UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

VÉRIFICATION D'UN PLAN DE PRODUCTION MINIER À COURT TERME PAR SIMULATION

RAPHAËL LEITE-CORTHÉSY

DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET DE GÉNIE INDUSTRIEL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES

(GÉNIE INDUSTRIEL)

AOÛT 2016

© Raphaël Leite-Corthésy, 2016.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

VÉRIFICATION D'UN PLAN DE PRODUCTION MINIER À COURT TERME PAR SIMULATION

présenté par : LEITE-CORTHÉSY Raphaël

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. PELLERIN Robert, Ph. D., président

M. GAMACHE Michel, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. BAPTISTE Pierre, Doctorat, membre et codirecteur de recherche

Mme LAHRICHI Nadia, Ph. D., membre

DÉDICACE

"*Try not to become a man of success, but rather try to become a man of value.*"

-Einstein

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier le professeur Michel Gamache pour la grande qualité de son enseignement qui a suscité mon intérêt pour la recherche opérationnelle. Sans sa grande disponibilité et ses précieux conseils, venir à bout de ce projet n'aurait pas été possible. Je remercie également Pierre Baptiste pour son implication dans le projet.

Je tiens également à remercier mon directeur de recherche ainsi que le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada pour l'aide financière qu'ils m'ont fournie.

Je remercie Louis-Pierre Campeau, Alexandre Ouellet et Aurélien Froger pour m'avoir aiguillé dans la bonne direction alors que je faisais face à certaines difficultés techniques.

Je remercie aussi mes parents, pour le support moral inconditionnel qu'ils m'ont offert tout au long du projet.

Finalement, merci à Kate qui a toujours été là lorsque j'avais besoin de motivation quand rien ne semblait vouloir fonctionner.

Ce travail n'est pas seulement le mien mais aussi le vôtre.

RÉSUMÉ

La planification minière à court terme consiste à déterminer quelles opérations doivent être faites à quel moment et par quelle équipe sur un horizon de temps court (un quart de travail à une semaine). Ce type de planification est un problème de taille qui est à ce jour principalement traité manuellement. La planification par quarts de travail est un aspect qui n'a pas encore été étudié dans la littérature. La planification par quarts de travail est complexe étant donné le fait que plusieurs contraintes qui ne sont pas considérées en planification à moyen et long terme doivent être considérées à court terme. L'avantage de cette planification est qu'elle permet d'offrir des résultats plus fidèles à la réalité que des planifications à plus long terme. De plus, cette planification limite la prise de décision devant être effectuée au jour le jour dans les mines souterraines puisqu'elle fournit un plan détaillé des opérations devant être effectuées et ce dans l'ordre et la mesure appropriés.

Afin d'obtenir un séquencement de la production adéquat et efficace, un modèle mathématique en programme linéaire mixte a été développé. Ce modèle utilise comme intrants les résultats d'un modèle de planification par semaine existant. Ces résultats doivent être traités afin d'être compatibles avec le modèle de planification par quarts. Ainsi, cette planification est obtenue en deux phases. Puisque le modèle par quarts offre une planification à plus petite échelle que le modèle hebdomadaire, certaines contraintes y sont considérées sans l'être dans le modèle hebdomadaire. La principale différence est la contrainte de précédence entre les opérations qui doit être prise en compte afin d'offrir un séquencement fidèle à la réalité. Cette contrainte est la raison pour laquelle la planification sur les quarts d'une semaine présente un écart par rapport à la planification par semaine et ce pour toutes les semaines à l'étude.

Cependant, le modèle d'optimisation a certaines limitations. En effet, le modèle, étant déterministe, ne permet pas de considérer la variabilité associée au temps de travail. De plus, les temps de déplacements des équipes à travers les divers sites n'ont pas été considérés dans le modèle mathématique. De plus, bien qu'une contrainte de ressources relative au nombre d'équipes de travail existe dans le programme linéaire mixte (PLM), celle-ci ne représente pas parfaitement la réalité. Pour pouvoir observer l'effet de ces éléments non pris en compte dans le modèle d'optimisation, un modèle de simulation a été développé. Des tests ont été effectués afin d'observer l'influence des temps de déplacement et de la variabilité sur les résultats. De plus, des analyses ont

été effectuées pour observer l'effet sur les solutions de traiter deux semaines consécutives conjointement.

Ainsi, ce mémoire présente un modèle de planification des opérations minières souterraines à très court terme, soit sur les quarts de travail (10 heures) ce qui n'a pas été fait dans la littérature. Effectuer une planification à l'échelle du quart de travail permet de considérer des contraintes qu'on ne peut considérer à une plus grande échelle comme la semaine. Ce modèle permet une planification à court terme automatique plutôt que manuelle ce qui offre un gain de temps considérable pour les compagnies minières en plus d'assurer la meilleure planification possible (solution optimale). En plus du modèle en PLM, le mémoire présente un modèle de simulation permettant d'évaluer l'effet de changements apportés au système ce qui représente un outil très intéressant pour les compagnies minières. En effet, cela permet d'observer les effets sur le système sans avoir à réellement perturber celui-ci ce qui résulte en des économies de temps et d'argent.

ABSTRACT

Short term mine planning (production sequencing) consists in determining the optimal sequence of operations and the team to do it on a very short period (a quarter to a week). It is an important problem that is to this day mainly solved manually. Mine planning on the scale of shifts (10 hours) is something that has not been studied yet in the literature. This type of planning is very complex because many constraints that are not considered in medium or long term planning must be taken into account. The advantage of this type of planning is that it provides results closer to reality than medium or long term planning since more constraints are considered. Furthermore, this type of planning limits the need for decision making in underground mines activities since it provides a very detailed plan of operations to be done.

To obtain a reliable production sequencing, a mixed inter program has been developed. This model uses as input data the results of another model that does the weekly planning. The results of this weekly model have to be treated to be compatible with the shifts planning model. Therefore, the production plan on quarters is obtained in two phases. Since this model provides a planning on shorter term than the weekly model, it has some constraints that are not present in the weekly model. Of these constraints, the main one is the precedence constraint between the operations that is important to offer a realistic sequencing. This constraint is the reason for the difference between the shift planning and the weekly planning for all the weeks analyzed.

However, the MIP model has certain limitations. Indeed, because the model is determinist, the model does not consider the variability associated to the operations time. Also, the shifting of the teams from site to site has not been considered in the mathematical model. Furthermore, even though there is a constraint in the MIP that restricts the number of hours of work that can be done according to the number of team, this constraint does not perfectly reflect reality. To be able to analyze the effect of these elements absent from the MIP, a simulation model has been developed. Tests were done to observe the influence on the results of considering the shifting of teams from site to site and the variability of the operations and shifting times. Also, tests were done to analyze the effect on solutions of planning two consecutive weeks simultaneously instead of planning both weeks individually.

This thesis presents a short term (by quarters) underground mine operations planning model which has not been done in the literature. Planning on quarters allows to consider constraints that cannot

be considered on longer term like the week. This model allows to do an automatic short term plan rather than a manual one which saves time for mining companies and ensure that the plan is optimal. The thesis also presents a simulation model allowing to evaluate the effects of changes on the system which is a valuable tool for mining companies. It allows to evaluate the effect of changes on the system without having to test on the real system resulting in money and time savings.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE III

REMERCIEMENTS IV

RÉSUMÉ V

ABSTRACT VII

TABLE DES MATIÈRES IX

LISTE DES TABLEAUX XII

LISTE DES FIGURES XIII

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS XIV

LISTE DES ANNEXES XV

CHAPITRE 1 INTRODUCTION 1

1.1 Définition du problème 2

1.2 La mine El Tio 4

1.3 Objectifs de la recherche 6

1.4 Hypothèses 7

CHAPITRE 2 REVUE CRITIQUE DE LA LITTÉRATURE 9

2.1 La recherche opérationnelle pour la planification de la production minière 10

2.2 La simulation appliquée à l'industrie minière 12

2.3 Utilisation conjointe la simulation et l'optimisation par PL 14

2.4 La planification à court terme appliquée à d'autres industries 16

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE 18

3.1 Le programme mathématique 18

3.1.1 Indices 20

3.1.2 Ensembles 20

3.1.3 Paramètres 21

3.1.4 Variables 23

3.1.5 La fonction-objectif et les contraintes 23

3.2 Avantages et limitations du modèle mathématique 26

3.2.1 Avantages 26

3.2.2 Limitations du modèle mathématique 26

3.3 Différences entre les modèle de planification par semaines et par quarts 29

3.4 Modèle de simulation 33

Bénéfices de la simulation 33

Intrants du modèle de simulation 34

Fonctionnement du modèle 34

CHAPITRE 4 RÉSULTATS 36

4.1 Solution issue du programme linéaire 36

4.2 Traitement des semaines en continu 37

4.3 Viabilité du modèle de simulation 39

4.4 L'estimation du nombre d'équipes nécessaires grâce à la simulation 40

4.5 L'influence de la variabilité de la durée des opérations 43

4.6 L'influence des temps de déplacement 46

4.7 Variabilité de la durée des opérations et temps de déplacement 48

4.8 Temps de résolution 50

CHAPITRE 5 DISCUSSION 52

CHAPITRE 6 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS 54

RÉFÉRENCES 56

ANNEXES 59

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 : Résultats issus du modèle de planification hebdomadaire pour une semaine (communication personnelle, Campeau 2015) 19

Tableau 3.2 : Durées des opérations pour la semaine A1 au site 309 (selon l'exemple) 19

Tableau 3.3 : Tableau des ensembles du modèle mathématique 20

Tableau 3.4 : Comparaison entre les planifications des modèles hebdomadaire et par quarts 30

Tableau 4.1 : Comparaison de solutions pour le traitement de paires de semaines traitées séparément et conjointement 37

Tableau 4.2 : Pourcentages d'inactivité des types d'équipe de travail 38

Tableau 4.3 : Résultats du test de viabilité du modèle de simulation pour la semaine A1 40

Tableau 4.4 : Résultat du PLM et du simulateur avec 3 équipes de chaque type 41

Tableau 4.5 : Nombre d'équipes optimal selon la semaine 42

Tableau 4.6: Résultats des tests de la variabilité de la durée des opérations 44

Tableau 4.7 : Résultats des tests de l'influence des temps de déplacement 47

Tableau 4.8 : Test de variabilité des durées d'opérations et déplacements et leur variabilité 49

LISTE DES FIGURES

Figure 1.3: Vue tridimensionnelle de la mine El Tio (communication personnelle, Campeau 2015) 44

Figure 2.2 : Séquence d'opérations d'exploitation d'un site dans le modèle classique 1111

(inspirée de Trout 1996) 1111

Figure 3.1 Représentation de la contrainte de ressource 2727

Figure 3.2 : Représentation de l'effet de décalage observé en réalité 2828

Figure 3.3 : Planification pour le site 117 pour la semaine A1 avec 3131

la contrainte de précédence des opérations 3131

Figure 3.4 : Planification pour le site 117 pour la semaine A1 sans 3232

la contrainte de précédence des opérations 3232

Figure 4.1 : Planification du PLM au site 14 pour la semaine B2 3636

Figure 4.2 : Planification du PLM au site 115 pour la semaine B2 3636

Figure 4.3 : Temps de résolution en fonction du nombre de sites 5050

Figure Annexe A.1 : Exemple de modèle de simulation pour la semaine A2 5960

Figure Annexe B.1 : Exemple de code pour un site de production long trou (site 18) 6061

Figure Annexe B.3 : Exemple de code pour un site de développement de type cheminée 6262

(monterie Alimak) (site 312) 6262

Figure Annexe B.2 : Exemple de code pour un site de développement (site 118) 6262

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

PBE	Programmation binaire entière
PLM	Programme linéaire mixte
PL	Programme linéaire ou programmation linéaire
SED	Simulation à évènements discrets
VPN	Valeur présente nette
OEP	Optimisation par essaims particulaires

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A – EXEMPLE D'UN MODÈLE DE SIMULATION (SEMAINE A2).....59

ANNEXE B – EXEMPLE DE BOUCLE DE CODE DE CHAQUE TYPE DE SITE.....60

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Pour assurer leur production, les compagnies minières se fixent des objectifs de production à long, moyen et court termes. La planification à long terme s'étend sur plusieurs années et touche les décisions stratégiques qui sont durables et permettent d'orienter les niveaux de décisions inférieurs. À moyen terme, on parle de décisions tactiques, soit la gestion globale des ressources. À court terme, les décisions faites sont opérationnelles, c'est-à-dire qu'elles sont flexibles et fréquentes et elles servent à atteindre les objectifs de la planification à moyen terme. (L'Heureux, 2011). À court terme, l'horizon est généralement de quelques mois.

Les entreprises doivent exploiter de manière optimale les ressources nécessaires au bon fonctionnement de leurs mines. Parmi ces ressources, on compte les ressources matérielles, telles que les équipements, les ressources humaines et finalement les ressources intangibles comme le temps et l'espace. Ces dernières ressources, ne peuvent pas être négligées dans l'industrie minière puisque toutes les opérations y sont contraintes.

Il est nécessaire pour les personnes responsables de la production de posséder des plans de production sur une très petite échelle de temps. En effet, si l'on connaît le plan production à long terme (plusieurs années), il est difficile de savoir quels sites doivent être exploités au jour le jour. Ainsi, les contremaîtres doivent disposer d'un plan de production pour chaque quart de travail. Cependant, plus la planification est faite à court terme, plus le niveau de détail augmente. Plusieurs éléments n'ont pas à être pris en compte lors de la planification à long et moyen termes, mais ils deviennent essentiels pour un horizon à court terme. La planification à court terme est un défi de taille pour les ingénieurs miniers (Fioroni & al. 2008). De plus, il est facile de comprendre que les employés ont très peu de marge de manœuvre en ce qui a trait à l'atteinte des objectifs de production sur un quart (Collard 2013).

«La planification à court terme a un horizon temporel mensuel et indique la séquence des opérations pour chaque semaine, chaque journée ou quart de travail. Pour chacun des horizons temporels, les séquences d'extraction sont déterminées en fonction d'un objectif et doivent respecter des contraintes de différentes natures.» (Auger 2000). Ainsi, la planification à court terme dans l'industrie minière souterraine représente les opérations à effectuer dans un ordre spécifique et à des sites de travail spécifique. Dans le cas de ce mémoire, c'est la séquence pour les quarts de travail qui est planifiée. Plus particulièrement, le temps à allouer à chaque opération à chaque site

de travail durant chacune des 14 quarts de la semaine. De plus, l'ordre dans lequel chacune de ces opérations doivent être effectuées est également une information donnée dans le cadre de la planification.

L'optimisation sous forme de programme linéaire (PL) est un outil intéressant pour développer ce genre de plans de production. Elle permet de prendre en compte plusieurs contraintes d'espace, de temps et de ressources afin d'obtenir des résultats qui seront les plus fidèles à la réalité. Cependant, la programmation linéaire a des limitations auxquelles d'autres outils comme la simulation peuvent pallier.

La simulation se rapproche plus de la réalité étant donné qu'elle est faite pour simuler des processus de la vie réelle. Par exemple, le temps de déplacement des équipes de travail peut difficilement être considéré en PL mais se modélise très facilement par la simulation. La simulation peut donc permettre d'observer le comportement réel des opérations de production d'une mine souterraine et ainsi améliorer un programme mathématique en le rendant plus fidèle à la réalité.

Le présent mémoire est subdivisé en cinq chapitres. Premièrement, les concepts de base utilisés dans le présent mémoire ainsi que le problème sont décrits afin de faciliter la compréhension du lecteur. Le second chapitre fait l'état des connaissances relatives à l'optimisation utilisée pour la planification des opérations minières, particulièrement pour les mines souterraines. Par la suite, le chapitre 3 présente le cœur du rapport, soit la méthodologie utilisée. C'est dans ce chapitre que sont présentés le programme mathématique et le modèle de simulation permettant l'amélioration du modèle mathématique. Le chapitre 4 présente les résultats issus des analyses réalisées à l'aide des outils décrits dans le chapitre précédant. Le 5e chapitre présente les limitations du modèle mathématique. Finalement, le 6e et dernier chapitre conclue le projet et offre une ouverture sur les améliorations qui pourraient éventuellement être apportées à ce projet.

1.1 Définition du problème

Tel que mentionné précédemment, la plupart des plans de production pour l'industrie minière sont faits à long et moyen termes. Ceci rend difficile le travail des administrateurs des mines qui n'ont pas un plan concret de travail au jour le jour. Louis-Pierre Campeau, candidat au Ph.D à Polytechnique Montréal, s'est attaqué au problème et a développé un plan de production à court terme, soit pour une période d'une semaine. Ses résultats sont issus d'une planification à moyen

terme sur 3 mois. Ce PL permet «d'optimiser la planification à très courte échelle, de tester divers scénarios et d'évaluer leur influence sur l'ensemble du projet ainsi que de vérifier la faisabilité des objectifs à long terme» (Campeau 2015). Ceci facilite grandement le travail de planification des administrateurs de la mine.

Bien que cet outil soit très intéressant pour les personnes responsables d'une mine puisqu'il fournit davantage de précision sur les travaux à réaliser, cet horizon est encore trop long pour permettre de bien considérer toutes les contraintes auxquelles les opérations de production et de développement d'une mine souterraine sont soumises.

De plus, le programme linéaire développé dans le cadre de ce mémoire ne permet pas de simuler le comportement exact lié à certaines contraintes. En effet, il ne prend pas en compte les temps de déplacement des divers véhicules et équipes de travail ou encore la variabilité associée à la durée des opérations. De plus, un certain effet de décalage (qui est expliqué à la section 3.2.2) qui est observé en réalité ne peut pas être considéré avec le PLM développé dans le cadre de ce projet. Bien qu'il soit possible de considérer tous ces aspects dans un modèle mathématique, nous avons opté pour un modèle déterministe dans ce projet et avons préféré tester les éléments non considérés dans un modèle de simulation. Considérer ces éléments aurait complexifier la résolution du modèle mathématique.

Il est important de noter que des contraintes complexes propres aux problèmes miniers souterrains existent ce qui distingue les problèmes de planification à court terme de l'industrie minière à des problèmes similaires dans d'autres industries. Premièrement, les mines sont un environnement dynamique où les structures en place sont en constante évolution. De plus, chaque site de travail n'est pas traité de la même manière et les temps d'opérations peuvent être très différents d'un site à l'autre. Les sautages forcent l'évacuation de la mine ce qui engendre des arrêts constants de la production à intervalle régulier contrairement à des chaînes de production qui travaille en continu et qui font toujours le même produit dans un temps fixe. De plus, les équipes étant spécialisées, elles sont responsables d'une tâche et les équipes ne sont pas interchangeables. Ces contraintes viennent complexifier la planification à court terme dans les mines souterraines.

Le modèle de planification par quarts découpe la planification sur une semaine en planification sur les quarts de travail de la semaine. Une planification sur l'horizon d'une semaine doit donc exister

afin d'utiliser le modèle de planification par quarts. À partir de ces données, on peut rentrer les durées d'opérations prévues dans le modèle. Cependant, le modèle de planification hebdomadaire ne sera pas présenté dans ce document puisqu'il constitue le travail d'un autre étudiant.

1.2 La mine El Tio

Afin de tester son modèle mathématique, Campeau (2015) a développé une mine souterraine fictive à l'aide du logiciel Surpac. Cette mine, basée sur une mine réelle, contient 312 sites différents qui peuvent être soit des sites de production ou de développement. On considère un site de production comme un site à partir duquel il vaut la peine d'extraire du minerai pour en faire le traitement. Un site de développement est un site qui peut ne pas contenir assez de minerai pour que son exploitation soit rentable mais qui doit tout de même être excavé et soutenu afin de permettre l'atteinte des zones de production. À la figure 1.3, les sites de développement sont couleur bronze et les sites de production sont colorés autrement.

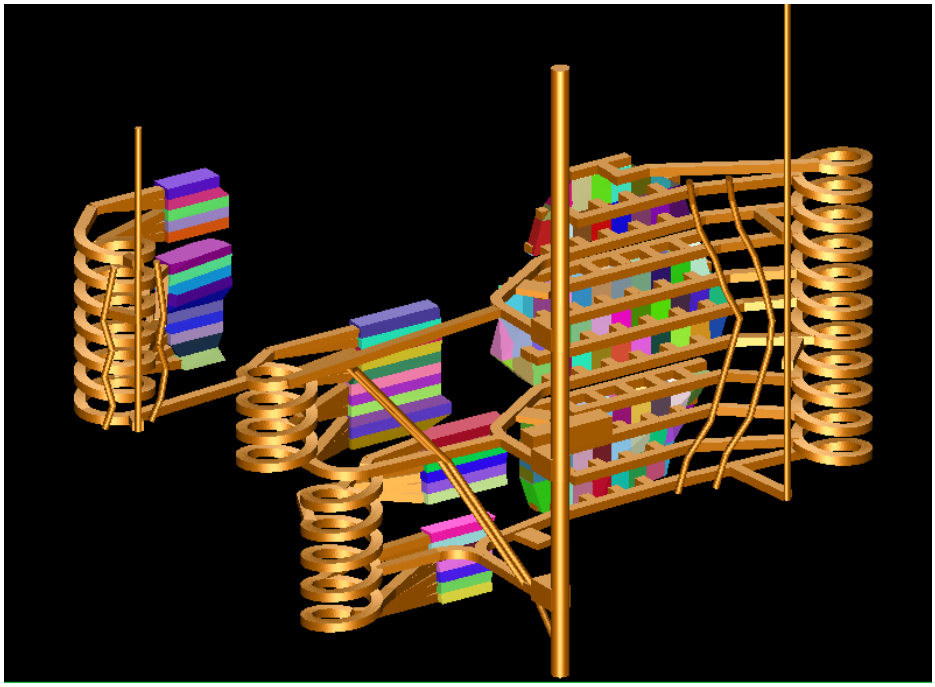


Figure 1.3: Vue tridimensionnelle de la mine El Tio (communication personnelle, Campeau 2015)

On compte 9 types d'équipes différentes (Campeau 2015) :

1) Forage de développement

2) Câblage
3) Forage de production
4) Services
5) Déblayage/transport
6) Support de terrain
7) Remblais
8) Forage de cheminée V-30 (*raise boring*)
9) Alimak

La mine possède six équipes de travail de type 1 à 7 et trois équipes de travail de type 8 et 9. Selon le site, la méthode d'exploitation est différente. On a choisi d'identifier 2 méthodes d'exploitation et deux types de développements. Les sites de production sont soit exploités en en long trou *(long hole*), alors que pour les développements on identifie les galeries ou les monteries Alimak. Voici les étapes, écrites pour chacune des méthodes avec le type d'équipe correspondant pour réaliser cette tâche entre parenthèses (communication personnelle, Campeau 2015).

Long Trou :

1) Forage des trous de câblage (2)
2) Insertion et cimentation des câbles (2)
3) Forage du trou de cheminée (8)
4) Déblayage (5)
5) Forage des trous de production (3)
6) Chargement des trous (3)
7) Sautage (effectué entre les deux quarts)
8) Déblayage (5)
9) Construction de la barricade (7)
10) Remblayage (7)
11) Temps de cure

Les sites de développement sont quant à eux, pour la plupart, exploités ainsi :

Développement de galeries :

1) Forage des trous (1)
2) Chargement des trous (1)
3) Sautage (effectué entre les deux quarts)
4) Déblayage (5)
5) Écaillage (6)
6) Installation du support de terrain (6)

7) Installation des services (4)
8) Répétition de 1 à 7

Finalement, certains sites particuliers, comme les cheminées, sont exploités de la manière suivante :

Monterie Alimak :

1) Installation des rails (9)
2) Forage des trous (9)
3) Chargement des trous (9)
4) Sautage (effectué entre les deux quarts)
5) Déblayage (5)
6) Écaillage (9)
7) Installation du support de terrain (9)
8) Installation des services (9)

Ainsi, c'est à partir de cette mine fictive que la planification hebdomadaire a été faite. De plus, dans le cadre de ce mémoire, on s'intéresse à 6 semaines. Premièrement, les semaines de type A (A1, A2) sont des semaines où uniquement des sites de développement sont analysés. Les semaines de type B (B1, B2) touchent encore des sites de développement mais on commence à planifier du travail dans des sites de production. Finalement, les semaines de type C (C1, C2) touchent quasi strictement des sites de production. Les résultats de ces divers scénarios seront comparés afin de voir si le comportement semble se répéter malgré la différence entre les sites traités. Ainsi, 6 semaines seront traitées dans ce mémoire ce qui est suffisant pour effectuer les analyses présentées dans ce chapitre.

1.3 Objectifs de la recherche

Le premier objectif de cette recherche est de vérifier la validité d'un plan de production hebdomadaire. Pour ce faire, un programme linéaire de planification des opérations d'une mine souterraine à très court terme soit pour un quart de travail a été développé. Cet outil utilise les extrants d'un programme linéaire de planification hebdomadaire existant comme intrants. Dans le même ordre d'idée que la planification à court terme (semaine) vise à atteindre les objectifs de la planification à moyen terme (3 mois), le modèle à très court terme (quart de travail, 10h) vise à atteindre les objectifs du modèle hebdomadaire. Ainsi, chaque quart est planifié de manière à atteindre les objectifs de la semaine qui dépendent des objectifs à moyen terme.

Avec un outil de simulation comme le logiciel Arena, par Rockwell Automation, il est facile de tenir compte des temps de déplacement et de la variabilité associée à la durée des déplacements ou des opérations qu'il est plus complexe de considérer en PL. Ainsi, la simulation est un outil pertinent pour tester des résultats issus d'un PL. Le second objectif est donc de vérifier la viabilité du modèle de planification par quarts. Pour ce faire un outil de simulation a été développé sur Arena afin de pouvoir tester la viabilité des résultats issus du PL pour un quart de travail et d'en observer le comportement réel. Cet outil simulera les opérations à chaque quart sur un horizon d'une semaine à la mine et il sera possible de faire varier certains paramètres dans cette simulation afin de pouvoir faire diverses analyses de sensibilité. Ainsi, il sera possible de tester la viabilité des plans de production sur les quarts d'une semaine lorsque certains paramètres comme les temps de déplacement et la variabilité change.

La recherche vient donc faire un lien entre l'optimisation utilisée pour planifier la production d'une mine souterraine à très court terme et la simulation qui sert à tester la viabilité de ces résultats et à évaluer l'influence de certains comportements difficiles à modéliser en optimisation. Dans le cas où il ne serait pas possible d'atteindre les objectifs visés, l'outil développé pourrait donner des indications quant aux aspects qui rendent l'atteinte des objectifs impossible et permettrait d'aider à tirer des conclusions relatives à ce qu'il faudrait faire pour les atteindre.

La simulation permettra d'optimiser les équipes de travail en estimant le nombre minimal d'équipes nécessaires pour atteindre les objectifs de production en tenant compte des temps de déplacements et de la variabilité associée aux temps d'opérations et de déplacements. De plus, le simulateur permettra de tirer des conclusions quant à l'influence du temps de déplacement et de la variabilité du modèle. Ces analyses seront faites à divers moments de la vie de la mine afin de voir si les comportements observés sont constants dans le temps.

1.4 Hypothèses

Certaines hypothèses sont posées afin de procéder aux analyses nécessaires à la réalisation de ce mémoire.

Premièrement, on considère que le trafic dans les galeries de la mine est considéré indirectement dans les temps de déplacement des équipes de travail entre les divers sites.

De plus, on considère les équipes de travail comme une entité en soit. On considère que si une équipe de type 1 est composée de trois employés différents, le déplacement de ces trois employés se fait toujours simultanément. Chaque équipe est donc une entité unique qui se déplace.

Pour passer d'un site à l'autre, on considère que le même chemin est utilisé à tout coup. Même si deux chemins sont possibles pour passer d'un site A à un site B, le même chemin sera emprunté à toutes les fois.

À chaque fois qu'un sautage est prévu, toute la mine doit être évacuée pour la durée du sautage et de l'attente d'évacuation des fumées de tir. Ces sautages sont effectués entre deux quarts de travail. Les périodes entre deux quarts ne sont pas modélisées directement dans le modèle, toutefois les sautages seront considérés indirectement lors de la séquence des opérations.

On considère que la distribution des teneurs dans le gisement est uniforme de manière à ne pas avoir à prioriser l'exploitation de certains sites avant d'autres.

CHAPITRE 2 REVUE CRITIQUE DE LA LITTÉRATURE

Ce chapitre a pour but de présenter les divers sujets pertinents à ce projet de recherche qui ont déjà été traités par d'autres. Pour ce faire, plusieurs articles et thèses seront analysés d'un point de vue critique. En effet une attention est portée à la différence entre ces études et le projet faisant l'objet de ce mémoire et comment il serait possible d'améliorer ce qui a été fait ou de l'adapter aux besoins de ce projet.

La plupart des études effectuées en recherche opérationnelle pour la planification de la production minière ont été faites pour des mines à ciel ouvert, qui sont beaucoup moins complexes que les mines souterraines. Ceci est sans doute dû au fait que l'on compte beaucoup plus de mines à ciel ouvert que souterraines dans le monde, bien que ce soit l'inverse au Québec. De plus, l'optimisation appliquée au domaine des mines souterraines se fait généralement pour trois secteurs principaux : la fixation des limites du site, le design des infrastructures et des galeries de développement de la mine et le séquencement de la production (Nehring et al. 2012). C'est ce troisième élément qui est traité dans ce mémoire. À titre informatif, (Nehring et al. 2012) citent certains auteurs ayant travaillé sur les deux premiers secteurs : Sens (2008), Ataee-Pour (2005), Alford (1995), Brazil and Grossman (2008), Alford et al. (2007) et finalement Brazil and Thomas (2004).

De plus, la planification stratégique minière est souvent faite à moyen ou long terme (plusieurs mois ou années) mais on remarque que très peu d'études ont été réalisées pour la planification des opérations de production à court terme. Ainsi, il est facile de comprendre que la littérature ne présente que très peu d'éléments traitant de l'optimisation de la planification à court terme dans les mines souterraines (Nehring et al. 2012). D'ailleurs, aucune étude dans la littérature traitant de l'optimisation du séquencement de la production à l'échelle d'un quart de travail n'a été trouvée.

Ensuite, la simulation appliquée aux mines souterraines est brièvement analysée étant donné qu'un modèle de simulation a été développé pour évaluer les résultats issus du programme mathématique. La plupart des modèles de simulation appliqués à l'industrie minière touche principalement le design des galeries de développement ou de la flotte de transport mais ces éléments sont déjà connus dans le cadre de ce mémoire. Peu d'études traitent de l'utilisation de la simulation comme outil de validation d'un modèle mathématique tel que présenté dans ce mémoire.

Pour conclure, cette section, une revue critique des modèles de planification agrégée dans d'autres domaines sera étudiée.

2.1 La recherche opérationnelle pour la planification de la production minière

La recherche opérationnelle appliquée au domaine minier remonte à il y a environ une cinquantaine d'années et elle a depuis été utilisée pour tout type de problème minier, que ce soit de la planification à long ou à court terme et pour des mines à ciel ouvert ou souterraines. Newman et al. (2010) ont résumé les travaux de recherche opérationnelle pour la planification minière des 30 dernières années pour le minage souterrain et à ciel ouvert. Le séquencement de la production est ce qui fait l'objet de ce mémoire, plus particulièrement, la planification à court terme. Ainsi, les articles traitant de ces aspects seront analysés dans cette section. Le séquencement de la production (*mine scheduling*) représente l'ordre dans lequel les sites doivent être exploités. À long terme, on chercher à maximiser la production et donc les profits, et ce peu importe le type de mine traitée. À court terme, on cherche à obtenir un séquencement permettant d'atteindre les objectifs issus d'un modèle à plus grande échelle. Cependant, la séquence d'exploitation des sites est évidemment sujette à de nombreuses contraintes.

Nehring et al. (2012) ont publié une des rares études sur le séquencement des opérations de production à court terme dans une mine souterraine. L'étude vise à présenter un modèle mathématique combinant la planification à moyen et à court terme. Leur modèle considère les étapes de développement externe et interne, les étapes de production et de remblayage. Le modèle faisant l'objet de ce rapport considère les mêmes aspects à l'exception des développements externes de la mine que l'on a considérés déjà établis. Normalement, la planification à court terme est dérivée de la planification à moyen terme et ces deux phases sont traitées séparément comme il est fait dans ce mémoire. Les chercheurs ont voulu démontrer les bénéfices de travailler avec ces deux horizons de planification simultanément. Cependant, les résultats ont été peu concluants étant donné que leur modèle combinatoire n'a amélioré la solution traitant les deux horizons de planification indépendamment que de 0.4%. Le modèle de ce mémoire traite la planification à court terme séparément de celle à moyen terme, mais utilise la simulation pour tester la validité des résultats issus du programme mathématique. Leur modèle fait une planification pour des périodes d'une semaine alors que le modèle traité dans ce mémoire offre une planification par quarts de travail d'une durée de 10 heures. Ainsi, une plus grande précision quant aux opérations à effectuer est offerte et facilite beaucoup la prise de décision. De plus, les informations quant aux étapes à

faire pour chaque site de travail sont également données par le modèle de ce rapport, détail qui n'est pas fourni dans l'étude de Nehring et al. (2012).

Nehring et al. (2012) font référence aux travaux de Trout (1995) ayant développé un PLM pour un horizon de 3 ans. La fonction objectif vise à maximiser la valeur présente nette (VPN) alors que celle de ce mémoire cherche à minimiser l'écart des heures planifiées entre la planification à moyen et court terme. On considère que la planification à moyen terme a déjà considéré les aspects monétaires du problème. La solution de Trout (1995) n'atteint pas l'optimalité et le modèle offre une solution après 1.6 heures de calculs.

Nehring et Topal (2008) ont fait une étude s'apparentant au sujet traité dans ce mémoire. En effet, leur étude portait sur l'amélioration d'un PLM pour l'optimisation de la planification (séquencement) de la production minière souterraine initialement développée par Trout (1995) et raffinée par Nehring (2006). Ils présentent en premier lieu le modèle classique cherchant à maximiser les profits (VPN) et où l'exploitation d'un site se fait selon quatre phases telles qu'illustrées dans la figure qui suit.

Figure 2.2 : Séquence d'opérations d'exploitation d'un site dans le modèle classique (inspirée de Trout 1996)

Ainsi, le modèle fournit pour chaque site le moment de commencement de la première phase, sachant que les trois phases ultérieures doivent se faire respectivement dans les trois périodes de temps suivantes. Cependant, le niveau de détails quant aux opérations à effectuer est très faible. Une phase d'extraction nécessite plusieurs opérations unitaires dans un ordre spécifique faisant appel à des ressources limitées. Bien que leur modèle indique l'ordre des sites à exploiter, aucune information n'est fournie quant à la manière et la séquence d'exploitation des sites en question. Le modèle présenté dans ce mémoire (chapitre 3) offre un très grand niveau de détail relatif à la séquence des opérations à effectuer en plus du séquencement entre les sites comme le modèle de Nehring et Topal (2008).

L'Heureux et al. (2013) se sont attaqués à un problème de planification à court terme pour les mines à ciel ouvert. «Le modèle planifie le séquencement de la production pour une période variant de

quelques jours à quelques mois en déterminant quels blocs doivent être extraits dans quel ordre.» L'objectif du PLM développé est de minimiser les coûts associés aux diverses opérations de transport et de production. Une particularité de leur modèle est le fait que le modèle choisisse les blocs à extraire en plus de s'occuper de l'organisation des opérations. Quatre modèles ayant de légères différences ont été proposés afin de trouver une solution avec un temps de résolution satisfaisant.

Finalement, Kuchta et al. (2003) se sont penchés sur un problème de planification des opérations à la mine Kiruna en Suède. Pour ce faire, ils ont utilisé un PLM qui minimise l'écart de production par rapport aux objectifs de production de trois types de minerai différents. Plutôt que de définir les sites à exploiter, les chercheurs ont travaillé sur le moment et le lieu du positionnement des machines ce qui a permis de réduire le nombre de variables. Le modèle offre une planification par mois.

Ce qui est récurrent à travers ces études est l'unité de temps sur laquelle la planification est faite. La plus petite échelle de temps sur laquelle ce genre d'étude a été effectué est la semaine. Les modèles n'offrent pas un séquencement détaillé des étapes de production à faire. Pourtant, un plan détaillé des opérations à effectuer sur les sites à chaque quart de travail est un outil qui peut s'avérer extrêmement intéressant. Ce genre de plan est à ce jour effectué manuellement et cette étude a pour but de concevoir un outil permettant de créer cette planification à très court terme rapidement.

2.2 La simulation appliquée à l'industrie minière

L'industrie minière gagne à employer la simulation étant donné que la production minière fait appel à de nombreux processus dont la durée varie dans le temps et à des types d'équipements en plus d'être affectée par de multiples facteurs externes (site web Arena, https://www.arenasimulation.com/industry-solutions/mining-simulation-software, visité le 9 février 2016). De plus, les investissements dans cette industrie sont souvent très importants et les administrateurs veulent faire des choix éclairés par rapport à ceux-ci. C'est pourquoi la simulation peut s'avérer très intéressante pour tester divers scénarios.

Fioroni *et al*. (2014) se sont penchés sur la question de la simulation minière et ont étudié quatre scénarios différents dans une mine d'or souterraine à l'aide du logiciel Arena pour faciliter l'étude du trafic souterrain. D'un scénario à l'autre, les auteurs faisaient varier la structure de la mine, le

sens de déplacement des véhicules et/ou la flotte de transport (type de véhicule et capacité). Il est possible d'évaluer pour chaque scénario la capacité de transport requise pour atteindre les objectifs annuels et donc de déterminer le scénario le plus intéressant pour la mine, c'est-à-dire celui nécessitant la plus faible capacité de transport. Cette étude a été faite pour une mine souterraine utilisant des camions pour le transport de minerai et de stérile. Cependant, dans le présent rapport, les ressources disponibles ainsi que la structure de la mine sont fixes. La simulation est alors utile pour tester la viabilité des résultats issus de l'optimisation à l'aide du PLM et éventuellement permettre d'apporter des améliorations au modèle mathématique une fois le comportement réel observé dans le modèle de simulation. La section qui suit mentionne certaines études où la simulation et l'optimisation ont été utilisées.

Miwa et Takakuwa (2011) ont utilisé la simulation pour étudier l'influence des systèmes de transport du minerai sur la production d'une mine de charbon souterraine. Les modèles de simulation développés dans le cadre de leur recherche ont été conçus à partir du logiciel de simulation Arena. Leur étude a révélé que le goulot d'étranglement du système à l'étude était la cheminée principale pour remonter le minerai à la surface. Les chercheurs ont également étudié le lien entre la vitesse de remontée du minerai et la quantité totale de minerai extraite de la mine ainsi que le lien entre la vitesse de remontée du minerai et l'inventaire de minerai aux lieux de stockage. Bien sûr, ces deux courbes ont des comportements opposés puisque plus la vitesse de remontée est grande, plus la quantité de minerai extraite sera grande et plus les quantités de minerai stockées seront faibles. La simulation a donc permis aux chercheurs de trouver le goulot d'étranglement et ainsi de pouvoir trouver des méthodes de minage et de transport plus efficace. Dans le cadre du présent mémoire, on considère les méthodes employées à la mine El Tio fixes et donc la simulation n'est pas utilisée pour apporter des améliorations au système mais bien pour valider les solutions issues du programme mathématique.

La simulation dans l'industrie minière n'est pas seulement utilisée que pour accroître les profits associés à la production. D'ailleurs, Yanbing et al. (2011) se sont attardés à un problème touchant la sécurité dans les mines souterraines de charbon. Leur recherche visait à déterminer la quantité de matériel d'urgence nécessaire suite aux accidents dans les mines ce qui est complexe étant donné la nature incertaine du nombre et du type d'accidents qui peuvent survenir. Pour ce faire ils ont conçu un modèle mathématique d'optimisation par essaim particulaire (OEP) qu'ils ont ensuite utilisé pour optimiser un modèle de simulation développé sur Arena.

2.3 Utilisation conjointe la simulation et l'optimisation par PL

Il est très difficile de trouver des études qui ont été faites sur une utilisation de la simulation à des fins de comparaison avec un modèle mathématique appliqué au séquencement de la production minière. En effet, la plupart des études de simulation faites pour l'industrie minière sont utilisées pour les deux premiers secteurs décrits au début de ce chapitre, soit la fixation des limites du site et la conception des infrastructures et des galeries de développement de la mine.

Fioroni & al. (2008) ont utilisé la simulation conjointement avec l'optimisation pour l'appliquer à un problème minier sans toutefois en faire l'usage qui en est fait dans ce mémoire. Ils ont utilisé les modèles d'optimisation et de simulation de manière simultanée. Ainsi, à chaque fois qu'il y a une interférence quelconque dans le système, le programme d'optimisation est appelé afin d'apporter des modifications à la planification afin que la simulation puisse s'ajuster. Une interférence est tout évènement hors de l'ordinaire, par exemple si un site est vidé de son minerai et que les ressources doivent être réaffectées à un autre site ou si un véhicule tombe en panne. Bien entendu, le modèle d'optimisation tentait de minimiser les différences entre le plan proposé et le plan précédant afin de ne pas perturber tout le système. L'étude de Fioroni & al. (2008) diffère de celle du présent mémoire étant donné que bien que la simulation est aussi utilisée dans ce projet, ces deux modèles ne seront pas exécutés simultanément. En effet, le modèle d'optimisation est utilisé afin de trouver la planification pour les quarts de travail de la semaine et ensuite, un outil de simulation est utilisé afin de tester la viabilité de ces résultats. Cependant, les 2 modèles ne communiquent pas durant la simulation. Le simulateur est utile pour observer des comportements auxquels le modèle mathématique est aveugle et les quantifier.

Faraji (2013) s'est attardé à un problème faisant intervenir la simulation ainsi que l'optimisation dans son mémoire de maîtrise. Un des objectifs de son mémoire est de «développer et d'utiliser un modèle de simulation afin de valider la planification d'un modèle mathématique existant à très court terme dans une mine à ciel ouvert.». Dans son mémoire, le modèle mathématique ne considère pas certains aspects comme le temps d'attente aux serveurs contrairement au modèle de simulation, d'où sa pertinence. Le concasseur représente le goulot dans le modèle mathématique et le modèle de simulation a été utilisé pour évaluer des solutions où le goulot d'étranglement est un élément différent. Similairement, l'un des objectifs du présent mémoire est également de valider les solutions d'un modèle mathématique à l'aide d'un outil de simulation puisque le modèle

mathématique ne permet pas de considérer certains des aspects présents dans la réalité. Cependant, ce mémoire est appliqué à une mine souterraine ce qui complexifie le problème.

Zhou (2011) a étudié les opérations de coordination entre les éléments suivants : la réception du minerai au moulin d'une mine, les opérations de maintenance et le séquencement de la production. Pour ce faire il a utilisé conjointement la simulation et l'optimisation. En effet, un modèle mathématique permet d'obtenir un séquencement de la production permettant de minimiser le minerai en attente au moulin et ce séquencement est utilisé dans le modèle de simulation. Avec cette solution, le modèle de simulation de Zhou peut être utilisé pour tester la performance du moulin. Dans le cadre de ce mémoire, une approche similaire est utilisée. En effet, le modèle mathématique développé offre une solution de planification qui sera ensuite testée dans un modèle de simulation, mais l'objectif est de valider si la planification est viable en considérant les aspects non pris en compte dans le modèle d'optimisation mathématique.

Finalement, Torkamani (2013) a aussi utilisé la simulation ainsi que la programmation linéaire dans le cadre de son projet de maîtrise touchant le lien entre les opérations des camions et des pelles et la planification à court terme des mines à ciel ouvert. Bien que sa recherche soit axée beaucoup plus sur l'aspect de simulation, son modèle doit s'adapter à la planification issue d'un modèle mathématique. Le modèle mathématique est un MILP utilisé pour assigner les pelles et les camions à des faces de travail. Contrairement aux travaux de Torkamani, le modèle du présent mémoire n'assigne pas d'équipement mais planifie les opérations à effectuer dans une mine souterraine. Si une opération est assignée à une certaine période, le modèle considère que la ressource en question est disponible. De façon similaire aux travaux de Torkamani, le présent modèle d'optimisation offre une solution qui est subséquemment utilisée dans un modèle de simulation.

Finalement, Amel Jaoua (2012) s'est attaqué à l'affectation des camions aux pelles dans une mine à ciel ouvert (*dispatching*). Pour ce faire, elle a utilisé la simulation imbriquée dans une heuristique. Une métaheuristique de type tabou évaluait différents scénarios d'affectation de camions aux pelles. Pour chaque scénario, une simulation permettait de déterminer le niveau de production de chaque pelle.

2.4 La planification à court terme appliquée à d'autres industries

Bien que très peu de travaux de planification à court terme aient été faits pour l'industrie minière, ce type de planification est primordial dans la majorité des industries. La section qui suit regroupe certains travaux de planification à court terme faits dans d'autres domaines que celui des mines et met de l'avant les différences principales entre les problèmes et contraintes rencontrés dans ces industries et l'industrie minière.

Cafaro et Cerda (2016) se sont attaqués à un problème de planification de la distribution de multiples produits le long d'un pipeline. Ainsi, plusieurs produits circulent dans le pipeline vers différentes destinations. Les produits circulant à l'intérieur du pipeline ont des caractéristiques qui leur sont propres. Ces valeurs sont considérées statiques puisqu'elles ne changent pas selon l'activité du pipeline. De plus, le pipeline a une structure fixe prédéterminée et ce n'est ce qui circule à l'intérieur qui varie dans le temps. Dans les problèmes miniers, la structure de la mine change constamment ce qui rajoute de la complexité aux problèmes de planification qui y sont associés. Une des similarités entre le problème étudié et les problèmes de travaux en mines souterraines est le fait que le travail est parfois arrêté. Lorsque le produit circulant dans le pipeline change, cela induit un arrêt dans la circulation. Dans le même ordre d'idée, des temps d'arrêt de travail sont prévus en minage souterrain pour permettre le sautage dans certains chantiers de travail ce qui induit des arrêts de travail. Cependant, le problème de planification dans les mines souterraines est plus complexe puisqu'il doit gérer le partage d'équipes de travail spécialisées à travers les différents sites de la mine alors que le problème de pipeline ne fait pas intervenir une telle contrainte.

Jia (2013) a développé un PLM pour le séquencement à court terme de l'utilisation d'un ensemble d'usines hydroélectriques. Le nombre d'usine est fixe à travers la résolution du problème et le système en place ne change pas ce qui n'est pas le cas des problèmes miniers souterrains où lorsqu'un site est terminé, on accède plus à cette zone. Ainsi, la structure en place est en constant changement. De plus, le problème de séquencement de la production d'hydroélectricité à travers un complexe de petites usines ne fait pas intervenir d'arrêt de travail à intervalles réguliers comme il est le cas pour le problème de séquencement des opérations minières souterraines. Le problème du séquencement de la production hydroélectrique ne fait pas intervenir une multitude d'opérations devant être faite dans un ordre précis contrairement au problème minier souterrain. Cette multitude d'opérations complexifie et alourdit le modèle mathématique. De plus, le système en place est plus

autonome. Des équipes n'ont pas à être présentes pour assurer la production contrairement aux opérations minières souterraines.

Baumann et Trautmann (2012) ont traité un problème de séquencement de production de produits *make and pack* ce qui touche surtout l'industrie alimentaire, des produits chimiques ainsi que des métaux en utilisant le même équipement. Ils ont considéré un horizon de temps continu ainsi que des variables de précédence. De plus, ils ont aussi considéré les temps de transfert des équipements, ainsi que les temps de changement de produit sur l'équipement utilisé. Une des différences principales entre les modèles est le fait que les auteurs cités précédemment ont considérer un horizon de temps continu alors que le problème minier traité dans ce mémoire est découpé en périodes fixes (14 quarts de 10 heures). Le problème du séquencement des opérations minières souterraines fait appel à une multitude d'équipes différentes faisant des opérations spécialisées alors que le problème traité par Baumann et Trautmann ne fait appel qu'à un seul type de ressource et ce sont les produits qui circulent sur la machine alors que ce sont les ressources qui se déplacent vers le produit dans le problème minier souterrain. Finalement, dans le problème de production minière souterraine, lorsque le minerai est extrait, la capacité de la cheminée pour remonter le minerai à la surface est limitée alors que dans une usine de production, les produits ne sont pas soumis à cette contrainte. Ainsi, la production n'est pas limitée par la quantité de produit pouvant être produite.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre présente la méthodologie utilisée afin de répondre à l'objectif de ce mémoire. Premièrement, une revue de la littérature critique sur les travaux de simulation et de recherche opérationnelle dans les mines ainsi que les travaux de planification à court terme dans d'autres industries a été faite. Ensuite, un modèle mathématique permettant la planification par quarts de travail des opérations de développement et de production d'une mine souterraine ainsi que la conception d'un outil de simulation pour observer et quantifier l'effet de certains aspects non considérés dans le PLM sur les solutions ont été conçus. Finalement, des tests ont été effectués pour tester la robustesse de la planification à court terme offerte par le modèle en PLM. Bien que le modèle de planification par semaines ait testé 12 semaines, ce mémoire touche l'étude de 6 semaines types.

3.1 Le programme mathématique

Cette section présente le modèle mathématique initial en PLM utilisé pour la première phase de ce projet, soit avant les améliorations apportées par le modèle de simulation. Le logiciel utilisé pour développer le programme mathématique est AIMMS. Le solveur utilisé sous AIMMS pour résoudre les problèmes de PLM est CPLEX. Ce modèle mathématique a pour objectif la planification pour chaque quart de travail sur une semaine à la mine fictive El Tio.

Un modèle a déjà été créé pour la planification hebdomadaire des opérations de la mine par un candidat au Ph. D. de Polytechnique. Le modèle présenté dans cette section utilise comme intrants les heures planifiées pour une semaine, issues du modèle existant, afin de déterminer les tâches à réaliser à chaque quart de travail d'une semaine. Le modèle hebdomadaire donne le pourcentage de travail du site devant être fait à chaque semaine. Le tableau 3.1 illustre un exemple des intrants pour une semaine obtenus de la planification à moyen terme.

Tableau 3.1 : Résultats issus du modèle de planification hebdomadaire pour une semaine (communication personnelle, Campeau 2015)

Semaine A1			
Site	Pourcentage planifié(%)	Site	Pourcentage planifié(%)
111	15.4	120	44.0
112	22.3	309	16.0
114	24.1	310	100.0
117	26.4	311	100.0
118	17.0	312	100.0
119	29.2		

Ainsi, à partir de ces informations, on sait que l'on doit travailler dans 11 des 312 sites durant cette semaine. Par exemple, on voit que toutes les heures de travail prévues pour les trois mois au site 310 doivent être complétées à cette semaine alors que seulement 44% des heures prévues sur trois mois doivent être faites au site 120.

On connaît aussi les précédences entre les sites ainsi que le nombre de sautages total nécessaire pour compléter un site de travail. À partir de ces informations, il a été possible de bâtir un tableau de durées de travail pour chaque opération à chaque site.

Par exemple, supposons que le nombre d'heures totales à faire sur trois mois au site 309 est de 100 heures pour les tâches 1, 5 et 4 et 200 heures pour la tâche 6 et que ce site nécessite 25 sautages pour être complété entièrement. De plus, le site 309 est exploité à 16% de sa totalité durant cette semaine. On considère l'opération 1 faite par l'équipe de type 1 et il en va de même pour les autres équipes. L'équipe 1 est ici l'équipe du forage de développement, l'équipe 5 celle du déblayage et du transport, la 6 celle du support de terrain et la 4 l'équipe des services. Ainsi, on fore les trous de sautage, on attend le sautage, on déblaye le site, on installe le support et les services. Ces quatre étapes sont répétées. À la lumière de ces informations, la série de durées suivantes sera établie :

Tableau 3.2 : Durées des opérations pour la semaine A1 au site 309 (selon l'exemple)

Opération	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Équipe	1	5	6	4	1	5	6	4	1	5	6	4	1	5	6	4
Durée (heures)	4	4	8	4	4	4	8	4	4	4	8	4	4	4	8	4

On voit que ces données sont logiques puisque pour les tâches 1, 5 et 4 on compte 16 heures en tout (16% de 100) et on compte 32 heures pour la tâche 6 (16% de 200). De plus, on sait que 25 sautages sont nécessaires pour compléter le site 309 donc 4 sautages seront nécessaires (16% de 25) durant cette semaine. C'est la raison pour laquelle on compte 16 opérations, soit quatre répétitions des quatre étapes nécessaires. À chacun de ces cycles de quatre étapes, il y a un sautage effectué. C'est de cette manière qu'est construit le tableau des durées d'opérations pour chaque semaine. On connaît donc également quel type d'équipe réalise quelle opération. Dans notre cas, les opérations 1, 5, 9 et 13 sont faites par une équipe de type 1. On peut donc bâtir une matrice associant chaque opération à une équipe. On connaît aussi les précédences à respecter entre les sites et on peut alors bâtir une matrice de précédence entre les sites.

Le modèle doit bien sûr tenir compte d'une multitude de contraintes représentant la réalité et a pour objectif de minimiser la différence entre le nombre d'heures prévues pour la semaine et le nombre d'heures prévues sur l'ensemble des quarts de travail. Cette section décrit au lecteur chacun des éléments utilisés dans le modèle mathématique pour faciliter sa compréhension.

3.1.1 Indices

Les indices sont utilisés afin de présenter de manière concise le modèle. Les indices utilisés dans le modèle sont présentés ci bas.

s Site de travail
c Type d'équipe de travail
q Quart de la semaine
o Opération

3.1.2 Ensembles

Tableau 3.3 : Tableau des ensembles du modèle mathématique

Ensemble	Description
S	Ensembles des sites, $\{1,\ldots,N^S\}$
C	Ensemble des types d'équipes de travail, $\{1,\ldots,N^C\}$
Q	Ensemble des quarts de travail, $\{1,\ldots,N^Q\}$
O^S	Ensemble des opérations au site s, $\{1,\ldots,N^{OS}\}$
OB^S	Ensemble des opérations précédant un sautage au site s
Ω^S	Ensemble des sites devant être terminés avant de pouvoir commencer le site *s*

3.1.3 **Paramètres**

$d_{s,o}$ Durée de l'opération o au site s

Une opération peut-être identique à une autre. Certains sites sont exploités avec une série de répétitions des mêmes opérations. Par exemple, les sites de développement sont exploités ainsi : forage et chargement des trous (1), sautage, déblayage (5), écaillage et installation du support de terrain (6) et installation des services (4) (Campeau, 2015). Le numéro entre parenthèses représente le type d'équipe effectuant cette tâche. Ainsi, un site de développement est exploité avec la répétition de ces 5 étapes.

$dtot_s$ Durée totale des opérations au site s

Cette valeur correspond au temps total de travail à faire (en heures) à un site de la mine.

HQ Nombre d'heures dans un quart de travail

Un quart de travail a une durée de 10 heures.

n_c Nombre d'heures disponibles de l'équipe de type c dans un quart de travail

Puisqu'il y a 10 heures par quart de travail, si on a 2 équipes d'un certain type, on aura 20 heures de travail possibles par quart pour ce type d'équipe. On a 6 équipes de type 1 à 7 et 3 de type 8 et 9. Ces données proviennent du modèle hebdomadaire.

O_{1s} Première opération au site s

La première opération varie selon le type de site.

N^S Nombre de sites de travail

Le nombre de sites de travail dans la mine à l'étude est de 312 mais N^S représente le nombre de site traité durant la semaine à l'étude. Cette valeur varie entre 6 et 12.

N^C Nombre de type d'équipes de travail

On compte 9 types d'équipes différents (voir section 1.3).

N^Q Nombre de quarts de travail considérés

Chaque semaine compte 14 quarts de travail de 10 heures. Le 28 heures restantes sont des quarts de sautage entre 2 quarts de travail.

N^{OS} Nombre d'opérations à faire au site s

Le nombre d'opérations à effectuer à chaque site varie.

$\alpha_{s,s'}$ Paramètre de précédence entre les sites

Certains sites doivent être complétés avant que d'autres ne soient commencés dans l'exploitation d'une mine. Ainsi, ce paramètre prend la valeur de 1 si le site s'doit être complété avant de pouvoir commencer le travail au site s.

$\beta_{o,c}$ Matrice indiquant le type d'équipe effectuant un type d'opération

Tel que mentionné précédemment, les opérations ne sont pas toutes effectuées par la même équipe. Ainsi, cette matrice permet de lier une opération à l'équipe qui la réalise.

M Grande valeur numérique

Ce paramètre est utilisé pour la logique à la contrainte (4).

3.1.4 Variables

$x_{s,o,q}$ = Le nombre d'heures effectués pour l'opération o au site s durant le quart q

$\delta_{s,o}$ = La différence entre le nombre d'heures à faire et faites pour l'opération o au site s

$y_{s,o,q}$ = $\begin{cases} 1 \text{ si du travail de l'opération o est fait au site s durant le quart q} \\ 0 \text{ sinon} \end{cases}$

$f_{s,o,q}$ = $\begin{cases} 1 \text{ si du travail de l'opération o est fait au site s durant les quart q} - 1 \text{ et q} + 1 \\ 0 \text{ sinon} \end{cases}$

3.1.5 La fonction-objectif et les contraintes

La fonction-objectif cherche à minimiser la différence entre les heures de travail planifiées par le plan de production hebdomadaire et celles planifiées par le plan de production par quarts de travail sur l'ensemble des quarts de cette même semaine. Ainsi, on cherche à obtenir le meilleur plan de production sur les quarts de travail pour répondre à la durée prévue des tâches sur la semaine.

$$\min Z = \sum_{s \in S} \sum_{o \in O^S} \delta_{s,o}$$

Sous les contraintes :

1. Un type d'équipe de travail ne peut pas fournir plus d'heures de travail que 10 fois le nombre d'équipes de ce type.

$$\sum_{s \in S} \sum_{o \in O^S} x_{s,o,q} * \beta_{o,c} \leq n_c \qquad \forall q \in Q, \forall c \in C \qquad (1)$$

2. La somme entre les heures d'une tâche faites et les heures non faites pour une opération à un site de travail doit correspondre à la durée planifiée par le modèle hebdomadaire.

$$\sum_{q \in Q} x_{s,o,q} + \delta_{s,o} = d_{s,o} \qquad \forall s \in S, \forall o \in O^S \qquad (2)$$

3. Contrainte liant les variables $x_{s,o,q}$ et $y_{s,o,q}$. Ainsi, si du temps de l'opération o au site s au quart q est fait, on considère que l'on travaille sur l'opération o au site s au quart q.

$$x_{s,o,q} \leq d_{s,o} * y_{s,o,q} \qquad \forall s \in S, \forall o \in O^S, \forall q \in Q \qquad (3)$$

4. Contrainte liant les variables $x_{s,o,q}$ et $y_{s,o,q}$. Ainsi, si aucun temps de travail de l'opération o au site s au quart q n'est effectué, on considère que l'on ne travaille pas sur l'opération o au site s au quart q.

$$y_{s,o,q} \leq x_{s,o,q} * M \qquad \forall s \in S, \forall o \in O^S, \forall q \in Q \qquad (4)$$

5. Contrainte de continuité d'une opération. Si à un quart q on n'a pas fini les heures d'une opération o au site s, on doit forcément continuer cette opération o au site s au quart suivant (q+1).

$$\sum_{\omega=1}^{q} x_{s,o,\omega} \geq d_{s,o} * \left(y_{s,o,q} - y_{s,o,q+1}\right) \qquad \forall s \in S, \forall o \in O^S, \forall q \in Q \backslash \{N^Q\} \qquad (5)$$

6. Contrainte de précédence des opérations au sein d'un site. On doit finir complètement les heures prévues d'une opération o à un site s avant de pouvoir commencer l'opération suivante.

$$d_{s,o} * y_{s,o+1,q} \leq \sum_{\omega=1}^{q} x_{s,o,\omega} \qquad \forall s \in S, \forall o \in O^S \backslash \{N^{OS}\}, \forall q \in Q \qquad (6)$$

7. On ne peut travailler plus d'heures à un site qu'il n'y en a dans un quart (10 heures). Si x heures d'une opération o sont faites en début de quart et que o est terminé, on ne pourra seulement faire que 10-x heures de l'opération o+1 durant ce quart.

$$\sum_{o \in O^S} x_{s,o,q} \leq HQ - \sum_{o \in O^S} x_{s',o,q} \qquad \forall s \in S, \forall s' \in \Omega^S, \forall q \in Q \qquad (7)$$

8. Il ne peut pas y avoir d'arrêt de travail entre le début et la fin d'une opération o à un site s sauf si cet arrêt est un sautage.

$$y_{s,o,q} - f_{s,o,q+1} + y_{s,o,q+2} \leq 1 \qquad \forall s \in S, \forall o \in O^S, \quad \forall q \in Q \backslash \{N^Q, N^Q - 1\} \qquad (8)$$

9. Contrainte de continuité de la tâche. Si une équipe travaille sur l'opération o au site s durant un certain quart q-1 et q+1, toutes les heures du quart q doivent être consacrées à cette opération o.

$$x_{s,o,q} \geq HQ * f_{s,o,q} \qquad \forall s \in S, \forall o \in O^S, \forall q \in Q \backslash \{1, N^Q\} \qquad (9)$$

10. Après certaines opérations, on doit attendre un sautage avant de pouvoir continuer à travailler à un site.

$$y_{s,o+1,q} + y_{s,o,q} \leq 1 \qquad \forall s \in S, \forall o \in OB^S, \forall q \in Q \qquad (10)$$

11. Contrainte de précédence entre les sites. Cette contrainte indique que certains sites doivent être complètement terminés avant de pouvoir en commencer d'autres.

$$\sum_{o \in O^S} \sum_{\omega=1}^{q} x_{s',o,\omega} \geq dtot_{s'} * y_{s,\mathrm{O1s},q} * \alpha_{s,s'} \qquad \forall s \in S, \forall s' \in \Omega^S, \forall q \in Q \qquad (11)$$

12. Contraintes de non négativité et de binarité. Ces contraintes sont nécessaires au bon fonctionnement et à la logique du modèle.

$$x_{s,o,q} \geq 0 \qquad \forall s \in S, \forall o \in O^S, \forall q \in Q \qquad (12)$$

$$\delta_{s,o} \geq 0 \qquad \forall s \in S, \forall o \in O^S, \forall q \in Q \qquad (13)$$

$$y_{s,o,q} \in \{0,1\} \qquad \forall s \in S, \forall o \in O^S, \forall q \in Q \qquad (14)$$

$$f_{s,o,q} \in \{0,1\} \qquad \forall s \in S, \forall o \in O^S, \forall q \in Q \qquad (15)$$

3.2 Avantages et limitations du modèle mathématique

3.2.1 Avantages

Rapidité de résolution

Ce modèle mathématique est intéressant étant donné qu'il peut offrir des résultats pour une semaine extrêmement rapidement, soit en moins d'une minute. Souvent, en planification minière et plus particulièrement à l'étape du séquencement, un des problèmes rencontrés est la lourdeur du modèle qui contribue à des très longs temps de résolution, tel qu'il est expliqué au chapitre 2. Ainsi, un temps de résolution rapide est un avantage très intéressant pour les gestionnaires.

Grande précision à très court terme

De plus, ce modèle permet de détailler à une granularité très faible, soit un quart de travail de 10 heures, quelles étapes faire et dans quel ordre, alors que la plupart des modèles de planification dans la littérature n'offre pas de détails sur les opérations à très court terme à effectuer.

Intégration des opérations

Le modèle prend en compte les précédences entre les sites, les précédences entre les opérations au sein d'un même site, les moments auxquels un sautage doit être attendu avant de continuer l'avancement d'un site et les ressources nécessaires à la complétion de ces sites. Il permet aussi d'associer une opération à un type d'équipe de travail. Ainsi, il offre un plan de travail détaillé aux opérateurs alors que traditionnellement, on connaît quel site à exploiter dans quel ordre, mais aucun détail n'est fourni sur les opérations pour exploiter le site en question.

3.2.2 Limitations du modèle mathématique

Bien que le modèle offre des avantages tangibles par rapport aux autres modèles traditionnellement conçus dans la littérature, certaines limitations sont présentes.

Temps de déplacement des équipes

En effet, le modèle ne considère pas les temps de déplacement des équipes de travail entre les sites. Ceci ne représente pas la réalité et les résultats issus du modèle mathématique sont donc optimistes par rapport à ce qu'ils seraient en réalité.

Effet de décalage

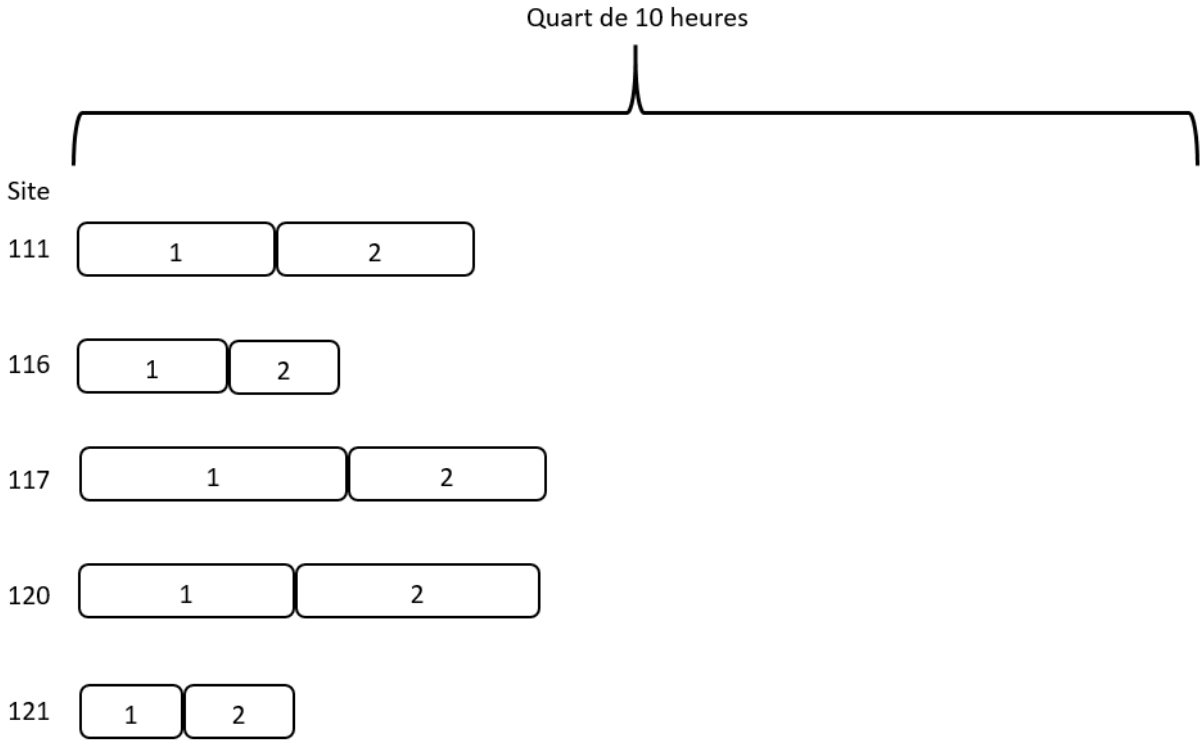


Figure 3.1 Représentation de la contrainte de ressource

De plus, un effet de décalage dû au nombre d'équipes restreint n'est pas pris en compte dans le modèle mathématique. La contrainte de ressources est prise en compte, mais en considérant le nombre d'heures que chaque type d'équipe peut fournir dans un quart de travail. Cependant, supposons qu'il n'y a qu'une seule équipe de type 1. Il y a donc 10 heures de travail de l'équipe de type 1 disponibles par quart. La figure qui suit explique la manière dont le modèle traite cette contrainte.

En supposant qu'il n'y ait qu'une seule équipe de travail de type 1 et de type 2, le nombre d'heures de travail disponibles pour un quart de travail pour ces équipes est de 10.

On peut voir que par exemple, pour le site 111, environ 2 heures de travail sont faites par l'équipe 1 et qu'il en est de même pour l'équipe 2. On voit que l'équipe 1 fait aussi environ 1 heure et demie de travail au site 116 et que l'équipe de type 2 travaille 1 heure à ce site.

Cependant, ceci ne représente pas bien la réalité puisque si l'équipe de travail de type 1 travaille au début du quart dans le site 111, elle ne peut débuter le quart en travaillant aussi au site 116.

Ainsi, un effet de décalage est observé en réalité mais le modèle mathématique ne rend pas compte de cet effet. La figure qui suit rend compte de ce qui se passe en réalité.

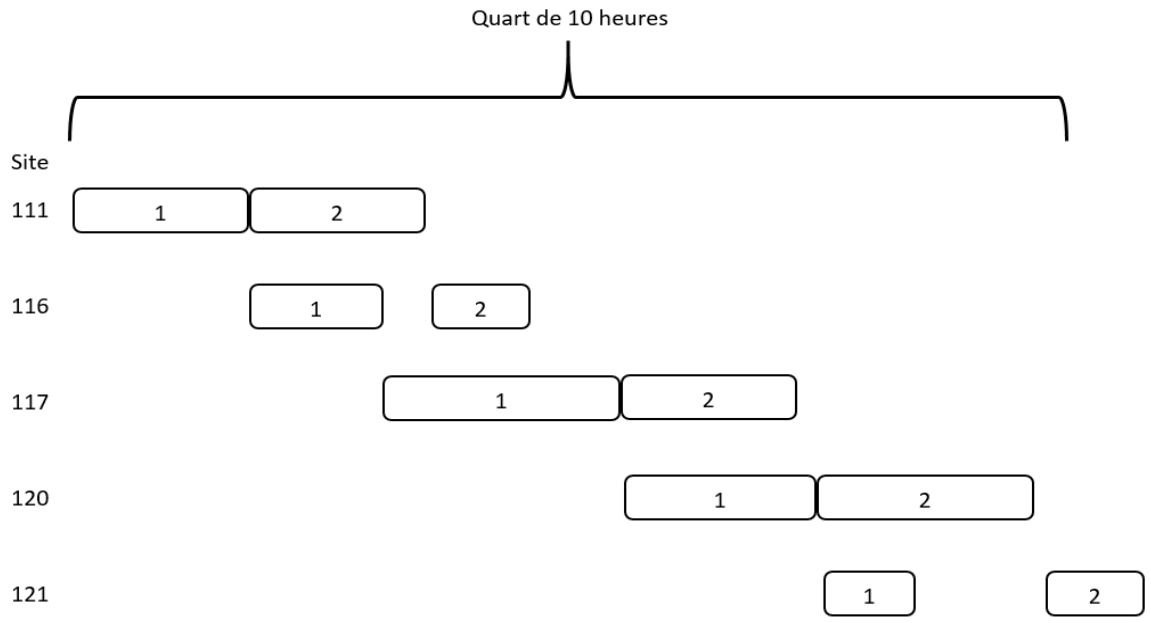


Figure 3.2 : Représentation de l'effet de décalage observé en réalité

Ce que l'on observe à la figure précédente est un phénomène de décalage des opérations d'un site à l'autre dû au fait que le nombre de ressources est limité. Ainsi, on voit qu'évidemment, lorsque l'équipe 1 est occupée au site 111 par exemple, elle ne peut pas commencer son travail au site 116 tant que le travail n'est pas terminé au site 111. Ainsi, un phénomène de décalage est observé alors qu'à la figure 3.1 un quart de travail semblait amplement suffisant pour terminer toutes les tâches, on remarque qu'en réalité, on ne peut pas finir les tâches prévues. Pour tenir compte de ce phénomène, il faudrait avoir recours à des contraintes disjonctives et à l'ajout d'une variable binaire à trois indices ce qui alourdirait considérablement le modèle. Initialement, afin de tenir compte de ce phénomène, la planification avait été faite sur les heures de la semaine (168 plutôt que 14 quarts). Cependant, ces modèles étaient beaucoup trop lourds et n'offraient pas de solution. La simulation sera donc utilisée afin de pouvoir considérer ces 2 phénomènes et éventuellement apporter des modifications au modèle mathématique.

Variabilité

Le modèle en PLM, tel qu'écrit, ne considère pas la variabilité qui est naturellement associée à la durée des opérations ou des temps de déplacement puisque c'est un modèle déterministe.

3.3 Différences entre les modèle de planification par semaines et par quarts

Étant donné le fait que le modèle de planification hebdomadaire est moins détaillé que le modèle de planification par quarts, il est normal que le modèle hebdomadaire prévoie faire plus d'heures que celui par quarts. Ainsi, puisque l'objectif du modèle par quarts consiste à minimiser l'écart avec les heures que prévoit le modèle hebdomadaire et qu'il contient plus de contraintes, il est normal que les solutions soient toujours inférieures à 100% (ces solutions sont présentées à la section 4).

La différence principale entre les deux modèles réside dans le fait que le modèle par quarts détaille chaque opération pour l'exploitation d'un site et fait donc intervenir une contrainte de précédence entre ces opérations. Ceci rallonge donc la séquence d'opérations et diminue le nombre d'heures à la fin de la semaine qui peuvent être planifiées par rapport aux cibles obtenues avec l'outil de planification hebdomadaire.

De plus, le modèle de planification par quarts fait intervenir une contrainte d'attente d'un sautage avant de pouvoir continuer le travail aux sites contrairement au modèle hebdomadaire. Cependant, dans le modèle hebdomadaire, une contrainte limite la charge de travail pouvant être faite à un site durant un quart, ce qui permet d'atténuer l'absence de contrainte sur l'attente des dynamitages dans la planification hebdomadaire. Afin de tester l'influence de la contrainte de précédence entre les opérations, les résultats issus du modèle avec et sans cette contrainte ont été testés et comparés au nombre total d'heures planifiées par le modèle par semaine.

Le tableau 3.4 sur la page suivante présente les solutions optimales du modèle de simulation par quarts pour les six semaines à l'étude (voir section 1.3) dans le cadre de ce mémoire.

Tableau 3.4 : Comparaison entre les planifications des modèles hebdomadaire et par quarts

Semaine	Planification du modèle hebdomadaire (heures)	% de satisfaction de la planification hebdomadaire par le PLM par quarts (solutions optimales PLM par quarts)
A1	300.56	97.1
A2	180.64	95.1
B1	482.73	99.1
B2	486.93	98.6
C1	594.11	98.9
C2	829.70	98.8

On remarque que l'écart entre les deux modèles de planification varie entre 1% et 5% de manière générale.

Afin de bien illustrer l'influence de la contrainte de précédence entre les opérations, deux figures sont présentées. Premièrement, la figure 3.3 représente une solution issue du modèle d'optimisation pour le site 117 à la semaine A1. Ainsi, cette figure est la représentation de la planification par quarts de travail sur l'ensemble de la semaine A1 pour le site 117.

q / o	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27
1	0.6312													
2		1.7358												
3		0.3472												
4		0.3472												
5		0.6312												
6			1.7358											
7			0.3472											
8			0.3472											
9			0.6312											
10				1.7358										
11				0.3472										
12				0.3472										
13				0.6312										
14					1.7358									
15					0.3472									
16					0.3472									
17					0.6312									
18						1.7358								
19						0.3472								
20						0.3472								
21						0.6312								
22							1.7358							
23							0.3472							
24							0.3472							
25							0.6312							
26								1.7358						
27								0.3472						
28								0.3472						
29								0.6312						
30									1.7358					
31									0.3472					
32									0.3472					
33									0.6312					
34										1.7358				
35										0.3472				
36										0.3472				
37										0.6312				
38											1.7358			
39											0.3472			
40											0.3472			
41											0.6312			
42												1.7358		
43												0.3472		
44												0.3472		
45												0.6312		
46													1.7358	
47													0.3472	
48													0.3472	
49													0.6312	
50														1.7358
51														0.3472
52														0.3472
53														0.6312

Figure 3.3 : Planification pour le site 117 pour la semaine A1 avec la contrainte de précédence des opérations

Ces valeurs représentent le nombre d'heures qui doivent être faites pour les opérations durant un quart. Ainsi, on voit que 1.74 heures de l'opération 14 doivent être faites durant le quart 9.

La figure qui suit montre la planification faite à la semaine A1 pour le site 117 lorsque la contrainte de précédence entre les opérations n'est pas considérée.

q / o	1	3	7	9	15	17	21	23	25	27
1										0.6312
2	1.7358									
3					0.3472					
4										0.3472
5						0.6312				
6	1.7358									
7										0.3472
8										0.3472
9	0.6312									
10									1.7358	
11		0.3472								
12		0.3472								
13		0.6312								
14			1.7358							
15				0.3472						
16	0.3472									
17	0.6312									
18							1.7358			
19		0.3472								
20										0.3472
21										0.6312
22									1.7358	
23		0.3472								
24										0.3472
25										0.6312
26									1.7358	
27									0.3472	
28		0.3472								
29						0.6312				
30	1.7358									
31	0.3472									
32		0.3472								
33	0.6312									
34									1.7358	
35	0.3472									
36	0.3472									
37							0.6312			
38					1.7358					
39										0.3472
40	0.3472									
41										0.6312
42		1.7358								
43		0.3472								
44										0.3472
45		0.6312								
46				1.7358						
47										0.3472
48		0.3472								
49	0.6312									
50									1.7358	
51								0.3472		
52		0.3472								
53							0.6312			
54								0.762	0.9738	
55		0.3472								
56						0.3472				

Figure 3.4 : Planification pour le site 117 pour la semaine A1 sans la contrainte de précédence des opérations

Lorsque l'on teste le modèle sans la contrainte de précédence entre les opérations, on obtient un résultat optimal de 100% ce qui signifie que toutes les heures planifiées par le modèle hebdomadaire peuvent être planifiées sur les quarts. Ainsi, on remarque que cette contrainte est très restrictive et fait partie de la réalité et ne peut donc pas être omise. Le modèle hebdomadaire est donc trop optimiste.

On remarque effectivement que le modèle mathématique réussit à faire les 56 opérations prévues au site 117 lorsque la contrainte de précédence entre les opérations n'est pas présente (figure 3.4) alors qu'elle ne peut que se rendre à la 53e opération lorsque la contrainte est en place (figure 3.3). De plus, la forme en escalier des résultats à la figure 3.3 sont caractéristiques d'une planification ordonnée qui respecte un ordre entre les diverses opérations. À la lumière de cet exemple, lorsque la contrainte est absente on voit que le modèle place des temps d'opérations à sa guise dans la planification, d'où l'aspect désordonné des résultats à la figure 3.4. Ainsi, c'est cette contrainte qui est responsable des écarts observés avec la planification issue du modèle hebdomadaire puisque ce dernier ne considère pas cette précédence entre les tâches d'un site. Pour l'ensemble des semaines testées, lorsque la contrainte de précédence entre les opérations est omise, une solution optimale de 100% est atteinte ce qui signifie que toutes les heures planifiées par le modèle hebdomadaire ont pu être planifiées sur les 14 quarts.

3.4 Modèle de simulation

Un des objectifs de ce mémoire est de tester la viabilité d'un modèle mathématique de planification minière à court terme par la simulation et être en mesure de quantifier les effets des aspects non considérés dans le modèle mathématique en faisant varier divers paramètres dans la simulation. Ainsi, un modèle de simulation des opérations de la mine El Tio a été développé. Le chapitre suivant présente le modèle de simulation.

Bénéfices de la simulation

Les aspects bénéfiques à simuler les opérations de la mine sont nombreux. L'objectif premier est de tester la viabilité des résultats issus du modèle mathématique. En effet, la simulation permet de considérer facilement des contraintes que le modèle mathématique peut plus difficilement prendre en compte.

Premièrement, les temps de déplacements des équipes sont beaucoup plus faciles à considérer en simulation qu'en programmation mathématique. Ainsi, le modèle de simulation permet d'offrir des résultats plus fidèles à la réalité que le modèle mathématique.

De plus, l'effet de décalage mentionné précédemment, que le modèle ne considère pas, est implicitement considéré dans la simulation puisque l'on observe réellement le déplacement des équipes de site en site.

Finalement, l'aspect de variabilité non considéré dans le modèle mathématique est facile à observer à l'aide de l'outil de simulation.

Intrants du modèle de simulation

Les intrants utilisés dans le modèle de simulation sont les mêmes que dans le modèle d'optimisation c'est-à-dire les durées des opérations à effectuer pour chaque opération à chaque site obtenues du modèle de planification hebdomadaire.

Fonctionnement du modèle

Le modèle simule les opérations minières souterraines de la mine El Tio. Pour ce faire, des boucles de logique représentant chaque site traité durant une semaine ont été utilisées. De plus, des entités représentant les équipes de travail ont été utilisées dans la simulation. Ce sont ces équipes qui sont partagées à travers différents sites pour les tâches à effectuer. Il est possible de faire varier différents paramètres facilement comme la variabilité associée la durée des tâches, les temps de déplacement des équipes entre les divers sites, la variabilité associée au temps de déplacement des équipes et le nombre d'équipes de chaque type. L'objectif du modèle de simulation est d'évaluer l'influence des paramètres non considérés dans le modèle d'optimisation. L'effet de décalage décrit à la section 3.2.2 est implicitement pris en compte dans le modèle de simulation. Les simulations, lorsque lancées sans variabilité ou temps de déplacement, offrent les mêmes résultats que le modèle d'optimisation. Cela signifie que l'on compte le même nombre d'heures n'ayant pu être planifiées aux mêmes sites. Une fois que l'on obtient ces mêmes résultats, il est possible de faire intervenir de la variabilité et les temps de déplacements te de faire varier ces paramètres afin d'observer l'influence sur les résultats. Les règles de décision de base d'Arena (FIFO) ont été considérées lorsque 2 sites faisait appel une même équipe de travail. Le nombre d'équipes considéré a été celui fournit par l'étudiant au Ph. D. qui a utilisé ce nombre d'équipes dans son modèle de planification

hebdomadaire. Afin de ne pas fausser les résultats, ce même nombre d'équipes a été considérés soient 6 équipes pour les équipes de type 1 à 7 et 3 pour les équipes de type 8 et 9. Des tests qui sont présentés à la section 4 ont permis de révéler que ces nombres d'équipes n'étaient pas optimistes et que moins d'équipes permettent d'atteindre tout de même la solution optimale dans le modèle de planification par quarts. Ainsi, on a remarqué que la séquence exacte des opérations du modèle mathématique n'avait pas d'influence sur les résultats des modèles de simulation étant donné le très grand nombre d'équipes disponibles. Des images du modèle de simulation sont disponibles en annexe.

CHAPITRE 4 RÉSULTATS

4.1 Solution issue du programme linéaire

Afin de s'assurer que les modèles fonctionnent et sont valides pour plus d'un cas particulier, les tests sont effectués à trois moments différents sur la durée des trois mois. Ces moments correspondent aux différents types de semaines traitées (voir section 1.3).

Voici un exemple de solution que fournit le programme mathématique développé dans le présent mémoire pour deux sites à la semaine B2.

q / o	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27
1	0.01	10	10	10	10	10	10	10	10	1.05	
2										8.4645	0.6415
3											0.5
4											8.8585

Figure 4.1 : Planification du PLM au site 14 pour la semaine B2

q / o	9	11	13	15	19	23	25	27
7	0.5584							
8		1.5355						
9		0.3071						
10			0.3071					
11			0.5584					
12				1.5355				
13					0.3071			
14						0.3071		
15							0.5584	
16								1.5355
17								0.3071
18								0.3071

Figure 4.2 : Planification du PLM au site 115 pour la semaine B2

Le modèle fournit comme information le nombre d'heures de chaque opération devant être fait à un site durant un certain quart. Ceci permet aux administrateurs d'avoir un objectif clair et défini afin d'atteindre les objectifs de production à plus long terme. On remarque que les opérations sont sujettes à une contrainte de précédence ce qui confère aux solutions leur aspect ordonné.

4.2 Traitement des semaines en continu

Une analyse a été effectuée pour évaluer l'effet de traiter deux semaines consécutives conjointement sur les solutions. Pour ce faire, l'aspect de variabilité dans les temps de déplacement et les durées des opérations a été omis. Le tableau qui suit présente les résultats de ces tests.

Tableau 4.1 : Comparaison de solutions pour le traitement de paires de semaines traitées séparément et conjointement

	Paires de semaines traitées conjointement	Paires de semaines traitées séparément
Semaines testées	% planifié (p/r au plan hebdomadaire)	% planifié (p/r au plan hebdomadaire)
A	99.0	96.3
B	90.0	70.0
C	99.6	98.9

On remarque que pour tous les cas lorsque les semaines consécutives sont traitées simultanément les solutions sont améliorées. Ainsi, les résultats obtenus de la planification par quarts se rapprochent de ceux obtenus par la planification par semaine. Ceci est dû au fait que les ressources sont plus utilisées. En effet, lorsqu'on traite une semaine seule, moins de sites sont traités que sur deux semaines. Les équipes sont parfois en attente d'une tâche à aller effectuer étant donné les contraintes de précédence entre les tâches. Ainsi, lorsque plus de sites sont disponibles pour être traités, plus de possibilités de sites à aller traiter s'offrent aux équipes ce qui réduit les temps d'inactivité des équipes. Ainsi, plus d'heures peuvent être faites sur deux semaines traitées ensemble que la somme de ces deux mêmes semaines consécutives traitées séparément. Des tâches n'ayant aucun prédécesseur peuvent alors être devancées dans le temps. Il est cependant peu probable que même si l'on traite un grand nombre de semaines en continu, qu'on atteigne une solution parfaite (100% de satisfaction) étant donné la contrainte de précédence entre les opérations. Cependant, on se rapprocherait d'une solution parfaite. Le tableau 4.2 présente les pourcentages d'inactivité de chaque type d'équipe.

Tableau 4.2 : Pourcentages d'inactivité des types d'équipe de travail

Semaine	Type équipe	Taux d'inactivité (%)		Semaine	Taux d'inactivité (%)	
		Conjointement	Séparément		Conjointement	Séparément
A	1	95.5	95.5	B	95.6	95.6
	2	-	-		76.9	81.2
	3	-	-		94.1	99.5
	4	97.6	97.7		97.6	97.7
	5	86.9	87.5		88.0	88.5
	6	97.6	97.7		97.6	97.7
	7	-	-		-	-
	8	-	-		96.2	98.9
	9	88.0	88.0		-	-

Semaine	Type équipe	Taux d'inactivité (%)		Type équipe	Taux d'inactivité (%)	
		Conjointement	Séparément		Conjointement	Séparément
C	1	96.7	96.7	6	98.2	98.3
	2	80.0	80.0	7	97.1	97.3
	3	68.0	68.8	8	91.7	91.7
	4	98.2	98.3	9	-	-
	5	81.5	81.0			

La raison pour laquelle ces pourcentages d'inactivité sont très élevés est que le modèle hebdomadaire travaillait avec 6 équipes de type 1 à 7 et 3 de type 8 et 9. Ainsi, ceci est nettement supérieur à ce qui est réellement nécessaire pour avoir une planification par quarts optimale. Prenons l'exemple d'une équipe de type 1. 6 équipes sont disponibles durant 28 quarts (2 semaines), 10 heures par quart. Ainsi, une équipe de type 6 peut offrir 1680 heures (6*10*28) de disponibilité sur 2 semaines. Si 80 heures de travail d'une équipe de type 1 sont faites sur ces 2 semaines, le taux d'inactivité associée à ce type d'équipe sera de 95.2% (1600/1680). Ce qu'on remarque est que dans la quasi-totalité des cas, le taux d'inactivité des équipes augmente lorsque les semaines sont traitées séparément ce qui vient confirmer que les équipes ont plus d'options lorsque l'horizon de planification est de deux semaines. Les équipes ont donc plus d'options de travail ce qui contribue à rapprocher la planification par quarts de l'objectif hebdomadaire.

De plus, lorsque l'on roule par exemple le PLM par quarts pour la semaine A1 avec une seule équipe de chaque type, on obtient la solution optimale, la même que lorsque l'on a roulé le modèle avec 6 équipes de type 1 à 7 et 3 équipes de type 8 et 9. Pour la semaine C1, on obtient la solution optimale avec 2 équipes de type 1 à 7 et 1 équipe de types 8 et 9. Ces résultats viennent prouver la surestimation du nombre d'équipes dans le modèle hebdomadaire. Cependant, le nombre d'équipe surestimé a été utilisé afin de ne pas induire de différence entre les paramètres des modèles de planification hebdomadaire et par quarts mais le modèle par quarts prouve que le nombre d'équipe considéré est trop important.

4.3 Viabilité du modèle de simulation

Le modèle de simulation a été conçu de manière à simuler les opérations de la mine. Afin de pouvoir comparer le modèle de simulation au modèle mathématique et tester la viabilité du modèle de simulation, ce dernier simule les mêmes contraintes qui ont été établies dans le modèle mathématique à savoir les sautages et l'évacuation de la mine à intervalle réguliers, la précédence entre les opérations à un site et le partage des ressources.

Ainsi, des tests ont été effectués afin de comparer les résultats issus du modèle mathématique et à ceux issus du modèle de simulation. Le tableau suivant montre les résultats obtenus.

Tableau 4.3 : Résultats du test de viabilité du modèle de simulation pour la semaine A1

Nombre d'équipes de chaque type	% planifié (p/r au plan hebdomadaire) - PLM	% planifié (p/r au plan hebdomadaire) - simulation
1	97.1	92.6
6	97.1	97.1

Ce test simple est intéressant puisqu'il prouve la viabilité du modèle de simulation et que celui-ci simule bien le processus que le modèle mathématique cherche à optimiser.

En effet, on sait que le modèle de planification hebdomadaire prévoit 300.6 heures de travail pour la semaine A1 sur 11 sites différents. On remarque qu'avec une équipe de chaque type, le modèle d'optimisation obtient comme solution 97.1%. Cela signifie que 97.1% des heures prévues par le modèle de planification hebdomadaire ont pu être planifiées sur les quarts de travail. La simulation avec une seule équipe montre qu'en réalité, ce n'est que 92.6% des heures du plan hebdomadaire qui peuvent être planifiées sur les quarts. Cet écart de 4.5% heures est dû au fait que le modèle de simulation considère l'effet de décalage décrit à la section 3.2.2. On voit que cet effet est donc non négligeable et que de l'ignorer fausse les résultats.

Lorsqu'on augmente le nombre d'équipes de chaque type à six, on remarque que le modèle d'optimisation donne le même résultat 97.1% qu'avec un faible nombre d'équipes. On comprend donc que ce ne sont pas les ressources qui limitent la solution dans le modèle mathématique mais bien l'ensemble des autres contraintes. Le fait que la simulation avec six équipes de chaque type donne le même résultat que le programme mathématique 97.1% montre que l'écart de 4.5% observé lorsque l'on teste la simulation avec une équipe de chaque type est dû à l'effet de décalage qui n'a plus d'influence lorsque le nombre de ressources disponibles devient suffisant.

4.4 L'estimation du nombre d'équipes nécessaires grâce à la simulation

Étant donné que le modèle de simulation considère des éléments présents en réalité que le modèle mathématique ne considère pas, il permet d'aboutir à certaines conclusions auxquelles le modèle d'optimisation ne peut pas arriver. Le modèle mathématique considère les contraintes dues aux

ressources limitées mais ne permet pas de simuler exactement le comportement des équipes de travail partagées entre plusieurs sites (voir section 3.2.2). Lorsque l'on résout le programme mathématique avec très peu d'équipes, on remarque que la solution optimale est tout de même atteinte puisque malgré le fait que l'on rajoute des équipes dans des tests subséquents, la solution optimale reste la même. Cependant, lorsque le modèle de simulation est lancé avec un nombre d'équipes permettant d'atteindre l'optimum dans le PLM, l'optimum n'est pas toujours atteint en simulation. Lorsqu'on augmente le nombre d'équipes disponibles dans la simulation, on arrive éventuellement à la solution optimale. Ainsi, il est possible de faire des tests pour déterminer le nombre d'équipes optimal, c'est-à-dire le nombre d'équipes le plus restreint permettant tout de même l'atteinte les objectifs. Le tableau 4.4 montre que le PLM atteint l'optimal avec 3 équipes de chaque type mais qu'avec le même nombre d'équipes, le simulateur ne l'atteint pas toujours. Il est à noter que ces tests ont été effectués avec trois équipes de chaque type et sans considérer les temps de déplacements ni la variabilité dans les temps d'opérations, afin d'isoler l'effet dû à la modification du nombre d'équipes. Ces résultats sont donc trop optimistes par rapport au nombre d'équipes nécessaires en réalité. L'influence du temps de déplacement (avec variabilité) et de la variabilité de la durée des opérations est étudiée à la section 4.7.

Tableau 4.4 : Résultat du PLM et du simulateur avec 3 équipes de chaque type

Semaine	% planifié (p/r au plan hebdomadaire) PLM	% planifié (p/r au plan hebdomadaire) Simulation
A1	97.1%	97.1%
A2	95.1%	95.1%
B1	99.1%	99.1%
B2	98.6%	89.5%
C1	98.9%	88.5%
C2	98.8%	96.1%

On remarque que les semaines A1, A2 et B1 ne sont pas affectées par l'effet décrit précédemment. Les semaines A ne sont pas touchées étant donné que tous leurs sites sont des sites de développement avec beaucoup de temps d'inactivité causé par l'attente des multiples sautages. Ainsi, cela permet à une même équipe de visiter plusieurs sites durant un même quart. Aux semaines B et C sont traités des sites de développement qui n'ont au maximum qu'une seule attente de sautage et dont les opérations sont très longues. Ainsi, ces sites monopolisent des équipes durant de longues périodes. On voit donc qu'à ces semaines l'effet de décalage décrit précédemment affecte la solution. Le tableau qui suit indique le nombre d'équipes nécessaire au simulateur pour atteindre la solution optimale pour chacune des semaines. On a considéré un nombre d'équipes fixe pour chaque type d'équipes.

Tableau 4.5 : Nombre d'équipes optimal selon la semaine

Semaine	Nombre d'équipes nécessaires à l'atteinte de la solution optimale avec le modèle de simulation
A1	3
A2	3
B1	3
B2	4
C1	5
C2	6

Bien entendu, plus il y a de contraintes de précédence entre les sites, moins d'équipes sont nécessaires. Considérons que tous les sites ont besoin d'équipes de type 1, 5, 4 et 6 pour progresser, et que des contraintes de précédence empêchent plus d'un site d'être exploité à la fois. Une seule équipe de chaque type suffira pour atteindre l'optimal (si on ne considère pas le déplacement) puisque de toute manière, une équipe 1 par exemple, ne pourrait pas travailler dans un autre site en attendant que les équipes 5, 4 et 6 terminent leur travail au site en question. On remarque que les semaines où des sites de développement sont exploités (semaines B et C) requièrent plus d'équipes

généralement étant donné que les équipes sont monopolisées durant de longues périodes. Il aurait été possible de définir le nombre d'équipes de chaque type comme une variable et laisser le solveur déterminer le nombre d'équipes optimal pour chaque type. Cependant, une approche différente a été choisie, soit celle où le nombre d'équipe était fixe comme il était le cas dans le modèle hebdomadaire dont les intrants du modèle par quarts sont issus. On a remarqué qu'avec un nombre d'équipes bien inférieur à celui établi dans le modèle hebdomadaire, le PLM par quarts atteignait ses solutions optimales.

4.5 L'influence de la variabilité de la durée des opérations

Les tâches sont en réalité évidemment soumises à de la variabilité. Ainsi, si les tâches prennent plus de temps à être réalisées, on s'attend à ce que le nombre d'heures manquantes soit plus grand à la fin de la semaine. La loi triangulaire est communément utilisée pour simuler les temps d'opérations. Ainsi, les temps d'opérations issus du modèle hebdomadaire (voir tableau 3.2, section 3.1) ont été modifiés avec une loi triangulaire de la manière suivante où x correspond au temps d'opération, α au coefficient de la borne inférieure et β au coefficient de la borne supérieure :

$$TRIANGULAIRE(\alpha * x, x, \beta * x)$$

Pour ces tests, on a ignoré les temps de déplacements et on a travaillé avec le nombre d'équipe de base (6 pour type 1 à 7 et 3 pour 8 et 9). Le tableau 4.6 présente les résultats des tests sur la variabilité de la durée des tâches.

Tableau 4.6: Résultats des tests de la variabilité de la durée des opérations

Semaine	Heures prévues (plan hebdomadaire)	α	γ	β	% planifié (p/r au plan hebdomadaire)
A1	300.6	1	1	1	97.0
		0.9	1	1.1	97.0
		0.9	1	1.2	97.0
		0.9	1	1.3	97.0
		0.9	1	2	97.0
B1	482.7	1	1	1	99.1
		0.9	1	1.1	99.1
		0.9	1	1.2	99.1
		0.9	1	1.3	99.1
		0.9	1	2	93.6
C1	594.1	1	1	1	98.9
		0.9	1	1.1	98.3
		0.9	1	1.2	97.9
		0.9	1	1.3	96.5
		0.9	1	2	82.0

On remarque que pour la semaine A1, la variabilité est absorbée complètement et que même avec un coefficient β de 2, on obtient une planification par quarts permettant de faire 97% des heures qui étaient prévues à cette semaine par le plan hebdomadaire. Ceci s'explique par le fait que les sites de développement présentent beaucoup de temps morts. Il en est ainsi puisque ces sites sont exploités par une répétition de 4 tâches très courtes et après la 1e étape (voir section 3.1), un sautage doit être effectué avant de pouvoir continuer l'exploitation du site. Ainsi, ces temps morts viennent absorber l'augmentation de la durée des tâches ce qui fait que la solution n'est pas dégradée.

Pour la semaine B1, on remarque que la variabilité ne commence à dégrader la solution seulement qu'au test avec un coefficient β de 2. À cette semaine, beaucoup de sites de développement sont traités et la variabilité est facilement absorbée.

À la semaine C1, on remarque que dès la borne supérieure atteint 1.1, l'optimalité n'est pas atteinte. Ceci s'explique par le fait que ces sites sont exploités avec une série de 7 opérations et chacune de ces opérations a une durée très importante. De plus, ce n'est qu'après la 4e étape qu'un sautage doit être fait avant de pouvoir continuer. À la semaine C1, aucun site de développement n'est planifié se rendre plus loin que l'étape 4. Ainsi, aucune attente d'un quart de sautage n'est planifiée pour ces sites. Alors, dès que la durée des tâches augmente même très légèrement, l'effet se fait tout de suite sentir et la solution est dégradée. De plus, le site 48 compte 140 heures de travail prévues. Puisque la semaine ne compte que 140 heures de travail, la moindre augmentation de durée de travail affectera les résultats.

Ainsi, on voit que la variabilité sur la durée des tâches n'a pas un effet considérable sur les solutions. De plus, on voit que lorsque sont négligées les contraintes de précédence entre les opérations ainsi que les contraintes d'attente de sautage, on surestime la charge de travail qui peut être réellement faite (jusqu'à 3%).

De plus, une des raisons pour laquelle on observe de faibles variations est le fait que le nombre d'équipes fourni par l'étudiant au Ph. D. comme paramètre est trop important. Puisque le nombre d'équipe est surestimé, il est plus difficile d'observer l'influence des autres paramètres (variabilité et temps de déplacement) sur les résultats.

4.6 L'influence des temps de déplacement

Les solutions optimales offertes par le PLM ne prennent pas en compte l'effet du temps de déplacement des diverses équipes entre les sites de travail car pour ce faire il faut connaître la séquence des tâches effectuées par chaque équipe. On pourrait reformuler le modèle afin que les variables indiquent l'ordre dans lequel un équipe visite les sites de travail (comme il se fait dans un problème de *flowshop* ou de *jobshop*) mais une telle formulation nécessiterait d'ajouter une variable binaire au modèle ainsi que de considérer un indice pour chacune des équipes de travail quel que soit son type. Cependant, on a opté pour tester l'influence de ce paramètre avec la simulation. Les modèles de simulation sont donc utilisés pour analyser et quantifier cet effet. Le temps de déplacement le plus grand qu'il est possible d'observer à la mine étudiée est de 27.9 minutes. Afin d'isoler l'effet des temps de déplacement, on a omis la variabilité associée à la durée des tâches. Des tests ont été effectués afin d'observer l'influence des temps de déplacement sur les solutions optimales. Pour réaliser ces tests, on a considéré la loi suivante pour les temps de déplacement :

$$Triangulaire(0.9 * X, X, 1.3 * X)$$

$$o\text{ù } X = Aléatoire\ (\theta, \mu)$$

Le temps de déplacement entre 2 sites est déterminé par cette loi mais reste fixe une fois qu'il a été établi. Le tableau 4.7 présente les résultats des tests sur les temps de déplacement.

Tableau 4.7 : Résultats des tests de l'influence des temps de déplacement

Semaine	θ (min)	μ (min)	% planifié (p/r au plan hebdomadaire)
A1	0	0	97.1
	5	15	97.1
	15	25	97.1
	25	35	97.1
	35	45	97.1
B1	0	0	99.1
	5	15	99.1
	15	25	99.1
	25	35	99.1
	35	45	99.1
C1	0	0	98.9
	5	15	98.8
	15	25	98.7
	25	35	98.6
	35	45	98.4

Dans la même optique que les résultats de la variabilité de la durée des opérations pour la semaine A1 présentés précédemment, on remarque que les temps de déplacements sont facilement absorbés par les temps d'attentes des sautages nécessaires. Même en considérant des temps de déplacement entre chaque site supérieurs à la valeur maximale possible dans la mine (29.7 minutes), soient des

temps variant entre 35 et 45 minutes, on voit que la solution reste inchangée avec 97.1% de la planification hebdomadaire sur les quarts.

Les tests ont été également effectués avec la semaine B1 comme pour les tests de la variabilité. Tel qu'observé au test de la variabilité de la durée des opérations pour la semaine B1, on remarque que cette augmentation des temps est absorbée même avec un grand temps de déplacement. Les temps de déplacement n'ont pas d'effet sur la solution pour la semaine B1.

Finalement, les tests ont été fait sur une semaine de type C, la semaine C1, où la plupart des sites sont des sites de production. On remarque que dès que l'on considère des temps de déplacement, même faibles (5 à 15 minutes) la solution est dégradée. Cependant, cette dégradation est minime et on voit que dans le pire scénario testé (35 à 45 minutes), la solution n'est dégradée que de 0.5%. Encore une fois, cette dégradation est due au fait que 140 de travail sont prévues au site 48 et donc qu'une perte de temps entre 2 tâches, aussi faible soit elle, engendre une dégradation de la solution.

Encore une fois, les écarts sont faibles puisque l'on a considéré un très grand nombre d'équipes qui n'est pas le nombre d'équipe optimal pour les semaines testées. En effet, en début de vie de la mine, on traite surtout des sites de développement avec beaucoup de temps d'inactivité (semaines de type A et B) ce qui fait que le nombre d'équipe optimal est plus faible que lorsque l'on traire beaucoup de sites de production (semaines de type C). Le modèle hebdomadaire a considéré un nombre d'équipe optimal pour des semaines régulières (type C) d'où le fait que lorsque l'on conserve ce nombre d'équipe pour les semaines de type A et B, on a un nombre d'équipes qui n'est pas optimal.

4.7 Variabilité de la durée des opérations et temps de déplacement

On a aussi testé le scénario réaliste en combinant la variabilité de la durée des opérations ainsi que les temps de déplacement des équipes et la variabilité associés à ces temps. Pour ce faire, on a utilisé la même loi triangulaire qu'à la section 4.1 pour la variabilité de la durée des opérations avec une valeur α fixe à 0.9 et une valeur de β fixe à 1.3. On a utilisé la même loi triangulaire qu'à la section 4.2 pour la variabilité des durées de déplacement avec des valeurs de θ et de μ fixes à respectivement 5 et 30 minutes. Ces valeurs semblent logiques puisque le déplacement le plus long entre deux sites de la mine est de 29.7 minutes.

La colonne de gauche du tableau 4.8 indique donc le pourcentage de la planification hebdomadaire qui a pu être planifiée avec le modèle par quarts. Cette solution est optimale puisqu'elle ne fait ni intervenir des temps de déplacement ou de la variabilité. Elle est issue du PLM. La colonne de droite représente les pourcentages de la planification hebdomadaire qui a pu être planifiée avec le modèle par quarts mais ces pourcentages sont issus du modèle de simulation. Ils représentent un scénario réaliste puisque dans la réalité les opérations ont des temps variables et les équipes de travail doivent se déplacer de site en site et ce, avec des temps variables. Les paramètres utilisés pour simuler ces variabilités et ces déplacements sont décrits précédemment.

Tableau 4.8 : Test de variabilité des durées d'opérations et déplacements et leur variabilité

Semaine	% planifié (p/r au plan hebdomadaire) **sans** variabilité et déplacement	% planifié (p/r au plan hebdomadaire) **avec** variabilité et déplacement	% d'écart entre le modèle déterministe et la réalité
A1	97.1	97.1	0
A2	95.1	95.1	0
B1	99.1	99.1	0
B2	98.6	96.5	2.1
C1	98.9	96.4	2.5
C2	98.8	96.5	2.3

Ce que l'on observe au tableau 4.8 est l'influence des facteurs que le modèle mathématique de planification par quarts ne considère pas étant donné que ce dernier est déterministe. Ces facteurs sont les temps de déplacement des équipes entre les sites ainsi que la variabilité associée à ces temps ainsi que la variabilité de la durée des opérations aux divers sites. Ces facteurs sont présents en réalité. On remarque que pour les semaines A et la semaine B1, l'effet de ces facteurs sont absorbés complètement puisque le modèle de simulation offre les mêmes résultats que le modèle déterministe. Il en est ainsi à cause des nombreux temps d'inactivité associés aux sites de développement qui sont plus présents aux semaines A. Cependant, aux semaines B2 et C on voit

que ces facteurs affectent les résultats les faisant varier de 2.1% à 2.5%. On voit que l'effet sur les solutions de ces facteurs n'est pas trop important et que les plans de production issus du modèle de planification par quarts sont assez fidèles à la réalité. Le fait que le nombre d'équipes utilisé dans ces tests ne soit pas optimal, vient minimiser les écarts que l'on observe entre le modèle de simulation et le modèle de planification par quarts.

4.8 Temps de résolution

Des tests ont été effectués afin d'évaluer le temps de résolution du PLM selon le nombre de sites à planifier. Les tests ont été basés sur le modèle traitant les semaines B1 et B2 conjointement. Ce modèle compte 13 sites. Des sites ont été enlevés et ajoutés afin de comparer les temps de résolution lorsque le nombre de sites varie de 5 à 20. Les durées d'opérations aux sites rajoutés étaient similaires aux durées des 13 sites traités aux semaines B. La figure qui suit présente ces résultats.

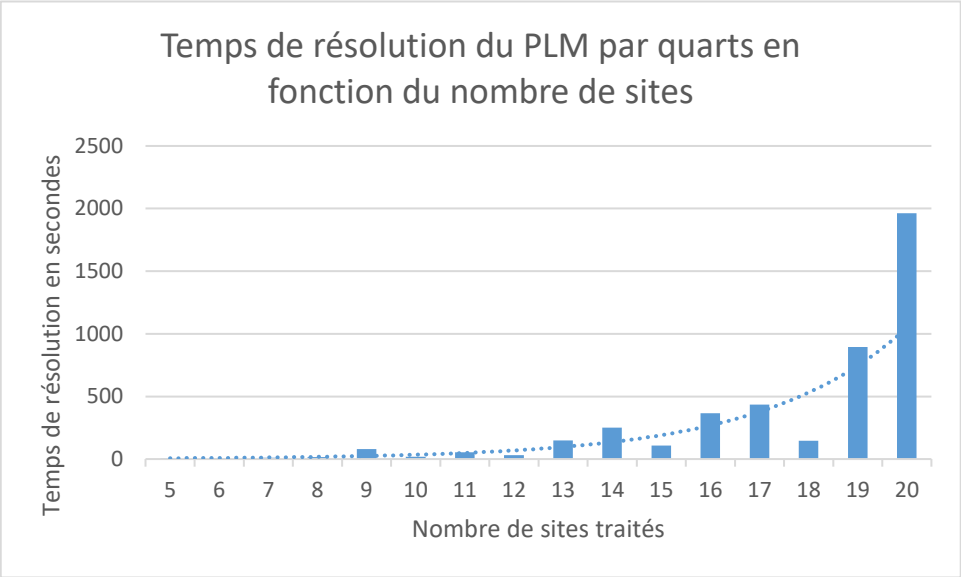


Figure 4.3 : Temps de résolution en fonction du nombre de sites

On remarque une tendance voulant que plus le nombre de sites considérés dans la planification est grand, plus le temps de résolution est grand. De plus, le modèle est efficace et rapide pour résoudre des problèmes de faible envergure, soit pour la planification par quarts sur une semaine (90 000 contraintes et 40 000 variables). Lorsque la planification est faite pour 2 semaines consécutives (330 000 contraintes et 140 000 variables), le temps de résolution est environ 25 fois supérieur mais offre quand même un résultat optimal dans un délai très court (moins de 2 minutes). On

remarque que parfois, un modèle avec plus de sites se résout plus rapidement qu'un modèle avec moins de sites. En effet, on voit que le modèle avec 18 sites a un temps de résolution inférieur au modèle avec 17 sites. Ainsi, probablement qu'avec les données pour le test avec 18 sites, le solveur a eu moins de nœuds à aller observer dans l'arbre de branchement pour trouver la solution optimale en nombres entiers. On remarque tout de même la tendance voulant que le temps de résolution soit exponentiellement croissant en fonction du nombre de sites.

CHAPITRE 5 DISCUSSION

Le modèle présenté dans ce mémoire a quelques limitations. En effet, ce dernier ne considère pas les temps de déplacement entre les divers sites ce qui offre des résultats trop optimistes. En réalité, moins d'heures pourraient être planifiées durant les quarts puisque les équipes doivent se déplacer d'un site à un autre. En second lieu, bien que le modèle considère une contrainte de ressources, celle-ci n'est pas exactement représentative de ce qui se passe dans la réalité (voir section 3.2.2). Cependant, le modèle de simulation permet de considérer ces aspects. Le modèle de simulation ne permet pas de considérer explicitement le trafic auquel sont sujets les véhicules dans la mine mais est considéré indirectement dans les temps de déplacement.

Certains aspects n'ont été considérés ni dans le PLM ni dans le modèle de simulation. En effet, les modèles ne font pas de distinction entre les sites en ce qui a trait à la teneur en minerai dans le massif rocheux. Ainsi, aucun ordre de priorité basé sur cet élément n'est entré en jeu dans les solutions issues du PLM et testées dans le simulateur. Les bris d'équipements et la maintenance n'ont également pas été considérés dans les modèles. Le transport du minerai des sites aux chutes de minerai n'a pas été pris en compte et le blocage des chutes de minerai non plus. Cependant, certains aspects ont été préalablement pris en compte dans le modèle hebdomadaire dont sont issues les données d'entrée du modèle par quarts présenté dans ce mémoire. Ainsi, les résultats du modèle présenté dans ce mémoire tiennent implicitement compte de ces aspects. Parmi ceux-ci on compte les contraintes associées à la ventilation de la mine, les contraintes touchant la stabilité de terrain, les contraintes relatives aux capacités des chutes de minerai ainsi que le travail minimal à réaliser si on envoie une équipe à un site.

Ce qui est récurrent à travers les tests qui ont été effectués est que la nature d'un site ainsi que le type de semaine traitée ont un impact sur l'influence de certains paramètres comme les temps de déplacement et leur variabilité ainsi que la variabilité de la durée des opérations. En effet, on remarque que les semaines A1 et A2 ne sont pas affectées par ces phénomènes étant donné le fait que les sites exploités à ces semaines sont des sites de développement et que les temps d'opérations et les multiples sautages font que les sites sont soumis à beaucoup d'inactivité. Ainsi, ces temps d'inactivité viennent absorber les temps de déplacement et la variabilité qui est affectée au modèle. Pour les sites de production n'ayant qu'un seul ou pas de sautage et des temps d'opérations très longs, ces effets se font sentir même avec des valeurs très faibles.

De plus, le modèle de panification des opérations par quarts a permis de révéler que le modèle de planification hebdomadaire ne considérait pas un nombre d'équipes optimal. En effet, les solutions obtenues par le modèle de planification par quarts étaient optimales même lorsque l'on réduisant de beaucoup le nombre d'équipes disponibles qui avait été utilisé dans la planification hebdomadaire. Réduire le nombre d'équipes dans une mine souterraine représente de grandes économies d'argent.

CHAPITRE 6 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Ce mémoire présente un modèle d'optimisation mathématique en programme linéaire mixte afin de planifier les opérations de production et de développement d'une mine souterraine, et ce sur les quarts de travail d'une semaine. Pour ce faire le modèle utilise les résultats d'un modèle faisant la planification sur la semaine. Le modèle par quarts vient donc minimiser l'écart entre la planification par semaine et la planification sur l'ensemble des quarts de cette même semaine et ce en un temps très court. La revue de littérature n'a pas permis de trouver un modèle avec une fonction similaire. Cependant, ce genre de planification est extrêmement intéressant pour les administrateurs des mines étant donné qu'une planification part quarts de travail permet de considérer toutes les contraintes réelles auxquelles sont soumises les activités minières. Ainsi, ce genre d'outil peut permettre de bien prédire la production minière sans la surestimer contrairement à des modèles à plus long terme qui ne permettent pas de prendre en compte certaines contraintes comme la précédence entre les opérations à un site de travail ou l'attente des sautages avant de pouvoir continuer. De plus, les modèles mathématiques étant des modèles déterministes, les aspects de probabilités et de variabilité n'y sont pas considérés. Un modèle de simulation a donc été développé afin de tester l'influence de certains aspects absents du PLM comme les temps de déplacements des équipes et la variabilité associée aux temps.

En plus d'offrir une planification détaillée des opérations à effectuer à chaque quart de travail, le modèle de planification a permis de tester la viabilité d'un modèle de planification par semaine. En effet, il a été possible de quantifier l'influence de l'omission de certaines contraintes qui est faite sur l'horizon d'une semaine ou l'influence de ne pas considérer le bon degré de précision pour certaines contraintes. On remarque que l'omission des contraintes d'attente des sautages et de précédence entre les opérations n'a pas une grande influence sur les solutions. En effet, on voit que dans le pire des cas, omettre ces contraintes ne surestime la solution que de 2.5%. Ainsi, le modèle de planification à court terme est viable. De plus, le PLM par quarts a permis de déterminer que le nombre d'équipes utilisé dans le modèle de planification hebdomadaire n'était pas optimal du tout ce qui se traduirait dans un cas pratique en des pertes d'argent pour une compagnie minière.

Un autre élément qui peut être tiré de ce mémoire est que les modèles de planification sur des horizons d'une semaine ne sont pas nécessairement pertinents puisque le modèle de planification sur les quarts de la semaine offre des résultats qui se rapprochent énormément des résultats obtenus

par la planification sur la semaine. De plus, ces résultats sont obtenus dans des temps extrêmement rapides (moins de 10 secondes). En plus, le PLM par quarts a l'avantage de fournir un plan détaillé des opérations à effectuer de manière beaucoup plus précise que le plan hebdomadaire. Cependant, il est à noter que dans le cadre de ce projet, certaines contraintes étaient considérées au niveau de planification supérieur (modèle hebdomadaire) et donc, la modélisation de ces contraintes n'a pas dû être considérée dans le modèle par quarts. Ainsi, considérer ces contraintes dans le PLM alourdirait probablement le modèle ce qui aurait un effet sur les temps de résolutions des planifications.

Une recommandation est donc de modifier le modèle de planification hebdomadaire de manière à être capable de considérer ou d'estimer l'influence des précédences nécessaires entre les opérations aux divers sites de travail. Les travaux présentés dans ce mémoire ont donc permis d'apporter des améliorations au modèle de planification hebdomadaire.

Afin de faciliter l'utilisation de l'outil de planification par quarts de travail, il serait bénéfique d'automatiser le traitement des données issues du modèle de panification hebdomadaire afin de les rendre compatibles avec le modèle par quarts. Cette étape faite manuellement dans le cadre de ce mémoire prend un temps non négligeable à réaliser. Ainsi, d'éventuels utilisateurs gagneraient beaucoup de temps si cette étape de traitement de données était automatisée. Il serait aussi pertinent pour d'éventuels utilisateurs de considérer certains éléments non pris en compte dans le cadre de ce mémoire comme les bris de véhicules, le transport du minerai des sites aux chutes de minerai ou le blocage des chutes de minerai. Ces éléments, dont certains dépendent de lois de probabilités peuvent être considérés avec le modèle de simulation développé dans le cadre de ce mémoire.

De plus, d'autres simulations pourraient être effectuées avec l'outil de simulation développé en y rajoutant d'autres éléments comme le trafic dans les galeries ainsi que les bris et la maintenance des équipements.

Finalement, comme dans le cadre de ce projet, le modèle de simulation offrait des résultats en termes d'heures planifiées similaires au modèle d'optimisation du séquencement de la production, une avenue de recherche intéressante serait de voir s'il serait possible d'utiliser un modèle de simulation pour obtenir une planification des opérations minières souterraines satisfaisante. Utiliser la simulation comme outil de planification plutôt que de vérification serait une recherche qui pourrait être intéressante et innovatrice.

RÉFÉRENCES

Alford, C. (1995). *Optimization in underground mine design*. Communication présentée à *25th International APCOM Symposium*, Melbourne, Australia (p. 213-218). Tiré de http://www.springer.com/gp/book/9780387718149

Alford, C., Brazil, M. et Lee, D. (2007). Optimisation in underground mining. A. Weintraub, C. Romero, T. Bjorndal, R. Epstein, J. Miranda, F. S. Hillier et C. C. Price, éditeurs, *Handbook Of Operations Research In Natural Resources*, Springer US, vol. 99 de *International Series in Operations Research and Management Science*. 561–577.

Ataaee-Pour, M. (2005). A critical survey of existing stop layout optimization. *Journal of Mining Science*, 41(5), 447-466.

Auger, G. (2000). Étude et programmation de l'algorithme du flot maximum appliqué aux problèmes de contour ultime dans une mine à ciel ouvert. (Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Montréal, QC).

Baumann, P. et Trautmann, N. (2012). A continuous-time MILP model for short-term shceduling of make-and-pack production processes. *International Journal of Production Research*, 51(6), 1707-1727.

Brazil, M. et Thomas, D. (2004). Network optimization for the design of underground mines. *Networks*, 49(1), 40-50.

Brazil, M. et Grossman, P. (2008). *Access layout optimization for underground mines*. Communication présentée à *Australian Mining Technology Conference*. Twin Waters, Queensland, Australia, p.119-128.

Cafaro, C. et Cerda, J. (2016). Short-term operational planning of refined products pipelines. *Optimization and Engineering*. 1-28.

Campeau, L. et Gamache, M. (2016). *Short-Term planning optimization model for underground mines.* À paraître dans les cahiers du Gerad, G-2016-26

Collard, J. (2013). *Planification stratégique d'une mine souterraine avec teneur de coupe variable.* (Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Montréal, QC).

Faraji, R. (2013). *A comparison between linear programming and simulation models for a dispatching system in open pit mines.* (Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Montréal, QC).

Fioroni, M., Bianchi, T. et Pinto, L. (2008). Concurrent simulation and optimization models for mine planning. Communication présentée à *2008 Winter simulation conference*. Austin, Texas, USA (p.759-767). Doi : 10.1109/WSC.2008.4736138

Jaoua, A., Riopel, D. et Gamache, M. (2012). A simulation framework for real-time fleet management in internal transport systems. Simulation Modelling Practice and Theory, 21(1), 78-90.

Jia. J. (2013). Mixed-integer Linear Programming Formulation for Short-term Scheduling of Cascaded Hydroelectric Plants with Pumped-storage Units. *Electric Power Components and Systems*. 41(15), 1456-1468.

Ju, Y., Yin, Y., Wang, A., et Yin, Y. (2011). Simulation Optimization of Emergency Refuge Chamber based on Particle Swarm Optimization. *JCIT*, 6(7), 154-161.

Kuchta M., Newmanm A. et Topalm E. (2003). Production scheduling at LKAB's Kiruna mine using mixed-integer programming. *Mining engineering*, 55(5), 35-40.

L'Heureux, G. (2011). *Modèle d'optimisation pour la planification à moyen termes des mines à ciel ouvert*. (Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Montréal, QC).

L'Heureux, G., Gamache, M. et Soumis, F. (2013). Mixed integer programming model for short term planning in open-pit mines. *Mining Technology : Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy : Section A*, 112(2), 101-109.

Miwa, K., et Takakuwa, S. (2011). Operations modeling and analysis of an underground coal mine. Communication présentée à *2011 Winter simulation conference*. Phoenix, Arizona, USA (p.1-11). Doi :10.1109/WSC.2011.6147884

Nehring, M. et Topal, E. (2008). A new mixed-integer programming model for mine production scheduling optimisation in sublevel stope mining. Communication présentée à *Australian Mining Technology Conference*, Twin Waters, Queensland, Australia, (p.156-172). Tiré de https://www.researchgate.net/publication/43509832_A_new_mixed-

integer_programming_model_for_mine_production_scheduling_optimisation_in_sublevel_stope_mining

Nehring, M., Topal, E., Kizil, M. et Knights, P. (2012). Integrated short and medium term underground mine production scheduling. *Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 112, 365-378.

Newman, A., Rubio, E., Weintraub, A. et Eurek, K. 2010. A review of operations research in mine planning. *Interfaces*, 40(3), 222-245.

Little, J., Knights, P. et Topal, E. (2012). Integrated optimization of underground mine design and scheduling. *Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 113, 755-785.

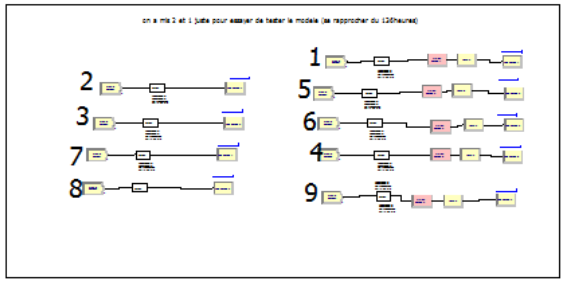
Sens, J. (2008). *Stope boundary optimisation*. (Projet de fin d'études, University of Queesnland, Brisbane, Australia).

Trout, LP. (1995). Underground mine production scheduling using mixed integer programming. Communication présentée à *25th International APCOM Symposium*, Melbourne, Australia (p. 395-400).

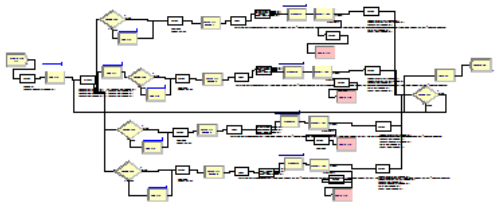
Torkamani, E. (2013). *Linkage of Truck-and-Shovel Operations to Short-term Mine Plans Using Discrete Event Simulation*. (Mémoire de maîtrise, University of Alberta, Edmonton, AB).

Zhou, J. (2010). Analysis of a mine-mill production system using simulation and integer programming. (Mémoire de maîtrise, Dalhousie University, Halifax, NS).

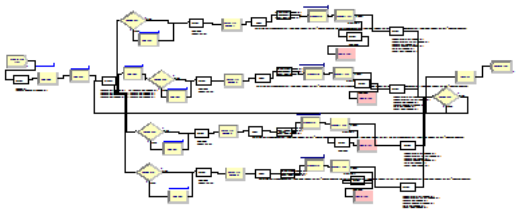
ANNEXE A – EXEMPLE D'UN MODÈLE DE SIMULATION (SEMAINE A2)



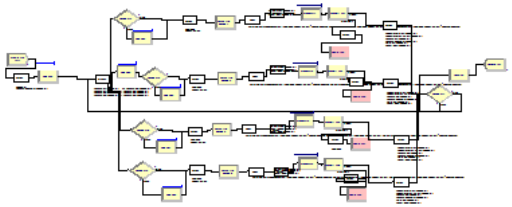
111



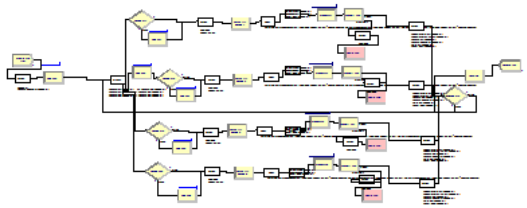
112



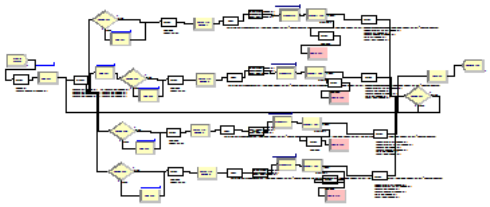
115



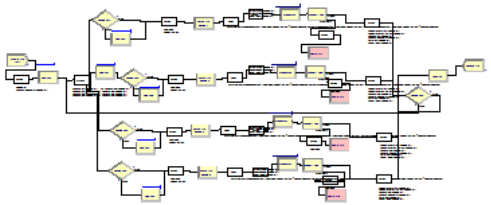
117



118



119



ANNEXE B – EXEMPLE DE BOUCLE DE CODE DE CHAQUE TYPE DE SITE

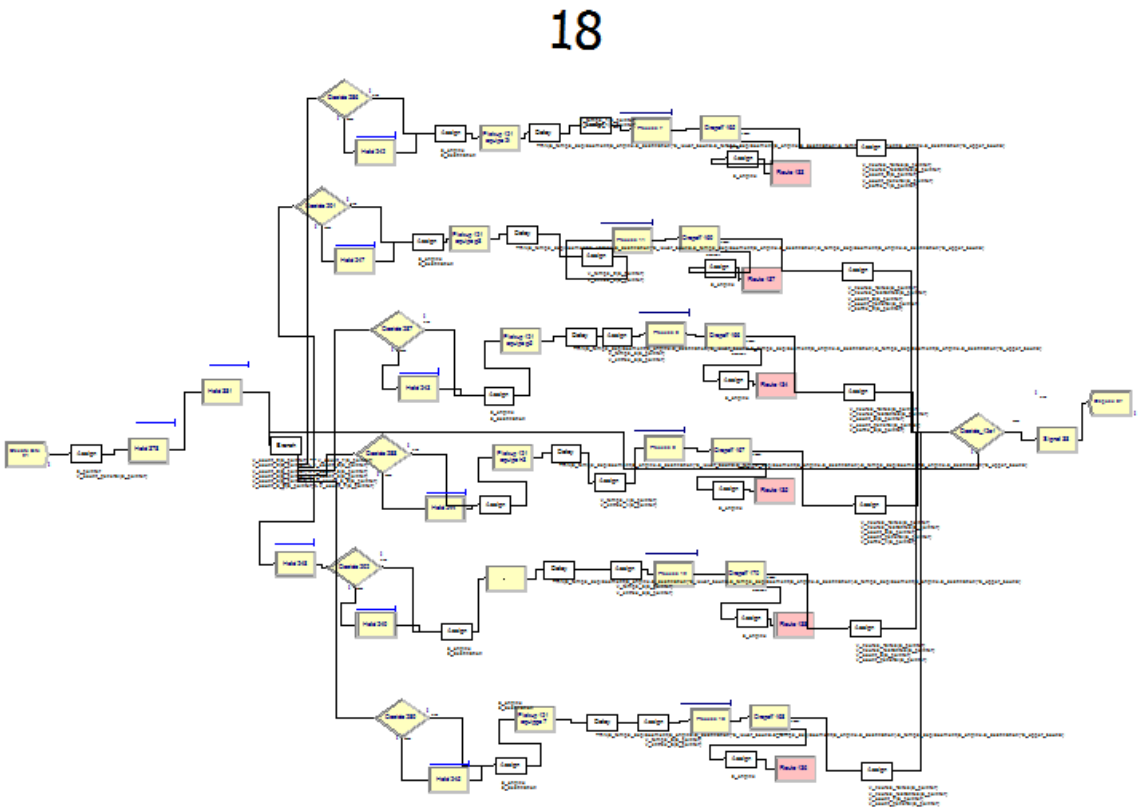


Figure Annexe B.1 : Exemple de code pour un site de production long trou (site 18)

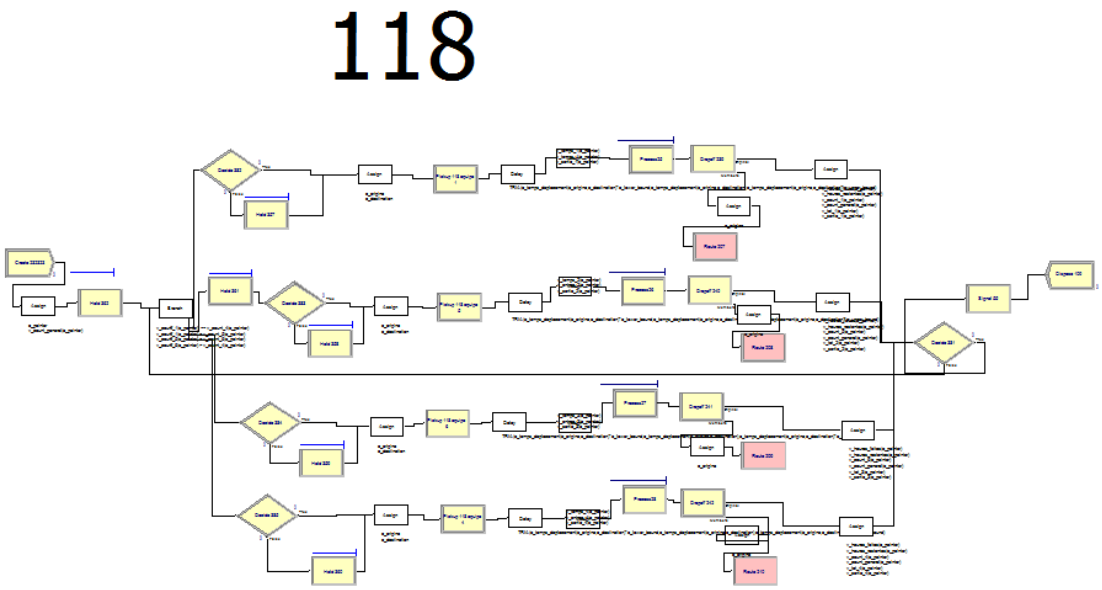


Figure Annexe B.2 : Exemple de code pour un site de développement (site 118)

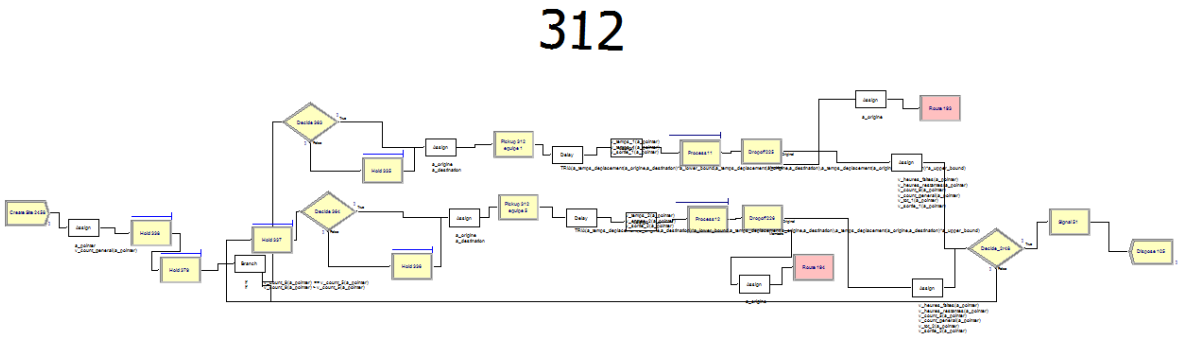


Figure Annexe B.3 : Exemple de code pour un site de développement de type cheminée (monterie Alimak) (site 312)