/09208119108944286>
- Karthik, B., R. Raut, S. Kamble, M. Kharat, and S. Kamble. (2015). Decision support system framework for performance based evaluation and ranking system of carry and forward agents. *Strategic Outsourcing: An International Journal* 8 (février): pp.23-52. doi : 10.1108/SO-02-2015-0008.
- Kawahata, K. (2016, juillet 18). New algorithm to solve large scale mine production scheduling problems by using the Lagrangian relaxation method. Thesis : Colorado School of Mines.
- Keen, P. G. W., & Scott Morton, M. S. (1978). *Decision support systems: An organizational perspective*. Reading, Mass.: Addison-Wesley Pub. Co.
- Kemmis, S., McTaggart, R., & Nixon, R. (2014). *The Action Research Planner: Doing Critical Participatory Action Research*. <https://doi.org/10.1007/978-981-4560-67-2>
- Keskinocak, P., Wu, F., Goodwin, R., Murthy, S., Akkiraju, R., Kumaran, S., & Derebail, A. (2002). Scheduling Solutions for the Paper Industry. *Operations Research*, 50(2), 249-259. <https://doi.org/10.1287/opre.50.2.249.425>
- Khan, S. A., Hassan, S. M., Kusi-Sarpong, S., Mubarik, M. S., & Fatima, S. (2022). Designing an integrated decision support system to link supply chain processes performance with time to

- market. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 17(1), 66-78. <https://doi.org/10.1080/17509653.2021.2000900>
- Khanna, N., Shah, P., Sarikaya, M., & Pusavec, F. (2022). Energy consumption and ecological analysis of sustainable and conventional cutting fluid strategies in machining 15–5 PHSS. *Sustainable Materials and Technologies*, 32, e00416. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2022.e00416>
- Khuri, A. (2017). A General Overview of Response Surface Methodology.
- Kim, J. S., & Arnold, P. (1996). Operationalizing manufacturing strategy: An exploratory study of constructs and linkage. *International Journal of Operations & Production Management*, 16(12), 45-73. <https://doi.org/10.1108/01443579610151751>
- Kim, Y. H., Sting, F. J., & Loch, C. H. (2014). Top-down, bottom-up, or both? Toward an integrative perspective on operations strategy formation—*Journal of Operations Management*.
- Klingman, D., & Phillips, N. (1988). Integer Programming for Optimal Phosphate-Mining Strategies. *The Journal of the Operational Research Society* Vol. 39, No. 9, 805-810.
- Krishna, L. S., Janardhan, G. R., & Rao, C. S. P. (2009). Web integrated decision support system for machine scheduling and inventory management. *The ICFAI University Journal of Operations Management: IJOM*, 8(1).
- Krishnaiyer, K., & Chen, F. F. (2017). Web-based Visual Decision Support System (WVDSS) for letter shop. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 43, 148-154. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.09.016>
- Kupisiewicz, C., Cerych, L., & Sabatier, P. (1988). Great Expectations and Mixed Performance. *The Implementation of Higher Education Reforms in Europe*.
- Lerchs, H., & Grossman, F. (1965) Optimum Design of Open-Pit Mines. *Transaction CIM*, 58, 47-54.
- Lester, J. P., & Bowman, A. O. (1989). Implementing Environmental Policy in a Federal System: A Test of the Sabatier-Mazmanian Model. *Polity*, 21(4), 731-753. <https://doi.org/10.2307/3234721>
- Laurich, R. (1990). Planning and design of surface mines. B. Kennedy, ed. *Surface Mining*, Chapter 5.2. Port City Press, Baltimore, 465-469.
- Lewin, K. (1946). Action Research and Minority Problems—Lewin—1946—*Journal of Social Issues*—Wiley Online Library. <https://doi.org/10.1111/j.1540-4560.1946.tb02295>
- Lin, C., Choy, K. L. T., Ho, G. T. S., Chung, S. H., & Lam, H. Y. (2014). Survey of Green Vehicle Routing Problem: Past and future trends. *Expert Systems with Applications*, 41(4 PART 1), 1118-1138. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.07.107>

- Liu, D., Yan, P., & Yu, J. (2009). Development of a multiobjective GA for advanced planning and scheduling problem. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 42 (9-10), p 974-992.
- Liu, M. (2021). La démarche de recherche-action : Une rupture épistémologique. In *Les questions de démocratie dans les transformations du monde actuel* (p. 77-101). Champ social. <https://doi.org/10.3917/chaso.obert.2021.01.0078>
- Marakas, G. M. (2003). *Decision support systems in the 21st century* (2nd ed.). Prentice Hall.
- Mazmanian, D. A., & Sabatier, P. A. (1980). A Multivariate Model of Public Policymaking. *American Journal of Political Science*, 24(3), 439-468. <https://doi.org/10.2307/2110827>
- McKenzie, P., Newman, A. M., & Tenorio, L. (2008). Front Range Aggregates Optimizes Feeder Movements at Its Quarry. *Interfaces* Vol. 38, No. 6, 436-447.
- Messier, P.-M., & Missotte, P. (2003). *La recherche action : Une autre manière de chercher, se former, transformer*. Editions L'Harmattan.
- Mohtasham, M., Mirzaei-Nasirabad, H., Askari-Nasab, H., & Alizadeh, B. (2022). Multi-stage optimization framework for the real-time truck decision problem in open-pit mines: A case study on Sungun copper mine. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 36(7), 461-491. <https://doi.org/10.1080/17480930.2022.2067709>
- Montgomery, D. C. (2022). *Design and Analysis of Experiments*, 9th Edition.
- Morin, A. (2010). *La recherche-action intégrale et systémique (RAIS)*.
- Mosca, R. N., Giribone, P., & Cassettari, L. (2010). The Stochastic Analysis of Investments in Industrial Plants by Simulation Models with Control of Experimental Error: Theory and Application to a Real Business Case. *Applied Mathematical Sciences*, (4): 3823 - 3840
- Munda, G. (2006). Social multi-criteria evaluation for urban sustainability policies. *Land Use Policy*, 23(1), 86-94. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2004.08.012>
- Najor, J., & Hagan, P. (2006). Capacity constrained production scheduling. Conference: Mine Planning and Equipment Selection At: Torino, Italy Volume: 15th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection.
- Naoum, S., & Haidar, A. (2001). A hybrid knowledge base system and genetic algorithms for equipment selection, *Engineering Construction and Architectural Management*. <https://doi.org/10.1046/j.1365-232x.2000.00128>
- Neilsen, E. H. (2006). But let us not forget John Collier: Commentary on David Bargal's 'Personal and intellectual influences leading to Lewin's paradigm on action research', <https://doi.org/10.1177/1476750306070102>
- Nelson, B., Swann, J., Goldsman, D., & Song, W. (2001). Simple Procedures for Selecting the Best Simulated System When the Number of Alternatives is Large. *Operations Research*

(49): 950-963

Newman, A. M., Rubio, E., Caro, R., Weintraub, A., & Eurek, K. (2010). A Review of Operations Research in Mine Planning. *Interfaces*, 40(3), 222-245.

Oraee, K., & Asi, B. (2004). Fuzzy Model for Truck Allocation in Surface Mines. *Mine Planning and Equipment Selection 2004, Thirteenth International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection (MPES 2004)*

O'Sullivan, D., & Newman, A. (2014). Extraction and Backfill Scheduling in a Complex Underground Mine. *Interfaces*, 44, 204-221. <https://doi.org/10.1287/inte.2013.0730>

Paravarzar, S., Askari-Nasab, H., Pourrahimian, Y., & Emery, X. (2021). Operational mine planning in block cave mining: A simulation-optimization approach. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 35(3), 199-218. <https://doi.org/10.1080/17480930.2020.1804039>

Piaget, J. (1970). Piaget's Theory.

Pimentel, B. S., Gonzalez, E. S., & Barbosa, G. N. O. (2016). Decision-support models for sustainable mining networks: Fundamentals and challenges. *Journal of Cleaner Production* (112): 2145-2157. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.023>.

Pimentel, B. S., Mateus, G., & Almeida, F. A. (2013). Stochastic capacity planning and dynamic network design. *International Journal of Production Economics*, (145): 139-149. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.01.019>.

Piton, G., Philippe, F., Tacnet, J.-M., & Gourhand, A. (2018). Aide à la décision par l'application de la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) à l'analyse multicritère des stratégies d'aménagement du Grand Bûech à la Faurie. *Sciences Eaux & Territoires*, Numéro 26(2), 54-57. <https://doi.org/10.3917/set.026.0054>

Power, D. J. (2002). *Decision Support Systems: Concepts and Resources for Managers*. Faculty Book Gallery. 67. <https://scholarworks.uni.edu/facbook/67>

Power, D. J., & Sharda, R. (2007). Model-driven decision support systems: Concepts and research directions—ScienceDirect.

Pradervand, J.-N., Anne, D., Alain, R., Vincent, S., Aurore, G., & Guisan, A. (2013). Quels facteurs influencent la richesse en orthoptères des Préalpes vaudoises ? *Bulletin de la Societe Vaudoise des Sciences Naturelles*, 93, 155-173.

Psarommatis, F., & Bravos, G. (2022). A holistic approach for achieving Sustainable manufacturing using Zero Defect Manufacturing: A conceptual Framework. *Procedia CIRP*, 107, 107-112. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.04.018>

Qian, C., Yu, Y., & Zhou, Z.-H. (2013). Subset Selection by Pareto Optimization. *Advances in Neural Information Processing Systems 28 (NIPS 2015)*

- Reason, P., & Bradbury, H. (2008). Sage Research Methods—The SAGE Handbook of Action Research.
- Ribiero, R., Pilastri, A., Carvalho, H., Matta, A., Jose Pereira, P., Rocha, P., Alves, M., & Cortez, P. (2021). An Intelligent Decision Support System for Production Planning in Garments Industry. International Conference on Intelligent Data Engineering and Automated Learning, IDEAL 2021. IDEAL 2021. Lecture Notes in Computer Science, (13113): 378–386 https://doi.org/10.1007/978-3-030-91608-4_37.
- Rouvrais, S. (2012). Recognizing non formal learning experiences.
- Roy, M., & Prévost, P. (2013). La recherche-action : Origines, caractéristiques et implications de son utilisation dans les sciences de la gestion. *Recherches qualitatives*, 32(2), 129. <https://doi.org/10.7202/1084625ar>
- Sabatier, P. A. (1977). Regulatory Policymaking: Toward a Framework of Analysis. *Natural Resources Journal*, 17(3), 415-460.
- Sabatier, P. A. (1986). Top-down and Bottom-up Approaches to Implementation Research: A Critical Analysis and Suggested Synthesis. *Journal of Public Policy*, 6(1), 21-48.
- Sabatier, P. A., & Hunter, S. (1989). The Incorporation of Causal Perceptions into Models of Elite Belief Systems. *The Western Political Quarterly*, 42(3), 229-261. <https://doi.org/10.2307/448427>
- Sabatier, P. A., & Jenkins-Smith, H. C. (1988). Symposium Editors' Introduction. *Policy Sciences*, 21(2/3), 123-127.
- Sabatier, P. A., Loomis, J., & McCarthy, C. (1995). Hierarchical Controls, Professional Norms, Local Constituencies, and Budget Maximization: An Analysis of U.S. Forest Service Planning Decisions. *American Journal of Political Science*, 39(1), 204-242. <https://doi.org/10.2307/2111764>
- Sabatier, P., & Mazmanian, D. (1979). The Conditions of Effective Implementation: A Guide to Accomplishing Policy Objectives. *Policy Analysis*, 5(4), 481-504.
- Sabatier, P., & Mazmanian, D. (1980). THE IMPLEMENTATION OF PUBLIC POLICY: A FRAMEWORK OF ANALYSIS*. *Policy Studies Journal*, 8(4), 538-560. <https://doi.org/10.1111/j.1541-0072.1980.tb01266>
- Samanta, B., Bhattacharjee, A., & Ganguli, R. (2005). A genetic algorithms approach for grade control planning in a bauxite deposit. *Book: Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry*
- Sánchez, M. S., Ortiz, M. C., & Sarabia, L. A. (2016). A useful tool for computation and interpretation of trading-off solutions through pareto-optimal front in the field of experimental

- designs for mixtures. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 158, 210-217. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2016.09.007>
- Schelling, X., Fernández, J., Ward, P., Fernández, J., & Robertson, S. (2021). Decision Support System Applications for Scheduling in Professional Team Sport. The Team's Perspective. *Frontiers in Sports and Active Living*, 3.
- Shaker, S., Nemati, A., Montazeri-Najafabady, N., Mobasher, M. A., Morowvat, M. H., & Ghasemi, Y. (2015). Treating Urban Wastewater: Nutrient Removal by Using Immobilized Green Algae in Batch Cultures. *International Journal of Phytoremediation*, 17(12), 1177-1182. <https://doi.org/10.1080/15226514.2015.1045130>
- Sheldon, L. E. (1987). *ELT textbooks and materials: Problems in evaluation and development*. Modern English Publications.
- Shim, J., Warkentin, M., Courtney, J., Power, D., Sharda, R., & Carlsson, C. (2002). Past, present, and future of decision support technology.
- Simon, H. A. (1957). *Book : Models of man: Social and rational*. New York: Wiley.
- Slack, N., & Lewis, M. (2021). *Operations strategy 6th edition*.
- Sprague, R.H. & Carlson, E.D. (1982). *Building Effective Decision Support Systems*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall
- Sterman, J. (2015). Stumbling Towards Sustainability: Why Organizational Learning and Radical Innovation are Necessary to Build a More Sustainable World—But Not Sufficient. In R. Henderson, R. Gulati, & M. Tushman (Éds.), *Leading Sustainable Change: An Organizational Perspective* (p. 0). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198704072.003.0003>
- Sterman, J. D. (2012). Sustaining Sustainability: Creating a Systems Science in a Fragmented Academy and Polarized World. *Sustainability Science*, 21–58. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3188-6_2
- Stewart, G. L., Piazza, K., & Ward, M. M. (2015). Empowering Sustained Patient Safety: The Benefits of Combining Top-down and Bottom-up Approaches.
- Ta, C. H., Kresta, J. V., Forbes, J. F., & Marquez, H. J. (2006). A stochastic optimization approach to mine truck allocation: *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*: Vol 19, No 3.
- Tabesh, M., Afrapoli, A.M., Askari-Nasab, M. (2023), A two-stage simultaneous optimization of NPV and throughput in production planning of open pit mines, *Resources Policy*, (80), <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103167>.

- Tabucanon, M. T., Batanov, D. N., & Verma, D. K. (1994). Decision support system for multicriteria machine selection for flexible manufacturing systems. *Computers in Industry*, 25(2), 131-143. [https://doi.org/10.1016/0166-3615\(94\)90044-2](https://doi.org/10.1016/0166-3615(94)90044-2)
- Tan, Y., & Takakuwa, S. (2016). A practical simulation approach for an effective truck dispatching system of open pit mines using VBA. *2016 Winter Simulation Conference (WSC)*, 2394-2405. <https://doi.org/10.1109/WSC.2016.7822279>
- Tan, S., & R. Ramani. (1992). Optimization models for scheduling ore and waste production in open pit mines. *Proc. 23rd International Application in Computer Operational Research. Mineral Industry. (APCOM) Sympos. SME, Littleton, CO*, 781-791.
- Teniwut, W. and C. Hasyim. 2019. "Decision support system in supply chain: A systematic literature review". *Uncertain Supply Chain Management*, août. doi: 10.5267/j.uscm.2019.7.009.
- Tuladhar, S. D., Yuan, M., Bernstein, P., Montgomery, D., & Smith, A. (2009). A top-down bottom-up modeling approach to climate change policy analysis.
- Turker, A., Aktepe, A., Inal, A., Ersoz, O., Das, G., & Birgoren, B. (2019). A Decision Support System for Dynamic Job-Shop Scheduling Using Real-Time Data with Simulation. *Mathematics*, 7(3), 278. <https://doi.org/10.3390/math7030278>
- Underwood, R., & Tolwinski, B. (1998). A mathematical programming viewpoint for solving the ultimate pit problem. *European Journal of Operational Research*, 107(1), 96-107. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00141-0](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00141-0)
- Vergara-Zambrano, J., Kracht, W., & Díaz-Alvarado, F. A. (2022). Integration of renewable energy into the copper mining industry: A multi-objective approach. *Journal of Cleaner Production*, 372, 133419. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133419>
- Vieira, G. E., Herrmann, J. W., & Lin, E. (2000). Analytical models to predict the performance of a single-machine system under periodic and event-driven rescheduling strategies. *International Journal of Production Research*, 38(8), 1899-1915. <https://doi.org/10.1080/002075400188654>
- Wagner, S. (1993). Morin, A. (1992). *Recherche-action intégrale et participation coopérative. Vol. 1. Méthodologie et étude de cas. Montréal : Agence d'ARC. Revue des sciences de l'éducation*, 19(3), 639. <https://doi.org/10.7202/031664ar>
- Weck, O. L. D. (2004). *MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION: HISTORY AND PROMISE*.
- Willett, G. (1996). Paradigme, théorie, modèle, schéma : qu'est-ce donc ?. *Communication et organisation*, <https://doi.org/10.4000/communicationorganisation.1873>
- Wing, I. S. (2008). The synthesis of bottom-up and top-down approaches to climate policy modeling: Electric power technology detail in a social accounting framework.

- Wright, E. (1989). Dynamic programming in open pit mining sequence planning: A case study. A. Weiss, ed. Proc. 21st International Appl. Computer Operational Research. Mineral Industry. (APCOM) sympos SME. 415-422.
- Xie, H., & Cai, W. L. (2020). Design of open-pit phases with consideration of schedule constraints. 217-221. <https://doi.org/10.1201/9781003078661-43>
- Xu, X., Gu, X., Wang, Q., Gao, X., Liu, J., Wang, Z., & Wang, X. (2018). Production scheduling optimization considering ecological costs for open pit metal mines. Journal of Cleaner Production, 180, 210-221. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.135>
- Yan, H., NaiQi, W., MengChu, Z. and ZhiWu, L. (2017). Pareto-Optimization for Scheduling of Crude Oil Operations in Refinery via Genetic Algorithm, IEEE transactions on systems,.
- Yaylacı, E. D., & Düzgün, H. Ş. (2017). Evaluating the mine plan alternatives with respect to bottom-up and top-down sustainability criteria. Journal of Cleaner Production, 167, 837-849. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.248>
- Zermane, A., Larkeche, O., Meniai, A.-H., Crampon, C., & Badens, E. (2016). Optimization of Algerian rosemary essential oil extraction yield by supercritical CO₂ using response surface methodology. Comptes Rendus Chimie, 19(4), 538-543. <https://doi.org/10.1016/j.crci.2015.08.011>
- Zhang, W., & Gen, M., (2010). Process planning and scheduling in distributed manufacturing system using multiobjective genetic algorithm. IEEJ Transactions on Electrical on Electronic Engineering, 5 (1), p 62-72.

Liste des tableaux

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des notations retenues pour le modèle SED	94
Tableau 2 : génération des indices de priorités pour 20 scénarios	113
Tableau 3 : Volumes à extraire par scénario	114
Tableau 4 : notations retenues pour la formulation de l'heuristique	121
Tableau 5 : équations de formulation des demandes perturbées par type	126
Tableau 6 : Alimentations par QS et par période T proposées par le scénario 17	129
Tableau 7 : Alimentations cumulés par QS proposées par le scénario 17.....	129
Tableau 8 : Demande annuelle en QM par période	130
Tableau 9 : Charte qualité des QM par composant chimique.....	130
Tableau 10 : Stock initial en QS	130
Tableau 11 : Mélange proposé pour la période T = 1 mois.....	131
Tableau 12 : Caractéristiques chimiques du mélange proposé à T =1	132
Tableau 13 : Mélange proposé pour la période T = 2 mois.....	132
Tableau 14 : Caractéristiques chimiques du mélange proposé à T =2	132
Tableau 15 : Mélange proposé pour la période T = 3 mois.....	133
Tableau 16 : Caractéristiques chimiques du mélange proposé à T =3	133
Tableau 17 : Mélange proposé pour la période T = 6 mois.....	133
Tableau 18 : Caractéristiques chimiques du mélange proposé à T =6	134
Tableau 19 : Mélange proposé pour la période T = 9 mois.....	134
Tableau 20 : Caractéristiques chimiques du mélange proposé à T =9	134
Tableau 21 : Mélange proposé pour la période T = 12 mois.....	135
Tableau 22 : Caractéristiques chimiques du mélange proposé à T =12	135
Tableau 23 : Synthèse de l'étude de faisabilité par scénario	136
Tableau 24 : Création de deux vecteurs de demandes perturbés	137
Tableau 25 : Synthèse de l'étude de robustesse par scénario	138
Tableau 26 : Récapitulatif des résultats obtenus	151

Tableau 27 : Implications managériales des éléments constituant la proposition du système d'aide à la décision	178
Tableau 28 : Implications scientifique des éléments constituant la proposition du système d'aide à la décision	182

Liste des figures

Figure 1 : Structure en boucle et enchaînement de nos travaux de thèse	16
Figure 2: Positionnement des domaines académiques dans le cadre de l'aide à la décision pour la logistique (Fenies, 2006)	25
Figure 3 : Schéma de recherche-action de Kemmis et McTaggart 1988.....	28
Figure 4 : Schéma de recherche-action de Kemmis et McTaggart adapté	30
Figure 5: les trois chaînes intégrées du groupe OCP au Maroc.....	33
Figure 6: Cartographie de l'Axe centre.....	34
Figure 7 : Décomposition du gisement en panneau, parcelle, tranchée	36
Figure 8 : Coupe lithologique moyenne du panneau 5, gisement de Ben Guérir	37
Figure 9 : Processus d'extraction minière	40
Figure 10 : Synthèse de la revue de littérature	87
Figure 11 : Simulation du processus d'extraction à la mine de Ben Guerir	93
Figure 12 : Framework du modèle SED (Inputs, contraintes technique et output)	97
Figure 13 : initialisation des avances de l'état du chantier.....	102
Figure 14 : Initialisation des processeurs de la simulation	103
Figure 15 : Coupe lithologique	104
Figure 16 : Matrices des affectations possibles des machines	104
Figure 17 : Calcul des temps opératoires pour le traitement des blocs.....	105
Figure 18 : brique d'intégration des données d'entrée de simulation	106
Figure 19 : spécification des indices de priorité des QS.....	106
Figure 20 : Structure du fichier de sortie du modèle SED	107
Figure 21 : Courbe cumulatif des volumes extraits par couche source QS	109
Figure 22 : Gantt d'affectation des machines d'extraction	110
Figure 23 : courbes alimentations cumulées par couches proposées par le scénario 4	114
Figure 24 : courbes alimentations cumulées par couches proposées par le scénario 15	115

Figure 25 : courbes alimentations cumulées par couches proposées par le scénario 17	115
Figure 26 : Apports et aspects génériques du SED	117
Figure 27 : Niveaux de l'heuristique de filtrage conçue	121
Figure 28 : Types de perturbations de la demande	125
Figure 29 : Diagramme de dispersion 3D des scénarios dans l'espace de décision concernant les critères {CR1, CR2, CR3}	140
Figure 30 : Diagramme de dispersion 3D des scénarios dans l'espace de décision concernant les critères {CR1, CR4, CR5}	142
Figure 31 : Diagramme de dispersion 3D des scénarios dans l'espace de décision concernant les critères {CR2, CR4, CR5}	143
Figure 32 : Diagramme de dispersion 3D des scénarios dans l'espace de décision concernant les critères {CR2, CR3, CR4}	144
Figure 33 : Diagramme de dispersion 3D des scénarios dans l'espace de décision concernant les critères {CR1, CR2, CR4}	145
Figure 34 : Diagramme de dispersion 3D des scénarios dans l'espace de décision concernant les critères {CR1, CR2, CR5}	146
Figure 35 : Diagramme de dispersion 3D des scénarios dans l'espace de décision concernant les critères {CR3, CR4, CR5}	147
Figure 36 : Diagramme de dispersion 3D des scénarios dans l'espace de décision concernant les critères {CR2, CR3, CR5}	148
Figure 37 : Diagramme de dispersion 3D des scénarios dans l'espace de décision concernant les critères {CR1, CR3, CR5}	149
Figure 38 : Diagramme de dispersion 3D des scénarios dans l'espace de décision concernant les critères {CR1, CR3, CR4}	150
Figure 39 : Diagramme synthétique de dispersion 3D des scénarios intégrant les cinq dimensions {CR1, CR2, CR3, CR4, CR5}	152
Figure 40 : Histogramme de la quantité d'extraction annuelle par couche pour les scénarios alternatifs et le PE de la mine	153
Figure 41 : Architecture classique selon [Gorry et Morton, 1971] et conception initiale du DSS proposé.....	157
Figure 42 : Diagramme de flux DSS classique	157

Figure 43 : Diagramme de flux DSS séquentiel proposé	159
Figure 44 : Architecture du DSS	160
Figure 45 : Caractéristiques de l'approche descendante (Top-down)	163
Figure 46 : schéma décisionnelle descendant de la chaine minière OCP	164
Figure 47 : Caractéristiques de l'approche ascendante (Bottom-up)	166
Figure 48 : Nature des données réelles provenant du terrain, intégrées dans le modèle SED	166
Figure 49 : schéma de l'approche hybride proposée	168
Figure 50 : Positionnement du DSS comme outil de réconciliation entre les décisions descendantes et ascendantes	170



NOM Prénom | Thèse de doctorat | mois année