

**Titre:** Modèle d'optimisation de l'ordonnancement des travaux correctifs  
Title: et de maintenance dans un contexte minier souterrain

**Auteur:** Alexandre Augustin  
Author:

**Date:** 2023

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Augustin, A. (2023). Modèle d'optimisation de l'ordonnancement des travaux correctifs et de maintenance dans un contexte minier souterrain [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie.  
Citation: <https://publications.polymtl.ca/54779/>

## Document en libre accès dans PolyPublie Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/54779/>  
PolyPublie URL:

**Directeurs de recherche:** Michel Gamache, & Souheil-Antoine Tahan  
Advisors:

**Programme:** Maîtrise recherche en génie industriel  
Program:

**POLYTECHNIQUE MONTRÉAL**

affiliée à l'Université de Montréal

**Modèle d'optimisation de l'ordonnancement des travaux correctifs et de  
maintenance dans un contexte minier souterrain**

**ALEXANDRE AUGUSTIN**

Département de mathématiques et de génie industriel

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

Génie industriel

Juillet 2023

**POLYTECHNIQUE MONTRÉAL**

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

**Modèle d'optimisation de l'ordonnancement des travaux correctifs et de  
maintenance dans un contexte minier souterrain**

présenté par **Alexandre AUGUSTIN**

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

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

**Antoine LEGRAIN**, président

**Michel GAMACHE**, membre et directeur de recherche

**Souheil-Antoine TAHAN**, membre et codirecteur de recherche

**Jean-Pierre KENNÉ**, membre

## DÉDICACE

*À Jeanne*

## **REMERCIEMENTS**

Je tiens, d'abord, à remercier mes parents qui m'ont soutenu tout au long de mon parcours académique et qui m'ont permis de réaliser mes études dans les meilleures conditions possibles.

J'aimerais remercier ma conjointe Jeanne qui m'a encouragé tout au long de ma maîtrise, m'a soutenu et qui me pousse à me dépasser tous les jours.

Ensuite j'aimerais énormément remercier mes directeurs Michel Gamache et Souheil-Antoine Tahan pour leur grande disponibilité, leur aide, leur support, leurs précieux conseils tout au long de la rédaction du mémoire ainsi que toutes les opportunités qu'ils m'ont données au cours des deux dernières années.

J'aimerais également remercier Simon Robatto Simard, Jérémy André et Younes Aalian pour leur précieuse aide.

Je tiens à remercier le groupe MISA pour les nombreuses opportunités offertes ainsi que pour le financement accordé.

J'aimerais remercier Leonard Cohen et Aphex Twin qui m'ont accompagné et calmé tout au long de ma rédaction.

Finalement, j'aimerais remercier les membres d'Agnico Eagle pour leur temps, leurs connaissances partagées de même que pour leur accueil pendant la visite du complexe minier Laronde.

## RÉSUMÉ

L'ensemble des activités de maintenance et de réparations représentent des coûts significatifs dans l'industrie minière. Une gestion optimale de ces activités entraîne entre autres un grand nombre de bénéfices comme une diminution des arrêts non planifiés, une baisse de la consommation énergétique des équipements et une hausse de la durée de vie des équipements. Actuellement, l'ordonnancement des bons de travail (BT) est réalisé de façon manuelle et basé sur la grande expérience des planificateurs de maintenance et de l'ensemble de l'équipe de maintenance. Ces problèmes d'ordonnancement sont de taille significative, ils comportent un grand nombre de contraintes ainsi que des fonctions objectifs variées à optimiser. La résolution de problèmes combinatoires de ce type est très difficile à accomplir manuellement et encore plus difficile de résoudre à l'optimalité sans assistance par ordinateur. Un modèle mathématique pourrait aider et guider l'équipe de maintenance d'établir un ordonnancement optimal des travaux à réaliser sur un horizon de temps variable.

Le mémoire suivant traitera du développement d'un modèle permettant l'ordonnancement optimal des activités de maintenance et de réparations. Cet ordonnancement respecte les contraintes usuelles des planificateurs de la maintenance : assurer pour chaque type d'équipement un nombre minimum d'équipements actifs (non immobilisés), affecter les bonnes ressources (mécaniciens et équipement) selon la spécificité de chaque bon de travail (BT), ajuster la durée d'une tâche en fonction de l'assignation des ressources humaines, et accélérer autant que possible les travaux en arriéré (Backlog). Le modèle a pour objectif d'ordonner de façon robuste et de compiler rapidement le plus grand nombre d'activités prêtes à être effectuées en fonction de leur indice de priorité (établi *a priori*) tout en minimisant la durée globale des travaux. Le modèle est validé sur des données réelles tirées d'applications minières.

## ABSTRACT

All maintenance and repair activities represent significant costs in the mining industry. Optimal management of these activities leads, among other things, to a large number of benefits such as a reduction in unplanned shutdowns, a reduction in the energy consumption of equipment and an increase in the life of equipment. Currently work order (WO) scheduling is performed manually and based on the extensive experience of maintenance planners and the entire maintenance team. These scheduling problems are of significant size, have a large number of constraints and various objective functions to optimize. Solving such combinatorial problems of this type is very difficult to accomplish manually and even more difficult to solve to optimality without computer assistance. A mathematical model could guide and help the maintenance team to establish an optimal scheduling of the work to be done on a variable time horizon.

The following master thesis will deal with the development of a model allowing the optimal scheduling of maintenance and repair activities. This scheduling respects the usual constraints of maintenance planners: ensure for each type of equipment a minimum number of active equipment (not immobilized), assign the right resources (mechanics and equipment) according to the specificity of each work order, adjust the duration of a task according to the assignment of human resources, and speed up backlog work as much as possible. The objective of the model is to schedule in a robust way and quickly compile the greatest number of activities ready to be carried out according to their priority indice (previously established) while minimizing the overall duration of the work. The model has been validated on real data from mining applications.

## TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS .....	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT .....	VI
LISTE DES TABLEAUX.....	IX
LISTE DES FIGURES .....	X
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS .....	XI
LISTE DES ANNEXES.....	XII
 CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	 1
1.1 Contexte et définitions .....	1
1.2 Définitions et cadre de recherche .....	6
1.3 Objectifs de recherche .....	7
1.4 Plan du mémoire.....	7
 CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE .....	 9
2.1 Planification et ordonnancement .....	9
2.2 Maintenance préventive .....	10
2.3 Planification de la maintenance et des travaux correctifs dans l'industrie minière .....	13
2.4 La programmation par contraintes .....	15
 CHAPITRE 3 MAINTENANCE DES ÉQUIPEMENTS MOBILES DANS LE CONTEXTE MINIER SOUTERRAIN .....	 18
3.1 Maintenance préventive et travaux correctifs .....	18
3.2 Processus de la maintenance .....	20
3.3 Gestion de la maintenance.....	24

CHAPITRE 4 MODÈLE D'ORDONNANCEMENT DE LA MAINTENANCE .....	28
4.1    Méthodologie .....	28
4.1.1    Contexte, objectifs et problème à résoudre .....	28
4.1.2    Données d'entrée .....	29
4.2    Modèle d'optimisation .....	31
4.2.1    Paramètres et variables de décisions .....	32
4.2.2    Fonction objectif .....	33
4.2.3    Contraintes .....	34
CHAPITRE 5 RÉSULTATS ET ANALYSE .....	40
5.1    Matériel utilisé .....	40
5.2    Performance en fonction des différents scénarios .....	40
5.3    Disponibilité des équipements .....	42
5.4    Impact de la matrice de transition sur l'ordonnancement proposé .....	43
5.5    Cohérence entre l'assignation du personnel en fonction des BT .....	44
5.6    Cohérence entre les différents modes et l'assignation du personnel .....	45
5.7    Fixations de BT spécifiques sur une baie de travail .....	46
5.8    Impact des modes sur la solution .....	46
CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS .....	50
6.1    Synthèse des travaux .....	50
6.2    Recommandations et améliorations .....	52
RÉFÉRENCES .....	56
ANNEXES .....	61

**LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1.1 Statuts possibles des bons de travail (BT) .....	3
Tableau 3.1 Indices de priorités pour les types de travaux de maintenance .....	22
Tableau 3.2 Indicateurs clefs de performance de la maintenance .....	24
Tableau 4.1 Types et caractéristiques des données d'entrée pour le modèle .....	29
Tableau 4.2 Ensemble et paramètres présents dans le modèle .....	32
Tableau 4.3 Variables de décision du modèle .....	33
Tableau 5.1 Performances du modèle selon le nombre de BT à ordonner .....	41
Tableau 5.2 Performance du modèle sans la fonction multimode .....	47
Tableau 5.3 Performance du modèle sans la fonction multimode et sans le moment de fin .....	48

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Processus pour la maintenance préventive et les travaux correctifs .....	2
Figure 1.2 État de la gestion de la maintenance et des travaux correctifs en fonction de l'ancienneté des travaux se trouvant dans le « Backlog » (semaines) [2] .....	4
Figure 1.3 Méthodologie employée lors du développement du modèle .....	7
Figure 2.1 Moment idéal pour effectuer une maintenance préventive.....	11
Figure 2.2 Tâche 1 et son ensemble des sous-tâches tiré de Palmer et al. [20] .....	14
Figure 2.3 Exemple d'un diagramme de Gantt obtenu par CPO .....	16
Figure 3.1 Vue longitudinale du complexe minier LaRonde tiré d'Agnico Eagle [27] .....	18
Figure 3.2 Illustration d'un garage d'une mine souterraine .....	19
Figure 3.3 Processus de maintenance dans une mine souterraine tiré de Laroche-Carrier [28] ...	23
Figure 5.1 Assignation des BT en fonction du nombre limite des équipements en maintenance pour chaque type d'équipement.....	42
Figure 5.2 Assignation du personnel en fonction des BT .....	45
Figure 5.3 Impact de la fixation d'une baie de travail pour le BT [<6>] .....	46

## **LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS**

- BT Bon de travail
- MP Maintenance préventive
- PPC Programmation par contraintes

**LISTE DES ANNEXES**

Annexe A Données d'entrée pour l'ordonnancement de 6 Bons de travail (BT) ..... 61

## CHAPITRE 1 INTRODUCTION

La performance industrielle est plus importante que jamais auparavant en raison de la compétition internationale dans un contexte de mondialisation et une pression croissante de la part des pays émergents. Ainsi, un grand nombre d'industries tentent de se distinguer de leurs compétiteurs avec l'ensemble des moyens à leur disposition dans le but d'augmenter leur productivité. Le secteur minier ne fait pas exception à la règle et tente ainsi d'optimiser ses opérations au maximum. Les coûts de maintenance et des travaux correctifs représentent de 30 à 50% de l'ensemble des coûts d'opération d'une mine [1]. L'optimisation de ce secteur d'activités serait donc une opportunité incontournable. Un ordonnancement optimisé de la maintenance et des travaux correctifs aura comme effet d'améliorer la disponibilité des équipements, de réduire les coûts induits par des arrêts non planifiés, d'économiser la consommation énergétique et ainsi de permettre l'exécution du plan de production préalablement défini avec une marge de profit améliorée.

### 1.1 Contexte et définitions

Actuellement, la planification de l'ordonnancement des opérations de maintenance et des travaux (correctifs, remplacements, réhabilitations, inspections, etc.) se fait avec une semaine d'avance par les planificateurs de maintenance. Grâce à leur connaissance de l'historique et leur expérience, les planificateurs sont capables d'estimer les horaires d'entretien. Aussi, ils sont responsables de coordonner l'ensemble des activités de maintenance corrective et préventive. Ils s'assurent du suivi de la maintenance préventive selon le programme d'entretien établi a priori pour les différents équipements fixes et mobiles. L'ensemble des activités de maintenance préventive sont effectuées systématiquement en fonction du nombre d'heures d'utilisation de l'équipement. Par exemple, ce type de maintenance peut être réalisé à chaque 250, 500 et 1500 heures-moteur (durée de l'utilisation du moteur). Les principales étapes du processus de maintenance et des travaux correctifs se traduisent par la Figure 1.1.

Cet ordonnancement des tâches à effectuer chaque semaine, pour la semaine suivante, se nomme le **calendrier d'ordonnancement**. Il découle d'une rencontre hebdomadaire durant laquelle le planificateur présente les travaux aux membres du personnel concerné. Pendant la rencontre, le calendrier est modifié, ajusté, adapté et puis validé. Une fois le calendrier validé, celui-ci n'est plus modifiable. Celui-ci est fort détaillé et décrit le temps nécessaire pour chaque tâche, la date de

début et fin des travaux, la main-d'œuvre allouée (ressources) de même que l'endroit géographique dans la mine où les travaux seront effectués. Chaque semaine, les planificateurs gardent une marge de manœuvre (tampon) au niveau des heures disponibles. Afin de minimiser l'impact des imprévus, les planificateurs décident de planifier environ 80% des heures disponibles. Il est également à noter qu'il existe le poste de superviseur général d'entretien. Cette personne supervise et coordonne les travaux de la maintenance de manière quotidienne et selon le calendrier d'ordonnancement pré validé. Ce poste est responsable des travaux d'urgences.

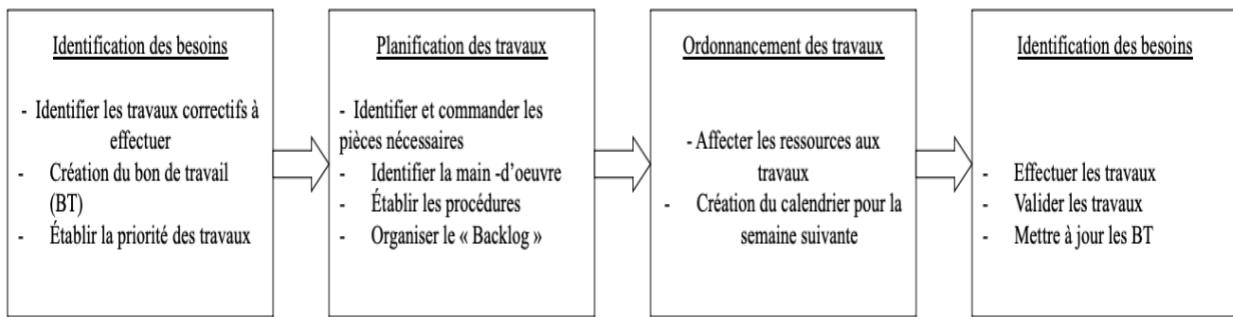


Figure 1.1 Processus pour la maintenance préventive et les travaux correctifs

Afin de permettre un suivi de l'ensemble des maintenances préventives et des travaux correctifs, des bons de travail (BT) sont créés et modifiés en fonction du statut de ceux-ci. Il existe plusieurs statuts dans l'industrie minière, mais les suivants ont été recensés dans les mines des partenaires du projet. Les différents statuts sont illustrés par le Tableau 1.1.

Tableau 1.1 Statuts possibles des bons de travail (BT)

<b>Statut</b>	<b>Description</b>
Inscrit	Ajout du BT dans la base de données et une révision par le planificateur de la maintenance est nécessaire.
À planifier	Le BT a été révisé. L'ensemble matériel et de la main-d'œuvre nécessaire ont été établis.
En attente de matériel	L'ensemble du matériel nécessaire a été commandé. Cependant il n'est pas encore disponible.
Prêt à ordonner	Les éléments nécessaires pour compléter le BT sont sur place.
Ordonnancé	Le BT possède une date prévue, une main-d'œuvre qualifiée et une baie de travail.
Complété	L'ensemble des tâches liées au BT ont été exécutées. Le BT est officiellement fermé.

Considérant que les opérations se déroulent en souterrain et la masse considérable des équipements miniers mobiles, l'ensemble des activités de maintenance et des travaux correctifs doivent être exécutés, autant que possible, *in situ* (souterrain). Les travaux sont assignés à des endroits spécifiques se nommant **baies de travail**. Ces baies sont des garages souterrains dans lesquels les différents métiers (mécaniciens, électriciens, etc.) exécutent les travaux avec les outils déjà disponibles sur place. Ces baies de travail se trouvent à quelques endroits bien spécifiques au sein d'une mine souterraine, il faut donc déplacer les équipements nécessitant une maintenance ou des travaux correctifs vers les baies. Ce temps de déplacement varie énormément en fonction de la position initiale dans la mine de l'équipement devant être déplacé. Avant d'être en position finale pour effectuer l'ensemble des travaux, les équipements doivent être nettoyés pour réduire le risque de blessures pour les travailleurs et pour faciliter les travaux. La durée de nettoyage pour chaque équipement n'est pas incluse dans les durées prévues pour les bons de travail. Ainsi, dans le cadre du présent mémoire, les temps de déplacements et de nettoyages des équipements ne seront pas considérés. Toutefois, il est pertinent de connaître l'existence de ces étapes afin d'avoir une

meilleure vision globale sur l'ensemble du processus de maintenance et des travaux correctifs dans le secteur minier.

Comme mentionné à la Figure 1.1, une étape cruciale du travail du planificateur de maintenance est d'assigner un indice de priorité pour chaque activité à effectuer. La notation des indices varie d'une mine à une autre, mais ceux-ci ont généralement un classement allant de 1 jusqu'à 4. Le type de priorité 1 s'applique pour les travaux d'urgences. Ce type de priorité nécessite des actions immédiates et présente des risques majeurs pour l'intégrité et la santé des travailleurs. Étant donné la nature urgente de ces travaux, ceux-ci ne sont pas planifiés et ne sont pas gérés par les planificateurs de maintenances. En effet, les mines possèdent des baies de travail et une équipe dédiée pour ce type de travaux. Les priorités de type 2 sont également des travaux imprévus, toutefois ceux-ci sont moins urgents que les précédents. Les travaux de ce type doivent être réalisés dans la semaine en cours suite au constat du bris. Contrairement à la priorité de type 1, le type 2 permet au superviseur de la maintenance de trouver le moment opportun afin de minimiser l'impact de la réparation sur la production.

Les travaux de type 3 sont des travaux pouvant être planifiés. Cette catégorie regroupe la majorité des travaux effectués, dont l'ensemble des maintenances préventives. Cette catégorie représente également les travaux correctifs. Finalement, les travaux de type 4 sont également des travaux pouvant être planifiés, mais ceux-ci sont encore moins urgents que ceux du type 3. La majorité de ces travaux se trouvent dans le « Backlog ». Celui-ci représente l'ensemble des travaux qui sont en attente. La gestion du « Backlog » est critique pour le bon fonctionnement de la mine, les travaux s'y trouvant devraient être exécutés jusqu'à 3 semaines après la création de leurs bons de travail. Après cette période, la gestion atteint un niveau critique pouvant mener à une perte de contrôle pour l'ensemble de la maintenance et des travaux correctifs devenant ainsi une préoccupation majeure pour les gestionnaires (voir Figure 1.2).

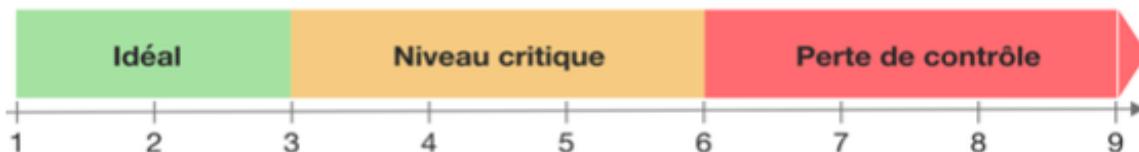


Figure 1.2 État de la gestion de la maintenance et des travaux correctifs en fonction de l'ancienneté des travaux se trouvant dans le « Backlog » (semaines) [2]

Même s'il existe quatre types différents de priorité pour l'ensemble des travaux, ceci n'implique pas systématiquement que tous les travaux ayant la même priorité sont équivalents aux yeux du planificateur. Selon les observations effectuées dans les mines des partenaires du projet, il existe une sous-catégorisation pour les différentes priorités au sein d'un même type de priorité. Puisque l'ordonnancement des BT se fait uniquement pour les travaux pouvant être planifiés, les priorités mentionnées dans la suite du mémoire ne s'attardent qu'aux travaux planifiables. Donc voici l'ordre de priorité pour l'ensemble des travaux pouvant être planifiés [2].

1. Maintenance préventive sur les équipements de production
2. Travaux correctifs pour des équipements de production non fonctionnels
3. Priorités de la semaine
4. Maintenance préventive sur les équipements auxiliaires
5. Travaux correctifs pour les équipements auxiliaires non fonctionnels
6. Travaux correctifs pour les équipements de production
7. Travaux correctifs pour les équipements auxiliaires
8. Travaux correctifs se trouvant dans « Backlog »

À noter que le troisième élément de la liste traite des priorités de type 1 à 2 qui n'ont pu être complétés pendant la semaine précédente. Il arrive que ces types de priorités ne puissent être complétés en raison d'absence de matériel nécessaire pour les effectuer ou bien des travaux ont des temps de réparation trop élevés pour être complétés dans la même semaine.

Un ordonnancement optimal des opérations de maintenance présente donc des avantages considérables pour une entreprise minière. Celui-ci permet d'affecter l'ensemble des tâches à effectuer au personnel qualifié en effectuant le maximum de tâches selon leur ordre de priorité tout en respectant l'ensemble des contraintes dont fait face l'entreprise.

## 1.2 Définitions et cadre de recherche

Le problème d'ordonnancement des activités de maintenance et de travaux correctifs est fort pertinent en raison de l'incertitude de l'environnement minier. Celle-ci se traduit par un suivi rigoureux du plan de la maintenance préventive, des bris de matériel nécessitant des réparations urgentes, des opérations de maintenance plus longues que planifiées de même que des absences imprévues du personnel de maintenance dans un domaine faisant déjà face à une pénurie de main d'œuvre grandissante. Face à ces problématiques, l'ordonnancement des maintenances présente un défi de taille en raison de sa complexité.

Pour assurer l'atteinte de l'ensemble des objectifs de production au niveau du site de production tout en améliorant la sécurité des équipements, leur disponibilité et leur consommation d'énergie, il est impératif que l'ordonnancement respecte l'ensemble des contraintes spécifiques aux mines québécoises. Une contrainte représente une restriction au niveau de l'ensemble des solutions pouvant être valides [3]. Le problème d'ordonnancement des tâches à effectuer est un type de problème pouvant être traduit par un modèle d'optimisation. Comme mentionné précédemment, le calendrier de la maintenance est créé sur une base hebdomadaire. Ce processus est chronophage et complexe. Ainsi, les planificateurs proposent un ordonnancement des maintenances et des travaux correctifs selon leur expérience. Même si les ordonnancements proposés par ceux-ci sont fort pertinents, ils ne sont pas nécessairement optimaux. Il est très difficile pour l'humain de trouver des solutions optimales sans l'aide d'un modèle mathématique surtout lorsque le nombre de données est de plus en plus volumineux. Un modèle mathématique est donc nécessaire afin d'obtenir des solutions optimales.

Une approche envisagée pour remédier à cette situation serait le développement d'un modèle mathématique utilisant la programmation par contraintes (PPC). Ce domaine est particulièrement efficace pour résoudre des problèmes d'ordonnancement selon Laborie et al. (2018) [4]. Le modèle sera basé sur une approche déterministe quant au temps estimé pour la complétion de chaque tâche.

La méthodologie suivante a été utilisée pour créer le modèle qui sera défini dans les chapitres suivants (voir Figure 1.3).

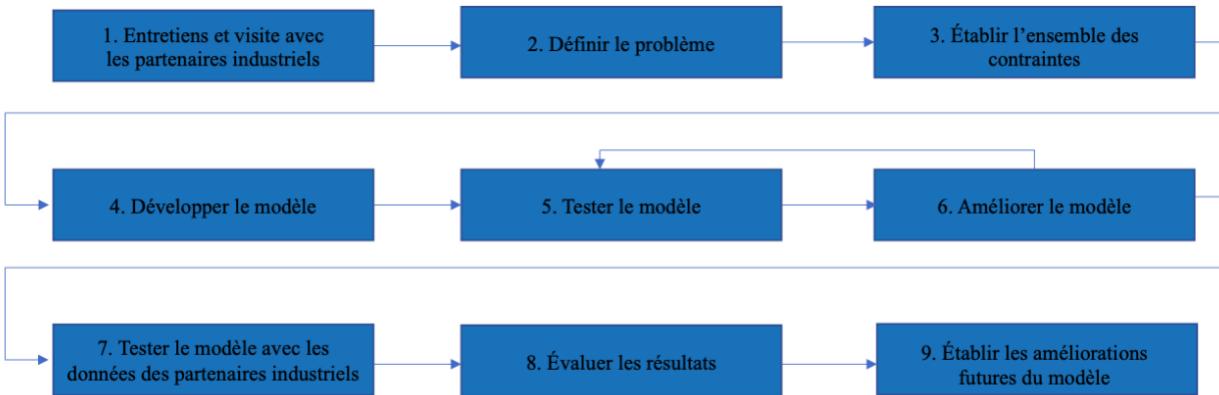


Figure 1.3 Méthodologie employée lors du développement du modèle

### 1.3 Objectifs de recherche

L’objectif du travail présenté est de créer un modèle et une résolution optimale et rapide du problème d’ordonnancement des activités de maintenance préventive et de travaux correctifs pour les équipements mobiles dans les mines souterraines en prenant en compte de l’ensemble des contraintes opérationnelles spécifiques au milieu des mines souterraines québécoises. La rapidité du modèle est nécessaire afin d’assurer une grande réactivité pour les entreprises lorsque celles-ci font face à des imprévus. Nous posons l’hypothèse que le nombre d’employés est suffisant afin de réaliser l’ensemble des travaux planifiés. Il va également de même pour les travaux à ordonner. Ceux-ci sont tous au statut prêt à être ordonné et ne concernent que les travaux pouvant être planifiés.

### 1.4 Plan du mémoire

Ce chapitre a couvert la description du contexte dans lequel s’inscrit ce mémoire. Les chapitres suivants traiteront de l’ensemble des démarches et des résultats qui ont mené à la complétion des objectifs mentionnés précédemment. Le chapitre 2 traitera de l’ensemble de la revue de littérature existante à propos du domaine étudié. Le chapitre suivant soulèvera l’ensemble des contraintes opérationnelles traitées dans le modèle selon les réalités du domaine minier étudié. Le chapitre 4 traitera de l’ensemble des paramètres, des variables de décision, des contraintes propres au modèle et de la fonction objectif. Le chapitre suivant se penchera sur les résultats de l’ordonnancement provenant du modèle ainsi qu’une analyse quant à sa performance. Pour finalement conclure le tout

par une discussion sur le mémoire, l'ensemble des conclusions, les recommandations ainsi que les prochains travaux possibles à partir de la recherche effectuée.

## CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Dans ce chapitre, une revue de la littérature traitant de la planification de la maintenance et des travaux correctifs dans l'industrie minière est réalisée. Les concepts fondamentaux de la planification et de l'ordonnancement, la maintenance préventive de même que la programmation par contraintes seront abordés afin de comprendre le contexte scientifique dans lequel s'inscrit ce mémoire.

### **2.1 Planification et ordonnancement**

La planification et l'ordonnancement constituent des formes de prises de décisions impactant directement l'approvisionnement, la production, la distribution, etc. dans un grand nombre d'industries manufacturières et de services [5]. Afin d'obtenir une planification et un ordonnancement appropriés, il est impératif de comprendre les objectifs principaux de l'entreprise. Ces objectifs peuvent se traduire par un grand nombre de concepts comme la maximisation des profits, la minimisation des retards, la minimisation du « *Makespan* », etc. Ces concepts représentent les lignes directrices pour tout modèle de planification ou d'ordonnancement afin d'allouer les ressources nécessaires et appropriées pour accomplir un ensemble de tâches.

Un modèle d'ordonnancement vise à maximiser l'efficacité d'une opération afin d'utiliser le maximum des ressources disponibles en fonction des contraintes appropriées pour le problème. L'ensemble des modèles sont basés sur des techniques mathématiques et des méthodes heuristiques. Un problème d'ordonnancement consiste principalement à organiser dans le temps un ensemble de tâches en fonction des contraintes temporelles. Ces contraintes pouvant être définies comme des délais pour l'exécution d'une tâche, des précédences entre des tâches, des enchaînements de tâches ou sur la disponibilité des ressources nécessaires afin de satisfaire un ou plusieurs objectifs [6].

Une ressource est définie comme un moyen technique ou humain utilisé afin de réaliser une tâche. Ce moyen est disponible en quantité limitée et se distingue en deux catégories. Le premier type de ressource est dit renouvelable, car celle-ci est de nouveau disponible une fois qu'elle a été allouée à une tâche. Le second type de ressource est le produit consommable. Cette ressource ne peut être renouvelée, elle est donc limitée au cours du temps [7]. Des exemples de ressources consommables sont des matières premières ainsi qu'un budget fixe. Une contrainte, quant à elle, s'attarde sur la

limitation des possibilités d'ordonnancement. Un exemple de contrainte temporelle serait des dates limites afin de compléter ou de débuter une tâche. Ce type de contrainte est essentielle pour le problème d'ordonnancement étudié dans le présent mémoire.

Les modèles d'un problème d'ordonnancement possèdent un objectif à minimiser ou à maximiser, cet objectif est traduit par une fonction objectif assurant ainsi l'optimisation de l'ordonnancement. Cette optimalité, si possible, est ainsi atteinte par plusieurs stratégies et techniques qui seront mentionnées plus tard dans le mémoire. Le développement de modèles d'ordonnancement est fort pertinent et peut s'appliquer dans un grand nombre de domaines. Ce type de problème est utilisé dans le domaine médical pour optimiser le nombre d'opérations au sein d'un bloc opératoire [8]. Le modèle considère les durées des interventions chirurgicales de façon stochastique et alloue ainsi l'ensemble des ressources nécessaires (un chirurgien spécifique, un anesthésiologue spécifique et une salle d'opération) pour établir une séquence ordonnancée des opérations avec un temps de début et de fin. Ces modèles, lors testés sur des données réelles, présentent une amélioration significative pour la planification quotidienne des salles d'opération selon les travaux de Denton et al. (2006).

Les travaux d'ordonnancement de ce type sont intéressants pour la problématique du mémoire en raison d'un grand nombre de similitudes au niveau des contraintes. Tout comme le problème de planification du bloc opératoire, une ressource humaine qualifiée doit être assignée à une tâche spécifique. De plus, certaines tâches ne peuvent être réalisées que dans un endroit spécifique. L'ensemble des contraintes propres au modèle d'ordonnancement seront décrites en détail dans le prochain chapitre.

## 2.2 Maintenance préventive

Selon Ben-Daya et al. (2016), la maintenance est caractérisée comme une combinaison d'actions techniques et administratives permettant de maintenir ou de rétablir un élément dans lequel celui-ci peut remplir sa fonction [9]. Il existe différents types de maintenance, mais le mémoire suivant se concentre primordialement sur la maintenance préventive et corrective. La maintenance corrective est également nommée réparation ou travail correctif. Ce type de maintenance est considéré comme réactif puisque celle-ci engendre des travaux de réparation seulement lorsqu'un équipement est défectueux. La maintenance préventive quant à elle se définit par l'exécution de

travaux programmés à des intervalles de temps spécifiques préalablement définis. Il existe différents types de maintenance préventive comme la maintenance préventive conditionnelle ainsi que la maintenance préventive systématique. Le premier type a comme objectif de réaliser des travaux de maintenance uniquement si certains composants sont usés. Cette usure est reflétée par l'état de certains indicateurs comme des analyses d'huile ou même des résultats obtenus par des capteurs. Ceux-ci assurent la conversion d'une quantité mesurée (ex. vitesse, force, pression, température, etc.) en un signal (électrique, pneumatique, numérique, etc.) interprétable relié à la mesure par une relation simple [10]. Le second type maintenance, quant à lui, exécute les travaux sur les composants qui sont remplacés ou restaurés, peu importe leur état. Ces intervalles de temps sont cruciaux et ont été largement étudiés dans les domaines de la construction [11], marin [12], manufacturier [13][14] et même dans le secteur de l'énergie [15].

Les recherches sont toutes basées sur des suppositions et des conditions allant comme suit. Les coûts des défaillances sont supérieurs aux coûts de la maintenance et le temps d'une panne liée à une défaillance est supérieur au temps nécessaire pour compléter la maintenance. Le but principal de ce type de maintenance est de minimiser les coûts tout en réduisant les temps d'arrêt de l'équipement qui aura comme conséquence directe de maximiser davantage la disponibilité de celui-ci. Le coût minimal est décrit par la Figure 2.1.

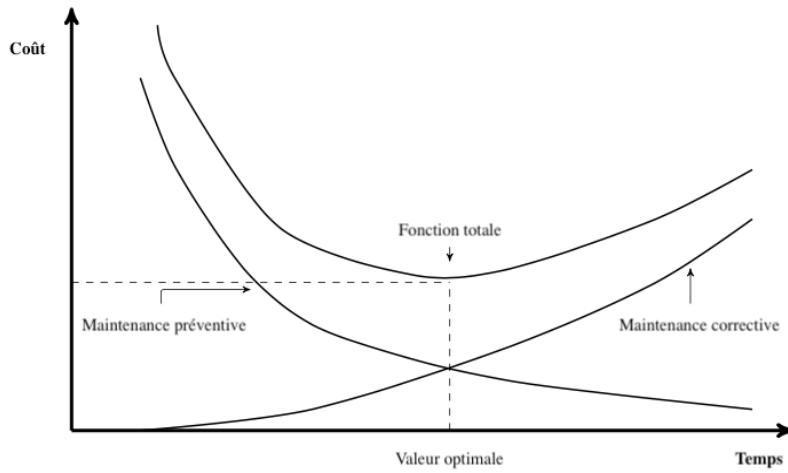


Figure 2.1 Moment idéal pour effectuer une maintenance préventive

Les intervalles de maintenance préventive se traduisent par le moment optimal afin de minimiser le coût par cycle. Ce moment découle d'études d'experts et des fabricants des équipements. Ces études ont comme but principal de maximiser la sécurité des utilisateurs afin d'évaluer l'usure de l'équipement en fonction du temps d'utilisation ainsi que les conditions dans lesquels il est utilisé. Il est primordial d'éviter des bris résultant à un arrêt complet de l'équipement. Ce type de bris se nomme une défaillance catastrophique.

Une étude réalisée par Angeles et al. (2020) stipule que le développement d'un plan approprié de maintenance préventive dans le domaine minier aura comme conséquence d'éviter les temps d'arrêt imprévus à long terme de même que les pertes de productivité liées à des réparations coûteuses. Cette étude se démarque par son originalité puisque l'approche pour la détermination des intervalles d'inspections est basée sur la fiabilité plutôt qu'un intervalle d'âge physique suggéré par les fabricants [16]. Cette approche est fort intéressante parce qu'il n'est pas rare que dans le domaine minier, les conditions de travail ne soient pas exactement les mêmes que celles établies par le fabricant. Ainsi, cette approche permet un reflet plus juste de l'état de l'équipement, évitant ainsi des défaillances catastrophiques. Cette approche est fort pertinente puisqu'elle permet aux décideurs d'établir les moments critiques d'inspection en fonction des niveaux de fiabilité requis de l'équipement.

Une autre étude de la maintenance préventive dans le secteur minier a été effectuée par Viveros et al. (2021). Celle-ci démontre que la planification de la maintenance préventive a la capacité de réduire les temps d'arrêts non prévus. La particularité de cette étude est la stratégie de la maintenance préventive utilisant un critère de tolérance de la fenêtre temporelle afin de générer des schémas de regroupements opportunistes [17]. Ce regroupement découle de travaux de Zhou et al. (2012) qui ont développé un modèle de maintenance préventive dynamique réactif au plan de production. Cette réactivité permet ainsi de maximiser les économies cumulatives à court terme des coûts de maintenance opportuniste pour un système dans son ensemble. L'étude de Viveros et al. (2021) s'est concentrée sur l'application d'un modèle de maintenance préventive au niveau d'un système de convoyeurs qui a comme fonction de déplacer le minerai vers les concasseurs tertiaires et quaternaires.

Le modèle d'optimisation de la planification proposé par Viveros et al. (2021) a été formulé sous le paradigme de la programmation linéaire en nombres entiers (MILP) ayant une fonction objectif

minimisant l'indisponibilité des équipements. La formulation des variables et des contraintes du problème est intéressante en raison de celles se rattachant au regroupement de tâches. Par exemple, les contraintes 5 à 8 [17] sont mises en place afin d'établir la stratégie de regroupements opportunistes en fonction de l'utilisation des fenêtres temporelles de tolérance. Somme toute, l'application de ce modèle dans le secteur minier chilien a ainsi permis une réduction du temps d'arrêt du système de convoyeurs à 35%. Cela augmente ainsi la disponibilité de l'équipement améliorant du même coup la rentabilité de même que le niveau de production de l'industrie.

## 2.3 Planification de la maintenance et des travaux correctifs dans l'industrie minière

Les problèmes de planifications et d'optimisation ont été énormément étudiés dans le secteur minier. L'optimisation dans les mines est pratiquement omniprésente que ça soit au niveau de l'extraction du minerai, le séquençage des tâches, la détermination du contour de fosse ultime (algorithme Lersch-Grossmann), etc. [18]. Plusieurs travaux sur la planification de la production minière à court et à moyen terme ont été effectués [19]. Toutefois, très peu de travaux se sont concentrés sur l'optimisation de l'ordonnancement des travaux de maintenance.

Même si les études sur ce domaine sont peu nombreuses, une étude s'est penchée sur la création d'un outil permettant l'ordonnancement des tâches de maintenance chaque semaine à l'aide d'une résolution par un algorithme génétique. Ce modèle a été développé par Palmer et al. (2017). Le modèle pour le problème d'ordonnancement a été formulé comme un MILP (Mixed-Integer Linear Programming), en d'autres mots un programme linéaire mixte en nombres entiers. Celui-ci a comme fonction objectif de minimiser le « *Makespan* » et le retard pour l'ensemble des travaux à effectuer. Le « *Makespan* » illustre la durée entre le début et la fin des travaux présents dans une séquence quelconque. Le retard quant à lui est associé à la différence entre le moment qu'un travail est effectué et le moment d'échéance pour cette tâche. Le « *Makespan* » et le retard sont des paramètres sélectionnables par l'utilisateur et doivent être choisis afin de refléter la priorité relative de chaque tâche. Le modèle ordonne ainsi l'ensemble des tâches à effectuer en y assignant un professionnel spécialisé, des heures de début et de fin ainsi qu'une baie de travail spécifique. Il est à noter que le modèle développé inclut également des sous-tâches liées à des tâches [20]. La figure suivante illustre un exemple d'une tâche et de ses sous-tâches (Figure 2.2).

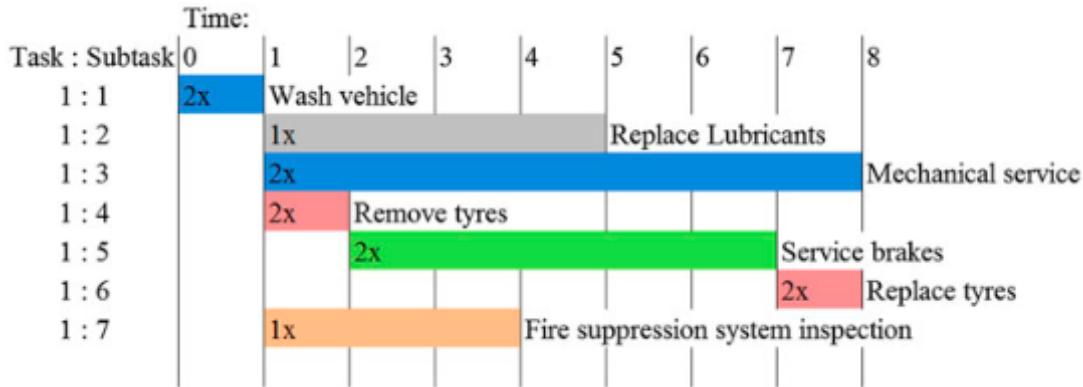


Figure 2.2 Tâche 1 et son ensemble des sous-tâches tiré de Palmer et al. [20]

Le modèle comprend évidemment des contraintes ayant comme objectif de représenter le plus fidèlement possible la réalité du secteur minier. Les contraintes du modèle sont séparées en blocs en fonction du statut de la tâche ou d'une sous-tâche. Les contraintes les plus importantes seront mentionnées. Le premier bloc se consacre aux sous-tâches. Les contraintes stipulent que les sous-tâches doivent être effectuées une seule fois et absolument être accomplies avant la fin du calendrier hebdomadaire. Une contrainte traitant la précédence des sous-tâches est présente afin de s'assurer qu'une certaine tâche doit être accomplie avant qu'une autre soit débutée.

Le second bloc s'attarde aux contraintes pour les tâches. Tout comme les sous-tâches, les tâches ne peuvent être exécutées qu'une seule fois et que le temps de début de la tâche doit correspondre au moment du début de la première sous-tâche rattachée. Ainsi, le moment de fin de la tâche doit être le même que la fin de la dernière sous-tâche. Le retard de chaque tâche est ainsi calculé grâce à la différence entre la fin de la maintenance et la date limite de la tâche en particulier.

La résolution du problème d'optimisation a été effectuée à l'aide de deux méthodes. La première constitue la résolution d'un programme linéaire en nombres entiers par une approche de séparation et d'évaluation progressive. Ce type d'approche permet de construire un arbre de recherche en séparant le domaine des solutions admissibles en sous-domaines, en imposant des bornes inférieure et supérieure sur la valeur d'une variable pour ensuite comparer la valeur de la solution trouvée sur le sous-domaine à la meilleure solution connue. Et ce, jusqu'à l'obtention de la solution optimale. La seconde stratégie consiste à utiliser un algorithme génétique. Celui-ci est une métahéuristique inspirée de la sélection naturelle et l'évolution de l'espèce. L'idée générale est de combiner des

solutions (parents) afin de générer de nouvelles solutions (enfants) possédant les bonnes caractéristiques des parents, et ce sans leurs mauvaises caractéristiques. Les caractéristiques d'une solution dans ce problème sont représentées par une liste ordonnée des tâches. Un croisement des caractéristiques est effectué et puis suivi d'une mutation selon une approche probabiliste. Un des gènes est échangé par un autre gène du même chromosome. Suite à la mutation, les caractéristiques de l'enfant sont finales. La séquence présente est par la suite évaluée. À chaque itération, le processus recommence et l'enfant devient un parent, et ce jusqu'à tant qu'une solution de qualité soit obtenue. Au niveau des résultats, la résolution par l'algorithme génétique performe mieux que le MILP. De plus, la résolution par l'algorithme génétique connaît un temps de compilation fort rapide. Cela permettrait un horaire facilement modifiable lors de délais et de défaillances inattendues. Toutefois, il est à noter qu'il devient difficile de tenir compte des contraintes lorsque leur nombre augmente.

## 2.4 La programmation par contraintes

La programmation par contraintes (PPC) est un paradigme de programmation qui permet de modéliser des problèmes d'optimisation combinatoire de grandes tailles. La PPC est particulièrement performante pour ces types de problèmes par rapport à d'autres méthodes d'optimisation comme la programmation linéaire en nombres entiers ainsi que des approches hybrides comme l'est rapportée par Laborie et al (2018). Cette méthode exacte est de plus en plus utilisée afin de résoudre des problèmes d'ordonnancement, de planification, de transport ainsi que de la planification de machines autonomes en raison de son côté instinctif et des résultats obtenus. *CP Optimizer* (CPO) de *l'Optimization Studio* d'IBM est souvent utilisé afin de modéliser des problèmes de PPC. Le logiciel permet de définir un ensemble de variables, des contraintes ainsi qu'une panoplie de fonctions permettant d'établir une relation temporelle entre les variables. L'ensemble des solutions obtenues à la fin de l'exécution du modèle sont présentées par un diagramme de Gantt (Figure 2.3). Les activités sont représentées par des variables d'intervalle alors que les ressources sont représentées par des variables d'intervalle optionnelles. Les variables d'intervalle sont définies par des caractéristiques s'attardant au temps de début et de fin de l'activité ainsi que leur durée totale. Alors que les variables d'intervalle optionnelles sont représentées par une valeur booléenne. Cette valeur peut être soit présente ou absente de la solution.

La consommation d'une ressource est modélisée par des séquences de variables. L'utilisation de ressources au fil du temps, l'évolution de l'activité d'une ressource et des contraintes liées à la disponibilité sont modélisables à l'aide de fonction par paliers discontinu [4].



Figure 2.3 Exemple d'un diagramme de Gantt obtenu par CPO

La PPC découle de certains principes fondamentaux suivants : la déduction de contraintes supplémentaires à partir des contraintes existantes par un raisonnement logique, et application d'algorithmes de recherche utilisés pour explorer l'espace des solutions [21]. L'espace des solutions est donc le domaine possible pour l'ensemble des variables présentes dans le problème, la propagation des contraintes au niveau de l'ensemble des solutions a comme impact d'éliminer certaines valeurs de l'ensemble des domaines. En d'autres mots, les contraintes impactent directement le domaine de chaque variable affectant ainsi le domaine des solutions réalisables. En fonction donc de la fonction objectif et des contraintes, la propagation de ceux-ci mène vers la recherche d'une solution dite optimale.

La PPC est une technique permettant de résoudre des problèmes combinatoires. Il existe différents types de problèmes combinatoires, mais les types principaux sont le problème de satisfaction de contraintes (CSP) et les problèmes d'optimisation. Le but du premier type est de trouver une solution réalisable, si elle existe. Cette solution est le résultat de l'ensemble des variables qui ont été affectées en fonction du respect des différentes contraintes spécifiques au problème.

Il existe plusieurs problèmes pouvant être résolus par CSP comme des problèmes de génération d'horaires, d'affectation, de Sudoku, etc. [22]. Historiquement, les problèmes d'ordonnancement se résolvent très bien par la programmation par contraintes comme le démontre les travaux de Wessén et al (2023) qui traite de l'ordonnancement et l'aménagement de l'espace de travail d'un robot d'assemblage multi-outils à deux bras à l'aide d'un modèle de PPC [40]. Ceci est

principalement dû au fait que les problèmes de ce type possèdent des contraintes temporelles et de capacité. Ces contraintes répondent très bien face aux algorithmes efficaces de recherche opérationnelle. Le second type a comme but d'optimiser (maximisation ou minimisation) un critère à l'aide d'une fonction objectif quelconque tout en satisfaisant les contraintes du problème. Ainsi le processus de résolution, comme brièvement mentionné préalablement, recherche des solutions basées sur une énumération intelligente des combinaisons possibles de valeurs associées aux variables. Par la suite, des algorithmes de propagation de contraintes sont appliqués aux solutions. Cette propagation a comme effet de propager les décisions d'une variable d'intervalle donnée à l'ensemble de celles-ci permettant de faciliter la combinaison des différents types de contraintes. La PPC comporte certains avantages par rapport à la PLNE, car le nombre de variables dans le modèle est équivalent au nombre de tâches. De plus, les contraintes d'ordonnancement sont plus intuitives qu'en programmation mathématique à l'aide des contraintes globales. Celles-ci sont définies comme une contrainte capturant une relation entre un nombre non fixe de variables [11]. Généralement, elles sont redondantes et remplacent une conjonction de contraintes plus simples.

Des travaux se penchant sur la planification minière à court et à moyen terme à l'aide de la PPC ont été effectués par Campeau (2019) et André (2022). L'objectif de ces travaux était la création d'horaires et de développement respectant les contraintes opérationnelles tout en permettant d'atteindre les objectifs technico-économiques [23] [24]. Les contraintes du problème se concentrent principalement sur des contraintes de ressources ainsi que des contraintes de préséance. Aalian et al (2022) se sont également intéressés sur la planification minière à court terme. Le modèle proposé a comme objectif de minimiser le « *Makespan* » de la durée de l'ensemble des tâches. De plus, le modèle est basé sur une approche par des scénarios afin de générer des séquences robustes [25]. Les travaux d'Astrand et al (2020) se sont également penchés sur l'utilisation de la PPC dans le but d'ordonnancer une flotte d'équipements dans un contexte minier souterrain [26].

## CHAPITRE 3 MAINTENANCE DES ÉQUIPEMENTS MOBILES DANS LE CONTEXTE MINIER SOUTERRAIN

### 3.1 Maintenance préventive et travaux correctifs

Comme souligné dans notre revue de la littérature, les travaux de maintenance préventive et corrective constituent une part importante des opérations dans le secteur minier. De plus, l'existence d'une plage optimale assure une minimisation globale des coûts d'opération (balance entre les coûts de maintenance et les coûts d'indisponibilité). Par conséquent, un *bon* (au sens *optimal*) plan de maintenance engendre une plus grande disponibilité de l'ensemble des équipements permettant ainsi une amélioration de la productivité en réduisant le nombre d'arrêts imprévus lié à une défaillance. L'importance de la bonne gestion de la maintenance dans les mines est encore plus prépondérante pour les mines souterraines sachant que l'opération de forage chez un des partenaires industriels est possible jusqu'à 3 500 m de profondeur. Cette impressionnante profondeur restreint considérablement le déplacement pour des réparations des équipements vers et à partir de la surface puisque les deux alternatives sont coûteuses en temps. La première option consiste de désassembler l'équipement pièce par pièce et de le remonter vers la surface à l'aide des différents ascenseurs. La seconde consiste de remonter l'équipement via un système de rampes pouvant prendre jusqu'à deux quarts de travail. La Figure 3.1 illustre un exemple d'un complexe minier souterrain.

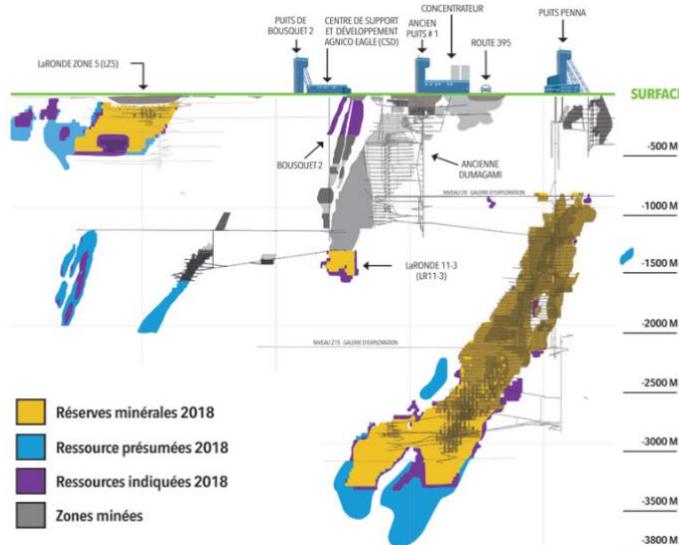


Figure 3.1 Vue longitudinale du complexe minier LaRonde tiré d'Agnico Eagle [27]

Comme mentionné à l'INTRODUCTION, les travaux de maintenance sont essentiellement exécutés sous terre. Des garages souterrains sont présents dans les diverses sections des mines. Le nombre de garages varie en fonction de la taille de la mine et du nombre d'équipements présents sur le site. Un garage typique d'une mine souterraine est subdivisé en espaces distincts nommés **baies de travail** comme le décrit la Figure 3.2.

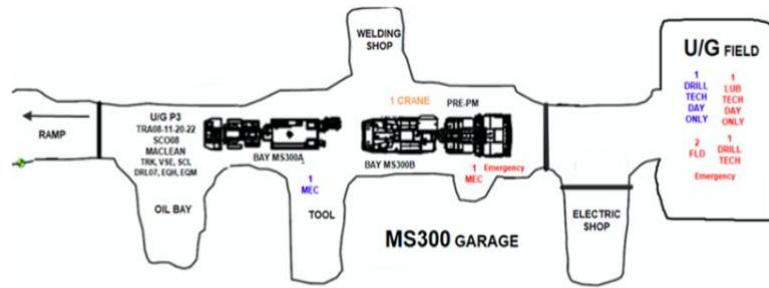


Figure 3.2 Illustration d'un garage d'une mine souterraine

Les différentes baies de travail contiennent des outils spécifiques pour certains travaux à effectuer ou pour des équipements. Des exemples d'outils spécifiques seraient la présence d'une grue au sein d'une baie de travail pour tous les travaux liés au moteur et la présence d'une boîte à outils spécialisée pour les remplacements de pneus. À cause de l'exiguïté de l'espace, les garages souterrains comportent un nombre limité d'entrées et de sorties. Ce fait complique la logistique de la planification des travaux puisque des tâches de maintenance de longue durée lorsqu'elles sont assignées sur certaines baies peuvent obstruer un équipement sur lequel la maintenance est déjà complétée. Cela peut probablement engendrer un ralentissement au niveau du nombre de travaux pouvant être effectué. Il est ainsi pertinent de bien assigner les différentes baies de travail pour les travaux afin d'optimiser le processus de la maintenance dans le secteur minier.

### 3.2 Processus de la maintenance

Comme mentionné brièvement au sein de l'Introduction, le plan de maintenance pour les équipements miniers est généré par l'équipe de maintenance. Celle-ci comprend des ingénieurs, des superviseurs et autres intervenants. Les stratégies de maintenance employées par cette équipe sont essentiellement basées sur les recommandations du fabricant de chaque équipement ainsi que du département d'ingénierie, des expériences professionnelles de l'équipe de maintenance ainsi que par les statistiques inférées à partir de l'historique d'entretien et de défaillances des équipements. Il est à noter que certaines maintenances sont régies par des réglementations gouvernementales ou pour des fins d'assurance.

Il existe deux grandes catégories d'équipements au sein d'une mine, soit les équipements fixes (concasseurs, convoyeurs, etc.) et les équipements mobiles (foreuse, chargeuse-navette, etc.). Le présent mémoire se concentre sur la maintenance des équipements mobiles. La gestion de la maintenance des équipements mobiles représente un défi de taille en raison d'un ensemble de facteurs comme la disponibilité de la main-d'œuvre, la fiabilité de la chaîne d'approvisionnement des pièces nécessaires (certaines mines sont dans des régions éloignées et isolées), des évènements imprévus, etc. Contrairement aux équipements fixes, le bon fonctionnement des équipements mobiles dépend surtout de leurs conditions d'opération et de la manière qu'ils sont utilisés par les différents opérateurs.

Au niveau des équipements mobiles, il existe une multitude de catégories : des équipements de forage de développement (ex. : foreuse jumbo), les équipements de forage de production (ex : foreuse long trou), les équipements de chargement (ex. : chargeuse-navette), les équipements de manutention (ex : camion 50 tonnes), les équipements de soutènement (ex : boulonneuse et camion à béton projeté) et les équipements de services (ex : tracteur et camion plateforme).

La gestion de la maintenance suivante reflète principalement la façon de faire d'un des partenaires industriels du projet. Celle-ci se fait à l'aide la gestion de maintenance assistée par ordinateur (GMAO). La GMAO est principalement utilisée pour informatiser le suivi de l'ensemble des bons de travail (BT) et de planifier ceux-ci en fonction des différentes ressources accessibles. La GMAO est aujourd'hui un outil très puissant comprenant une multitude de fonctions. Elle permet la centralisation de l'ensemble de l'information lié aux équipements, de générer des listes actualisées de l'inventaire des pièces de rechange, de gérer le réapprovisionnement ainsi que la génération de

plusieurs tableaux de bord permettant d'évaluer la performance à l'aide de plusieurs indicateurs clefs de performance qui seront définis au cours de ce chapitre. Il est à noter que le processus de gestion de la maintenance est très similaire pour la grande majorité des mines souterraines. L'ensemble de la maintenance se distingue en quatre étapes principales allant comme suit.

### **Étape 1 : Identification des besoins**

La première étape du processus est l'identification des travaux à effectuer. Cette étape est effectuée soit par des travailleurs ayant constaté un problème au niveau de l'équipement ou peut être automatiquement programmée en fonction du nombre d'heures d'utilisation pour la maintenance préventive. C'est à ce moment-ci que le BT est créé. Avant la planification des travaux et l'ordonnancement du BT, celui-ci doit être approuvé. L'approbation est obtenue lors d'une rencontre quotidienne entre les planificateurs et les superviseurs qui revoient l'ensemble des demandes soumises au cours des 24 dernières heures. Cette rencontre permet ainsi de prioriser l'ensemble des travaux à effectuer pour la prochaine semaine.

### **Étape 2 : Planification des travaux**

Le planificateur s'assure d'avoir la main-d'œuvre spécialisée et l'ensemble du matériel nécessaire pour effectuer les travaux. C'est également à cette étape que le planificateur établit toutes les procédures des travaux. Une estimation de la durée du travail requis pour chaque métier impliqué est réalisée par l'équipe de maintenance.

### **Étape 3 : Ordonnancement des travaux**

Les BT sont ordonnancés au sein du **calendrier d'ordonnancement**. Celui-ci est réalisé sur une base hebdomadaire. Un grand nombre de facteurs sont étudiés afin d'établir un calendrier optimisé. Cependant, les critères de décisions principaux sont la priorité du BT et la criticité de l'équipement. Comme mentionné à au CHAPITRE 1, la priorité des BT est cruciale et les travaux sont ordonnancés en fonction de cette priorité. Les indices de priorité pour les travaux planifiés sont définis par le Tableau 3.1.

Tableau 3.1 Indices de priorités pour les types de travaux de maintenance

Indice de priorité	Types de travaux de maintenance
1	Maintenance préventive sur les équipements de production
2	Travaux correctifs pour des équipements de productions non fonctionnels
3	Priorités de la semaine
4	Maintenance préventive sur les équipements auxiliaires
5	Travaux correctifs pour les équipements auxiliaires non fonctionnels
6	Travaux correctifs pour les équipements de production
7	Travaux correctifs pour les équipements auxiliaires
8	Travaux correctifs se trouvant dans le « Backlog »

#### **Étape 4 : Exécution des travaux et fermeture**

La dernière étape constitue l'exécution des travaux par le personnel concerné. Pour assurer un suivi rigoureux de la maintenance, le personnel fournit des informations détaillées à propos des travaux au sein du BT. Ces détails respectent les exigences du département et permettent une amélioration continue de la planification de la maintenance grâce aux statistiques inférées des durées réelles des travaux, des complications rencontrées et de l'historique propre à chaque équipement. Le BT de travail est par la suite fermé par le planificateur et il s'assure que l'ensemble des informations nécessaires sont présentes. Il est également à noter que le BT possède un chiffre associé à son statut au sein de l'ensemble du processus de la gestion de la maintenance. Les statuts des BT en fonction du processus sont illustrés à l'aide de la Figure 3.3. (Laroche- Carrier, 2020).

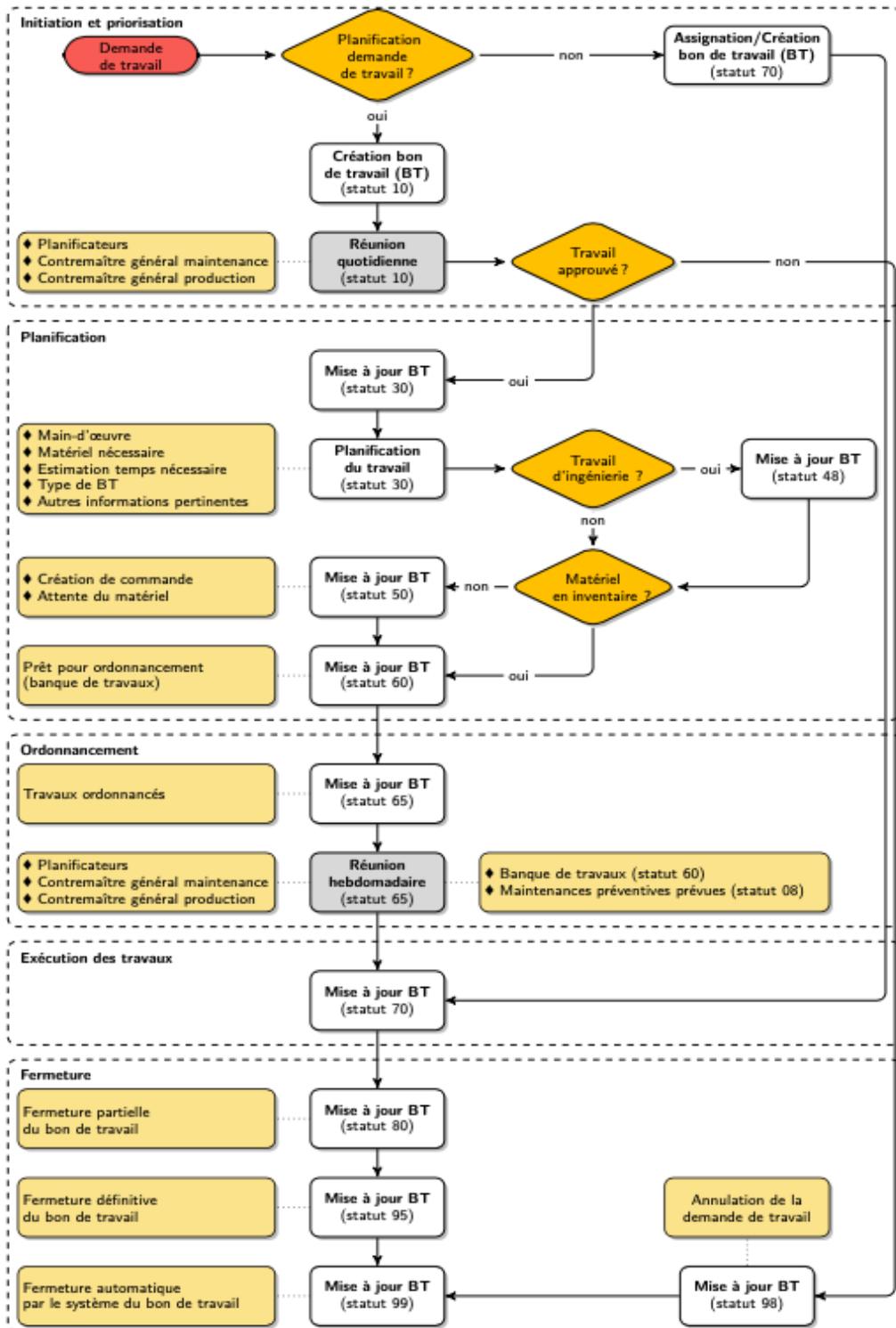


Figure 3.3 Processus de maintenance dans une mine souterraine tiré de Laroche-Carrier [28]

### 3.3 Gestion de la maintenance

Une gestion appropriée de la maintenance dans le secteur minier est basée principalement sur des indicateurs clefs de performance particuliers (KPI). Ceux-ci permettent donc d'évaluer l'efficience et l'efficacité du processus de l'ordonnancement (Tableau 3.2).

Tableau 3.2 Indicateurs clefs de performance de la maintenance

KPI	Description
Disponibilité de la flotte	Le nombre d'équipements disponibles du même type (Ex : Chargeuse navette, camion, boulonneuse, etc.)
Utilisation de l'équipement	Mesuré généralement en heures de fonctionnement du moteur [h], il constitue la caractéristique principale afin de planifier la maintenance préventive comme mentionné préalablement.
Temps d'arrêt de l'équipement	Mesuré en heure [h], il indique la durée pour laquelle un équipement n'est pas fonctionnel pour la production en raison d'un bris ou d'une maintenance.
Fréquence de la maintenance	Nombre d'heures moteur entre différentes maintenances sur le même équipement
Criticité des BT complétés	Nombres de BT complétés en fonction de leurs indices de priorité
<i>Backlog</i>	État général du « <i>Backlog</i> »; nombre de travaux s'y trouvant ainsi que le nombre de semaines depuis qu'ils y sont. (voir Figure 1.2)
Complétion du calendrier d'ordonnancement	Représente le pourcentage des tâches complétées par rapport aux tâches se trouvant sur le calendrier d'ordonnancement pour la semaine.
Précision de l'estimation des durées	Pourcentage des heures nécessaires pour compléter un BT en fonction du nombre d'heures estimées.

Ces KPI sont importants pour les opérations de maintenance. Ils sont principalement utilisés par les planificateurs. Il existe toutefois d'autres KPI qui sont plutôt utilisés par les experts en fiabilité et l'équipe d'ingénierie qui élabore les plans de maintenance. Le temps moyen entre des pannes (MTBF) [h] détermine la durée moyenne entre deux pannes successives, pour un équipement

particulier ou un type d'équipements. Cet indice permet ainsi d'optimiser la gestion de la maintenance en y complétant les maintenances nécessaires avant une défaillance. Le MTBF permet également d'identifier un équipement ayant un plus grand nombre de défaillances qu'un autre équipement du même type pouvant mener à une investigation [29]. Celle-ci aura ainsi comme objectif d'évaluer la problématique au niveau de l'équipement afin de réinstaurer sa performance comme les autres équipements semblables.

Le temps moyen de réparation (MTTR) [h] permet d'établir le temps moyen entre une défaillance et le moment qu'un équipement soit de nouveau fonctionnel. Cet indice est pertinent pour l'équipe de maintenance puisqu'il guide la gestion de la maintenance pour les équipements du même type. Sachant que la production nécessite un nombre précis d'un certain type d'équipements et que le nombre actuel de la flotte fonctionnelle est équivalent à ce nombre, l'équipe de maintenance considérera uniquement à planifier une maintenance sur ce même type d'équipements dans une durée équivalente au MTTR. Le MTTR permet également d'évaluer les différents goulots d'étranglement au niveau du processus de la maintenance. Il est donc possible de scinder le MTTR en un ensemble de sous-groupes comme le temps moyen de réparation d'une tâche spécifique au sein du BT, du temps moyen de déplacement de l'équipement vers une baie de travail, le temps moyen entre la commande d'une pièce spécifique jusqu'à son installation, etc. [29].

Une composante cruciale pour la gestion de la maintenance pour les planificateurs est d'établir les moments de calendriers les plus opportuns pour les maintenances préventives (MP). Puisque les travaux associés à la maintenance préventive pour les équipements (de production et auxiliaires) forment des priorités importantes selon l'ordre de priorité des travaux planifiés. Les différents travaux de MP comme préalablement discutés sont programmés en fonction de l'utilisation de l'équipement. Ainsi, lorsqu'un équipement atteint le nombre d'heures requis, une maintenance est effectuée. Toutefois, de façon réaliste, il n'est pas nécessairement possible d'effectuer une MP exactement à un nombre d'heures d'utilisation. La manière employée actuellement est d'établir en pourcentages les heures d'utilisation actuelles en fonction des heures d'utilisation nécessaires pour effectuer une maintenance quelconque. Par exemple : une chargeuse navette possède 400 heures-moteur d'utilisation, cet équipement possède donc 80% des heures dues pour sa MP à 500 heures.

Afin d'effectuer une MP adéquate, l'équipe de maintenance établit une fourchette acceptable au niveau de ce pourcentage. Cette fourchette n'est pas évidente à établir puisqu'un pourcentage trop

bas engendrerait des maintenances non nécessaires et coûteuses comme établi à la Figure 2.1 et au contraire, un pourcentage trop élevé engendre potentiellement des défaillances augmentant ainsi les coûts d'indisponibilité et de réparation. La méthode employée par nos partenaires industriels est d'ordonnancer les maintenances préventives pour que les pourcentages des heures dues demeurent entre 80% à 120%. Évidemment, cette stratégie n'est pas optimale. Toutefois, elle permet de donner une marge de manœuvre pour ordonner les BT liés à la maintenance préventive.

L'ensemble des BT sont assignés à différents métiers compatibles avec les tâches à accomplir. Suite à une analyse des BT provenant d'un partenaire industriel, il est possible d'affirmer que la grande majorité des tâches sont assignées à quatre (4) corps professionnels : mécaniciens, électriciens, soudeurs et frigoristes. Il est à noter que ces professionnels sont des employés de la mine (pas une ressource externe). Toutefois, il n'est pas rare que des professionnels employés par des manufacturiers d'équipement soient sur place pour exécuter des maintenances et des réparations spécifiques. Il est également assez courant que les planificateurs utilisent la sous-traitance pour des réparations en raison du manque de place dans les garages, de même qu'un manque de main-d'œuvre. Puisque ces tâches ne sont pas réalisées par des employés de la mine, elles ne sont pas ordonnancées au niveau du calendrier de la maintenance et sont traitées comme des exceptions.

Les quarts de travail sont séparés en deux (2) catégories : un quart de jour et un quart de nuit. Il est important de mentionner qu'entre les deux quarts, une période est dédiée pour le sautage. Le sautage correspond à la fragmentation de corps rocheux à l'aide d'explosifs. Afin d'assurer une sécurité pour les mineurs, personne n'a la permission d'être sous terre pendant cette période. Celle-ci a une fenêtre de trois heures afin de permettre l'évacuation des gaz, les vérifications géomécaniques. C'est à ce moment que les équipes de jour et nuit effectuent leur rotation.

Ainsi, le contexte minier engendre un grand nombre de particularités quant aux ressources disponibles, l'organisation des différentes équipes de travail de maintenance et la gestion des BT liés aux travaux de maintenance. Afin de développer un modèle permettant d'ordonner de façon optimale et réaliste l'ensemble des BT en fonction de leur indice de priorité, il est crucial de prendre en compte le contexte minier préalablement défini. La réalité de contexte minier sera donc traduite par l'ensemble des caractéristiques du modèle. Celles-ci sont définies par la fonction objectif,

l'ensemble de contraintes, des paramètres et des variables présentes au sein du modèle. L'ensemble du modèle sera expliqué en détail dans le prochain chapitre.

## CHAPITRE 4 MODÈLE D'ORDONNANCEMENT DE LA MAINTENANCE

### 4.1 Méthodologie

#### 4.1.1 Contexte, objectifs et problème à résoudre

L'objectif de la planification de la maintenance est de produire un calendrier d'ordonnancement des travaux qui répond, au mieux, à l'ensemble des contraintes opérationnelles. Le calendrier est défini par un modèle déterministe comprenant des durées fixes pour chacun des BT à ordonner. Ces durées sont estimées par l'équipe de maintenance et découlent d'une statistique descriptive (ex. moyenne, médiane...) d'anciens travaux du même type ou similaires.

Les modèles de PPC possèdent la capacité de résoudre le problème à l'optimalité ou d'obtenir des solutions performantes et réalisables avec un temps de résolution rapide. Un modèle de ce type serait pertinent pour cette problématique puisqu'il permettrait à l'équipe de maintenance de résoudre le problème sur une base périodique ainsi qu'à chaque fois qu'une ressource est absente selon l'ordonnancement préalablement établi dans le **calendrier d'ordonnancement**. En effet, une absence non planifiée d'un travailleur qualifié ou une ressource matérielle manquante engendre actuellement une non-conformité du calendrier puisque le BT assigné au travailleur (ou à une ressource quelconque) n'est pas entamé. Ainsi, en prenant compte du nouveau portait des ressources, le modèle pourrait assigner les BT à l'ensemble des ressources compatibles et disponibles. Une simple compilation du modèle, avec comme intrant les nouvelles ressources, engendre un nouvel ordonnancement optimal dans un intervalle de temps relativement rapide et qui varie selon la taille du lot des BT à ordonner. Les détails concernant le temps de compilation du modèle seront spécifiés au 0.

Un modèle de ce type procure donc une flexibilité qui n'était envisageable auparavant chez les partenaires industriels du projet puisque le **calendrier d'ordonnancement** se fait aujourd'hui sur une base strictement hebdomadaire, et n'est pas modifiable une fois complété. Cette flexibilité assure une nouvelle réactivité au niveau de la planification des travaux de maintenance permettant d'optimiser les travaux chaque jour. Cela permet aussi à l'équipe de maintenance de ne pas essuyer des contraintes supplémentaires en raison de décisions prises au cours de la semaine précédente, et

puisque les choses peuvent changer rapidement, il est fort pertinent d'employer un modèle pouvant ordonnancer les BT en fonction des véritables ressources (telles qu'actualisées) accessibles plutôt que celles planifiées auparavant.

#### 4.1.2 Données d'entrée

Les données d'entrée du modèle déterministe proviennent de quatre (4) fichiers (voir Tableau 4.1). Les données sont liées aux BT, aux travailleurs, aux différents modes d'assignation et à une matrice de suivi temporel pour des BT successifs au sein de l'ordonnancement. Le programme *IBM ILOG CPLEX* avec lequel le modèle a été créé permet d'extraire des fichiers de format *csv*. Il est également possible d'ajouter ces fichiers directement dans la section du programme réservée aux données d'entrée.

Tableau 4.1 Types et caractéristiques des données d'entrée pour le modèle

Nom du jeu de données	Informations contenues
BT	Id, prio, type_eq, id_eq, deb, fin, talent et type_trav
Mode	Id, BtId, dur, nb_empl et mo_talent
Skill	Id_trav et trav_talent
MM	Id1, id2 et value

Le jeu de données lié aux *BT* est composé d'un ensemble de caractéristiques uniques pour chaque BT. Chacun possède un identifiant (Id) qui lui est propre ainsi qu'un indice de priorité (prio) qui a préalablement été établi par l'équipe de maintenance selon les travaux à effectuer (voir Tableau 3.1). Il comprend également l'identifiant de l'équipement (id\_eq) sur lequel les travaux sont effectués ainsi que le type d'équipement (type\_eq) auquel celui-ci appartient. Le type des équipements peut être une foreuse jumbo, une chargeuse-navette, un camion 50 tonnes, un tracteur, etc. La date calendrier telle que souhaitée pour le début des travaux (deb) est en d'autres mots la date la plus hâtive possible pour effectuer les travaux et contrairement la date de fin (fin) souhaitée est la date maximale pour compléter les travaux. Ces dates sont particulièrement utiles pour

l'ordonnancement des BT liés à la maintenance préventive. Comme mentionné à la section 3.3, il existe un intervalle de temps pour effectuer ce type de maintenance. Cet intervalle est fort pertinent pour le modèle parce qu'il permet d'offrir le plus grand éventail de possibilités quant aux dates envisageables de début et de fin pour les travaux au sein de l'ordonnancement. Il est également important de noter que l'ensemble des BT traités par le modèle sont ceux qui possèdent le statut prêt à être ordonné (statut 60).

Le jeu de données du *Mode* est une particularité intéressante quant à la modélisation du problème puisqu'il est tout à fait possible pour l'équipe de maintenance d'associer plus d'un travailleur à un BT spécifique [30]. Conséquemment, le temps estimé pour la complétion de cette tâche change en fonction du nombre de travailleurs assignés. La règle générale employée par les partenaires industriels est que la durée nécessaire pour accomplir un travail est divisée par le nombre de travailleurs assignés. Ainsi, un travail estimé à 12 heures aura une durée de 6 heures lorsqu'il est assigné à deux travailleurs. Il est à noter que la durée de l'ensemble des travaux présents sur les BT est estimée pour un seul travailleur. Ce jeu comprend l'identifiant du mode (Id) ainsi que l'identifiant du BT (BtId) rattaché. Par exemple, un BT avec l'identifiant 01 peut être réalisé par un seul ou deux travailleurs. Ainsi, le jeu de données aura deux modes de réalisation possible pour le BT possédant l'identifiant 01; le premier mode est, réalisé par une seule personne, possède l'identifiant de mode m01; et le second mode, réalisé par deux travailleurs, possède l'identifiant de mode m02.

Dans ce jeu de données, on y trouve la durée [h] (dur) des BT en fonction du mode choisi ainsi que le nombre de travailleurs (nb\_empl) pour chaque mode. Pour reprendre l'exemple précédent : le m01 possède une durée de 12 h et un nombre de travailleurs est un, alors que le m02 possède une durée de 6 h et le nombre de travailleurs est deux. De plus, le jeu de données comprend le corps de métier (mo\_talent) nécessaire du travailleur afin d'effectuer les travaux demandés. Finalement, ce jeu de données comporte des informations liées au type des travaux à effectuer. Ces types de travaux permettent donc de signaler si des outils spécifiques sont nécessaires pour effectuer les travaux. Si tel est le cas, une baie possédant ces outils (baie spécifique) serait assignée au BT. Sinon, une baie générique pourrait être assignée pour le BT.

Le troisième jeu de données est *Skill*. Il contient la liste des travailleurs et leurs compétences. Chaque travailleur possède ainsi un identifiant unique (Id\_trav) jumelé à un corps de métier

(trav\_talent). Les métiers se trouvant dans la majorité des BT se résument à quatre (4) : mécanicien, électricien, soudeur et frigoriste. Cette liste est non exhaustive. Il arrive que d'autres métiers soient nécessaires pour exécuter les travaux décrits au sein des BT.

Le dernier jeu de données d'entrée est une matrice temporelle qui a pour fonction d'illustrer l'impact de réaliser des ordonnancements successifs des BT possédant le même équipement sur la même baie de travail ainsi que d'ordonnancer successivement sur la même baie de travail des BT possédant des équipements différents. Comme mentionné précédemment à la section 1.1, le déplacement d'un équipement vers ou hors d'une baie de travail est nécessaire dans certains cas pour y effectuer les travaux, ou simplement pour remettre l'équipement en fonction dans sa baie d'origine. Ces déplacements sont chronophages alors que des travaux successifs pour le même équipement au sein de la même baie de travail ne nécessitent aucun déplacement. La matrice est représentée par le premier élément BT (Id1). Celui-ci représente l'assignation d'un BT sur une baie quelconque. Le second élément (Id2) représente le BT successif au premier élément. Le second élément est ainsi donc ordonné sur la même baie de travail et ordonné immédiatement après le premier élément. La valeur (value) est nulle si les deux (2) BT sont associés au même équipement. Cependant, si les deux (2) BT ne sont pas associés au même équipement, la valeur (value) est non nulle

## 4.2 Modèle d'optimisation

Le modèle déterministe d'optimisation de programmation par contraintes est présenté ci-dessous et la formulation utilisée correspond à celle qui est utilisée par le programme *IBM ILOG CPLEX* et sa librairie. Ce programme permet donc la modélisation et la résolution des problèmes de PPC.

### 4.2.1 Paramètres et variables de décisions

L'ensemble des paramètres du modèle se retrouvent au Tableau 4.2. Ces paramètres découlent directement des données d'entrée et concernent les équipements, les baies de travail, les BT et la main-d'œuvre.

Les variables utilisées au sein du modèle correspondent à des variables d'intervalles, optionnelles ou non, ainsi qu'à des séquences de variables d'intervalle. Une variable d'intervalle est définie par une variable possédant un temps de début, de fin, et par conséquent, une durée maximale.

Tableau 4.2 Ensemble et paramètres présents dans le modèle

Ensembles	Description
$I$	Ensemble des BT
$L$	Ensemble des baies de travail
$P$	Ensemble des priorités
$S$	Ensemble de la main-d'œuvre
$M$	Ensemble des modes
Paramètres	Description
$\mathbf{MM}$	Matrice des temps de transition pour des BT successifs sur une même baie de travail

Les variables de décisions sont présentées dans le Tableau 4.3. Celles-ci sont représentées par des variables d'intervalle optionnelles. Les variables d'intervalle représentent un intervalle de temps dans lequel une tâche (BT) est exécutée. Cet intervalle est caractérisé par une taille précise (durée), un moment de départ ainsi qu'une fin. Les variables d'intervalle optionnelle possèdent la spécificité d'être présentes ou absentes au sein de la solution obtenue par le modèle. Une séquence de variables d'intervalles présente l'ordre dans lequel se trouvent les variables d'intervalle au sein de la solution obtenue en fonction de l'ensemble des contraintes et de la fonction objectif.

Tableau 4.3 Variables de décision du modèle

Variables	Description	Application
$bt$	Variable d'intervalle optionnelle représentant les BT $b$ ordonnancés	$\forall b \in B$
$assign$	Variable d'intervalle optionnelle pour la main-d'œuvre $s$ réalisée par le mode $m$	$\forall s \in S$ $\forall m \in M$
$Loc$	Séquence de variables d'intervalles optionnelles réalisée sur une baie de travail $l$	$\forall l \in L$ $\forall m \in M$
$mode$	Variable d'intervalle optionnelle pour les BT $b$ réalisés par le mode $m$	$\forall b \in B$ $\forall m \in M$
$x$	Variable d'intervalle optionnelle pour les BT $b$ réalisés sur une baie de travail $l$	$\forall b \in B$ $\forall l \in L$
$Nb$	Variable entière pour les BT $b$ ordonnancés selon leur score de priorité	$\forall b \in B$

#### 4.2.2 Fonction objectif

La fonction objectif vise à maximiser ou minimiser un ou plusieurs objectifs caractérisés par diverses métriques dans le but d'optimiser la solution. Dans le cadre de cette modélisation, la fonction objectif est une fonction multiobjectifs. Celle-ci en possède deux principaux. Le premier objectif est de maximiser le nombre de BT ordonnancés au sein du **calendrier d'ordonnancement** en fonction de leurs indices de priorité. La maximisation des nombres de BT ordonnancés a été séparée en huit (8) sous-objectifs en fonction des indices de priorité déjà mentionnés au Tableau 3.1 allant de 1 jusqu'à 8. Le second principal objectif s'attarde sur la minimisation du « *Makespan* » des BT ordonnancés dans le **calendrier d'ordonnancement**. La fonction *staticLex* de la librairie de *CPO* est utilisée puisqu'elle permet une optimisation lexicographique multicritères [31]. Ainsi, l'ordre dans lequel se présentent les critères au sein de la fonction objectif représente l'ordre d'importance général de l'ensemble des critères. Le premier critère est donc considéré comme le plus important et le dernier critère comme le moins. Dans le cas de la fonction objectif utilisée, le premier critère représente le nombre des BT de priorité 1 qui ont été ordonnancés au sein de la solution obtenue. Le second critère est la minimisation du « *Makespan* » de l'ensemble des BT ordonnancés au sein de la solution. Les critères suivants représentent le nombre de BT ordonnancés des priorités de type 2 jusqu'à 8. Le nombre de BT ordonnancés en fonction de la priorité est obtenu

à l'aide de la variable de décision  $Nb$  (voir Tableau 4.3). L'ordre des critères a été obtenu par une série de modifications en fonction des résultats obtenus. L'ordre indiqué dans la fonction objectif correspond donc aux résultats les plus satisfaisants et qui se rapprochent le plus possible aux résultats obtenus par l'équipe de planification de la maintenance. La fonction objectif utilisée dans le modèle est décrite comme suit par l'Équation ((4.1)).

$$\begin{aligned} Obj = \min \text{staticLex} \{ & (-nb[1], \max [EndOf(BT_{i,l}) \mid \forall i \in I, \forall l \in L] - \\ & nb[2], -nb[3], -nb[4], -nb[5], -nb[6], -nb[7], -nb[8]), \} \end{aligned} \quad (4.1)$$

### 4.2.3 Contraintes

Dans notre cas, il existe deux types de contraintes :

1. Le premier type concerne les contraintes globales. Il permet de lier une série de contraintes élémentaires tout en favorisant la résolution du problème avec un temps de résolution plus rapide qu'une série de contraintes élémentaires équivalentes [32].
2. Le second type des contraintes traite celles qui sont élémentaires. Ceci permet de lier une ou plusieurs variables d'intervalles à l'aide d'une équation d'égalité ou d'inégalité.

L'ensemble des contraintes présentées dans cette section tente d'illustrer le plus fidèlement possible la réalité à laquelle fait face l'équipe planifiant les travaux de maintenance. Les contraintes de ce problème ont donc comme fonction de générer un ordonnancement réalisable dans un contexte minier. Ainsi, les contraintes présentées sont les contraintes génériques qui se trouvent chez l'ensemble des partenaires industriels du projet. Celles-ci ne représentent donc pas une mine spécifique. À noter qu'il est possible de modifier les équations dans le modèle afin d'avoir un portrait adapté à une mine en particulier.

Une contrainte importante dans le cadre de la problématique est la disponibilité des équipements (critère de disponibilité). Les travaux de maintenance ont comme rôle de supporter les plans de production pour maximiser le taux de disponibilité en s'assurant de mettre en place des équipements fonctionnels et en nombre suffisant. La disponibilité est donc traduite à l'aide d'une

fonction qui se trouve dans la librairie de *CPO* ainsi qu'une contrainte élémentaire qui épaulé cette fonction. Les équations suivantes s'attardent pour les équipements de type 1.

$$\text{cumulFunction } f\_1 = \text{sum}(b \text{ in } Bts : b.\text{typeq} == 1) \text{ pulse}(bt[b], 1) \quad (4.2)$$

$$f\_1 \leq 3 \quad (4.3)$$

La fonction cumulative (*cumulFunction*) permet de représenter l'évolution temporelle d'une quantité pouvant être modifiée de façon incrémentale par des variables d'intervalles [16]. Dans le cadre du modèle retenu, cette fonction permet de faire le suivi en temps réel du nombre de BT ordonnancés qui possède le type d'équipement 1 à l'aide d'une simple somme. Comme mentionné auparavant, la variable représentant les BT est ordonnancée dans le calendrier à l'aide d'un intervalle qui possède un début et une fin. Ainsi, pour l'ensemble de la durée ainsi que pour chaque unité de temps pour lequel le BT est au calendrier, une incrémentation de 1 est réalisée au niveau de la somme grâce à la fonction *pulse* (Équation (4.2)). La contrainte élémentaire à l'équation (4.3) permet donc d'assurer que le nombre maximal de BT possédant des équipements de type 1 est toujours inférieur ou égal à une constante sur l'ensemble de la période. Ainsi, si la constante vaut 3, cela signifie qu'un nombre maximal de trois (3) équipements de type 1 peuvent être en maintenance pour une période t.

Une fonction cumulative est présente dans le modèle pour l'ensemble des différents types d'équipements disponibles dans le jeu de données représentant les BT ainsi qu'une fonction élémentaire qui indique le nombre d'équipements de ce type qui peuvent être ordonnancés en même temps.

Deux contraintes du modèle s'assurent que le BT est ordonné selon la date de début et de fin souhaités (voir le Tableau 4.1) :

$$\text{forall}(b \text{ in } Bts, l \text{ in } L) \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned}
& startOf(bt[b]) \geq b.deb \\
& forall(b \text{ in } Bts, l \text{ in } L) \\
& \quad endOf(bt[b]) \leq b.fin
\end{aligned} \tag{4.5}$$

Les contraintes globales *startOf* et *endOf* sont présentes dans la librairie *CPO*. Ces fonctions permettent de spécifier le début et la fin des variables d’intervalles dans la solution. Dans le modèle retenu, ces contraintes s’assurent que le début et la fin de chaque BT respectent les dates désirées sur chaque baie de travail (Équation (4.4) et Équation (4.5)).

La contrainte globale *alternative* est utilisée pour respecter que les BT ne soient ordonnancés qu’une seule fois.

$$\begin{aligned}
& forall(b \text{ in } Bts) \\
& \quad alternative(bt[b]), all(l \text{ in } L)x[b][l])
\end{aligned} \tag{4.6}$$

Cette fonction permet qu’une variable d’intervalle commence et puis se termine au même moment qu’une autre variable. Dans le cas du modèle, la variable d’intervalle des BT doit ainsi commencer et se terminer au même moment que la variable d’intervalle qui représente les BT assignés pour chaque baie de travail. Ainsi, la cohérence entre les BT ordonnancés et ceux qui sont assignés aux différentes baies de travail est assurée. De plus, si certains BT ne sont pas ordonnancés dans la solution obtenue, ils ne seront donc pas assignés à une baie de travail (Équation (4.6)).

La contrainte globale *noOverlap* est présente afin de s’assurer qu’aucune variable ne se chevauche dans une séquence.

$$\begin{aligned}
& forall(l \text{ in } L) \\
& \quad noOverlap(Loc[l])
\end{aligned} \tag{4.7}$$

Au sein du modèle, cette contrainte s'assure qu'un seul BT à la fois est ordonné pour chaque baie de travail. Ainsi, les BT ne se chevauchent pas pour l'ensemble des baies de travail au sein de la séquence *Loc* (Équation (4.7)).

Afin d'éviter le chevauchement des BT qui possèdent le même identifiant pour l'équipement, sachant qu'il est impossible d'effectuer des travaux sur un même équipement sur des baies de travail différentes en même temps. Une contrainte similaire à la disponibilité des équipements est employée. Une fonction cumulative est utilisée pour chaque équipement et sa somme doit être inférieure ou égale à 1 en tout temps. Ceci élimine la possibilité d'assigner un BT possédant le même équipement pour un même intervalle de temps (Équation (4.8) et Équation (4.9))

$$\text{cumulFunction } e\_1 = \text{sum}(b \text{ in } Bts : b.\text{id\_eq} == 1) \text{pulse}(bt[b], 1) \quad (4.8)$$

$$e\_1 \leq 1 \quad (4.9)$$

Le modèle permet également aux différents utilisateurs de fixer une ou des préséances pour les BT au niveau de l'ordonnancement. Cela est possible grâce à la contrainte globale *endBeforeStart*.

$$\text{endBeforeStart}(bt[< 2 >], bt[< 3 >]) \quad (4.10)$$

Cette contrainte s'assure que la position relative des variables d'intervalle est respectée dans la solution obtenue. Ainsi, l'intervalle pour lequel *bt* [2] sera ordonné sera terminé avant que l'intervalle du *bt* [3] débute (Équation (4.10)).

Comme mentionné à la section 3.1, certains BT ne peuvent être réalisés que sur des baies spécifiques en raison de la disponibilité d'outils qui sont exclusivement présents sur une baie de travail. Les BT qui possèdent ainsi un type de travail particulier seront assignés à une baie de travail spécifique.

$$\text{forall}(b \text{ in } Bts : b.\text{type\_eq} == 2) \quad (4.11)$$

$$\text{startOf}(x[b][2] == b.deb)$$

Ainsi, l'ensemble des BT possédant des types de travaux 2 sera assigné à la baie de travail 2 (Équation (4.11)).

D'une manière similaire, si requis, il est permis aux utilisateurs de fixer un BT à une baie spécifique. Une contrainte rigide est donc appliquée qui impose ainsi l'ordonnancement de ce BT à une baie de travail spécifique.

L'usager doit donc identifier le BT à l'aide de son identifiant unique ainsi que l'identifiant de la baie de travail. Par la suite, les insérer au sein de la contrainte. L'exemple de la contrainte démontre que le BT possédant l'identifiant 1 a été fixé sur la baie de travail possédant l'identifiant 2 (Équation (4.12)).

$$\begin{aligned} \text{forall}(b \text{ in } Bts : b.id == 1) \\ \text{startOf}(x[b][2]) == 0 \end{aligned} \quad (4.12)$$

La dernière contrainte s'attarde sur la cohérence entre l'assignation des BT aux travailleurs en fonction des métiers de chacun et des modes sélectionnés. La contrainte globale *alternative* est utilisée pour s'assurer que la même ressource humaine ne soit pas assignée sur plus d'une baie de travail à la fois.

$$\begin{aligned} \text{forall}(m \text{ in } Modes) \\ \text{alternative}(mode[m], \text{all } (s \text{ in } Skills : s.trav_talent} \\ = m.mo_talent) \text{assign}[s][m], m.nb\_empl) \end{aligned} \quad (4.13)$$

$$\begin{aligned} \text{forall}(m \text{ in } Modes, s \text{ in } Skills : s.trav_talent} \\ \neq m.mo_talent) \text{presence}(\text{assign}[s][m]) == 0 \end{aligned} \quad (4.14)$$

Comme mentionné précédemment, la sélection du *mode* impacte directement l'assignation des ressources humaines. Si le *mode* sélectionné nécessite deux (2) travailleurs, il est impératif d'avoir deux travailleurs assignés à ce BT (Équation (4.13)). Le nombre de travailleurs est respecté grâce

au dernier élément ( $m.nb\_empl$ ) de la contrainte globale *alternative* qui indique le nombre de travailleurs requis en fonction du *Mode* exécuté au sein de la solution. L'Équation (4.14) s'assure qu'aucun travailleur ne possédant le métier approprié ( $s.trav_talent$ ) ne sera affecté au métier requis par le BT ( $m.mo_talent$ ).

La prochaine section traite de la performance du modèle en termes des solutions générées ainsi qu'en matière de temps nécessaire pour la compilation. L'ensemble des résultats découlent directement de véritables données provenant des partenaires industriels afin d'évaluer la robustesse et la représentativité du modèle retenu dans un contexte se rapprochant le plus possible de la réalité. Une synthèse des avantages et des lacunes du modèle proposé sera présentée également.

## CHAPITRE 5 RÉSULTATS ET ANALYSE

### 5.1 Matériel utilisé

Comme mentionné auparavant, le modèle a été résolu en utilisant *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio* (version 22.1.0.0) et la librairie *CP Optimizer*. Les résultats sont obtenus par un MacBook Air 2®, 2 GHz avec 8 GB de RAM et un GPU *Intel HD Graphics 6000 1536 Mo*. Les paramètres de résolution du modèle correspondent aux paramètres de résolution par défaut du solveur *CP Optimizer*. Il est à noter qu'un ordinateur plus puissant pourrait réduire le temps de compilation nécessaire pour la résolution du modèle.

### 5.2 Performance en fonction des différents scénarios

Les jeux de données utilisés proviennent de données réelles fournies par différents partenaires industriels. Il a été jugé pertinent de les utiliser afin d'évaluer la performance du modèle dans un contexte qui se rapproche le plus possible de la réalité. Ainsi, le modèle compile différents jeux de données représentant différents scénarios plausibles.

Le **premier scénario** représente l'ordonnancement des BT pour une semaine régulière. Une semaine régulière nécessite d'ordonnancer 30 à 35 BT. Ainsi, le premier scénario comporte 30 BT avec des ordres de priorité variable, 15 travailleurs possédant des métiers différents (6 mécaniciens, 3 frigoristes et 6 électriciens) et le tout est appliqué sur 10 baies de travail distinctes. Les différents emplois sont représentés par les numéros suivants : le #1 correspond au métier de mécanicien, le #2 correspond au métier d'électricien et le #3 représente les frigoristes.

Le **second scénario** représente une semaine plus occupée que la normale puisque 40 BT sont disponibles à être à ordonner. Ce scénario comporte 40 BT avec des ordres de priorité variable, 15 travailleurs et 10 baies de travail distinctes comme le premier scénario.

Le **troisième scénario** illustre la performance du modèle sur un horizon à moyen terme. Le nombre de BT à ordonner est plus élevé que dans les scénarios précédents. Toutefois, l'horizon sur lequel ces BT peuvent être exécutés varie d'une à deux semaines plus tard que les premiers BT. Cela signifie que les intervalles de temps pour lesquels les BT doivent être exécutés se situent une

à deux semaines après les premiers intervalles d'exécution des BT. Le nombre de BT à ordonner est donc de 60 et les ressources sont identiques aux scénarios précédents.

Le **quatrième scénario** illustre la performance du modèle sur un horizon de planification de la maintenance à long terme. Ainsi, les BT à ordonner se situent jusqu'à 4 semaines après les BT les plus pressants à ordonner. Le nombre de BT à ordonner est de 80 et les ressources sont identiques aux scénarios précédents. L'ensemble des performances du modèle selon les différents scénarios sont présentées au Tableau 5.1.

Tableau 5.1 Performances du modèle selon le nombre de BT à ordonner

Nombre de BT à ordonner	Temps de compilation (secondes)	Solution optimale obtenue	Utilisation totale de la mémoire	Nombre de solutions
30	0,50 (0,48 Engine et 0,03 Extraction)	Oui	24,1 MB (23,0 MB CP Optimizer et 1,0 MB Concert)	2
40	0,64 (0,61 Engine et 0,03 Extraction)	Oui	31,3 MB (30,0 MB CP Optimizer et 1,2 MB Concert)	1
60	3,63 (3,56 Engine et 0,07 Extraction)	Oui	47,1 MB (45,6 MB CP Optimizer et 1,5 MB Concert)	1
80	2,95 (2,88 Engine et 0,07 Extraction)	Oui	61,3 MB (59,4 MB CP Optimizer et 1,8 MB Concert)	2

L'analyse des résultats obtenus par le modèle dans les différents scénarios et sur différents jeux de données permet de cerner un portrait global de sa performance. Le modèle permet de résoudre à l'optimalité l'ordonnancement des BT pour les quatre scénarios distincts. Le modèle permet ainsi d'établir au moins une solution optimale pour chaque scénario, et même 2 solutions possibles dans les cas du premier et du quatrième scénario. Un plus long horizon de temps ne génère pas nécessairement une meilleure planification des tâches. L'ordonnancement proposé pour 60 BT sur un horizon de 2 (deux) semaines est identique à une résolution de deux (2) ordonnancements successifs de 30 BT qui possèdent un horizon d'une semaine chacun. Toutefois, la pertinence d'ordonner un grand nombre de BT à l'avance est de maîtriser davantage le processus de maintenance et d'optimiser l'ordonnancement avec le plus grand horizon possible.

Toutefois, il n'est pas possible pour le moment de valider l'ordonnancement proposé par le modèle dans un véritable contexte de maintenance minière. Il est ainsi très difficile d'évaluer l'impact des ordonnancements proposés sur le nombre de BT supplémentaires qui sont complétés ainsi que le gain de temps gagné (critère de productivité) en utilisant le modèle proposé pour effectuer le **calendrier d'ordonnancement** hebdomadaire.

Ainsi, il a été jugé pertinent d'évaluer l'impact de l'ensemble des contraintes présentes dans le modèle. L'ensemble des résultats proviennent de jeux de données sensiblement moins volumineux que dans les précédents scénarios. Une plus petite taille des jeux est retenue afin de clairement illustrer l'impact des contraintes sur les résultats et de les comparer avec les résultats obtenus par l'humain.

### 5.3 Disponibilité des équipements

Comme mentionné précédemment, la disponibilité des équipements est un critère fondamental de la maintenance dans le secteur minier (critère de disponibilité). En effet, la maintenance ne doit jamais se faire à profit du plan de production (critère de productivité). La production doit toujours avoir accès à un nombre minimal de chaque type d'équipements selon le plan production préalablement défini par l'équipe de production. Le modèle doit donc, en tout temps, générer des solutions d'ordonnancement pour lesquels un nombre maximal d'équipements du même type est en maintenance. La solution suivante (Figure 5.1) provenant du modèle illustre donc le respect de la disponibilité des équipements. Cette solution est obtenue à partir des données affichées à l'Annexe A.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
[1]							x[<6>][1]			
[2]		x[<3>][2]	x[<2>][2]			x[<4>][2]				
[3]	x[<1>][3]		x[<5>][3]							

Figure 5.1 Assignation des BT en fonction du nombre limite des équipements en maintenance pour chaque type d'équipement

La figure 5.1 est constituée des lignes qui possèdent des valeurs allant de [1] à [3]. Ces lignes représentent les baies de travail. Il y a ainsi trois (3) baies de travail disponibles pour ordonner les BT et les trois sont utilisées au niveau de la solution. Les colonnes quant à elle représentent une unité temporelle et dans le cas de cette figure l'unité est l'heure. Les couleurs quant à elle ne représentent rien de spécifique, les différentes couleurs ne sont utilisées qu'à des fins esthétiques. La notation suivante :  $x[<1>][3]$  indique que le BT [ $<1>$ ] est ordonné sur la baie de travail [3]. On constate que l'ensemble de l'ordonnancement des 6 BT respecte la disponibilité pour chaque type d'équipement. Il y a trois (3) types d'équipements différents qui se trouvent au sein des BT et un maximum de deux (2) équipements du type #1 et #2 peuvent être en maintenance en même temps. Les BT possédant des équipements de type #1 sont les suivants : [ $<1>$ ], [ $<2>$ ], [ $<3>$ ] et [ $<5>$ ]. La solution illustre très bien qu'en tout temps le nombre d'équipements du type #1 en maintenance est inférieur ou équivalent à 2. Il y a ainsi un équipement de type #1 en maintenance durant l'intervalle allant de [0,1] (BT [ $<1>$ ]) et deux (2) équipements pour l'intervalle allant de [1,2] (BT [ $<1>$ ] et BT [ $<3>$ ]). Par la suite, au niveau de l'intervalle de temps [2,3], il y a deux BT ordonnancés ayant le type d'équipement #1 (BT [ $<2>$ ] et BT [ $<5>$ ]). Et puis, pour terminer, au niveau de l'intervalle de [3,6], seulement un BT possédant un équipement de type #1 est ordonné (BT [ $<5>$ ]).

L'ordonnancement respecte également l'ensemble des intervalles de début et de fin souhaités pour chacun des BT.

## 5.4 Impact de la matrice de transition sur l'ordonnancement proposé

Comme mentionné préalablement, une matrice représentant les temps de transition d'un équipement à un autre sur une baie de travail est intégrée. L'objectif de cette matrice est de favoriser l'ordonnancement successif de BT qui possèdent le même identifiant d'équipement, pour la même baie de travail. Les valeurs présentes au sein de la matrice de transition ne substituent pas réellement les temps de transition nécessaires pour déplacer les équipements.

Il y a deux principales raisons pour lesquelles les temps de transitions ne sont pas valides : d'abord ceux-ci ne sont pas mesurés actuellement chez les partenaires industriels; et deuxièmement ces temps de transition comportent une très grande variabilité en raison des équipements spécifiques à déplacer.

Les temps de transition ne sont donc pas inclus dans l'ordonnancement obtenu par le modèle. Ces temps ont été exclus en raison du manque de données chez les partenaires industriels. Pour visualiser l'impact de cette matrice sur la solution, il suffit d'analyser les jeux de données d'entrée. Au niveau des BT, deux (2) paires possèdent le même identifiant d'équipement. Ces paires impliquent respectivement le BT [<1>] et le BT [<5>] ainsi que le BT [<2>] et le BT [<3>]. La première paire possède le même identifiant d'équipement qui est le #1 et la seconde paire possède l'identifiant #2. La Figure 5.1 illustre ainsi que les deux (2) paires de BT se retrouvent de façon successive sur la même baie (baie 2 et baie 3) de travail afin de minimiser les déplacements au niveau de l'ordonnancement des travaux sur les différentes baies de travail.

## 5.5 Cohérence entre l'assignation du personnel en fonction des BT

L'ensemble des BT comporte un corps de métier bien précis et nécessaire pour être exécuté. Ainsi, il est impératif que les travailleurs assignés pour chacun des BT possèdent les compétences nécessaires pour effectuer les travaux. Ces compétences sont donc traduites par un **métier**. Par exemple, si le BT nécessite un mécanicien, il est impératif que le travailleur possède le métier représenté par le nombre #1 au niveau du jeu de données *Skill* dans le champ *trav\_talent* et que le BT possède le nombre #1 dans le jeu de données *BT* dans le champ *talent*. De plus, il est également indispensable qu'un travailleur ne soit affecté qu'à un seul BT à la fois puisqu'il n'est pas possible pour un travailleur d'être présent simultanément dans deux (2) baies! De plus, il est nécessaire que le ou les mêmes travailleurs soient affectés au BT pour l'ensemble de sa durée tel indiqué à la Figure 5.2.

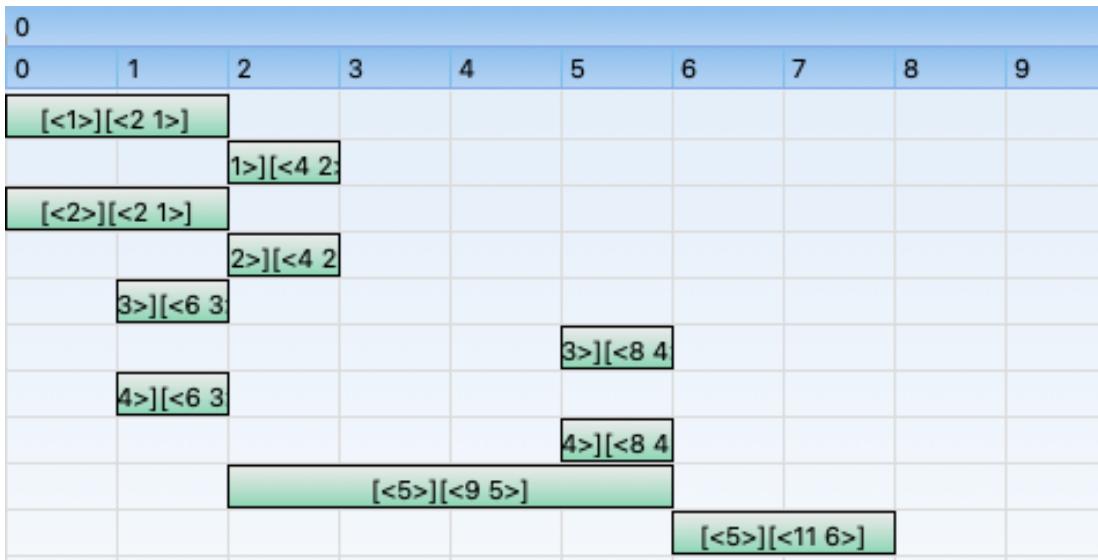


Figure 5.2 Assignment du personnel en fonction des BT

Les colonnes présentent dans la Figure 5.2 tout comme les colonnes à la Figure 5.1 illustrent une unité temporelle (heure). Les blocs quant à eux illustrent la variable d'intervalle d'assignation d'un mode à une ressource humaine. La notation suivante [ $<1>$ ][ $<2 1>$ ] indique que le travailleur qui possède l'identifiant [ $<1>$ ] est assigné au mode 2. Le mode 2 quant à lui est associé au BT [ $<1>$ ] lorsqu'il est assigné à deux (2) travailleurs. Ainsi, le travailleur qui possède l'identifiant [ $<1>$ ] possède les compétences nécessaires pour accomplir le BT [ $<1>$ ], car le *trav\_talent* du travailleur [ $<1>$ ] est de #1 comme BT[ $<1>$ ] dans le champ *talent*.

## 5.6 Cohérence entre les différents modes et l'assignation du personnel

Le modèle permet de refléter la réalité minière (à d'autres secteurs d'activité) qui est la possibilité d'assigner jusqu'à deux membres du personnel pour un seul BT, ce qui a comme effet de réduire la durée des travaux de 50%. Puisque la minimisation du « *Makespan* » se situe au second rang d'importance au niveau de la fonction multiobjectif (Équation (4.1), le modèle assignera si possible deux membres du personnel afin de réduire la durée d'un ou de plusieurs BT. Ainsi, si le modèle opte pour une solution comportant un mode d'exécution qui génère l'assignation de plusieurs travailleurs pour un BT. Il est essentiel que le nombre de travailleurs assignés soit cohérent avec le nombre de travailleurs nécessaires afin de réaliser un mode d'exécution d'un BT avec des travailleurs multiples. Il est également à noter que le nombre d'employés présents pour chaque métier est une contrainte présente au sein du modèle afin de permettre d'assigner le bon nombre

d'employés pour les BT ordonnancés et cette contrainte permet la possibilité d'assigner plusieurs travailleurs sur un BT si leur nombre est suffisant. Comme indiqué à la Figure 5.2, illustre que le travailleur qui possède l'identifiant [ $<1>$ ] est également assigné au BT [ $<1>$ ] qui est exécuté selon le mode 2 qui nécessite deux (2 travailleurs).

## 5.7 Fixations de BT spécifiques sur une baie de travail

Le modèle permet également de jumeler (fixer) un BT spécifique sur une baie de travail spécifique. Cette fonction permet ainsi à l'équipe de maintenance d'ajouter une contrainte ponctuelle en fonction de la particularité d'un BT. Le modèle permet également d'assigner certains types de BT à une baie spécifique en fonction des travaux à effectuer. Certaines baies de travail comportent des outils spécialisés pour effectuer les travaux, il est ainsi nécessaire d'assigner ces types de travaux aux baies appropriées. La Figure 5.3 illustre l'ordonnancement de l'ensemble des BT et le modèle possédait la contrainte de placer le BT [ $<6>$ ] à la location #1.



Figure 5.3 Impact de la fixation d'une baie de travail pour le BT [ $<6>$ ]

## 5.8 Impact des modes sur la solution

Il a été jugé important d'évaluer l'impact de la possibilité d'avoir différents modes d'exécution des BT. Le premier impact devrait se ressentir au niveau du « *Makespan* » des solutions émises. Si le nombre de travailleurs présents permet l'assignation d'un ou plusieurs BT à plus d'un travailleur, le modèle assignera un mode d'exécution à travailleurs multiples. Si la fonction des modes est éliminée, pour l'ensemble des scénarios précédents, le modèle n'obtient aucune solution réalisable avec l'ensemble des contraintes établies (Tableau 5.2). Il est pertinent de noter la fonction des modes qui permet d'obtenir des solutions réalisables, et ce avec les mêmes ressources. Une des raisons qui explique cette performance décevante est que sans la fonction des modes, le problème possède des contraintes trop rigides pour obtenir une solution réalisable.

Toutefois, l'environnement de la gestion minière est assez contraignant ainsi la fonction permet d'obtenir des combinaisons permettant d'obtenir des solutions réalisables. Il n'est donc pas nécessairement souhaitable d'effectuer une relaxation des contraintes établies afin d'obtenir des solutions. Il est vrai qu'une relaxation engendrerait la génération de solutions, mais celles-ci ne respecteraient pas les contraintes présentes dans un véritable contexte minier et l'ordonnancement ne pourra être appliqué par l'équipe de la maintenance.

Tableau 5.2 Performance du modèle sans la fonction multimode

<b>Nombre de BT à ordonner</b>	<b>Solution optimale obtenue</b>	<b>Nombre de solutions</b>
30	Non	Aucune
40	Non	Aucune
60	Non	Aucune
80	Non	Aucune

La contrainte liée au moment de fin de l'exécution des BT est très contraignante. Cette contrainte est la plus contraignante et est directement responsable au fait qu'aucune solution n'est réalisable pour l'ensemble des quatre scénarios si la fonction multimode est retirée. Par conséquent, le même exercice a été effectué au niveau du modèle sans la fonction multimode et ainsi que le relâchement de contrainte imposant la fin de l'exécution dans un intervalle prédéfini. Les résultats sont représentés dans le Tableau 5.3.

Tableau 5.3 Performance du modèle sans la fonction multimode et sans le moment de fin

Nombre de BT à ordonner	Temps de compilation (secondes)	Solution optimale obtenue	Utilisation totale de la mémoire	Nombre de solutions	Différence du « Makespan » (heures)
30	0,12 (0,10 Engine et 0,02Extraction)	Oui	14,2 MB (13,3 MB CP Optimizer et 0,8 MB Concert)	3	+ 6
40	0,59 (0,56 Engine et 0,03Extraction)	Oui	23,5 MB (22,5 MB CP Optimizer et 0,9 MB Concert)	7	+14
60	0,82 (0,78 Engine et 0,04Extraction)	Oui	32,2 MB (31,1 MB CP Optimizer et 1,1 MB Concert)	7	+28
80	0,97 (0,91 Engine et 0,076Extraction)	Oui	61,3 MB (59,4 MB CP Optimizer et 1,8 MB Concert)	3	+38

Les résultats illustrent que la relaxation de la contrainte ainsi que l'élimination de la fonction multimodes génèrent plusieurs résultats optimaux. Toutefois, ces résultats sont beaucoup moins performants quant à l'ordonnancement proposé. Sachant que la réduction du « Makespan » est un des objectifs principaux, il est possible d'affirmer que les résultats obtenus avec la contrainte d'intervalle de temps d'exécution et la fonction multimode sont d'une qualité supérieure. La différence du « Makespan » entre la solution du modèle complet et la solution du modèle réduit pour chacun des scénarios est illustrée par le Tableau 5.3. Les différences varient de 6 jusqu'à 38 heures en fonction du nombre de BT ordonnancés au sein de la solution obtenue.

Il est à noter qu'il est possible de relaxer des contraintes au sein du modèle si pour celui-ci aucune solution n'est réalisable. Il est vrai que la solution provenant de la relaxation est moins idéale que

celle provenant du modèle tel quel. Toutefois, une solution cohérente est obtenue dans un temps de résolution rapide et l'équipe de maintenance pourra ajuster le plan si le besoin est nécessaire.

La valeur ajoutée d'un modèle de ce type est sans aucun doute la qualité des solutions obtenues. Même si celles-ci n'ont pas pu être testées dans un véritable contexte de maintenance minière, elles assurent tout de même que les contraintes exprimées dans la modélisation sont respectées. Les solutions proposées faciliteraient le travail de l'équipe de la planification des travaux puisqu'une grande partie de leur ouvrage consiste à assurer que l'ordonnancement proposé respecte l'ensemble des différentes contraintes. De plus, les solutions proposées sont obtenues d'une grande rapidité contrairement au **calendrier d'ordonnancement** qui nécessite plusieurs rencontres afin d'être finalisé. L'ordonnancement du modèle permet de fournir rapidement des solutions réalisables et de qualité au niveau de la planification de la maintenance en cas d'imprévus.

## CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

### 6.1 Synthèse des travaux

L'ensemble des travaux ont permis de développer un modèle permettant l'ordonnancement des BT selon les contraintes opérationnelles du secteur minier. L'ordonnancement des BT provenant de la solution du modèle a comme objectif de maximiser le nombre de BT ordonnancés en fonction de leurs indices de priorité et de minimiser le « *Makespan* » de l'ensemble des travaux. Le modèle développé répond aux objectifs principaux énumérés à la section 1.3 puisque celui-ci respecte les contraintes opérationnelles décrites au sein du mémoire et le temps de résolution pour obtenir des solutions réalisables et optimales est rapide. Le temps de compilation variant de 0,5 à 3,63 secondes selon le nombre de BT à ordonner. La fonction multimodes a augmenté la qualité du modèle en lui permettant de résoudre des problèmes à l'optimalité alors qu'un modèle ne possédant pas cette fonction n'obtient aucune solution réalisable sans la relaxation de contraintes même si cela s'inscrit dans un contexte particulier en fonction des temps de fin souhaitée pour certains BT.

Le modèle possède des contraintes assurant en tout temps la disponibilité d'un nombre fixe d'équipements en fonction des besoins du plan de production. Une assignation cohérente entre les travailleurs et les BT en fonction de leurs métiers et du nombre requis. Le respect de l'intervalle du temps pour exécuter les BT. Cet aspect est particulièrement intéressant pour les BT liés à la maintenance préventive puisque l'exécution de ceux-ci doit être effectuée dans un intervalle de temps bien précis afin de respecter le principe fondamental de la maintenance préventive. Le modèle assigne également les BT aux baies de travail appropriées en fonction de sa nature. Le modèle permet également aux utilisateurs d'assigner un BT à une baie de travail spécifique ainsi qu'établir une présence de BT au besoin. La matrice des temps de transition limite le nombre de changements du même équipement sur la même baie de travail. Cela a comme conséquence directe d'assigner successivement des BT possédant le même équipement sur la même baie de travail.

Afin d'utiliser le modèle de façon appropriée, il est impératif d'importer les différents fichiers d'entrée correspondant à la situation actuelle. Le format des fichiers d'entrées doit également correspondre aux caractéristiques décrites au Tableau 4.1. Par la suite, l'usager doit modifier les contraintes directement afin de répondre aux besoins de maintenance. Un exemple de modifications

des contraintes serait de s'assurer que le nombre de travailleurs ayant un métier particulier est cohérent avec le fichier d'entrée traitant des travailleurs et de leurs compétences (Tableau 4.1). Il serait très pratique d'inclure une fonction liant automatiquement les données d'entrée en fonction des contraintes qui sont directement liées aux données d'entrée.

Une fois l'ensemble des fichiers d'entrée intégré et les différentes contraintes modifiées, la compilation des résultats peut être effectuée. Selon de la nature des fichiers d'entrée, trois résultats sont possibles.

1. Solution optimale
2. Solution réalisable
3. Aucune solution réalisable

Pour les deux premiers scénarios, aucune relaxation des contraintes n'est nécessaire puisqu'une solution est obtenue. Cette solution peut donc être immédiatement utilisée auprès de l'équipe de maintenance comme guide afin d'élaborer le **calendrier d'ordonnancement** de la semaine. Puisque les solutions du modèle n'ont pas encore été évaluées dans un véritable contexte de maintenance minière et que le modèle n'est encore qu'un prototype, il a été jugé que les solutions obtenues ne sont pas prêtes pour être directement considérées comme un ordonnancement final pour l'ensemble des BT à exécuter au cours d'une semaine. Toutefois, les solutions obtenues assurent le respect d'un grand nombre de contraintes présentes dans le secteur minier. Celles-ci peuvent donc être utilisées comme un guide ou comme un point de départ par l'équipe de maintenance. L'équipe pourra donc modifier l'ordonnancement selon leurs besoins particuliers et les différentes améliorations nécessaires au modèle pourront être effectuées de façon itérative dans un véritable contexte minier dans lequel les solutions pourront être exécutées. Le troisième quant à lui nécessite une étape supplémentaire avant d'être utilisé comme guide ou point de départ. Il serait également intéressant d'ajouter un troisième niveau à la fonction objectif qui pénaliserait les retards sur les maintenances. L'ajout d'une variable qui accumulerait l'ensemble des retards pour les BT ordonnancés en fonction des dates de fin souhaitées devrait être mis en place. Cette variable aurait comme effet de fortement pénaliser la fonction objectif afin de réduire au maximum l'ordonnancement des BT avec des fins tardives.

## 6.2 Recommandations et améliorations

Afin d'optimiser la gestion de la maintenance davantage et l'optimisation de la production, une intégration de la gestion de la maintenance au sein de la planification de la production serait recommandée. Une intégration de ce type permettrait de concevoir un plan de production en prenant compte des travaux de maintenance des équipements. À l'heure actuelle, la planification de la production et celle de la gestion de la maintenance sont considérées comme des problématiques distinctes alors que ces deux problèmes sont plutôt complémentaires. Plusieurs travaux se sont déjà attardés sur le développement de modèles pour optimiser la planification minière comme ceux de Campeau (2019), André (2022) et Aalian et al (2023), il serait donc fort pertinent d'inclure les spécificités de la gestion au sein de ces modèles comme contraintes.

Ce genre de modèle pourrait générer des solutions optimales qui prennent en compte de la réalité des maintenances. Ces solutions seront donc plus facilement réalisables dans un véritable contexte minier puisque les activités de maintenance ne seront plus un obstacle à l'exécution du plan de production. Les travaux de Ghaleb et al. (2021) se sont déjà penchés sur l'intégration de la maintenance au sein d'un plan de production et les résultats obtenus ont eu comme conséquence de réduire les coûts liés à la maintenance tout en optimisant le plan de production. Cependant, les résultats obtenus dépendent grandement de la variabilité et de la flexibilité du système de production traité [33].

L'ajout du temps de déplacement et de lavage au sein des BT aurait comme effet d'évaluer l'ensemble du temps pour lequel un équipement n'est pas disponible pour la production, reflétant ainsi plus fidèlement la réalité. Suite aux entretiens avec les différents partenaires industriels, il a été constaté que le temps consacré au lavage et au déplacement est assez significatif. Toutefois, celui-ci n'est pas mesuré de façon standard et très souvent estimé par l'équipe de maintenance. De plus ces temps comportent une grande variabilité, c'est donc pour ces raisons que ces temps n'ont pu être inclus au sein de la modélisation. Pour pallier cette situation, une prise massive de données serait nécessaire pour l'ensemble des équipements afin de compiler les temps de lavage nécessaires en fonction des travaux à effectuer, de même que les déplacements.

Ainsi un effort supplémentaire devra être effectué au sein de l'équipe afin de mesurer ces temps de façon standard afin d'obtenir des données fiables qui pourraient être utilisées à des fins de planification de la maintenance. Une uniformisation du lavage et de son temps nécessaire en

fonction des tâches à effectuer pourrait serait grandement utile. De plus, la problématique de l'ordonnancement des équipements à laver mériterait d'être étudiée puisque cette étape semble être un goulot d'étranglement pour la suite des travaux à effectuer. Une optimisation de cette portion pourrait avoir des impacts considérables sur l'ensemble du reste des travaux. Il serait ainsi très pertinent de créer un modèle similaire à celui décrit dans le mémoire, ayant comme objectif de minimiser le « *Makespan* » du temps de lavage des différents équipements tout en maximisant le nombre d'équipements lavés. Le nombre d'équipements lavés pourrait être lié à la priorité du BT ou plutôt au nombre de BT ayant le même équipement. De plus, un défi considérable serait d'inclure une seule fois le temps de lavage au niveau de la solution si l'assignation de deux (2) BT consécutifs dans la même baie de travail puisqu'il est difficile d'établir la position de BT successifs dans une séquence.

De plus, dans un contexte de numérisation du secteur minier [34][35], il serait intéressant d'évaluer les durées de déplacement nécessaires en fonction de la position de l'équipement au sein de la mine qui pourraient être obtenues à l'aide de capteurs de position en temps réel. Une intégration d'une telle technologie permettrait d'intégrer le véritable temps de déplacement afin d'optimiser l'ordonnancement des BT en traitant l'ensemble des étapes et du temps nécessaire pour exécuter les travaux.

Comme brièvement mentionnées précédemment, des améliorations au modèle sont souhaitées afin d'améliorer la performance du modèle. Une amélioration possible serait d'intégrer les règles syndicales liées aux horaires des travailleurs. La génération d'horaires respectant des règles syndicales a été déjà grandement étudiée pour la création des horaires du personnel infirmier [36] par Booarsdottir et al (2022) ainsi que pour les pilotes [37] par Park et al. (2021). Une intégration de ces règles aurait un impact positif au niveau de la performance du modèle.

L'ajout d'indicateurs de performances clefs (KPI) liés à la maintenance serait fort pertinent afin d'illustrer la performance des solutions proposées par le modèle. Un indicateur lié à la conformité serait fort intéressant. Celui-ci pourrait évaluer la conformité des travaux effectués au cours de la semaine en fonction de l'ordonnancement proposé. Un autre indicateur de conformité pourrait se rattacher exclusivement à la maintenance préventive (MP). Sachant que la maîtrise de la MP est un concept fondamental au sein de l'industrie minière, un indicateur illustrant le nombre de BT qui ont été exécutés en conformité avec l'intervalle de temps souhaité ainsi que le nombre de BT qui

sont ordonnancés en conformité avec l'intervalle de temps serait fort pertinent. Ceux-ci auront comme effet d'évaluer la performance de l'ordonnancement de même que l'exécution des travaux. Ces indicateurs permettront d'évaluer plus spécifiquement où se situe la problématique si les exécutions des BT ne respectent pas les intervalles de temps souhaités.

Un autre indicateur de performance intéressant serait l'ajout du nombre de BT se trouvant dans « *Backlog* » ainsi que le nombre de semaines que ceux-ci s'y trouvent. Comme mentionné au CHAPITRE 1, une gestion appropriée des BT se trouvant dans le « *Backlog* » est nécessaire afin de maîtriser l'ensemble des travaux correctifs et de maintenance. Cet indicateur serait séparé en trois catégories. La première s'attarde sur le nombre de BT dans le « *Backlog* » depuis 1 à 3 semaines. Cette durée représente une gestion idéale pour les BT s'y trouvant. La seconde s'attarde sur le nombre de BT dans le « *Backlog* » depuis 3 à 6 semaines. Cette durée illustre une gestion non idéale (non optimale) pour les BT s'y trouvant. Les BT dans cette catégorie méritent de l'attention et devront avoir leurs indices de priorité modifiés par l'équipe de maintenance afin de les ordonner rapidement. La troisième catégorie s'attarde sur le nombre de BT dans le « *Backlog* » depuis 6 à 9 semaines. Cette durée illustre une gestion inacceptable pour les BT s'y trouvant. Des actions immédiates sont requises par l'équipe de maintenance afin de grandement modifier l'indice de priorité de ces BT. Ces changements auront pour effet d'ordonner les BT le plus rapidement possible. Un indice de performance de la sorte permettra d'améliorer l'utilisation du modèle puisque, pour l'instant, l'ensemble des indices de priorités sont choisis par l'équipe de maintenance. Il serait fort intéressant pour une itération future du modèle, d'intégrer des indices de priorité automatiquement en fonction des types des travaux à effectuer ainsi que les équipements qui sont ciblés.

Et puis finalement, le modèle présenté dans le mémoire considère la durée de l'ensemble des BT de façon déterministe. Celui-ci s'inscrit au sein d'un plus grand projet de recherche et pourrait être utilisé au sein d'une plateforme numérique assistant l'équipe de maintenance à la prise de décisions. Le modèle sera une fonction qui ordonne l'ensemble des BT prêts à être ordonnancés. L'équipe de maintenance obtiendra une solution proposée sous la forme d'un diagramme de Gantt et ceux-ci pourront le modifier en fonction des besoins.

La prochaine étape est le développement d'un modèle qui traite de la durée des BT de façon stochastique. Un tel modèle est présentement étudié par un collègue de la Polytechnique. Un

modèle qui évalue les durées de façon stochastique permettrait de générer un modèle plus robuste qui génère des solutions qui se rapprochent le plus fidèlement possible de la réalité. Un modèle de ce type est une étape primordiale afin de permettre un ordonnancement optimal des BT en temps réel en fonction des ressources disponibles et de l'avancement des BT. Un modèle de ce type s'intégrerait dans le mouvement de l'industrie 4.0 [38] et permettrait d'obtenir en tout en temps la solution optimale en fonction du déroulement de l'ensemble des activités [39].

## RÉFÉRENCES

- [1] B. Christiansen, «Exploring biggest maintenance challenges in the mining industry,» Mining.com, 30 Juillet 2019. [En ligne]. Available: <https://www.mining.com/web/exploring-biggest-maintenance-challenges-mining-industry/>. [Accès le 16 Novembre 2022].
- [2] S. Robatto Simard, M. Gamache et D.-P. Philippe, «Current Practices for Preventive Maintenance and Expectations for Predictive Maintenance in East-Canadian Mines,» *Mining*, vol. 3, 1MDPI, p. 26-53, 2023.
- [3] W.-J. Van Hoeve et I. Katriel, *Handbook Of Constraint Programming*, Elsevier B.V, 2006, p. 169-208.
- [4] P. Laborie, J. Rogerie et P. Vilim, «IBM ILOG CP optimzer for scheduling : 20+ years of scheduling with constraints at IBM/ILOG Constraints,» *Constraints*, vol. 23, Springer Science, p. 210-250, 2018.
- [5] Soumis, F. (2020). *MTH8442 – Ordonnancement de la production* [Présentation PowerPoint]. Moodle@Polytechnique Montreal. <https://moodle.polytml.ca>
- [6] M. Pinedo, *Scheduling: Theory, Algorithms and Systems*, vol. 4, 2013.
- [7] P. Vilím, «Global constraints in scheduling,» 2007.
- [8] B. Denton, J. Viapiano et A. Vogl, «OPtimization of surgery sequencing and scheduling decision under uncertainty,» *Health Care Management Science*, vol. 10, p. 13-24, 2006.
- [9] M. Ben-Daya, U. Kumar et D. Murthy, *Introduction to Maintenance Engineering: Modelling, Optimization and Management*, New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 2016.

- [10] Viens, M. (2021). *MEC743 – Instrumentation et contrôle de procédés industriels* [Présentation PowerPoint]. Moodle@ÉTS. <https://moodle.etsmtl.ca>
- [11] K. Kundu, F. Cifone, F. Costa, A. Portioli-Staudacher et M. Rossini, «An evalutation of preventive maintenance framework in an Italian manufacturing company,» *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 28, p. 37-57, 2022.
- [12] D. Kimera et F. Nagolo, «Maintenance Practices and Parameters for Marin Mechanical Systems: A Review,» *J. Qual. Maint. Eng.*, vol. 26, p. 459-488, 2020.
- [13] E. Basri, I. Razak, H. Ab-Samat et S. Kamaruddin, «Preventive Maintenance (PM) Planning: A Review,» *J. Qual. Maint. Eng.*, vol. 23, p. 114-143, 2017.
- [14] K. Ogura, «Preventive Maintenance Technology for Enhancing Generator Reliability,» *Mitsubishi Electric Advance*, vol. 175, p. 1-4, 2021.
- [15] X. Zhou, Z. Lu et L. Xi, «Preventive Maintenance Optimization for a multi-component system under changing job shop schedule,» *Reliable Engineering System*, vol. 101, SAF, p. 14-20, 2012.
- [16] E. Angeles et M. Kumral, «Optimal Inpesction and Preventive Maintenance scheduling of Mining Equipment,» *Journal of Failure Analysis and Prevention*, vol. 20, p. 1408-1416, 2020.
- [17] P. Viveros, R. Mena, E. Zio, L. Miqueles et F. Kristjanpoller, «Intergrated planning framework for preventive maintenance groupig : A case study for a conveyor system in the Chilean mining industry,» *Journal of Risk and Reliability*, vol. ESREL2020 PSAM15, p. 1-17, 2021.
- [18] H. Lerchs et F. Grossman, «Optimum design of open-pit mines,» *Operations Research*, vol. 12, Institutue of Operations and Research Management, p. 17-24, 1964.

- [19] A. Newman, E. Rubio, R. Caro, A. Weintraub et K. Eurek, «A review of operations research in mine planning,» *Interfaces*, vol. 10, p. 222–245, 2010.
- [20] A. Palmer, R. Vujanic, A. Hill et S. Scheding, «Weekly maintenance scheduling using exact and genetix methods,» *Mining Technology*, vol. 126, p. 200-208, 2017.
- [21] Baptiste, L. Pape et Nuijten, «Constraint based scheduling: Applying constraint programming to scheduling, » *International Series in Operations Research and Management Science*, vol.39, 2001
- [22] Lahrichi, N. (2022). *MTH8410 – Méthodes d'optimisation pour les services* [Présentation PowerPoint]. Moodle@Polytechnique Montreal. <https://moodle.polytml.ca>
- [23] Campeau, L-P. (2019). *Optimisation de la planification à court et moyen terme dans les mines souterraines* [Thèse de doctorat, Polytechnique Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/3882/>
- [24] Andre, J. (2022). *Modèles de planification minière court terme par programmation par contraintes dans un environnement incertain* [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/10226/>
- [25] Y. Aalian, M. Gamache et G. Pesant, «Short-term underground mine planning with uncertain activity durations using constraint programming,» *GERAD*, G-2022-44, 2022.
- [26] M. Astrand, M. Johansson et A. Zanarini, «Underground mine scheduling of mobile machines using constraint programming and large neighborhood search,» *Computers and Operations Research*, vol. 123, n° %1Publisher : Elsevier Ltd., 2020.
- [27] Agnico Eagle, «Agnico Eagle Mines Limited—Operations—Operations—LaRonde Complex.,» Agnico Eagle, [En ligne]. Available: <https://www.agnicoeagle.com/English/operations/operations/laronde/default.aspx> (. [Accès le 27 Novembre 2022].

- [28] La Roche-Carrier, N. (2020). *Conception et développement d'un outil automatique basé sur la stratégie de maintenance prévisionnelle des équipement miniers* [Thèse de doctorat, Université du Québec à Chicoutimi]. Constellation. <https://constellation.uqac.ca/id/eprint/5541/>
- [29] R. Smith et R. Mobley, Industrial Machinery Repair: Best Maintenance Practices Pocket Guide, Burlington, NJ, USA: Elsevier Science & Technology, 2003.
- [30] S. Kreter, A. Schutt et P. Stuckey, «Using constraint programming for solving RCPSP/max-cal,» *Constraints*, vol. 22, p. 432–462, 2017.
- [31] IBM ILOG CPLEX Optimization Studio, «Ibm ilog cplex optimization studio cp optimizer extensions user's manual,» 2017.
- [32] P. Baptiste, P. Laborie, C. Le Pape et W. Nuijten, «Constraint-based scheduling and planning,» *Foundations of Artificial Intelligence*, vol. 2, n° %1Elsevier, p. 761– 799., 2006.
- [33] M. Ghaleb, S. Taghipour et H. Zolfaghariinia, «Real-time integrated production-scheduling and maintenance-planning in a flexible job shop with machine deterioration and condition-based maintenace».
- [34] H. Hongliang, «Underground mine planning optimization process to improve values and reduce risks,» *Proceedings of the 39th international symposium on Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry*, vol. APCOM 2019, n° %1CRC Press/Balkema, p. 335-343, 2019.
- [35] M. Compare, P. Baraldi et E. Zio, «Challenges to IoT-Enabled Predictive Maintenance for Industry 4.0,» *IEEE Internet Things J*, vol. 7, p. 4585–4597, 2020.
- [36] Booarsdottir, «A flexible mixed integer programming-based system for real world nurse rostering,» *Journal of Scheduling*, vol. 25, p. 59-88, 2022.

- [37] Park, J et Vrettos, E, «A hybrid optimization approach employee rostering: Use cases at Swissgrid and lessons learned,» *arXiv:2111.10845*, 2021.
- [38] Z. Li, Y. Wang et K.-S. Wang, «INtelligent Predictive Maintenance for Fault Diagnosis and Prognosis in Machine Centers: Industry 4.0 Scenario,» *Adv. Manuf*, vol. 5, pp. 377-387, 2017.
- [39] M. Provencher, «A Guide to Predictive Maintenance for the Smart Mine,» Mining.com, 2020. [En ligne]. Available: <https://www.mining.com/a-guide-to-predictive-maintenance-for-the-smart-mine/>. [Accès le 26 Février 2023].

## ANNEXE A DONNÉES D'ENTRÉE POUR L'ORDONNANCEMENT DE 6 BONS DE TRAVAIL (BT)

L'annexe A détaille les valeurs des quatre (4) jeux de données utilisés pour l'exemple de l'ordonnancement de 6 BT. [1]

```

Bts = { < 1, 1, 1, 1, 0, 5, 1 >,
        < 2, 3, 1, 2, 0, 6, 1 >,
        < 3, 2, 1, 2, 1, 8, 2 >,
        < 4, 4, 2, 3, 5, 14, 2 >,
        < 5, 1, 1, 1, 2, 9, 3 >,
        < 6, 2, 3, 4, 3, 14, 3 >

    };

Skills = {
    < 1,1 >,
    < 2,1 >,
    < 3,2 >,
    < 4,2 >,
    < 5,3 >,
};

nL = 3;

Modes = {
    < 1, 1, 4, 1, 1 >,
    < 2, 1, 2, 2, 1 >,
    < 3, 2, 2, 1, 1 >,
    < 4, 2, 1, 2, 1 >,
    < 5, 3, 2, 1, 2 >,
    < 6, 3, 1, 2, 2 >,
    < 7, 4, 2, 1, 2 >,
    < 8, 4, 1, 2, 2 >,
    < 9, 5, 4, 1, 3 >,
    < 10, 5, 2, 2, 3 >,
    < 11, 6, 2, 1, 3 >,
    < 12, 6, 1, 2, 3 >,

};

MM = {<1,1,0>, <2,2,0>, <3,3,0>, <4,4,0>, <5,5,0>,<6,6,0>,
<1,2,100>, <1,3,100>, <1,4,100>, <1,5,0>, <1,6,100>,
<2,1,100>, <2,3,0>, <2,4,100>, <2,5,100>, <2,6,100>,
<3,1,100>,<3,2,0>,<3,4,100>,<3,5,100>,<3,6,100>,
<4,1,100>,<4,2,100>,<4,3,100>,<4,5,100>,<4,6,100>,
<5,1,0>, <5,2,100>,<5,3,100>,<5,4,100>,<5,6,100>,
<6,1,100>,<6,2,100>,<6,3,100>,<6,4,100>,<6,5,100>};
```

Figure A.1 Exemple de fichiers d'entrée tiré de CPO Optimization Studio