UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

INTÉGRATION DE LA GESTION DE L'ÉNERGIE ET DES RESSOURCES HUMAINES DANS LA GESTION D'UNE USINE D'AMIANTE

STEVE QUESSY

DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET DE GÉNIE INDUSTRIEL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES

(GÉNIE INDUSTRIEL)

JUILLET 2004

© Steve Quessy, 2004.

Library and Archives Canada

Published Heritage Branch

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque et Archives Canada

Direction du Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence
ISBN: 0-612-97977-6
Our file Notre référence
ISBN: 0-612-97977-6

NOTICE:
The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:
L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

Intégration de la gestion de l'énergie

et des ressources humaines dans la gestion

d'une usine d'amiante

présenté par : QUESSY Steve

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. OUALI Mohamed Salah, Docteur, président

M. TRÉPANIER Martin, Ph.D., membre et directeur de recherche

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

M. GAMACHE Michel, Ph.D., membre

RÉSUMÉ

Inscrite dans une problématique de prospective scientifique, cette recherche propose l'évaluation du pilotage d'une usine intégrant la planification de la production et des ressources. Le but de ce mémoire est d'examiner la pertinence de prendre en compte, au moment de la planification de la production, les ressources humaines et la consommation énergétique lorsque ces coûts deviennent non négligeables et dépendent de la planification elle-même. Comme il y a peu de littérature disponible sur ce sujet, il est nécessaire dans ce cas de développer une méthode permettant de les intégrer dans le pilotage d'une usine.

La mine Jeffrey, productrice d'amiante située à Asbestos, est utilisée comme cadre de cette étude mettant en pratique ces hypothèses. Pour ce faire, un modèle de sa production est développé et les coûts d'énergie et de ressources humaines y sont intégrés. Les résultats fournis par ce modèle sont ensuite analysés.

« Comment la mine Jeffrey aurait-elle pu réduire ses coûts sans investissement majeur? » est la question à laquelle cette étude doit tenter de trouver une solution. Habituellement, le coût des ressources humaines et énergétiques est principalement lié à la capacité requise, c'est-à-dire que plus la production augmente, plus le coût s'accroît. Ce n'est cependant pas le cas à J.M. Asbestos. Il faut faire une nouvelle hypothèse de base qui dit que le coût des ressources est une fonction du plan directeur de production et ce, parce que les coûts fixes représentent une très grande partie du budget total : le coût de main d'œuvre dépend des heures travaillées (jour, nuit, en 1, 2 ou 3 équipes) et le

coût énergétique est plus lié à la consommation de pointe (coût de l'abonnement) qu'au volume consommé.

Le coût de souscription trop élevé cause à lui seul une grande partie des problèmes. L'usine conçue dans les années 1950 pour fonctionner 24 heures sur 24 a adopté des modes de fonctionnement (réglages, organisation) qui ne sont valides que lorsque la mine travaille à plein régime. En conséquence, la baisse considérable (récente) du volume de production se traduit par un fonctionnement à plein régime mais durant de courtes périodes (quelques heures par semaine). La pointe de consommation (instantanée) est ainsi restée identique (liée au plein régime) et le coût fixe d'abonnement n'a pas changé malgré la baisse de production. De fait, la connaissance technique permettant de fonctionner en mode partiel (seulement certaines parties de la mine), aussi appelé mode dégradé, est inexistante (il est difficile de percevoir si elle n'a jamais existé ou si elle a simplement disparu au fil des ans).

Le travail a donc consisté à proposer un modèle donnant la possibilité de fonctionner en mode dégradé et intégrant les coûts énergétiques fixes et variables (abonnement et consommation), ainsi que les coûts fixes et variables en ressources humaines (selon les tranches horaires utilisées).

J.M. Asbestos a la capacité de produire environ 200 produits finis différents mais l'usine ne peut cependant en fabriquer que 8 à 12 simultanément. Le modèle sera testé avec un assortiment de 9 produits finis très en demande.

Dans le modèle, il y a trois paramètres : le nombre d'employés par quart de travail, leur salaire selon la période de travail (avec prime de soirée et de nuit ou sans prime) et le nombre de kilowatts nécessaires au fonctionnement de chaque mode partiel (les coûts énergétiques sont ceux en vigueur au Québec). Les

résultats obtenus proposent, si l'usine fonctionne à moins de 25% de sa capacité, des économies entre 10% et 30% de la facture totale d'électricité. Si l'usine fonctionne à plus de 25% de sa capacité, les économies se situent entre 2% et 10% et tendent vers 0% lorsque l'usine s'approche de sa capacité maximale de production.

Des économies annuelles de près de 600 000 $ sont donc envisageables. De plus, le retour sur l'investissement est instantané puisque aucun achat d'équipement n'est nécessaire, tout se situant au niveau de la capacité de réorganisation. Plusieurs industries auraient avantage à mettre en application un programme de recherche en efficacité énergétique comme celui testé avec J.M. Asbestos.

ABSTRACT

This research proposes the piloting of a plant to integrate planning of the production and resources. The goal of this thesis is to evaluate the importance of planning of I) production, II) human resources and III) energy consumption, considering that these costs are not negligible and are dependent on the planning itself. Over the past few years, a low number of studies have been conducted on this subject; therefore it was necessary to develop a method allowing their integration in the piloting of the plant.

The Jeffrey mine, asbestos producer, located in Asbestos is used as the framework for this study to test these hypotheses. To do so, a production model is developed and the energy and human resource costs are integrated. Finally, results obtained by this model are analyzed.

« How could Jeffrey mine reduce its costs without major investment? » was the question to which this study tried to answer. The high fixed costs are partially responsible for the problems and because of that, the basic hypothesis running the mill is erroneous. Normally, the human resource costs and energy are function of the required capacity, meaning that when the production increases, the cost increases. This is not the case at J.M. Asbestos. It is necessary to develop a new hypothesis that would allow the resource cost to be function of the production plan since the fixed costs represented a high proportion of the total budget. Human resource costs depends on the work period (day, evening or night) and energy costs correlated better to the peak consumption (subscription cost) than the consumed volume.

The high subscription cost is responsible for most of the problems. The plant was built in the 50's to work 24 hours a day and adopted a set-up valid only for a full capacity mill. Consequently, the recent reduction of the production volume caused the mill to operate at full capacity but for short periods of time (few hours a week). Therefore, the peak consumption (instantaneous) is still the same (linked to the full capacity) and the cost of subscription did not change despite the reduction of production. So, the technical knowledge allowing the use of partial mode is non-existent.

This study consists of proposing a model, giving the possibility to work in partial mode (just some parts of the mill) while integrating the fixed and variable energy costs (subscription and consumption) as well as the fixed and variable human resource costs (according to the work period). This model is based on a linear programming in whole numbers.

J.M. Asbestos can produce about 200 different products. However, the plant cannot produce more than 8 to 12 at the same time. The model is tested with a selection of 9 of the most popular products.

In the model, there are three parameters : the number of employees by work shift, their salary according to the period of work, and the number of kilowatts necessary for each of the partial mode. The energy costs are the one used in Quebec (Hydro-Quebec). The obtained results propose possible savings of 10-30% of the total electricity bill, if the plant works at less than 25% of its capacity. If the plant works at more than 25% of its capacity, the savings are somewhere between 2% and 10% and leans towards 0% when the plant is at its maximum capacity.

Annual savings of 600 000 $ are therefore conceivable. Also, the return on the investment is instantaneous since no purchase of equipment is necessary, everything being situated at the level of the reorganization capacity. Several industries could apply such a program of energy effectiveness as the one tested at J.M. Asbestos and achieve important savings.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ ..... **iv**

ABSTRACT ..... **vii**

TABLE DES MATIÈRES ..... **x**

LISTE DES TABLEAUX ..... **xiii**

LISTE DES FIGURES ..... **xv**

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS ..... **xvi**

LISTE DES ANNEXES ..... **xvii**

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION **1**

CHAPITRE 2 : REVUE DE LITTÉRATURE **7**

2.1 Gestion énergétique 7

2.1.1 Demand-Side Management (DSM) 7

2.1.2 Impacts sur les autres secteurs d'activités 10

2.1.3 Quelques exemples de contrôle énergétique 11

2.2 Gestion environnementale (ERM) 13

CHAPITRE 3 : CONTEXTE **26**

3.1 Historique 26

3.2 L'amiante 28

3.2.1 Le Quebec Standard (QS) 30

3.2.2 La valeur instantanée (IVT) 30

3.2.3 Le rotap 31

3.3 Fonctionnement de la mine et de l'usine étudiée 31

3.4 Produits finis 34

3.5 Structure du moulin #6 36

3.5.1 Lignes primaires 36

3.5.2 Lignes secondaires 37

3.6 Ressources consommées 37

3.6.1 Électrique 38

3.6.2 Humaines 41

3.7 Pilotage à Jeffrey 41

3.8 Tarification de l'électricité 42

CHAPITRE 4 : MÉTHODOLOGIE 44

4.1 Méthodologie 44

4.1.1 Cueillette de données 44

4.1.2 Gammes et nomenclatures 45

4.2 Modélisation mathématique 54

4.2.1 Choix du modèle 54

4.2.2 Notation 55

4.2.3 Formulation 58

CHAPITRE 5 : RÉSULTATS 66

5.1 Logiciel utilisé 66

5.2 Impact du nombre de travailleurs par mode de production 68

5.3 Impact du salaire des travailleurs selon les quarts de travail 74

5.4 Impact du nombre de kilowatts nécessaire par mode 76

5.5 Impacts du facteur humain sur la productivité 78

CHAPITRE 6 : CONCLUSION 80

RÉFÉRENCES 84

ANNEXES 88

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 - Économies réalisées par les programmes américains de DSM 9

Tableau 2.2 - Différentes options disponibles 16

Tableau 3.1 - Production et consommation mondiale d'amiante 29

Tableau 3.2 - Commande réalisée durant le mois de septembre 2002 35

Tableau 4.1 - Lignes en fonction 46

Tableau 4.2 - Calculs des ressources humaines nécessaires, Méthode 2 47

Tableau 4.3 - Caractéristiques des modes 48

Tableau 4.4 - Tonnage horaire des fractions 49

Tableau 4.5 - Répartition de la production des fractions 50

Tableau 4.6 - Calculs de répartition des fractions pour le mode 1 51

Tableau 4.7 - Répartition des fractions pour chacun des modes 52

Tableau 4.8 - Constitution des produits finis 53

Tableau 4.9 - Détail des coûts 58

Tableau 4.10 - Implémentation des modes au modèle 62

Tableau 4.11 - Implémentation des recettes au modèle 63

Tableau 4.12 - Implémentation des proportions des fractions au modèle 64

Tableau 4.13 - Implémentation des coûts de ressources hum. au modèle..... 65

Tableau 4.14 - Implémentation de la demande au modèle..... 65

Tableau 5.1 - Niveaux de production..... 67

Tableau 5.2 - 4 premiers scénarios testés..... 68

Tableau 5.3 - Économies possibles pour les scénarios 1 et 3..... 69

Tableau 5.4 - Économies possibles pour les scénarios 2 et 4..... 72

Tableau 5.5 - Économies possibles du scénario 5 77

LISTE DES FIGURES

Figure 3.1 - Flux de la roche suite à l'extraction 33

Figure 3.2 - Fonctionnement du moulin #6 34

Figure 3.3 - Puissance facturée VS puissance souscrite de 2000 à 2003 39

Figure 3.4 - Production annuelle à J.M. Asbestos 40

Figure 3.5 - Évolution des ressources humaines à J.M. Asbestos 41

Figure 4.1 - Méthodologie suivie 45

Figure 4.2 - Principe de fonctionnement du moulin 55

Figure 5.1 - Comparaison entre les scénarios 1 et 3 71

Figure 5.2 - Comparaison entre les scénarios 2 et 4 73

Figure 5.3 - Comparaison entre les scénarios 1 et 2 75

Figure 5.4 - Comparaison entre les scénarios 3 et 4 76

Figure 5.5 - Comparaison entre les scénarios 1 et 5 78

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

CV – Chevaux vapeurs

DSM – Demand-Side Management

ERM – Environmentally Responsible Manufacturing

ISO – International Standardization Organization

IVT – Valeur instantanée

J.M. – Jeffrey Mine

KW – Kilowatt

Kwh – Kilowattheure

MW – Mégawatt

Mwh – Mégawattheure

QS – Quebec Standard

Tep – Tonne équivalente de pétrole

Tph – Tonnes par heure

W – Watt

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Schématisation du moulin #6

Annexe 2 : Lignes 1 à 6, direction des types de fibre

Annexe 3 : Lignes 1 à 6, de l'alimentation aux collecteurs

Annexe 4 : Lignes 1 à 6, schéma complet

Annexe 5 : Lignes 7 à 12, de l'alimentation aux collecteurs

Annexe 6 : Lignes 7 à 12, à partir des collecteurs AA

Annexe 7 : Lignes 7 à 12, à partir des collecteurs AB

Annexe 8 : Lignes 7 à 12, à partir des collecteurs AB et C

Annexe 9 : Lignes 8A et 10A, de l'alimentation aux collecteurs

Annexe 10 : Lignes 8A et 10A, à partir des collecteurs

Annexe 11 : Lignes 13 à 16, de l'alimentation aux collecteurs

Annexe 12 : Lignes 13 à 16, à partir des collecteurs B

Annexe 13 : Lignes 13 à 16, à partir des collecteurs AA et AB

Annexe 14 : Consommation énergétique mensuelle

Annexe 15 : Répartition des coûts énergétiques

Annexe 16 : Calculs de la répartition des fractions par ligne

Annexe 17 : Programme d'optimisation en langage AMPL

Annexe 18 : Programme de lecture et d'écriture des résultats dans ACCESS

Annexe 19 : Photos

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

Ce mémoire démontre l'intérêt d'une vision globale de la planification intégrant l'ensemble des coûts (inventaires, ressources humaines et énergétiques) lorsque celle-ci a un effet sur le coût de ces dites ressources.

Une telle approche n'existe pas dans l'industrie parce que ce type de planification pour lequel les coûts sont fonction de l'utilisation des ressources n'est pas habituelle. Une compagnie fait habituellement l'hypothèse que le coût des ressources est seulement fonction de la capacité requise, c'est-à-dire que le coût des ressources humaines et énergétiques augmente linéairement avec le volume de production. Par exemple, si la production double, le coût des ressources double également.

Pour certaines compagnies, cette hypothèse ne semble pas réaliste. Il arrive en effet, pour certains types d'activité industrielle, que le coût des ressources énergétiques et humaines soit une fonction du plan directeur de production, c'est-à-dire que le prix de ces ressources varie suivant la façon dont est organisée la production.

Les difficultés rencontrées par ce type d'approche sont que la plupart des industries n'ont pas de statistiques ou de connaissances permettant de quantifier le coût des ressources humaines et énergétiques en fonction des unités de production. De plus, puisque cette approche de planification n'est pas répandue, il n'existe que peu d'antécédents permettant à une compagnie de se réorienter et d'admettre que, même si la production n'est pas diminuée, une réorganisation du plan directeur de production peut amener une réduction des coûts de ressources humaines et énergétiques.

Ce type de problème est important à résoudre, dans une conjoncture économique où le chômage est à la hausse et où la mondialisation s'étend rapidement. Résoudre ce genre de problème peut faire réaliser aux entreprises que pour diminuer les coûts des ressources humaines et énergétiques, il n'est pas toujours nécessaire de couper des emplois, de diminuer la production en arrêtant de la machinerie ou bien de transférer l'entreprise dans un pays où les ressources sont moins dispendieuses.

Cette vision plus globale de la production en fonction des ressources est rare. Dans la littérature, il existe quelques articles sur la planification de la production qui traitent séparément des coûts énergétiques et des ressources humaines. Cependant, il n'y a pas de travaux concernant la modélisation intégrée de la production et de ces deux types de ressource. En effet, la majorité des méthodes de planification de la production suppose que le système physique (contraintes, règles, ressources disponibles, etc.) est déjà défini et a établi le cadre dans lequel la production doit être optimisée. Dans ces cas, des coûts principaux sont définis hors du système de planification de la production et y intègrent souvent les coûts de la main d'œuvre, de la gestion de demande (coûts énergétiques) et des contraintes de production (inventaire et demande).

C'est en se servant de l'entreprise J.M. Asbestos, que l'on tente d'intégrer cette nouvelle vision de la production où le coût des ressources énergétiques et humaines est une fonction du plan directeur de production. La principale difficulté est venue d'une absence de culture "Génie Industriel" dans cette entreprise qui fonctionnait à partir de règles non écrites. Elle ne "savait" travailler qu'à plein régime avec des schémas d'ajustements globaux. Il a donc fallu recréer (ou créer) de la connaissance de type gammes (produits) et

nomenclatures (procédés) pour accéder à des modèles de fonctionnement partiel.

Avant de pouvoir penser à réorganiser la production, il est nécessaire de connaître le site du complexe de production J.M. Asbestos. Les principales installations sont la mine à ciel ouvert, le moulin #5, l'entrepôt de minerai sec, et le moulin #6. La mine à ciel ouvert est l'endroit où est extraite la roche. Celle-ci est ensuite passée dans le concasseur primaire et envoyée au moulin #5. Dans le moulin #5, la roche subit un traitement de concassage et de tamisage et, maintenant sous la forme de minerai, elle est envoyée à l'entrepôt de minerai sec. C'est là que le minerai est emmagasiné et l'eau évacuée. Puis, le minerai est envoyé vers le moulin #6 où il subit divers traitements de concassage, de tamisage et de triage si bien qu'à la fin, il ne reste que quelques types de fibres qui sont alors appelées des fractions. C'est en mélangeant ces fractions selon divers ratios que les produits finis sont obtenus.

Le moulin #6 est le plus grand consommateur de ressources, tant énergétique (environ 55% du total du site dont l'essentiel de la partie variable) qu'humaine (près de 60% des opérateurs). C'est donc au niveau du moulin #6 que sera tentée une réorganisation de la production en fonction des ressources. Puisque le moulin #6 est le plus grand consommateur d'énergie, il est en grande partie responsable des dépassements de la puissance souscrite. En effet, le paiement de l'énergie à Hydro-Québec (à l'instar de tous les gros distributeurs) se fait sur la base d'une puissance souscrite (abonnement en KW) et de la consommation (KwH). La souscription est une sorte d'autorisation à consommer un certain niveau de puissance. Au dessous de ce niveau (puissance instantanée), la consommation est facturé à très bas prix, mais au dessus, les pénalités sont

très importantes. Cette politique tarifaire a pour but de pousser les très gros consommateurs à lisser leur consommation. Il est donc à l'avantage du client d'utiliser l'énergie qui sera le plus près possible de la puissance souscrite sans avoir de dépassements. Seule une excellente connaissance interne du fonctionnement d'une entreprise peut permettre l'utilisation d'une puissance à peu près égale à celle souscrite.

Ce besoin d'une meilleure maîtrise de la consommation énergétique est un des soucis du développement durable. C'est ce besoin qui est à l'origine des travaux sur la tarification énergétique (lissage du côté producteur que l'on retrouve dans la littérature sous le vocable Demand-Side Management -DSM-) et sur une meilleure utilisation des ressources industrielles (lissage du côté utilisateur souvent identifié sous le terme Environmentally Responsible Manufacturing - ERM-). Ces deux points seront étudiés dans la revue de littérature.

Les programmes de DSM sont liés à la gestion énergétique. Les programmes de DSM consistent à planifier, améliorer et à effectuer le suivi des activités servant à encourager une modification des niveaux de consommation électrique et leur façon de le faire. Dans le cas du moulin #6, il s'agit d'encourager une modification de la consommation énergétique permettant son contrôle, donc celui de la puissance souscrite, et ce en fonction d'une réorganisation de la production.

Les programmes de ERM sont quant à eux des programmes de gestion environnementale. Un ERM est un système qui intègre le design des produits et des procédés dans la planification et le contrôle de la production manufacturière. Ce domaine traite et explique de quelle façon une industrie peut

économiser de l'argent à long terme en créant moins de polluants et en utilisant efficacement l'énergie.

Le moulin #6, lorsqu'il fonctionne, est en mode permanent, c'est-à-dire que tous ses équipements (les 16 lignes) fonctionnent, de la même façon que lorsqu'il était en opération 24 heures sur 24, 7 jours sur 7, et ce, même s'il ne fonctionne maintenant que 10 heures par jour, 4 jours par semaine. On appelle ligne, une série de machines traitant et transformant le minerai en fibre. Pour baisser la puissance instantanée (pic de consommation) et par conséquent la puissance souscrite, il est nécessaire de fermer certaines parties du moulin. Pour les besoins de cette étude, des modes de travail réduits, appelés modes partiels, sont proposés. Un mode de travail partiel correspond à l'arrêt d'une ou plusieurs des 16 lignes. Puisque chaque ligne ne produit pas la même quantité et qualité de produit, il a été nécessaire, pour chacun des modes partiels, d'analyser la production totale de chaque produit.

Le mémoire sera divisé de la façon suivante. Le deuxième chapitre sera consacré à la revue de littérature. Étant faite dans le cadre de la gestion énergétique et environnementale, elle traite des programmes de DSM et de ERM. Le troisième chapitre sera consacré au contexte à la mine Jeffrey. Il y sera fait mention de son historique, de l'utilisation qui peut être faite de l'amiante, du fonctionnement en profondeur du moulin #6, des produits finis qui y sont fabriqués (aussi appelés fractions), de sa structure, des ressources énergétiques et humaines consommées, de la façon dont il est piloté ainsi que d'une explication de la tarification d'électricité. Le quatrième chapitre a trait à la méthodologie. Il y sera expliqué les moyens utilisés pour récolter les données nécessaires et la façon de développer les gammes et nomenclatures. Suivra

ensuite une section sur la formulation du modèle mathématique ayant été implémenté en langage de programmation AMPL. C'est en langage AMPL que s'effectueront les simulations qui ont pour but de trouver la combinaison des modes de travail, sur une période de 20 jours (60 quarts de travail), la plus économique pour divers niveaux de demande. Cinq différents scénarios seront simulés pour différentes demandes. Les paramètres qui changeront d'un scénario à l'autre seront le coût des ressources humaines, le nombre d'employés nécessaires pour chaque mode partiel ainsi que la puissance énergétique nécessaire au fonctionnement de chaque mode partiel. Dans le cinquième chapitre, les résultats seront présentés et analysés. Le sixième chapitre, la conclusion, démontre que l'analyse de l'utilisation des ressources énergétiques et humaines dans le cadre de la planification de la production semble être un bon champ d'analyse pour le problème vécu à J.M. Asbestos.

CHAPITRE 2 : REVUE DE LITTÉRATURE

Cette section a pour but de revoir la littérature scientifique sur laquelle reposent les bases de ce projet de recherche. Il y sera premièrement traité de la gestion énergétique. Le Demand-Side Management (DSM) sera décrit et étudié. Les pratiques de DSM recherchent les mêmes buts que cette étude. Des exemples de pratiques efficaces et réussies de DSM seront également présentés. Deuxièmement, un sujet de pratiques environnementales, les « Environmentally Responsible Manufacturing (ERM) » seront utilisés pour démontrer les avantages multiples que l'on peut retirer en utilisant intelligemment l'énergie électrique.

2.1 Gestion énergétique

Le sujet traité sera maintenant la gestion énergétique, c'est-à-dire les moyens de réorganisations possibles permettant d'utiliser moins d'énergie pour arriver aux mêmes fins. La gestion énergétique est étroitement liée à la gestion environnementale puisque, comme le mentionne Evans (2001), des mesures d'efficacité énergétique sont un moyen peu dispendieux permettant de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

2.1.1 Demand-Side Management (DSM)

Les programmes de « Demand-Side Management » consistent à planifier, améliorer et effectuer le suivi des activités servant à encourager une modification des niveaux de consommation électrique et plus particulièrement le lissage de la consommation. En effet, les investissements de base en équipements de production énergétique (barrages, centrales, etc.) comme les

impacts sur l'environnement de ces équipements sont plus liés à la puissance MAXIMALE à produire qu'à la puissance moyenne. Le principe même de l'énergie électrique étant qu'il faut à tout moment être en mesure de produire la puissance exacte appelée (stockage étant inexistant). Le DSM inclut donc tous les programmes mis en œuvre par les producteurs afin de pousser leurs clients à lisser cette puissance appelée. Wolsink (1997) mentionne que le focus, dans un programme de DSM peut être mis sur une ou plusieurs parties du concept d'efficacité comme par exemple, la planification, les coûts totaux ou encore, la demande totale.

Rodney Dunn (1999) mentionne sur le site internet de l' « Energy Information Administration » que dans le passé, l'objectif principal de la plupart des programmes de DSM était de trouver des énergies efficaces et les ressources nécessaires pour ne pas avoir à rechercher de nouvelles sources d'énergie. Le DSM fait seulement référence à l'énergie et à la variation de la consommation produite par une modification des activités entreprises, c'est-à-dire des changements tels que la fabrication de nouveaux produits ou l'instauration de nouvelles machines. Il ne fait pas référence à une modification causée par les opérations normales de l'entreprise comme par exemple une légère hausse des commandes.

Les programmes de DSM offrent plusieurs mesures de performance permettant de réduire la consommation énergétique et par conséquent, les coûts qui y sont reliés. Les différentes stratégies de DSM ont pour but de maximiser l'efficacité énergétique afin de pouvoir retarder au maximum la construction et l'installation de nouvelles sources d'énergie.

La technique du nivellement des charges est très utilisée présentement. Cette technique a pour utilité de lisser les courbes de consommation, c'est-à-dire diminuer les puissances instantanées. Le nivellement des charges peut se faire par une réduction de consommation aux moments où ces pointes apparaissent ("peak shaving"), en l'augmentant en dehors des puissances de pointe ("valley filling") ou en déplaçant une partie de la consommation des périodes de pointe vers les périodes hors-pointes.

Tableau 2.1 - Économies réalisées par les programmes américains de DSM

Source : Energy Information Administration, Form EIA-861, "Annual Electricity Utility Report"

	1995	1996	1997	1998	1999
Réductions actuelles de puissances instantanées (MW)	29 561	29 893	25 284	27 231	26 455
Réductions potentielles de puissances instantanées (MW)	47 029	48 344	41 237	41 430	43 570
Coûts (en millions de $)	2 421	1 902	1 636	1 420	1 423

Selon des statistiques de l'EIA (Energy Information Administration), dans la section intitulée « *Electric Utility Demand-Side Management* », en 1999, 848 compagnies d'électricité américaines ont rapporté avoir un programme de DSM. De ces compagnies, 459 sont classifiées comme étant des grandes industries et 389 des petites. Lorsqu'une compagnie d'électricité rapporte des ventes annuelles plus grandes ou égales à $0,15 \times 10^9$ kwh, elle est considérée comme une grande industrie. Les coûts de DSM sont cependant demeurés pratiquement inchangés à 1,4 milliard de dollars pour 1998 et 1999. Les

économies réalisées pour les 459 grandes industries en 1999 ont été de 50,6 x 10^9 Kwh, une augmentation de 1,4 x 10^9 Kwh par rapport à 1998. Cette économie d'énergie représente 1,5% des ventes annuelles d'électricité aux États-Unis. Les économies réalisées aux États-Unis seulement pour les années 1995 à 1999 sont présentées au tableau 2.1. Aucune statistique canadienne sur ce sujet n'a été trouvée.

2.1.2 Impacts sur les autres secteurs d'activités

En plus d'être profitable au niveau monétaire, une gestion énergétique contrôlée a des effets positifs au niveau de la production et de l'environnement.

E. Worrell et al. (2003) exprime très bien cette idée en mentionnant dans un de ses articles qu' « un investissement dans l'efficacité énergétique peut apporter un essor significatif à la productivité d'une industrie ». Il mentionne également que « les technologies exploitant l'efficacité de l'énergie sont des opportunités économiques significatives ». Il est cependant très difficile, lorsque des mesures sont implantées, de savoir exactement les économies qui seront réalisées car, comme l'ont écrit Dalgleish et Grobler (2003), « les économies ne peuvent jamais être mesurées précisément, elles ne peuvent être que vaguement estimées ». De plus, il existe un mythe persistant qui dit que des mesures environnementales auront des impacts économiques négatifs, c'est-à-dire qu'un investissement ayant pour but de diminuer les impacts environnementaux ne rapporte rien de plus à l'entreprise qu'un meilleur rapport environnemental et des dépenses supplémentaires. Cependant, après de nombreuses recherches sur le sujet, John A. Laitner (2002) mentionne que « le premier pas vers un bilan économique amélioré est l'implantation de mesures environnementales ».

Au niveau environnemental, les effets d'une baisse de consommation d'électricité sont généralement positifs. Fouad Al-Mansour et al. (2003) mentionne : « L'activation de mesures de sauvegardes énergétiques a un effet direct sur la réduction de gaz à effet de serre ». Edward Vine (2003) exprime la même idée lorsqu'il écrit : « L'augmentation de l'efficacité énergétique dans les secteurs résidentiels, commerciaux et industriels est un moyen efficace de réduire les émissions de polluants dans l'air et par conséquent de réduire la production de gaz à effet de serre ».

2.1.3 Quelques exemples de contrôle énergétique

Un type de gestion énergétique a été étudié par Sansò et Girard (1997) pour le métro de Montréal. Un système de gestion automatique devait assurer un décalage entre les départs des rames de métro afin d'en limiter le nombre atteignant leur puissance maximale en même temps. Ainsi, les responsables étaient capables de contrôler la puissance instantanée maximale atteinte dans une journée, et réduire ainsi le coût de la facture d'électricité.

Lauri Gregg (1998) mentionne dans l'article intitulé « Energy management in a mining company », paru dans la revue *Caddet Energy Efficiency* que la compagnie minière Australienne, Mount Isa Mines, s'est également servie du principe qui dit que plus les puissances instantanées sont contrôlées, plus la puissance souscrite est contrôlable et par conséquent, des économies d'énergie sont réalisées. Pour ce faire, les ingénieurs ont décidé de faire fonctionner moins de pompes et moins de ventilateurs en même temps lorsque c'est possible. De cette façon, Mount Isa Mines a pu sauver 3 millions de dollars dès

sa première année et ce pour un investissement initial de 2,86 millions de dollars.

Andre Gabagnou (2002) mentionne dans la revue « Énergie Plus », que la compagnie Lafarge, productrice de ciment, utilise des ventilateurs afin de refroidir le « clinker », semi-produit issu de la cuisson des matières premières. Le refroidisseur était équipé de ventilateurs soufflant de l'air à température ambiante à l'aide de moteurs à vitesse fixe de 90 kW, 55 kW et 45 kW. La régulation du débit d'air se faisait à l'aide de volets s'inclinant à l'aspiration et au refoulement. En 1997, Lafarge a pris la décision, afin d'économiser de l'énergie, de remplacer ces trois volets par des variateurs électroniques de vitesse de 90 kW, 45 kW et 37 kW. Le refroidisseur a donc vu sa consommation d'électricité annuelle passée de 607 tep/an (tonne équivalente de pétrole / année) à 530 tep/an. Il s'agit d'une économie d'énergie de 12% annuellement. Le retour sur l'investissement initial se fait en 2,6 années.

NoorLeha A.R. et al. (2003) mentionne qu'un moyen d'économiser l'énergie serait d'imposer des standards d'efficacité pour tous les moteurs présents dans une habitation. Le site internet de la Société canadienne d'hypothèques et de logement (2003) suggère également qu'une autre façon de réaliser des économies d'électricité serait de remplacer les moteurs d'entraînement de ventilateurs et de pompes de modèles plus anciens par d'autres à rendement élevé. Les moteurs qui fonctionnent plus de 2000 heures par année devraient toujours être régulièrement inspectés et remplacés au besoin. Ces entretiens préventifs permettent en général des améliorations d'efficacité de l'ordre de 10% à 30% et une réduction des frais d'énergie. Il y est également suggéré de raccorder des dispositifs de commande aux importantes sources de charge

électrique afin d'empêcher leur fonctionnement durant les périodes de forte demande en électricité. Ce principe peut s'appliquer aux systèmes de chauffage et de ventilation en général. Le principal avantage de cette mesure est une réduction considérable de la demande mensuelle en électricité donc, de la facture. Il y a trois façons de maîtriser la demande de pointe :

- commandes à minuterie pour les charges non essentielles. Cette mesure est la moins coûteuse et offre le meilleur rendement sur l'investissement ;
- dispositif électrique effectuant le délestage de certaines charges en réaction à la demande en électricité ;
- commande de toutes les charges possibles à délester au moyen d'un microprocesseur.

2.2 Gestion environnementale (ERM)

Ce type de gestion implique tout ce qui a trait à la réduction de déchets, d'émissions polluantes et de rejets de toutes sortes dans l'environnement dont une grande partie provient de la production d'électricité. Une meilleure gestion énergétique aura des conséquences environnementales positives. C'est un sujet qui prend plus d'ampleur malgré la persistance de l'idée que la capacité de la planète à nous fournir des ressources et à éliminer nos déchets est énorme, voire illimitée (mentalité analysée par Humphries et al. (2002)).

L'implantation d'un ERM se fait dans un souci d'économie monétaire. Pour arriver à cette fin, Curkovic et al. (1999) mentionne que la façon de faire est

d'instaurer des stratégies permettant de réduire la production de déchets et la consommation d'énergie.

Un ERM est, selon la définition de Steven A. Melnyk (1993), un système qui intègre le design des produits et des procédés dans la planification et le contrôle de la production manufacturière. De cette façon, il est possible d'identifier, de quantifier, de contrôler et de gérer le flux de déchets environnementaux en ayant pour but de réduire, voire d'éliminer, les impacts sur l'environnement tout en maximisant l'efficacité des ressources.

Melnyk (1993) a également développé plusieurs hypothèses et prémisses afin de rendre cette définition plus précise :

- les décisions en rapport avec l'ERM sont toujours intégrées aux procédés de l'entreprise ;
- le but ultime est l'élimination complète de déchets ;
- un ERM doit être évalué avec des décisions stratégiques en comparant les coûts et les bénéfices relatifs ;
- un ERM doit mettre l'accent sur les trois P : « Product, Process, Packaging » ;
- afin d'atteindre ses objectifs, un ERM doit reconnaître l'importance de la chaîne d'approvisionnement ;
- un ERM est un procédé dynamique.

Pour réussir l'implantation d'un ERM, une compagnie se doit d'être proactive, c'est-à-dire mettre l'accent sur les décisions et les actions qui ont causé le problème en tout premier lieu. L'approche « End-of-pipe » qui consiste à

résoudre les problèmes une fois qu'ils ont été créés doit être autant que possible évitée. Cette méthode s'avère la plupart du temps très inefficace.

Mohanty et Deshmukh (1999) mentionnent que traditionnellement une entreprise porte beaucoup d'attention sur l'effet que peut avoir une mesure environnementale sur son profit, et non sur l'environnement. Au cours des dernières décennies, un besoin grandissant s'est fait sentir pour les entreprises de réduire les coûts de fabrication tout en éliminant ou en réduisant de façon considérable la production de déchets de toutes sortes. Le fait de vouloir être plus responsable envers l'environnement est la conséquence de plusieurs années de pression exercée par des organismes de protection environnementale, par des gouvernements et par le public en général.

Comme il a été démontré par Porter (1991), la production de déchets a un impact sur les coûts de fabrication et consomme inutilement des ressources tout en n'apportant rien à la création de biens de valeur, et plus particulièrement lorsqu'il y a du gaspillage ou aucun programme de recyclage. Contrairement à ce qui se passait lorsque les industries ont commencé à se préoccuper de l'environnement, le but premier n'est pas que de se faire de la bonne publicité. Les industries ont maintenant le devoir de respecter l'environnement. Cependant, le lien direct entre l'amélioration des performances environnementales et le perfectionnement global des performances d'une industrie n'a pas encore été explicitement prouvé. La plupart des dirigeants sont d'accord avec l'idée qu'il est nécessaire pour une entreprise de devenir plus responsable en matière de protection de l'environnement. Cependant, il existe trois principales difficultés qui rendent la création d'un ERM plus difficile. En premier lieu, ces programmes sont difficiles à supporter au niveau corporatif. En

second lieu, le concept d'ERM étant relativement nouveau, il est mal compris et pas tout à fait bien défini. Finalement, il est difficile de savoir où mettre l'emphase, sur le design du procédé ou bien dans la mesure des performances.

Selon Melnyk (1993), lorsqu'il y a une situation de création de déchets, il y a différentes options possibles afin de se diriger vers un ERM. Les principales sont résumées dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2 - Différentes options disponibles

Source : Melnyk, A., Steven. (1993), « Environmentally Responsible Manufacturing : New Opportunities, New Challenges, New Gaps to Bridge ».

Redesigner	Transformer le design du système à la base.
Substituer	Changer le produit créant les problèmes environnementaux par un autre qui se révèlera moins nocif.
Réduire	Utilisation moindre du produit qui est à la base de la création des déchets.
Recycler	Redonner leur aspect initial à certaines composantes d'un système afin de les réintroduire dans le cycle de production.
Reconstruire	Réévaluer le rôle de chaque partie d'un système et enlever les parties génératrices de déchets et de pertes d'énergie.
Remanufacturer	Désassembler un produit afin d'en réparer, nettoyer ou remplacer ses différentes parties, pour ensuite le remonter.

Ces nombreuses options permettent à la direction d'avoir plusieurs choix lorsqu'il y a nécessité de prendre une décision. Les relations entre ces options sont complexes et parfois plus d'une option peut être utilisée à la fois. À d'autres occasions, ces choix peuvent être des substituts. Par exemple, une compagnie peut décider d'utiliser un nouveau matériau plus difficile à recycler ou à réutiliser dans la construction de son produit parce qu'il permet de réduire la quantité de déchets en fin de cycle d'utilisation. Aussi, ce nouveau matériau pourrait par

exemple prolonger la durée de vie du produit en question. L'habileté à gérer ces différentes options et leurs effets constitue un trait majeur des ERM.

L'intérêt grandissant pour les ERM est un résultat de la récente convergence de plusieurs développements et tendances dont les plus importants sont les suivants :

- pressions gouvernementales ;
- législations ;
- implication des responsabilités ;
- nouveaux standards internationaux quant à la responsabilité environnementale ;
- reconnaissance de l'implication des industries dans la production de déchets environnementaux ;
- conscience des coûts élevés relatifs aux rejets de déchets dans l'environnement ;
- impacts du «Total Quality Management » et de la production juste-à-temps ;
- publicité ;
- difficultés avec la disposition des déchets ;
- pression d'organismes et de groupes populaires ;
- évidence qu'un ERM augmente la profitabilité et la compétitivité d'une entreprise.

Pour augmenter les chances de succès lors de l'implantation d'un ERM, Melnyk (1993) préconise les idées suivantes :

- utiliser le travail d'équipe. Chaque entreprise possède ses propres experts en environnement. C'est une erreur majeure de se fier seulement aux experts en environnement pour instaurer un programme tel qu'un ERM. Ils ne connaissent pas assez les détails relatifs à la production et au design des procédés. L'équipe en charge de l'implantation devrait être composée de représentants de l'environnement, de l'ingénierie, de la production, des achats, des ressources humaines et de la direction ;
- fixer des objectifs clairs et précis. Plus les objectifs seront clairs et précis, moins il y aura de chance qu'il y ait confusion. Les chances de succès sont plus grandes si toute l'équipe met l'emphase sur l'analyse et la résolution d'un objectif spécifique au ERM ;
- procurer de la formation sur la résolution des problèmes, les outils utilisés ainsi que les procédures. Il faut s'assurer que tous les membres de l'équipe ont reçu la formation nécessaire. Les outils qui devraient être considérés sont les suivants : analyse de causes à effets, analyse de procédés, analyse de Pareto et histogramme ;
- développer une méthode pour quantifier les performances et communiquer les résultats. La clé du succès est de trouver des mesures quantitatives qui peuvent être mesurées et analysées sur une base quotidienne comme par exemple des kilogrammes de déchets produits ou recyclés ;

- si possible, impliquer la communauté dans le procédé. L'implantation réussie d'un ERM affectera non seulement l'industrie à l'interne mais souvent la communauté environnante ;
- choisir les projets prudemment. Les projets sélectionnés doivent être visibles en terme d'impacts et réalisables dans un délai raisonnable ;
- développer une culture ERM. Pour réussir l'implantation, il est important d'établir une culture corporative mettant l'emphase sur les objectifs et les buts d'un ERM. Une grande partie du développement de cette culture est l'établissement et la communication de trois éléments. Le premier est la vision décrivant comment l'entreprise voit ses buts. Le second est l'impact sur l'entreprise et son personnel si aucun ERM n'est implanté. Le troisième élément est le plan ou la séquence d'activités qui aideront l'entreprise à atteindre ses objectifs ;
- s'assurer que tous comprennent que le respect des normes n'est qu'un minimum. C'est une erreur de se satisfaire du respect minimal des normes, une industrie se doit de viser plus haut.

Toujours selon Melnyk (1993), il existe plusieurs obstacles lorsque l'on désire implanter un ERM, les principaux sont les suivants :

- manque d'impacts stratégiques d'un ERM. Il constitue un obstacle majeur dans l'implantation d'un ERM car généralement, les dirigeants ne le voient pas comme un changement qui pourrait affecter l'entreprise positivement en terme de coût, qualité ou flexibilité de production. Il n'est vu que comme un coût supplémentaire ;

- budget serré. Si le budget est trop serré, il sera difficile de faire accepter un investissement dans un ERM. C'est encore mal connu et la peur de l'échec est encore très souvent présente ;
- manque de support de la part de la direction. Cette situation peut être possible lorsque la direction ne reconnaît pas l'importance d'implanter un ERM par peur de l'investissement demandé ou tout simplement par manque de temps pour l'implantation du système ;
- se satisfaire d'une conformité aux lois en vigueur. Une controverse qui continue d'empêcher plusieurs entreprises de développer un ERM est que plusieurs dirigeants croient qu'il suffit de respecter les lois sans nécessité d'en faire plus ;
- impossibilité de faire un arrêt des opérations. Il est parfois obligatoire d'arrêter complètement les opérations de production afin d'introduire des changements, ce qui n'est pas toujours possible ;
- manque de mesures significatives et d'outils de travail. Cette situation rend difficile la quantification des impacts réels d'un ERM ;
- incertitude à propos des conséquences réelles des solutions apportées par un ERM. Les conséquences d'un changement sont difficiles à évaluer. Alors, un changement pourrait rendre une entreprise encore plus polluante où les prédictions sont erronées comme par exemple, si un produit est ajouté à l'eau usée d'une usine dans le but de l'assainir. La conséquence directe est que l'usine rejette maintenant de l'eau propre dans une rivière. Cependant, il se pourrait que le produit ajouté ait des conséquences néfastes lorsque qu'il est mélangé avec d'autres polluants déjà présents dans l'eau de la rivière ;

- incertitude quant à l'interprétation des lois et des règlements. Étant donné le nombre élevé de lois et leurs changements fréquents, une compagnie doit se tenir à jour et au courant de toutes modifications.

De nouveaux outils et procédures sont apparus dans la dernière décennie afin d'aider l'implantation des ERM. Dans son article « New Opportunities, New Challenges, New Gaps to Bridge », Steven A. Melnyk (1993) mentionne les outils suivants :

- les audits internes sont utiles pour créer une conscience environnementale. Pour qu'ils soient un succès, certains préalables doivent tout d'abord être satisfaits. Le support de la direction doit être total et sans condition. Les audits doivent se tenir régulièrement. Aucune norme non respectée ne peut être acceptée, c'est-à-dire qu'une tolérance zéro doit être en vigueur. Ensuite, les audits doivent être dirigés par des gens à l'interne et non par des experts environnementaux. Ces derniers feront leurs propres audits afin de vérifier le travail effectué ;
- plusieurs des outils inclus dans le « Total Quality Management » peuvent être utilisés et sont applicables aux problèmes des ERM. Les diagrammes de causes à effets sont efficaces pour identifier les interrelations entre les différents facteurs relatifs à un ERM. Il y a aussi le « brainstorming » qui sert à générer plusieurs idées ou à identifier les multiples causes potentielles d'un problème. Le « Process Flow Analysis » consiste à étaler graphiquement les différentes étapes et l'ordre dans lequel elles s'effectuent ;

- le « waste streaming » est un outil graphique décrivant la relation entre les quantités de matériaux en production et les déchets à la sortie. Il décrit également la façon dont chacun des déchets est traité et récupéré.

Si une approche passive (end-of-pipe) plutôt qu'active est utilisée, les options possibles sont moins nombreuses et surtout, beaucoup moins efficaces :

- séparation des déchets pour les traiter. Cette séparation a pour effet de rendre le traitement plus efficace ;
- étaler les risques. Transférer la responsabilité sur divers groupes de personnes plus qualifiées pour résoudre le problème ;
- accepter les risques et leurs conséquences. Ne faire aucun changement et accepter les conséquences de ses actes.

Stroufe, Melnyk et Montabon (2001) ont poussé plus en profondeur la question : « L'appui de la haute direction aide-t-elle à établir un ERM ? ». Ce support est effectivement un des points les plus importants pour l'implantation de n'importe quel ERM désirant réduire de façon significative les impacts environnementaux. Cependant, il a pu être démontré que les dirigeants perçoivent mieux un ERM si leur compagnie est déjà certifiée ISO 14 000. Il semble donc logique qu'avant de tenter l'implantation d'un ERM, une compagnie doive tout faire afin d'obtenir sa certification ISO 14 000.

Stroufe, Melnyk et Montabon (2001) ont répertorié quatre types d'impacts environnementaux. Il y a les impacts de nature globale, régionale, locale ou humaine.

- les impacts environnementaux de nature globale sont ceux dont le public entend parler le plus souvent. Il s'agit par exemple du réchauffement général de la planète. Il peut également s'agir de la déplétion de la couche d'ozone. Ce sont des impacts très dangereux à long terme et auxquels il est très difficile de remédier. Ce sont les principaux problèmes visés par le protocole de Kyoto ;
- on parle d'impacts régionaux lorsqu'il s'agit d'une perte au niveau de la bio-diversité, de contamination locale de l'air ou de l'eau ou bien lorsqu'il s'agit de perte au niveau de la végétation ;
- les impacts locaux sont généralement des événements fortuits sur les sites industriels comme une contamination du sol ou de l'eau. Les déversements de pétrole comme celui de l'Exxon Valdez sont très médiatisés et font partie de cette catégorie ;
- finalement, il y a les impacts sur la santé humaine. L'amiantose est un très bon exemple d'impact qui existait, il y a 60 ans, mais qui a pu être corrigé.

Afin de minimiser ces impacts, il existe deux solutions possibles. On peut premièrement diminuer notre consommation de biens et de services ou deuxièmement changer la façon dont on satisfait nos besoins, c'est-à-dire continuer à développer des systèmes ERM plus perfectionnés et plus exigeants. Le secteur minier est un grand consommateur de ressources énergétiques. Paszkowski (2002) mentionne dans son article « L'Association minière du Canada reçoit un prix pour son leadership en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre » que les efforts pour diminuer la consommation d'énergie ont été bénéfiques car de 1990 à 1999, les opérations

minières canadiennes l'ont réduite de 25,6%. Durant cette même période, les mines du Canada ont également diminué leurs émissions de gaz à effet de serre de 24,7%. Ces types de gaz se révèlent nocifs car en restant pris dans l'atmosphère, la chaleur peut s'évacuer plus difficilement de notre planète causant le réchauffement planétaire.

Selon le site internet de Environnement Canada, plusieurs compagnies minières Canadiennes ont réalisé des exploits. Prenons par exemple le compagnie minière TeckCominco. Par l'entreprise de sa filiale en propriété exclusive, Cominco Engineering Services Ltd. (CESL), a mis au point un procédé hydrométallurgique (procédé qui recouvre l'ensemble des procédés d'extraction de métaux par mise en solution -solvant acide ou basique- et par des traitements de lixiviation et d'électrolyse) qui est non seulement plus écologique mais permet un taux d'extraction de 99% pour le cuivre. Ce procédé a l'avantage de convertir 90% du soufre en soufre élémentaire et le reste en acide sulfurique, lequel est neutralisé en une matière inerte, le gypse. Le gypse peut être vendu ou éliminé sans danger. De plus, ce procédé n'émet aucune émission de dioxyde de soufre. Les éléments dangereux comme l'arsenic sont quant à eux convertis en composés stables qui ne libèrent pas d'arsenic soluble dans l'environnement. Ce procédé permet de produire du cuivre de grande pureté et puisqu'il n'y a pas de rejets de polluants dans l'atmosphère, les dépenses en immobilisations et les frais d'exploitation sont beaucoup moindres, et le problème de l'élimination de l'acide sulfurique ne se pose pas.

Environnement Canada mentionne également une industrie minière canadienne ayant réussi de grandes améliorations, la Compagnie minière et métallurgique de la baie d'Hudson limitée. Dans les années 1980, les seuils limites de

pollutions tels que prescrits par les règlements provinciaux demandaient une réduction de 25% des émissions de dioxyde de soufre et de 50% des émissions de particules. La compagnie examina des méthodes de traitement pour les dégagements gazeux chargés de dioxyde de soufre des procédés. Elle entreprit de perfectionner ses techniques de traitement du zinc en mettant en exploitation la première installation de lessivage sous pression. Le concentré de zinc est plongé directement dans une solution d'électrolyte sans produire de dégagements gazeux. Ce nouveau procédé permettait l'atteinte des objectifs de réduction des émissions de SO_2. Cependant, il ne permettait pas de ramener les émissions de particules à un niveau acceptable. Pour réduire ces émissions, des études ont été réalisées et il a été décidé d'installer un système amélioré de manipulation des gaz de fonderie afin de réduire la quantité de déversements et de gaz échappant au système de collecte. Le nouveau système comprenant des hottes de refroidissement par eau et un dépoussiéreur électrostatique a réduit de plus de 90% la quantité de déversements de gaz. Par rapport aux valeurs de 1988, les améliorations des paramètres pour 2002 sont des réductions du dioxyde de soufre de 30%, de la quantité totale de particules de 65%, du cadmium de 60%, du plomb de 52%, de l'arsenic de 65% et du mercure de 97%.

Cependant, ce ne sont pas toutes les compagnies qui réussissent à atteindre leurs objectifs. Kamp-Roelands et Hibbitt (2002) indiquent que même si plusieurs compagnies font des progrès en ce qui a trait à la conservation de l'environnement, plusieurs compagnies d'envergure éprouvent encore de la difficulté à progresser dans cette voie.

CHAPITRE 3 : CONTEXTE

La mine Jeffrey, complexe d'amiante à ciel ouvert, a été choisie comme cadre de réalisation de cette étude. Ce chapitre a pour but de décortiquer l'usine, ses produits ainsi que la façon dont elle est gérée dans ses moindres détails afin d'en saisir le fonctionnement et les interactions entre les différentes structures. Ce chapitre commence par un bref historique de la mine Jeffrey et une description de ce qu'est l'amiante. Suivent deux sections sur le fonctionnement de l'usine et les produits finis, expliquant le fonctionnement général de J.M. Asbestos. Les deux sections suivantes, la structure du moulin #6 et les ressources consommées, sont plus détaillées et expliquent précisément ce qui est plus pertinent à cette étude. Suivront ensuite une section sur le pilotage et une dernière relative à la tarification d'électricité qui s'avèrent utiles pour comprendre la gérance du moulin et son effet direct sur les coûts.

3.1 Historique

Selon Matthew Farfan (2001) du CyberMagazine Patrimoine des Cantons, c'est au début du 19^{e} siècle que la région d'Asbestos accueille ses premiers habitants. Ce sont des Américains, pour la plupart des Loyalistes anglais fuyant la révolution américaine. Viennent ensuite des Britanniques, des Écossais et des Irlandais qui sont à la recherche de grands espaces cultivables. Vers la fin de ce siècle, les habitants de Richmond remarquent à environ 20 kilomètres au Nord-Est de leur ville, sur le territoire de ce qui allait devenir plus tard la ville d'Asbestos, une matière étrange. Cette matière se présente en veines dans la roche d'une colline appelée « Webb's Ledge » et avait été repérée quelques années plus tôt. C'est Evan Williams, un mineur gallois, qui le premier, a

identifié l'amiante avec certitude et a pu, en 1881, en évaluer la valeur commerciale

Dans la même année, un cultivateur du nom de W. H. Jeffrey, en commence l'exploitation à un rythme de 2100 tonnes/année. Mr Webb, propriétaire du terrain reçoit une redevance de 10$/tonne de fibre extraite pendant l'été et 5$/tonne de celle extraite l'hiver. En 1895, le rythme de production atteint 2300 tonnes/année. C'est au cours de cette même année que la mine est vendue à un groupe anglais et deux ans plus tard, en 1897, elle est nommée : « The Asbestos and Asbestic Company ». La compagnie Manville Asbestos en prend le contrôle à son tour en 1916 pour former, en 1918, la compagnie Johns-Manville Canada Inc., qui est vendue en 1983 à un groupe d'investisseurs canadiens et porte depuis ce temps le nom de J.M. Asbestos Inc.

Au début, des méthodes primitives d'exploitation sont utilisées. Après le dynamitage, l'amiante est recueilli manuellement dans l'excavation produite. Le premier chevalement (construction utilisée pour extraire le minerai du puits) est actionné par un seul cheval. Avec les années, les méthodes de production deviennent beaucoup plus sophistiquées. La mine à ciel ouvert s'étend aujourd'hui sur un diamètre de 2 kilomètres pour une superficie de 6 kilomètres carrés et est profonde de plus de 350 mètres.

Au cours des ans, la ville d'Asbestos se développe autour de la mine. De grandes parties de son territoire sont intégrées à l'expansion de cette immense mine avec comme conséquence un déplacement du centre-ville à plusieurs reprises au cours des années.

3.2 L'amiante

L'amiante, qui se répartit en deux groupes, les amphiboles et les serpentines, est un minéral utilisé depuis près de 2000 ans dans la fabrication des tissus d'incinération, mèches de lampes à l'huile, matériaux de friction et d'isolation, textiles, amiante-ciment, etc.

Le groupe des amphiboles comprend la crocidolite, l'amosite, l'anthophyllite, l'actinolite et la trémolite. Ils font partie d'un groupe de silicates à deux clivages parfaits et faciles à briser. Ils sont plus friables, c'est-à-dire qu'ils se transforment facilement en poussière, et par conséquent peuvent être dangereux pour la santé.

La seule forme d'amiante du groupe des serpentines, le chrysotile, est un silicate hydraté fibreux qui se trouve à l'état naturel. Ce type de fibre est produit à la mine Jeffrey. Il est imputrescible, résiste à la plupart des produits chimiques et possède une contrainte de rupture élevée. Cette fibre est la moins poussiéreuse et sans danger pour la santé lorsqu'elle est utilisée de façon sécuritaire. Le chrysotile, qui réagit à l'acide, a tendance à se dissoudre dans les poumons, à moins que ceux-ci n'aient été surchargés par exposition à des niveaux trop élevés et non contrôlés. Tous les types de fibres ont tendance à jouer le rôle d'irritants dans les poumons. Dans le passé, la plupart des problèmes associés au chrysotile découlaient des conditions qui existaient en milieu de travail, tant lors de la manipulation que de l'utilisation. Depuis que les conditions de travail se sont améliorées et que les travailleurs sont mieux protégés, les dangers associés au chrysotile ont énormément diminué et sont limités grâce à la technologie actuelle.

Le chrysotile, dont l'extraction commerciale a commencé en Oural (Russie), en Italie et au Canada, est maintenant principalement utilisé dans les matériaux de friction et de forte densité et aussi dans l'amiante-ciment. En fait, 90% de la production mondiale de chrysotile sert à la fabrication de l'amiante-ciment dont les principales qualités sont la durabilité et l'excellent rapport entre la qualité et le prix. Les principaux pays producteurs et consommateurs d'amiante sont présentés au tableau 3.1.

Tableau 3.1 - Production et consommation mondiale d'amiante

Production		Consommation	
Russie	36%	Extrême-Orient	42%
Canada	19%	Russie et Kazakhstan	25%
Chine	14%	Moyen-Orient et Inde	12%
Brésil	11%	Amériques du Sud et Centrale	11%
Zimbabwe	7%	Afrique	4%
Kazakhstan	6%	Europe	3%
Grèce	3%	Amérique du Nord	3%
Inde	1%		
Autres	3%		

Sur son contrat d'achat, le client qui fait une commande d'amiante, doit absolument spécifier les caractéristiques physiques requises, c'est-à-dire la longueur de la fibre, sa résistance, etc. Alors avant d'envoyer les produits finis vers l'ensachage, des inspections doivent être effectuées à l'aide de divers tests afin de s'assurer que les caractéristiques physiques de chaque produit fabriqué soient adéquates. Les principaux tests effectués à la mine Jeffrey sont :

- Le Quebec Standard (QS)

- La valeur instantanée (IVT)
- Le rotap

Ces trois premiers tests sont les plus importants parce qu'habituellement, s'ils obtiennent de bons résultats, les vérifications subséquentes devraient être positives. Voici la procédure normale pour effectuer chacun de ces trois tests.

3.2.1 Le Quebec Standard (QS)

C'est un test de classification à sec par longueur de la fibre. Un échantillon de 20 onces de produit est mis dans une presse à fibres hydraulique. Après ce traitement, 16 onces de fibres sont récupérées et déposées dans la boîte supérieure de l'appareil Quebec Standard. Il s'agit d'une superposition de paniers dont les treillis sont de grosseurs différentes, c'est-à-dire ½ maille, 4 mailles, 10 mailles et une assiette appelée plat qui récupère la fibre réussissant à passer à travers tous les treillis. Lorsque le traitement est terminé, les fibres des différents treillis et du plat sont pesées. Le poids de fibres dans chaque panier doit correspondre aux normes requises par la demande du client.

3.2.2 La valeur instantanée (IVT)

Ce test consiste à peser un échantillon de 20 onces de produit. L'échantillon est ensuite arrosé avec de l'eau et mis à sécher au four pendant environ 10 minutes ou jusqu'à ce qu'il soit complètement sec, et il est ensuite repesé. La perte de poids résultante doit correspondre à ce qui est demandé par le client.

3.2.3 Le rotap

Le test du rotap se fait à l'aide d'un échantillon de 50 ou de 100 grammes. L'échantillon de fibres d'amiante est déposé dans un appareil à secouer les cribles. Il s'agit d'un arrangement de tamis superposés. Tout comme pour le Quebec Standard, les fibres de chaque crible sont pesées et les résultats doivent être dans l'écart de valeur demandé par l'acheteur.

3.3 Fonctionnement de la mine et de l'usine étudiée

Toutes les étapes de production sont réalisées directement sur le site de la mine et sont présentées à la figure 3.1. La première, l'extraction du minerai, s'effectue dans la mine à ciel ouvert. Le forage se fait aux endroits qui ont été planifiés par le service d'ingénierie et marqués par les arpenteurs. Les trous sont ensuite remplis d'explosif et, quand le raccordement des fils est terminé, le sautage peut être effectué. Des camions font ensuite le marinage (transport du minerai) du fond de la mine jusqu'au concasseur primaire où se fait une première réduction de la roche. Du concasseur primaire, le minerai est ensuite dirigé vers le moulin #5. C'est dans ce bâtiment que se situent les concasseurs secondaires qui ont pour but de réduire encore une fois la roche. Il s'y trouve également des tamiseuses qui séparent la roche de la fibre. Ayant subi ce traitement, le minerai est ensuite remisé dans l'entrepôt de minerai sec. Environ 60% de ce qui pénètre dans le concasseur primaire se retrouve à cet endroit, 6% est évacué en eau et le reste rebuté. L'entrepôt de minerai sec a été construit avec une capacité totale d'environ 14 000 tonnes. Mais en réalité, pour éviter les problèmes de surcharge et, tenant compte des problèmes de dos-de-cheval

(minerai restant coincé dans l'entrepôt), l'entrepôt a une capacité réelle de 10 000 tonnes.

C'est cet entrepôt qui alimente les 16 lignes de traitement (lignes primaires) de l'usine, c'est-à-dire le moulin #6 (annexe 1). On donne le nom de ligne à un trajet de plusieurs machines de traitement suivi par le minerai. Le minerai y subit son traitement final de fragmentation et de séparation, c'est-à-dire que la fibre est complètement séparée de la roche. La roche est envoyée avec les rebuts et les fibres obtenues sont les fractions primaires (produits intermédiaires). Les fractions primaires seront ensuite mélangées selon divers ratios et donneront les produits finis. C'est le moulin #6 qui est le plus grand consommateur d'énergie. Il contient plus de 4000 moteurs. Les agencements de ces machines en différentes lignes, présentés aux annexes 2 à 13, permettent de comprendre en détail les étapes suivies par le minerai et la fibre tout au long de leur traitement et de calculer les conséquences sur la consommation énergétique que provoque l'arrêt de certaines parties du moulin #6 (notons qu'une grande partie de la difficulté est due aux nombreux transferts qui lient ces lignes entre elles).

Les moteurs qui consomment le plus d'électricité sont principalement ceux des « hurricane pulvirizer » (150 CV), des « broyeurs à marteaux » (150 CV) et des « fiberizers » (200 CV). Ceux-ci ont tous pour tâches de procéder à l'ouverture de la fibre, c'est-à-dire la séparer du minerai. Ces l'opérations de traitement sont les plus coûteuses au plan énergétique. À la fin, les produits finis sont ensachés, c'est-à-dire qu'il sont entreposés dans des sacs pour être expédiés aux clients. Le besoin en ressources humaines pour un moulin #6 à pleine capacité est de 130 employés. Les employés se répartissent de la façon

suivante : 4 techniciens de la fibre, 45 employés à l'ensachage, 20 opérateurs, 8 contremaîtres, 30 employés de bureau, 8 employés pour les services et 15 électriciens et mécaniciens.

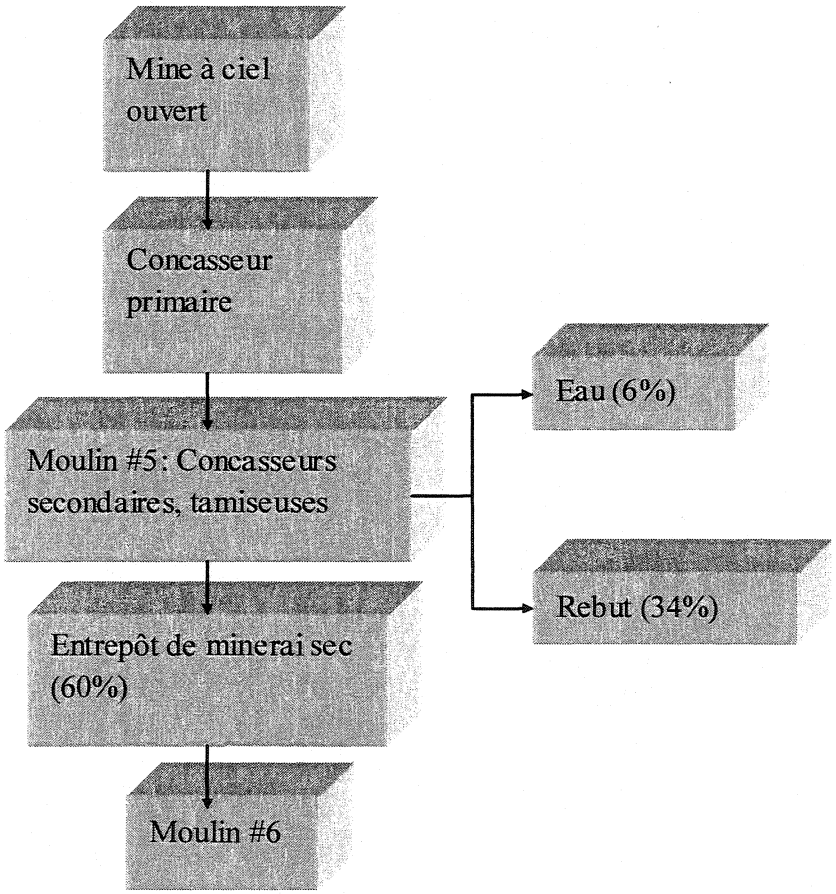


Figure 3.1 - Flux de la roche suite à l'extraction

3.4 Produits finis

Le fonctionnement du moulin #6 est schématisé sur la figure 3.2. Le minerai arrive directement de l'entrepôt de minerai sec. Un traitement mécanique sépare complètement la roche et on ne conserve que la fibre. Les différents types de fibre obtenus, les fractions, sont séparés selon leur longueur ou dans certains cas, selon le circuit (ensemble de lignes) d'où ils proviennent. Les fractions sont les suivantes : AA, AB, AC, B, C, 8A-10A, XZ, SF, WD, CP, Extension. AB et AC sont très semblables et sont considérées comme étant la fraction A. Ces différentes fractions sont ensuite mélangées ensemble afin de fabriquer les produits finis.

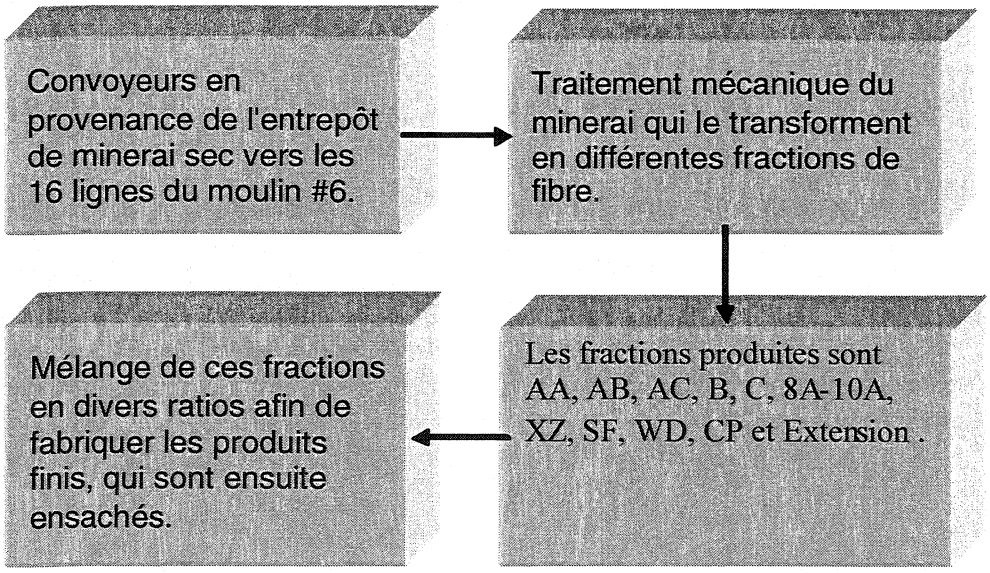


Figure 3.2 - Fonctionnement du moulin #6

Les fractions AA, AB, AC, B et C sont obtenues directement grâce à un système de collecteurs à air. Ces machines fonctionnent de la façon suivante : le minerai emprunte un trajet sur des convoyeurs, la partie roche tombe vers le bas tandis

que la partie fibre est aspirée vers le haut par une pression d'air négative. C'est ainsi que, selon la pression d'air et l'endroit où le séparateur se situe, les fractions sont séparées. La fraction AA est la plus longue et la fraction C la plus courte. La fraction 8A-10A est le produit obtenu à la fin des lignes de traitements 8A et 10A. Les fractions XZ et SF sont produites respectivement par les circuits XZ et SF. Les fractions WD et CP, plus courtes, sont des restants de chacune des lignes du moulin (under flow). Les rebuts sont retraités dans un circuit appelé extension afin de récupérer les fibres qui pourraient avoir été perdues.

Chacun des produits finis fabriqués est le résultat d'une combinaison des fractions précédentes. Le tableau 3.2 présente la production journalière moyenne de chacun des produits finis pendant le mois de septembre 2002.

Tableau 3.2 - Commande réalisée durant le mois de septembre 2002

Produit	Tonnage	% du total
7D15	48-58	9%
7MF-5 et	36-44	7%
7M-O2	27-33	5%
7M-O6	60-74	11%
7T-15	3-5	1%
AX-4200	72-88	14%
PLAST#20	45-55	9%
SP4T30	162-198	30%
SP5R-28-O	72-88	14%
Total	526-642	100%

La variation au niveau de la production de chaque produit fini provient du fait que la production journalière de chacune des fractions intermédiaires n'est pas contrôlée. Ce contrôle n'est pas possible en grande partie parce que la production des fractions est directement dépendante de la sorte de roche qui est extraite de la mine.

3.5 Structure du moulin #6

Afin que la structure du moulin #6 soit bien expliquée, la structure des lignes primaires et des lignes secondaires sera abordée.

3.5.1 Lignes primaires

Le circuit primaire est alimenté par quatre navettes sur rails. Elles font le trajet entre l'entrepôt de minerai sec et le moulin #6. La navette #1 alimente les lignes primaires 1 à 6. La navette #2 quant à elle alimente les lignes primaires 7 à 12. Le service des lignes primaires 13 à 15 est assuré par la navette #6 tandis que la dernière, la ligne primaire 16 est alimentée par la navette #5.

Les six premières lignes fonctionnent chacune à environ 43 tph pour un total de 260 tph. Si la roche utilisée est faible en fibres, le tonnage peut être augmenté jusqu'à 55 tph. Cependant, si la roche est riche en fibres, diminuer le tonnage aidera à réduire les pertes de fibres dans le système. En fonctionnant avec cinq lignes, il est possible, sur de courtes périodes de temps, d'obtenir la même quantité de fibres qu'avec l'utilisation des six lignes. En arrêtant une des lignes 1 à 6, le circuit secondaire ne recevra cependant pas moins de fibres.

Les lignes 7 à 16 fonctionnent chacune à environ 31 (28 à 34) tph pour un total de 310 tph. Si la roche est faible en fibres, le tonnage peut être augmenté jusqu'à environ 38 tph. Les lignes 7 à 16 alimentent en partie les lignes du circuit secondaire. Si deux des lignes 7 à 16 sont arrêtées, la perte de tonnage encourue pour les lignes du circuit secondaire est suffisante pour permettre l'arrêt d'une ligne du circuit secondaire.

Chacune des lignes 8A et 10A fonctionne à un tonnage maximal de 30 à 32 tph. À moins de vouloir diminuer la production totale, elles ne peuvent pas être arrêtées. Ces deux lignes alimentent en partie le circuit secondaire (C-Line).

3.5.2 Lignes secondaires

L'alimentation du circuit secondaire est assurée par deux navettes. La navette #3 s'occupe des lignes 1 à 4 et la navette #4, des deux dernières, soit les lignes 5 et 6. Chacune des lignes du circuit secondaire a un tonnage d'environ 30 tph. C'est le nombre de lignes primaires en fonction qui détermine le nombre de lignes secondaires utilisées.

3.6 Ressources consommées

La première ressource consommée décrite sera l'énergie, c'est-à-dire l'électricité. La puissance facturée est comparée à la puissance souscrite afin de constater les dépassements fréquents.

La deuxième partie concerne les ressources humaines et leur évolution au cours des ans.

3.6.1 Électrique

La facture électrique payée au distributeur est composée de deux facteurs :

- l'abonnement (ou puissance souscrite) qui est un montant fonction du pic de consommation atteint (en Kw)
- la consommation en dessous de la puissance souscrite (en KwH)

La puissance souscrite (niveau de l'abonnement) est la puissance minimale qui sera facturée à une entreprise quelle que soit sa consommation. En dessous de cette consommation, le KwH est facturé à un prix relativement bas, en revanche, si l'entreprise utilise plus de puissance que sa puissance souscrite, elle doit payer des pénalités de surconsommation. La structure de ces pénalités peut se résumer en une augmentation journalière du niveau de la puissance souscrite au niveau de la puissance moyenne maximale appelée sur une période de 15 minutes consécutives. Ainsi, un dépassement de consommation sur 15 minutes se traduit par la hausse de l'abonnement d'un montant proportionnel à ce dépassement SUR TOUTE la journée.

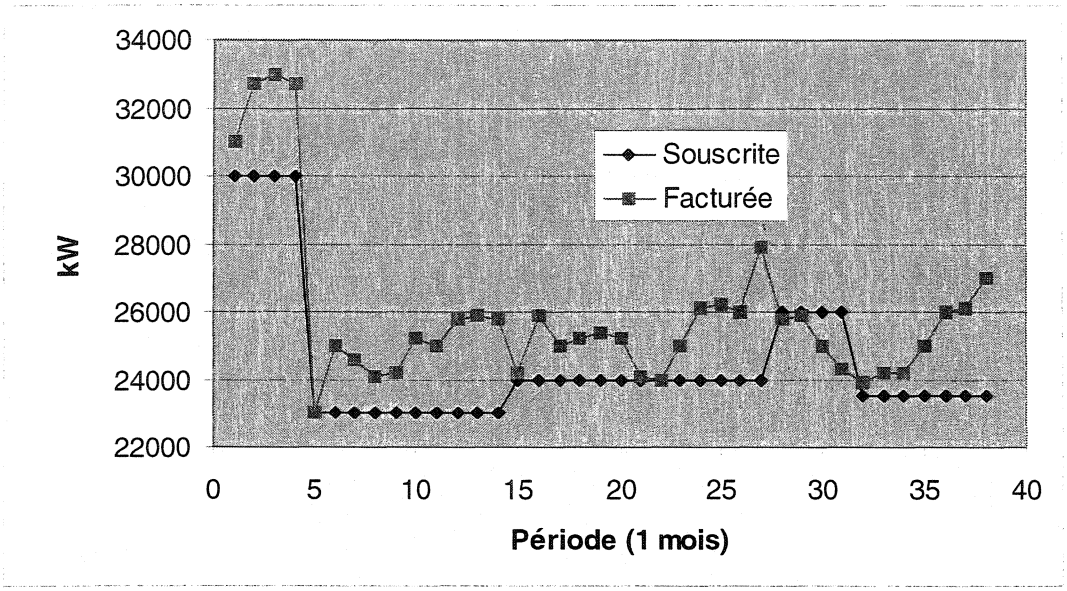


Figure 3.3 - Puissance facturée VS puissance souscrite de 2000 à 2003

L'évolution du coût de la puissance facturée (incluant les dépassements) par rapport à la puissance souscrite, pour J.M. Asbestos, est présentée à la figure 3.3.

Ces dépassements de la puissance souscrite sont donc chèrement pénalisés. Le modèle qui sera décrit dans le prochain chapitre ne peut pas les simuler, cependant il peut permettre de connaître plus efficacement la consommation électrique du moulin et de pouvoir fixer une puissance souscrite qui sera plus près de la puissance facturée. L'élimination des primes de dépassements pourrait donc représenter des économies importantes. La puissance souscrite peut être augmentée en tout temps sur demande écrite du client mais pas plus d'une fois par mois. La puissance souscrite peut également être diminuée mais seulement après un délai d'un an suivant la dernière augmentation ou diminution de la puissance souscrite ou selon l'entente établie entre le client et

Hydro-Québec. Une entente existe entre Hydro-Québec et J.M. Asbestos sur ce point mais elle est confidentielle.

C'est en grande partie une mauvaise connaissance interne sur la façon de gérer l'énergie et la production en général qui cause des dépassements fréquents de la puissance souscrite.

La figure 3.4 montre la tendance à la baisse de la production depuis 1980. La production annuelle est en baisse constante depuis le début des années 80. Elle est passée de plus de 450 000 tonnes, à moins de 150 000 par année, en seulement 25 ans. Les données précises quant à la consommation énergétique et la puissance souscrite pour les années 80 et 90 ne sont pas disponibles. Cependant, une chose est certaine, nous savons que si la production a diminué régulièrement au cours des ans, la puissance souscrite n'a pas énormément diminué, ce qui signifie que J.M. Asbestos continue de payer presque autant pour une production beaucoup moindre.

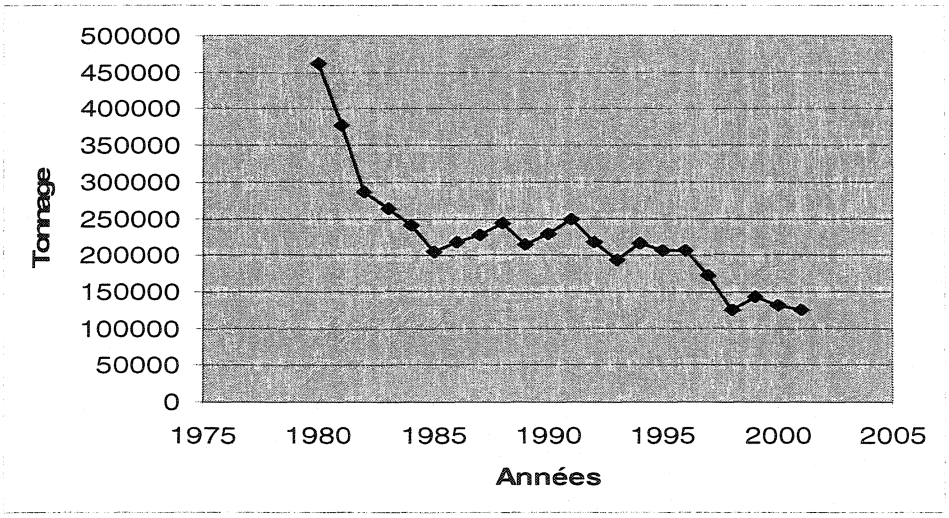


Figure 3.4 - Production annuelle à J.M. Asbestos

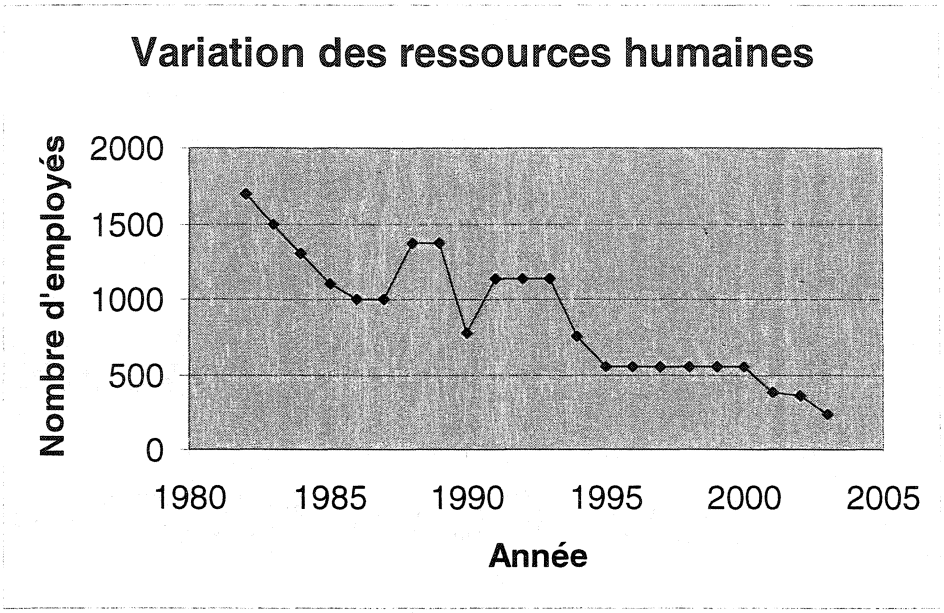


Figure 3.5 - Évolution des ressources humaines à J.M. Asbestos

3.6.2 Humaines

La figure 3.5 présente l'évolution des ressources humaines à J.M. Asbestos depuis 1982. Le nombre total d'employés en 1982 était de 1700 et après une baisse constante, il s'établissait à environ 1000 employés en 1987. Les deux augmentations du nombre d'employés, vers la fin des années 80 et au début des années 90 sont dues à des expansions de la mine à ciel ouvert. Le nombre d'employés était de 231 lors de la fermeture.

3.7 Pilotage à Jeffrey

Le pilotage du moulin #6, c'est-à-dire la façon dont sont contrôlées les différentes lignes et fractions résultantes, se fait par essais et erreurs. Si le produit fini obtenu ne correspond pas à ce qui est désiré par le client, des

modifications à l'usine de traitement sont faites et de nouveaux tests sont effectués jusqu'à ce qu'il y ait conformité

Le pilotage manuel de l'usine se fait de deux manières. La première façon de faire est d'aller directement sur une machine et d'y faire une modification à l'aide d'un commutateur par exemple. La deuxième façon est de se servir du poste de contrôle. Certaines des modifications peuvent se faire électroniquement à l'aide de ce poste. Il n'existe cependant aucune méthode ou démarche à suivre quant aux modifications à effectuer lorsque c'est nécessaire. Les techniciens en charge ont beaucoup d'expérience et sont donc capables de faire les modifications.

3.8 Tarification de l'électricité

Les pratiques de DSM favorisent le lissage des courbes de consommation électrique. Afin de faciliter ces pratiques, le tarif mensuel général L s'appliquant aux industries dont la puissance à facturer minimale est de 5 000 kilowatts ou plus a été développé. Le tarif mensuel L (T_L) change à chaque année donc c'est celui de 2003 qui sera utilisé. Le tarif mensuel L utilisé à Asbestos est structuré comme suit :

$$T_L = EV_k \cdot f_1 + EN_k \cdot f_2 + D_m$$
$$D_m = (P_m - 1.1 \cdot EV_k) \cdot f_3 \quad \text{si } P_m \geq 1.1 \cdot EV_k$$

où T_L est la tarification mensuelle (\$), EV_k est la puissance souscrite (kW), f_1 est le tarif de souscription (ici, il est de 7,7983\$/kW), EN_k est la consommation mensuelle en kWh, f_2 le tarif de consommation (dans notre cas, il est de

0,0242$/kWh) et D_m la prime de dépassement, qui n'est payée que si la puissance utilisée dépasse 110% de la puissance souscrite, comme expliqué ci-après. La puissance souscrite est la puissance minimale qui sera facturée au client et ce, même si la puissance utilisée au cours de la période est plus basse que la souscription.

Selon les informations obtenues d'Hydro-Québec, lorsque la puissance maximale atteinte (P_m) excède 110% de la puissance souscrite, l'excédent est assujetti à une prime de dépassement (f_3) quotidienne de 6,26$/kW. Cette prime s'applique au nombre de kW résultant du dépassement le plus élevé de la journée. Cependant, pour une période de consommation de un mois, le montant total des primes de dépassement quotidiennes est limité au montant qui résulterait d'une prime de dépassement mensuelle maximale de 18,78$/kW. Il est à noter que la prime sur la détérioration du facteur de puissance est négligée.

La consommation énergétique mensuelle pour 2001 et 2002 ainsi que les coûts qui s'y rattachent pour chacun des départements de la mine Jeffrey sont présentés aux annexes 14 et 15. On y constate que le complexe J.M. Asbestos fonctionne à l'aide d'une puissance mensuelle moyenne de 25 000 kW. Le moulin #6 représente à lui seul 55% de la facture totale d'électricité. Plus du trois-quart de ce 55% est payé pour le fonctionnement des 4000 machines du moulin #6.

CHAPITRE 4 : MÉTHODOLOGIE

Rappelons que le but de ce mémoire est d'examiner la pertinence de tenir compte des ressources humaines et de la consommation énergétique au moment de la planification de la production lorsque les coûts s'y rattachant deviennent non négligeables et dépendent de la planification elle-même. La première section présente la méthodologie suivie, en passant par la cueillette de données et le développement des gammes et des nomenclatures. Ensuite, il y sera expliqué de quelle façon le modèle mathématique a été développé et son implémentation en langage de programmation AMPL.

4.1 Méthodologie

Cette section porte sur les étapes de la méthode (voir figure 4.1) qui a permis de récolter les données sur ce que fabrique exactement chaque ligne ainsi que leur apport à la production des produits finis.

4.1.1 Cueillette de données

Les premières visites au moulin #6 ont été faites en compagnie de techniciens de la fibre. Ces techniciens ont pour responsabilité de faire les réglages manuels du moulin #6 et de vérifier avec le personnel du laboratoire si la fibre obtenue est conforme à ce qui est demandé par le client. C'est au cours de ces rencontres qu'il a été possible de se familiariser avec les opérations.

Tous les plans expliquant les processus du moulin #6 ont été obtenus et étudiés en profondeur, ce qui a permis de connaître toute la machinerie et la

constitution de chacune des lignes et circuits. La consommation électrique de chacun des types de machines a également été étudiée.

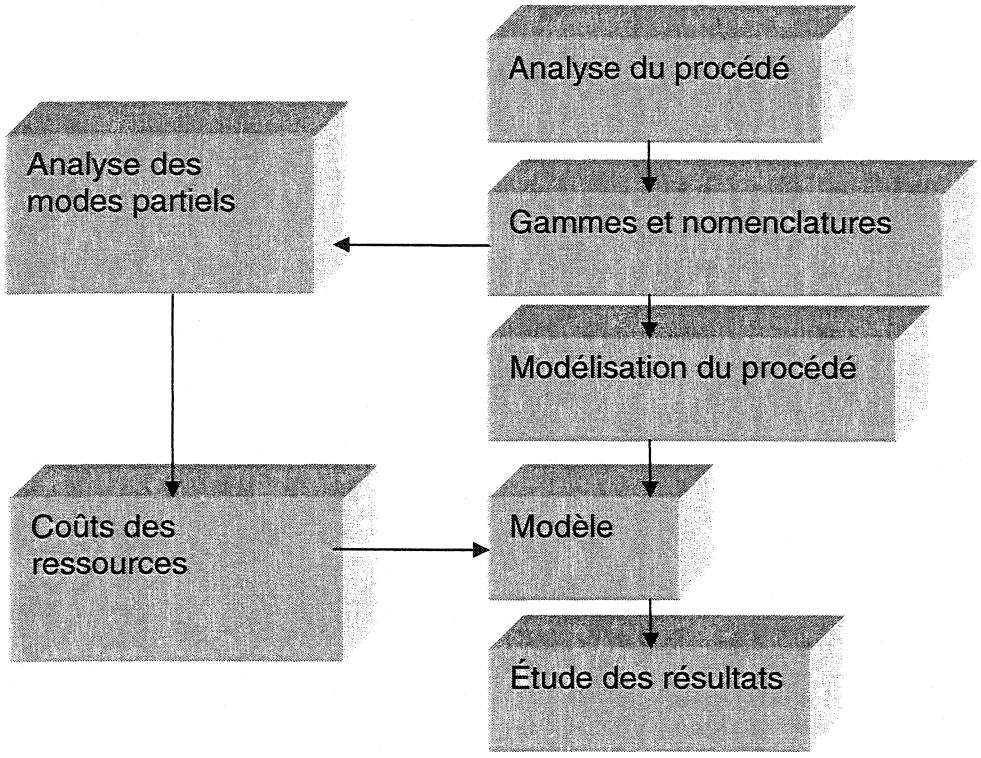


Figure 4.1 - Méthodologie suivie

4.1.2 Gammes et nomenclatures

Lorsque le moulin fonctionne, c'est toujours à pleine capacité. La puissance maximale d'électricité atteinte est plus élevée dans ces circonstances. Il a donc été nécessaire d'imaginer (de concevoir) des modes de fonctionnement partiels, où certaines lignes sont arrêtées et dont l'utilisation atteindra des puissances maximales moindres. Pour les besoins de notre étude, le fonctionnement actuel

du moulin #6 sera appelé le mode 1. Le tableau 4.1 présente les différents modes de fonctionnement partiels, qui sont de plus en plus réduits donc, de moins en moins énergivores. Le tonnage étant connu pour chacune des lignes, celui de chacun des modes de fonctionnement a pu être déterminé.

Tableau 4.1 - Lignes en fonction

	Mode 1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11
Ligne 1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
L2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
L3	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
L4	X	X	X	X	X	X	X	X			
L5	X	X	X	X	X	X	X				
L6	X	X	X	X	X	X					
L7	X	X	X	X	X						
L8	X	X	X	X	X						
L9	X	X	X	X							
L10	X	X	X	X							
L11	X	X	X								
L12	X	X	X								
L13	X	X									
L14	X	X									
L15	X										
L16	X										
Fractions (t/quart)	**568**	**506**	**444**	**382**	**320**	**258**	**215**	**172**	**129**	**86**	**43**

Les 12 modes partiels choisis ont été sélectionnés comme étant les plus représentatifs après consultation avec les dirigeants de J.M. Asbestos. D'autres modes pourraient éventuellement être ajoutés. Comme le moulin #6 n'a jamais

fonctionné selon les modes partiels qui ont été proposés, le nombre d'employés nécessaires pour chacun des modes est inconnu. Il y a 130 personnes qui travaillent directement au moulin #6 quand il fonctionne à pleine capacité. Le nombre d'employés nécessaires pour chacun des modes de fonctionnement a été estimé de deux manières. Les travailleurs nous ont fournis une première estimation (Méthode 1, tableau 4.3). La deuxième en fixant un nombre minimum de 2 employés plus 8 employés par ligne en opération (Méthode 2, tableau 4.2).

Tableau 4.2 - Calculs des ressources humaines nécessaires, Méthode 2

Mode	Nombre de lignes en fonction	# minimum d'employés	8 employés par ligne en opération	Employés au total
1	16	2	16 Lignes * 8 employés = 128	130
2	14	2	14 Lignes * 8 employés = 112	114
3	12	2	12 Lignes * 8 employés = 96	98
4	10	2	10 Lignes * 8 employés = 80	82
5	8	2	8 Lignes * 8 employés = 64	66
6	6	2	6 Lignes * 8 employés = 48	50
7	5	2	5 Lignes * 8 employés = 40	42
8	4	2	4 Lignes * 8 employés = 32	34
9	3	2	3 Lignes * 8 employés = 24	26
10	2	2	2 Lignes * 8 employés = 16	18
11	1	2	1 Lignes * 8 employés = 8	10
12	0	2	0 Lignes * 8 employés = 0	2

Ces deux méthodes seront simulées. Un autre paramètre intéressant à faire varier est l'effet sur le coût total, si on ne calcule pas de prime de soirée et de nuit aux employés. Si aucune prime n'est payée, le salaire est de 125$ par jour

pour chaque employé peu importe la période de travail. Cependant, si des primes sont calculées le salaire est de 125$/jour, 150$/soirée et 175$/nuit.

Le nombre de kilowatts nécessaires pour chacun des modes a également été calculé de deux façons différentes. La première a été fournie par les estimations d'un contremaître (Méthode 1, tableau 4.3) et la deuxième en assumant un nombre de kilowatts égal pour chacune des lignes (Méthode 2, tableau 4.3). Ces deux méthodes seront simulées. Le tableau 4.3 présente les caractéristiques propres à chacun des modes. La production par quart n'inclut pas les rebuts mais seulement les différentes fractions.

Tableau 4.3 - Caractéristiques des modes

Mode	Arrêt de lignes	Prod. de fractions (t/quart)	R.H. Méth. 1	R.H. Méth. 2	kW Méth. 1	kW Méth. 2
1	aucun	568	130	130	25280	25280
2	15 et 16	506	110	114	23800	22745
3	13 à 16	444	90	98	22320	20210
4	11 à 16	382	80	82	19340	17675
5	9 à 16	320	70	66	16360	15140
6	7 à 16	258	60	50	14880	12605
7	6 à 16	215	50	42	13400	11338
8	5 à 16	172	40	34	10920	10070
9	4 à 16	129	30	26	9440	8803
10	3 à 16	86	20	18	7960	7535
11	2 à 16	43	10	10	6480	6268
12	1 à 16	0	0	2	0	0

Prod. = Production, R.H. = Ressources Humaines, Méth. = Méthode

Il a été décidé, afin de bien comprendre la constitution des produits finis, de les décortiquer en leurs fractions primaires. Les techniciens à J.M. Asbestos ne travaillent pas en fonction des fractions car ils connaissent par expérience la

configuration pour fabriquer chacun des produits. La constitution des nomenclatures a été effectuée à l'aide du tableau 4.4 donnant des renseignements sur la production horaire de chacune des fractions.

À partir des tonnages horaires, le but est d'obtenir le pourcentage de chaque fraction que produit chacune des lignes. Il est à noter que chacune des lignes ne fabrique pas les mêmes proportions de fractions. Puisque le tonnage de chaque mode ainsi que les lignes en fonction sont connus, il sera possible d'estimer, pour chaque mode, le volume de production de chaque fraction.

Tableau 4.4 - Tonnage horaire des fractions

Fraction	Tonnage horaire	% du total
AA	0,1	0,02%
AB, AC (appelée A)	18	3,00%
B	5	0,83%
8A – 10A	3	0,50%
C	7	1,17%
XZ	17	2,83%
SF	15	2,50%
WD	5	0,83%
CP	4	0,67%
Extension	5	0,83%
Rebuts	520,9	86,82%
Total	600	100,00%

En soustrayant le tonnage de rebut, la production horaire de fractions est donc de 79,1 tph lorsque toutes les lignes fonctionnent. Sur un quart de travail de 8 heures, cela représente 633 tonnes de fractions. En considérant, les pertes de temps au cours d'un quart (environ 10%), il reste une production de fractions (en

mode 1), de 568 t/quart (voir tableau 4.3). Un responsable du moulin #6 a fourni des renseignements sur la répartition de chacune des fractions entre les lignes de production. Les résultats sont présentés dans le tableau 4.5 et les calculs sont à l'annexe 16.

Tableau 4.5 - Répartition de la production des fractions

Fraction	AA	AB	AC	B	CP	EXT	SF	WD	XZ	C
L1	0.0075	1.125	0.3		0.3	0.3125	1.125	0.375	1.41667	
L2	0.0075	1.125	0.3		0.3	0.3125	1.125	0.375	1.41667	
L3	0.0075	1.125	0.3		0.3	0.3125	1.125	0.375	1.41667	
L4	0.0075	1.125	0.3		0.3	0.3125	1.125	0.375	1.41667	
L5	0.0075	1.125	0.3		0.3	0.3125	1.125	0.375	1.41667	
L6	0.0075	1.125	0.3	0.25	0.3	0.3125	1.125	0.375	1.41667	
L7	0.00458	0.675	0.2625	0.475	0.18333	0.3125	0.6875	0.22917	0.70834	
L8	0.00458	0.675	0.2625	0.475	0.18333	0.3125	0.6875	0.22917	0.70834	
L9	0.00458	0.675	0.2625	0.475	0.18333	0.3125	0.6875	0.22917	0.70834	
L10	0.00458	0.675	0.2625	0.475	0.18333	0.3125	0.6875	0.22917	0.70834	
L11	0.00458	0.675	0.2625	0.475	0.18333	0.3125	0.6875	0.22917	0.70834	
L12	0.00458	0.675	0.2625	0.475	0.18333	0.3125	0.6875	0.22917	0.70834	
L13	0.00458	0.675	0.28125	0.475	0.18333	0.3125	0.6875	0.22917	0.70834	
L14	0.00458	0.675	0.28125	0.475	0.18333	0.3125	0.6875	0.22917	0.70834	
L15	0.00458	0.675	0.28125	0.475	0.18333	0.3125	0.6875	0.22917	0.70834	
L16	0.00458	0.675	0.28125	0.475	0.18333	0.3125	0.6875	0.22917	0.70834	
L8A	0.00458				0.18333		0.6875	0.22917	0.70834	
L10A	0.00458				0.18333		0.6875	0.22917	0.70834	
L. sec 1										1.16667
L. sec 2										1.16667
L. sec 3										1.16667
L. sec 4										1.16667
L. sec 5										1.16667
L. sec 6										1.16667
tph	0.1	13.5	4.5	5	4	5	15	5	17	7

Les données du tableau précédent montrent le tonnage horaire de chaque fraction et ce, pour chacune des lignes de production. Grâce à ces données, il est maintenant possible de calculer la proportion fabriquée de chaque fraction pour chacune des lignes et ce, pour tous les modes de production.

Pour ce faire, soit $tmax_{i,k}$ la proportion fabriquée d'une fraction i pour un mode k donné ; on a :

$$t\max_{i,k} = \frac{x_{i,k}}{Y_k}$$

où $x_{i,k}$ est le tonnage horaire total de la fraction i dont on calcule la proportion fabriquée (pour le mode k) et Y_k le tonnage horaire total pour ce mode k. Les calculs présentés au tableau 4.6 sont donnés en exemple et ont été réalisés pour le mode 1.

Les résultats pour chacun des modes sont présentés dans le tableau 4.7. Ce sont ces résultats qui seront utilisés dans le modèle puisqu'ils indiquent, et ce pour chacun des modes, les pourcentages de chaque fraction. Par exemple, si le mode 1 est choisi pendant un quart de travail, 25% des fractions produites pendant ce quart seront de la fraction A.

Tableau 4.6 - Calculs de répartition des fractions pour le mode 1

AA = Tonnage de fibre AA pour les lignes 1 à 16 / tonnage total des lignes 1 à 16 AA = [(0,0075 tph/Lignes * 6 Lignes) + (0,00458 tph/L * 10 L)] / 72,4742 tph AA = 0,001
A = Tonnage de fibre A pour les lignes 1 à 16 / tonnage total des lignes 1 à 16 A = [[(1,125 tph+ 0,3 tph) * 6L]+[(0,675 tph + 0,2625 tph) * 6L]+[(0,675 tph + 0,28125 tph) * 4L]] / 72,4742 tph A = 0,25
B = Tonnage de fibre B pour les lignes 1 à 16 / tonnage total des lignes 1 à 16 B = 0,25 tph + [(0,275 tph + 0,2 tph) * 10L] / 72,4742 tph B = 0,07
C = Tonnage de fibre C pour 6 lignes secondaires / tonnage total des lignes 1 à 16 C = [(1,16667 tph * 6L)] / 72,4742 tph

C = 0,10

XZ = Tonnage de fibre XZ pour les lignes 1 à 16 / tonnage total des lignes 1 à 16
XZ = [[(1,0625 tph + 0,35417 tph) * 6L] + [(0,35417 tph + 0,35417 tph) * 10L]] / 72,4742 tph = 0,22

WD = Tonnage de fibre WD pour les lignes 1 à 16 / tonnage total des lignes 1 à 16
WD = [(0,375 tph * 6L) + (0,22917 tph * 10L] / 72,4742 tph = 0,06

CP = Tonnage de fibre CP pour les lignes 1 à 16 / tonnage total des lignes 1 à 16
CP = [(0,3 tph * 6L) + (0,18333 tph * 10L] / 72,4742 tph
CP = 0,05

SF = Tonnage de fibre SF pour les lignes 1 à 16 / tonnage total des lignes 1 à 16
SF = [(1,125 tph * 6L) + (0,6875 tph * 10L] / 72,4742 tph
SF = 0,19
EXT = Tonnage de fibre EXT. pour les lignes 1 à 16 / tonnage total des lignes 1 à 16
EXT = [(0,3125 tph * 16L)]
EXT = 0,07

L = Lignes, Tph/L = Tonne par heure par Ligne

Tableau 4.7 - Répartition des fractions pour chacun des modes

	AA	A	B	C	XZ	EXT	WD	CP	SF
Mode 1	0.1%	24.8%	6.9%	9.7%	21.5%	6.9%	6.3%	5.0%	18.8%
Mode 2	0.1%	22.2%	6.3%	11.4%	22.3%	7.0%	6.4%	5.0%	19.3%
Mode 3	0.1%	24.0%	5.0%	12.0%	22.2%	6.3%	6.0%	5.0%	19.4%
Mode 4	0.1%	25.4%	4.1%	10.4%	23.4%	6.4%	6.4%	5.4%	18.4%
Mode 5	0.1%	25.0%	3.2%	11.2%	24.1%	6.0%	6.2%	5.0%	19.2%
Mode 6	0.1%	25.9%	1.0%	7.0%	26.0%	6.0%	7.0%	6.0%	21.0%
Mode 7	0.1%	26.0%	0.0%	8.8%	25.8%	5.9%	7.0%	5.6%	20.8%
Mode 8	0.1%	25.8%	0.0%	11.0%	25.6%	5.8%	7.0%	5.0%	19.7%
Mode 9	0.1%	26.9%	0.0%	7.0%	26.0%	6.0%	7.0%	6.0%	21.0%
Mode 10	0.1%	25.7%	0.0%	11.0%	25.9%	6.0%	6.8%	4.8%	19.7%
Mode 11	0.1%	23.1%	0.0%	19.1%	23.4%	5.0%	6.1%	5.0%	18.2%
Mode 12	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

Les recettes des produits finis, c'est-à-dire les types et les pourcentages de fractions nécessaires à la fabrication de chaque produit fini (voir tableau 4.8), seront également intégrés au modèle.

Tableau 4.8 - Constitution des produits finis

Produits finis	Fractions	Proportions
7D15	XZ	30%
	CP	30%
	EXT	40%
7MF-5	XZ	60%
	SF	40%
7M-O2	XZ	100%
7M-O6	XZ	60%
	SF	40%
7T-15	CP	100%
AX-4200	A	6%
	EXT	10%
	B	37%
	CP	20%
	XZ	27%
Plast#20	B	7%
	AA	10%
	A	83%
SP4T30	A	85%
	B	15%
SP5R-28-O	A	43%
	B	57%

4.2 Modélisation mathématique

Il est maintenant temps d'expliquer de quelle façon s'est effectué le choix du modèle ainsi que les étapes de développement du modèle mathématique.

4.2.1 Choix du modèle

Une simulation aurait pu permettre de voir et de connaître le fonctionnement exact du moulin et de trouver ainsi une façon optimale de le faire fonctionner. L'idée a cependant été abandonnée à cause de la complexité de l'opération. Un modèle mathématique permettant de découvrir la meilleure façon de piloter l'usine a été préféré car pour le créer, il n'est pas nécessaire de modéliser complètement tous les équipements du moulin. Il suffit de connaître certaines bases telles que les gammes, les nomenclatures ou bien les tonnages. Un modèle mathématique permet d'établir facilement des contraintes et de changer les conditions de fonctionnement du modèle et ainsi de trouver des résultats optimaux.

Le modèle mathématique est d'une élaboration complexe. La compréhension totale des étapes opérationnelles (voir figure 4.2) est obligatoire avant le développement de quelque modèle que ce soit. La connaissance de l'évolution, c'est-à-dire la forme et la désignation que prend la fibre au cours des différentes étapes est impérative.

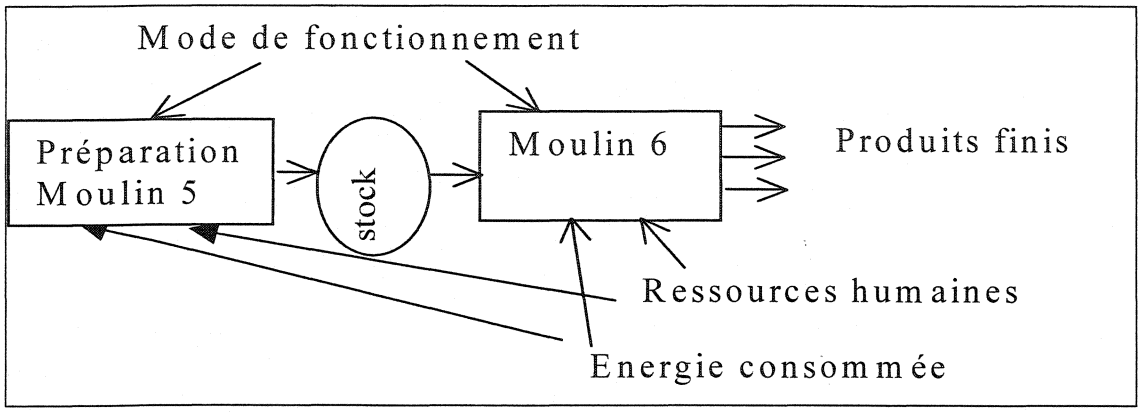


Figure 4.2 - Principe de fonctionnement du moulin

4.2.2 Notation

Les notations nécessaires à l'élaboration du modèle mathématique sont les suivantes :

L'indice « i », où « i » =1,...,10, représente un produit intermédiaire fabriqué.

L'indice « j », où « j » =1,...,9, représente un produit fini fabriqué.

L'indice « t », où « t » =0,...,59, représente les périodes de travail (périodes de 8 heures consécutives).

L'indice « d », où « d » =1,...,20 représente la journée de travail. d = ent (t/3) + 1

L'indice « k », où « k » =1,...,12, représente le mode de travail utilisé.

L'indice $\propto$, où $\propto$=0, 1, 2, représente le quart de travail (0=jour, 1=soir, 2=nuit).

$\propto$ = mod (t/3)

Les simulations s'effectueront sur une période de 20 jours donc 60 quarts de travail. Pour chacun de ceux-ci, le modèle devra déterminer la séquence de modes de travail utilisée. (entre 1 et 12 pour chaque quart de travail)

Les paramètres suivants sont utilisés :

$tmax_{i,k}$	Proportions de chaque produit intermédiaire « i » produit en mode « k » (Calculées au tableau 4.7).
$Q1max_k$	Quantités totales de produit intermédiaire pouvant être produites en mode « k » pour une période de 8 heures (tonnes).
$QFINI_{i,j}$ i=1..10, j=1..9	Fraction de produit « j » obtenu avec le produit intermédiaire « i » (un ratio entre 0 et 1) (tableau 4.8).
$D_{j,t}$ j=1..9	Demande de produit « j » à la période « t » (tonnes).
H_k	Ressources humaines utilisées en mode « k » (nombre de personnes) (tableau 4.3).
EV_k	Puissance de pointe en mode « k » (en Kw) (tableau 4.3).
EN_k	Consommation en mode « k » (en KWh).

$C_{\propto}$ Coût des ressources humaines au quart de travail « $\propto$ » en $/homme/quart (section 4.1.2).

f_1 Coût de l'abonnement électrique en $/kW (section 3.8).

f_2 Coût de la consommation électrique en $/kWh (section 3.8).

V Tonnage maximum de produits finis pouvant être emmagasinés (10 000 tonnes).

Voici maintenant les variables de décision :

$\partial_{k,t}$ Variable binaire = 1 si le mode « k » est utilisé à la période « t »
= 0 si le mode n'est pas choisi

$x_{i,t}$ Tonnage de produit « i » fabriqué à la période « t »

$y_{i,t}$ Niveau de stock en produit « i » à la période « t »

$y_{j,t}$ Niveau de stock en produit « j » à la période « t »

EMAX Puissance maximale atteinte au cours du mois

4.2.3 Formulation

Le modèle mathématique consiste à minimiser la fonction de coût, c'est-à-dire qu'il faut obtenir la combinaison de modes de fonctionnement qui donnera le coût le plus faible tout en produisant la même quantité de produits finis.

Au départ, l'équation de la fonction de coût contenait 4 parties distinctes : les coûts de souscription énergétique, de consommation, de ressources humaines et d'entreposage. L'équation a cependant été simplifiée et seuls les coûts de souscription, de consommation et de ressources humaines ont été conservés (voir tableau 4.9). Le coût d'entreposage a été éliminé parce qu'il ne constitue pas un facteur déterminant. Il ne représente pas un coût important sur le total des coûts d'opération.

La fonction de coût à utiliser est :

$$\min(CT) = \min\begin{pmatrix} f_1 EMAX + f_2 \sum_k \sum_t \partial_{k,t} EN_k + \\ \sum_{d=1}^{20} \sum_{\alpha=0}^{2} \sum_k \partial_{k,3d+\alpha-3} C_\alpha H_k \end{pmatrix}$$

Tableau 4.9 - Détail des coûts

$f_1 EMAX$	Coût de souscription
$f_2 \sum_k \sum_t \partial_{k,t} EN_k$	Coût de l'énergie consommée
$\sum_{d=1}^{20} \sum_{\alpha=0}^{2} \sum_k \partial_{k,3d+\alpha-3} C_\alpha H_k$	Coût relié aux ressources humaines. Le coût de la main d'œuvre dépend de la période (jour, soir ou nuit)

La fonction de coût est sujette à :

$$\sum_k \partial_{k,t} \leq 1 \qquad \forall t \qquad [1]$$

$$\partial_{k,t} \in \{0,1\} \qquad \forall k, \forall t \qquad [2]$$

$$y_{i,t} \leq Q1\max_k \qquad \forall t, \forall k, \forall i \qquad [3]$$

$$x_{i,t} \leq \sum_k \partial_{k,t} * Q1\max_k * t\max_{i,k} \qquad \forall t, \forall i \qquad [4]$$

$$x_{i,t} = \sum_{j=1}^{9} QFINI_{i,j} * x_{j,t} \qquad \forall t, \forall i \qquad [5]$$

$$x_{i,t} = 0 \qquad t = 0, \forall i \qquad [6]$$

$$y_{i,t} = 0 \qquad t = 0, \forall i$$

$$x_{j,t} = 0 \qquad t = 0, \forall j$$

$$y_{j,t} = 0 \qquad t = 0, \forall j$$

$$x_{i,t} \geq 0 \qquad \forall t > 0, \forall i \qquad [7]$$

$$y_{i,t} \geq 0 \qquad \forall t > 0, \forall i$$

$$x_{j,t} \geq 0 \qquad \forall t > 0, \forall j$$

$$y_{j,t} \geq 0 \qquad \forall t > 0, \forall j$$

$$y_{j,t} = y_{j,t-1} + x_{j,t} - D_{j,t} \qquad \forall t > 0, \forall j \qquad \textbf{[8]}$$

$$\sum_{j=1}^{9} y_{j,t} \leq V \qquad \forall t \qquad \textbf{[9]}$$

$$EMAX \geq \partial_{k,t} * EV_k \qquad \forall k, \forall t \qquad \textbf{[10]}$$

Contrainte 1 : Au plus, 1 mode est actif par période. Lorsqu'un mode est choisi, il prend la valeur de 1 et s'il ne l'est pas, la valeur de 0. Cette contrainte spécifie que pour chacune des périodes « t », la somme des valeurs assignées aux modes doit être inférieure ou égale à 1. La somme est donc de 1 si le quart de travail est sélectionné ou bien 0 si l'usine ne fonctionne pas pour ce quart de travail.

Contrainte 2 : La valeur de $\partial_{k,t}$ est de 0 ou de 1 puisqu'il s'agit d'une variable binaire.

Contrainte 3 : Contrainte nécessaire afin de respecter la capacité de production propre à chacun des modes. La quantité de produit « i » fabriqué pendant une période « t » se doit d'être inférieure ou moindre à la quantité maximale possible pour le mode spécifié.

Contrainte 4 : La quantité de produit fabriqué durant chaque période respecte la possibilité donnée par le mode de fonctionnement utilisé (respect des ratios).

Contrainte 5 : Assure que les produits finis fabriqués respectent les ratios donnés.

Contrainte 6 : Ces contraintes spécifient qu'au moment 0, c'est-à-dire au début de la production, il n'y a aucun produit intermédiaire ou fini emmagasiné. Certains des produits intermédiaires peuvent parfois être conservés pour être réutilisés plus tard. Cependant, la plupart du temps, ce n'est pas le cas et la production part de 0 à chaque fois.

Contrainte 7 : Les quantités produites au cours d'un mode et en fin de période ne peuvent pas être négatives.

Contrainte 8 : Équation de conservation de la matière

Contrainte 9 : Contrainte de tonnage maximal pour l'entrepôt de produits finis. Cette dernière n'a que peu d'importance puisque la capacité de l'entrepôt « V » est très élevée.

Contrainte 10 : Une des contraintes les plus importantes et ayant le plus d'effets sur le modèle est celle reliée à l'énergie. Elle spécifie que la puissance souscrite utilisée est toujours supérieure ou égale à la puissance nécessaire au mode de fonctionnement le plus élevé. Ceci permet de linéariser la fonction de coût. Cette contrainte reliée à l'énergie oblige le modèle à travailler avec des modes plus lents puisque le coût d'énergie représente une grande partie de la facture. Une fois qu'un mode a été sélectionné, il devient plus économique pour

le modèle de le conserver pour le reste du mois puisque de toute façon, c'est cette puissance qui fera office de puissance souscrite.

Remarquons tout d'abord que dans la réalité, la variation de quantité produite par mode est faible (estimée à moins de 10 %) et que nous ne sommes pas encore certains qu'elle soit complètement contrôlable (certains opérateurs estiment qu'elle est plus subie que contrôlée). De même, les ratios sont bien variables, mais dans de faible proportion et là encore, leur contrôle reste à démontrer. Donc, si le modèle ne représente pas une description stricte de la réalité (les notions de gammes et nomenclatures sous-jacentes au modèle ne lui préexistent pas) mais sont une des représentations possibles du fonctionnement du moulin.

Les gammes et nomenclatures ont également dû être insérées dans le modèle, sous forme de tableau Access, où AMPL lit les données. Les modes, tonnages totaux ($Q1MAX_k$), ressources humaines (H_k), puissances (EV_k) et consommation (EN_k) sont lus dans un tableau semblable au tableau 4.10.

Tableau 4.10 - Implémentation des modes au modèle

Modes	Description du mode	$Q1MAX_k$	H_k	EV_k	EN_k
1	2 lignes arrêtées (8A-10A)	568	130	25280	202240
2	4 lignes arrêtées (8A-10A + 15-16)	506	110	22745	181960
3	6 lignes arrêtées 8A-10A + 13-14-15-16)	444	90	20210	161680
4	8 lignes arrêtées (8A-10A + 11 à 16)	382	80	17675	141400
5	10 lignes arrêtées (8A-10A + 9 à 16)	320	70	15140	121120
6	12 lignes arrêtées (8A – 10A + 7 à 16)	258	60	12605	100840
7	13 lignes arrêtées (8A – 10A + 6 à 16)	215	50	11338	90704
8	14 lignes arrêtées (8A – 10A + 5 à 16)	172	40	10070	80560
9	15 lignes arrêtées (8A – 10A + 4 à 16)	129	30	8803	70424

Modes	Description du mode	$Q1MAX_k$	H_k	EV_k	EN_k
10	16 lignes arrêtées (8A – 10A + 3 à 16)	86	20	7535	60280
11	17 lignes arrêtées (8A – 10A + 2 à 16)	43	10	6268	50144
12	18 lignes arrêtées (8A – 10A + 1 à 16)	0	0	0	0

Les recettes des produits finis, présentées au tableau 4.8, ont également été adaptées au modèle (tableau 4.11) où les fractions, les produits finis ainsi que les proportions de chaque fraction dans un produit fini (proportions) sont présents.

Tableau 4.11 - Implémentation des recettes au modèle

Fractions	Produits finis	Proportions
A	AX-4200	0,06
A	Plast#20	0,83
A	SP4T30	0,85
A	SP5R-28-O	0,43
AA	Plast#20	0,1
B	AX-4200	0,37
B	Plast#20	0,07
B	SP4T30	0,15
B	SP5R-28-O	0,57
C	AX-4200	0,2
CP	7D15	0,3
CP	7T-15	1
EXT	7D15	0,4
EXT	AX-4200	0,1
SF	7MF-5	0,4
SF	7M-O6	0,4
XZ	7D15	0,3
XZ	7MF-5	0,6

Fractions	Produits finis	Proportions
XZ	7M-O2	1
XZ	7M-O6	0,6
XZ	AX-4200	0,27

Les proportions de fractions fabriquées ($tmax_{i,k}$) pour chaque mode, ayant été démontrées précédemment dans le tableau 4.7, ont été adaptées à l'aide du tableau 4.12.

Tableau 4.12 - Implémentation des proportions des fractions au modèle

Fractions	Modes	$tmax_{i,k}$
A	1	0,25
A	2	0,22
A	3	0,24
A	4	0,25
A	5	0,25
A	6	0,26
A	7	0,26
A	8	0,26
A	9	0,27
A	10	0,26
A	11	0,23
A	12	0
.....	.....	.....

Deux autres tableaux sont également nécessaires pour expliquer le fonctionnement du modèle. Il est important d'introduire un tableau Access indiquant le coût des ressources humaines (C_∞) (tableau 4.13) ainsi qu'un autre

où la demande pour chaque produit peut être indiquée au modèle (tableau 4.14).

Tableau 4.13 - Implémentation des coûts de ressources hum. au modèle

Quart de travail	Quart de travail	C_{w}
T1	Jour	125,00 $
T2	Soir	150,00 $
T3	Nuit	175,00 $

Tableau 4.14 - Implémentation de la demande au modèle

Produits finis	$D_{i,60}$
7D15	53
7MF-5	40
7M-O2	30
7M-O6	67
7T-15	4
AX-4200	80
Plast#20	50
SP4T30	180
SP5R-28-O	80

CHAPITRE 5 : RÉSULTATS

Ce chapitre présentera les résultats obtenus pour tous les tests ayant été faits. Les résultats sont présentés sur des graphiques pour bien permettre de visualiser et de les comparer entre eux. Chaque graphique sera également analysé afin de tenter de comprendre les différences, l'effet de chaque facteur sur le coût total ou encore, certaines irrégularités dans les courbes de résultats.

5.1 Logiciel utilisé

Maintenant que les équations du modèle mathématique ont été converties en lignes de programmation de langage AMPL, il est possible de commencer les tests. Le programme AMPL est présenté à l'annexe 17. Le programme de lecture et d'écriture des données en Access se retrouve quant à lui à l'annexe 18. Le modèle est testé en faisant varier trois paramètres :

- le nombre d'employés par mode de production (H_k)
- le salaire des employés selon les quarts de travail (C_∞)
- le nombre de kilowatts par mode de production (EV_k)

Pour chacun des paramètres, le modèle est testé à divers niveaux de demande, allant d'environ 10% à 100% de la capacité totale (voir tableau 5.1). La demande totale est celle demandée à la fin de la $60^{ème}$ période de travail. De plus, pour chacun de ces niveaux, le modèle est testé en le forçant à ne travailler qu'en mode 1, c'est-à-dire de la façon dont J.M. Asbestos fonctionnait. De cette façon, il est possible d'évaluer l'économie probable pour chacun des niveaux de demande par rapport à la situation actuelle.

Tableau 5.1 - Niveaux de production

Demande totale théorique (tonnes de produits finis à la fin de la 60ème période)	% de la production maximale possible
439	11.2%
584	14.9%
731	18.7%
844	21.6%
1023	26.1%
1168	29.8%
1315	33.6%
1461	37.3%
1607	41.1%
1752	44.8%
2045	52.3%
2336	59.7%
2629	67.2%
2920	74.6%
3213	82.1%
3504	89.5%
3797	97.0%
3913	100.0%

Donc, en fonctionnant à 100% de capacité, il est possible d'obtenir 3913 tonnes de produits finis après 60 périodes de travail. Cinq scénario seront testés et ce, pour chacun des niveaux de demande présentés au tableau 5.1.

Les scénarios testés sont présentés au tableau 5.2. Les quatre premiers seront faits en assumant que le calcul de la consommation par mode se fait selon la méthode 1, puisqu'elle est plus réaliste. Pour le scénario 1, le nombre d'employés par quart de travail est établi par la méthode 1 et des primes de

soirée et de nuit sont payées. Dans le scénario 2, le nombre d'employés est établi par la méthode 1 également, mais aucune prime n'est payée. Pour le scénario 3, le nombre d'employés est établi selon la méthode 2 et des primes sont payées selon la période de travail. Le nombre d'employés par quart de travail, pour le scénario 4, est également établi par la méthode 2 mais aucune prime n'est payée.

Tableau 5.2 - 4 premiers scénarios testés

	Primes payées pour le travail de soir et de nuit	**Pas de prime payée pour le travail de soir et de nuit**
Nombre d'employés établi par la méthode 1	Scénario 1	Scénario 2
Nombre d'employés établi par la méthode 2	Scénario 3	Scénario 4

De plus, un cinquième scénario est testé. Les conditions y sont les mêmes que pour le scénario 1, excepté que la puissance par mode est déterminée par la méthode dictant que chacune des lignes a la même consommation électrique (méthode 2).

5.2 Impact du nombre de travailleurs par mode de production

Les premiers tests ont servi à vérifier l'impact possible sur l'économie en regard de la variation du nombre de travailleurs nécessaires à chaque mode de production. Les deux méthodes utilisées pour déterminer le nombre de travailleurs nécessaires par mode de travail y sont comparées. J.M. Asbestos n'a jamais utilisé les modes de fonctionnement partiels. Il n'y a donc pas de

données existantes relatives au nombre d'employés nécessaires pour chacun des modes de fonctionnement partiels. Bien entendu, plus on arrête de lignes de production, plus le nombre d'employés nécessaires diminue. Il ne faut pas assumer que l'usine peut réduire grandement sa production sans réduire le nombre d'employés. Dans ce cas, nous nous retrouverions avec le même problème rencontré avec la puissance souscrite, c'est-à-dire que nous influencerions le modèle à travailler dans les modes plus élevés.

Les scénarios 1 et 3 (voir tableau 5.3 et figure 5.1) ainsi que les scénarios 2 et 4 (voir tableau 5.4 et figure 5.2) sont comparés. Pour ces scénarios, le nombre de kilowatts par mode de production est celui fourni par J.M. Asbestos.

Tableau 5.3 - Économies possibles pour les scénarios 1 et 3

% de la production possible	Coût total Fonct. actuel	Économie Scénario 1	Économie Scénario 3
11,2%	345 150 $	21,6%	26,7%
14,9%	387 440 $	18,3%	21,2%
18,7%	450 872 $	14,5%	15,9%
21,6%	493 160 $	10,3%	8,7%
26,1%	535 448 $	7,0%	4,1%
29,8%	577 737 $	2,6%	1,8%
33,6%	665 564 $	1,9%	3,2%
37,3%	714 352 $	2,4%	3,3%
41,1%	787 535 $	6,5%	5,7%
44,8%	836 323 $	6,2%	5,5%
52,3%	933 900 $	4,5%	3,2%
59,7%	1 055 871 $	4,1%	3,0%
67,2%	1 156 698 $	3,4%	1,5%
74,6%	1 267 275 $	2,2%	1,1%
82,1%	1 405 496 $	4,0%	2,5%
89,5%	1 516 072 $	2,4%	1,4%
97,0%	1 654 294 $	2,2%	1,8%

% de la production possible	Coût total Fonct. actuel	Économie Scénario 1	Économie Scénario 3
100,0%	1 681 938 $	0,0%	0,0%

Le tableau 5.3 donne les économies possibles et compare, lorsque des primes de soirée et de nuit sont payées, les deux méthodes utilisées pour calculer le nombre de travailleurs nécessaires pour chaque quart de travail. Par exemple, si la demande totale pour le mois représente 29,8% de la production maximale qu'il serait possible de produire durant cette période, l'économie est de 2,6% si le nombre d'employés est déterminé par la méthode 1 et 1,8% par la méthode 2. L'économie possible est la différence de coût entre la façon de produire de J.M. Asbestos (i.e. en forçant le modèle à ne travailler qu'en mode 1, pleine capacité) et le résultat de la simulation. Les simulations, en plus de donner un coût minimal de fonctionnement, donne la séquence des modes de production à utiliser. La tendance générale consiste à utiliser des modes de travail plus élevés seulement lorsque, en travaillant dans un mode inférieur, il n'est plus possible de répondre à la demande et ce, même en travaillant durant les 60 périodes. C'est-à-dire que l'usine fonctionnera à très faible capacité en continue jusqu'à un certain point où il sera nécessaire d'augmenter la production et de diminuer le nombre de journées travaillées. Cependant, il n'y a pas de grandes variations des modes de production sur une période de 60 quarts de travail puisqu'il est avantageux, une fois un mode de production utilisé, de le conserver puisque de toute façon, la puissance atteinte fera office de puissance souscrite. La variation de mode de production, donc de personnel, changera d'un mois à l'autre, selon les commandes puisque celles-ci dicteront les modes de production utilisés pour les 60 prochaines périodes.

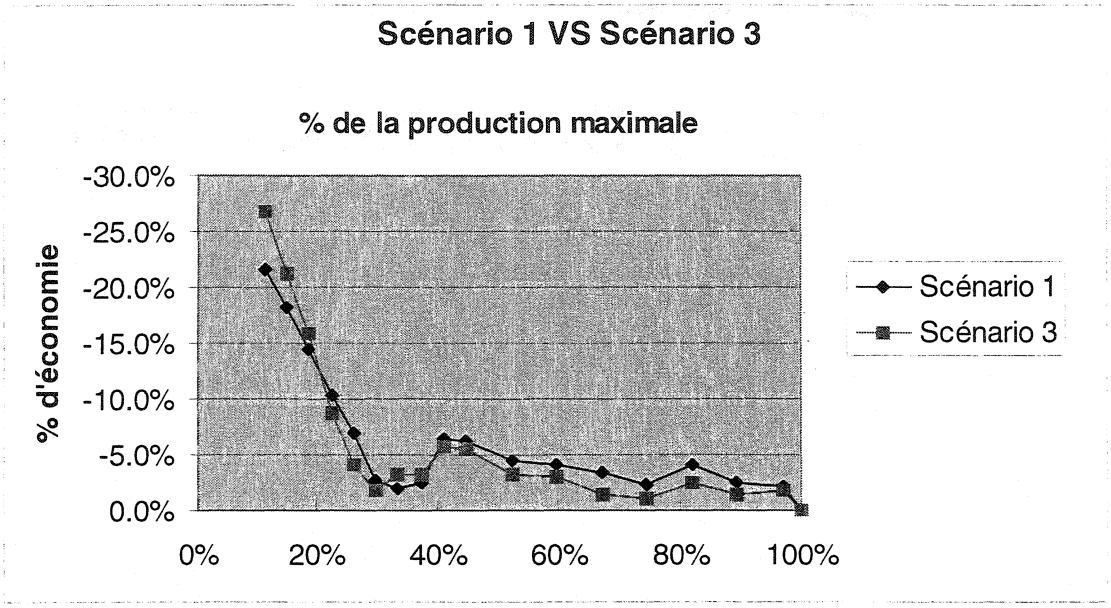


Figure 5.1 - Comparaison entre les scénarios 1 et 3

Si des primes de soirée et de nuit sont payées, les simulations indiquent qu'entre 20% et 30% ainsi qu'au-dessus de 40% de la production maximale possible, il est plus économique de déterminer le nombre d'employés par la méthode 1 (scénario 1). Par contre, si l'usine fonctionne entre 30% et 40% ou bien sous 20% de sa capacité possible, il est préférable de déterminer le nombre d'employés par la seconde méthode (scénario 3).

Les économies réalisables sont tout d'abord très élevées pour les deux méthodes et celles-ci diminuent jusqu'à ce que soit atteint environ 30% de la production possible. C'est un point où, en travaillant dans des modes très lents, il n'est plus possible de répondre à la demande. Dans ces cas, il est nécessaire d'utiliser des modes de travail plus rapides (plus de lignes en fonction) et de travailler sur moins de quart de travail. La même chose se reproduit autour de 70% de la capacité maximale. Le fait qu'il soit plus économique de travailler sur

moins de périodes avec des modes plus élevés s'explique par le fait que le surplus d'énergie souscrite payé est moindre que l'économie se réalisant au niveau de la consommation et des ressources humaines. Ces limites se situent aux alentours de 30% à 40% et 60% à 70% de la capacité de production possible.

En ce qui concerne les résultats obtenus avant 30% de la capacité, il apparaît que le scénario 3 est à priori plus économique et que c'est ensuite le scénario 1 qui prend l'avantage. La transition se fait où les deux courbes se croisent, c'est-à-dire vers 20% de la capacité.

Tableau 5.4 - Économies possibles pour les scénarios 2 et 4

% de la production possible	Coût total Fonctionnement actuel	Économie Scénario 2	Économie Scénario 4
11.2%	345 150 $	21.6%	26.7%
14.9%	387 440 $	18.3%	21.2%
18.7%	450 872 $	14.5%	16.7%
21.6%	493 160 $	10.3%	13.8%
26.1%	535 448 $	7.0%	9.2%
29.8%	577 737 $	2.6%	1.6%
33.6%	662 314 $	4.3%	4.5%
37.3%	704 602 $	8.3%	6.3%
41.1%	768 035 $	9.5%	11.4%
44.8%	810 323 $	6.3%	5.9%
52.3%	894 900 $	6.0%	6.2%
59.7%	1 000 621 $	10.1%	4.1%
67.2%	1 085 198 $	3.2%	3.4%
74.6%	1 169 775 $	2.6%	1.5%
82.1%	1 275 496 $	4.3%	1.8%
89.5%	1 360 072 $	2.0%	0.9%
97.0%	1 465 794 $	1.8%	1.5%
100.0%	1 486 937 $	0.0%	0.0%

En comparant les scénarios 2 et 4, il est possible de vérifier et de comparer les économies possibles selon la méthode utilisée pour déterminer le nombre d'employés par quart de travail mais cette fois, si aucune prime de soirée ou de nuit n'est payée.

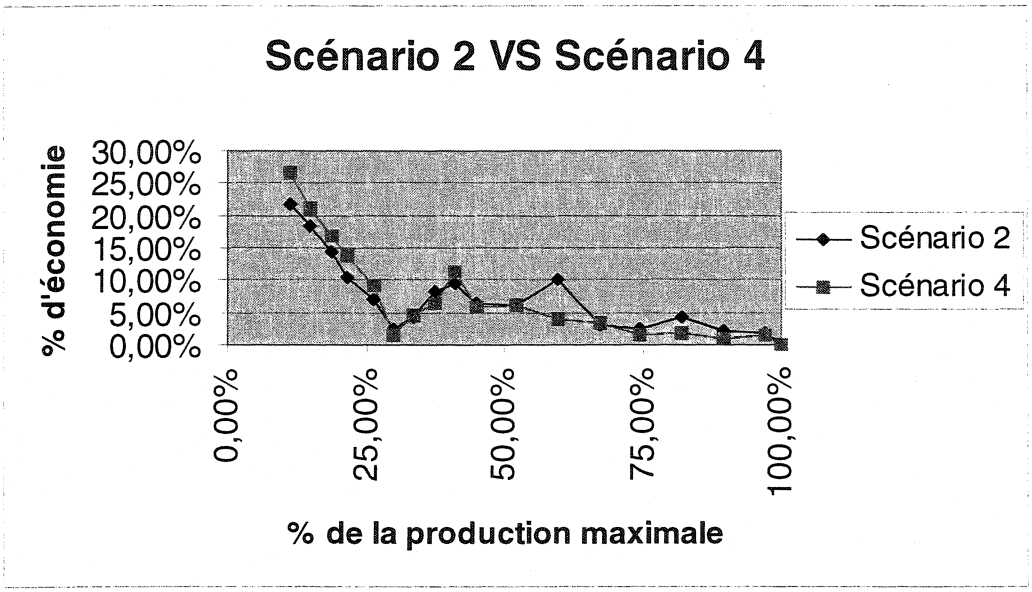


Figure 5.2 - Comparaison entre les scénarios 2 et 4

La différence entre les scénarios 2 et 4 et, 1 et 3, est au niveau du coût des ressources humaines. L'économie sera donc la même, que ce soit un quart de travail de jour, de soirée ou de nuit. Le tendance générale est la même pour les scénarios 1 et 3, c'est-à-dire que les économies commencent de façon élevée pour de faibles niveaux de production, remontent vers 35% de la capacité, pour à nouveau descendre graduellement et remonter vers 65% de la capacité. Les augmentations d'économie situées vers 35% et 65% de la capacité sont cependant beaucoup plus abruptes et prononcées.

Entre 50% et 70% de la capacité, les différences d'économie entre les scénarios 2 et 4 sont à leur niveau le plus élevé, c'est-à-dire entre 4% et 6%. Cela est du au fait que pour le scénario 2, il y a une soudaine économie, de 3% à 10,1% lorsque la capacité passe de 52% à 60%. Mais comment expliquer cette différence ? Il est possible que pour ce niveau précisément, les modes de fonctionnement utilisés soient ceux nécessitant le moins d'employés. Il est donc raisonnable de penser que ce niveau de production est le point exact où il faut avoir recours au niveaux 4 et plus, c'est-à-dire ceux où le scénario 2 emploie moins de travailleurs que le scénario 4. Cette tendance semble donc possible mais, elle est très accentuée. Il est certain cependant que ce n'est pas parce que le modèle informatique n'a pas fonctionné assez longtemps pour trouver les bonnes solutions car le modèle part d'un coût très élevé et diminue graduellement lorsque des solutions plus économiques sont trouvées. La grande différence dans le scénario 2 est une économie élevée par rapport aux autres. Il y a donc une logique dans cette économie de 10,1% pour le scénario 2.

5.3 Impact du salaire des travailleurs selon les quarts de travail

Le salaire des employés a été fixé de deux façons. La première, en considérant que les employés ont un salaire plus élevé lors des quarts de travail de soirée et de nuit, et la deuxième en fixant un même salaire pour chacun des quarts de travail. Les résultats ayant déjà été présentés pour les quatre premiers scénarios, l'impact du salaire des travailleurs par quart de travail est analysé en comparant les graphiques des scénarios 1 et 2 (voir figure 5.3) ainsi que ceux des scénarios 3 et 4 (voir figure 5.4).

Les comparaisons entre les scénarios 1 et 2 montrent que l'économie moyenne supplémentaire possible, si le nombre d'employés est fixé par la méthode 1, et qu'aucune prime de soirée ou de nuit n'est payée, est de l'ordre de 1%. Cependant, l'annulation des primes représente une économie moyenne d'environ 3% lorsque l'usine fonctionne entre 30% et 70% de sa capacité maximale. Pour des niveaux de demande plus bas, les coûts des scénarios 1 et 2 sont identiques. Si on ne travaille que de jour, le salaire étant le même pour les deux scénarios, la coût est identique pour un même nombre d'employés, ce qui explique les similarités à de bas niveaux de demande.

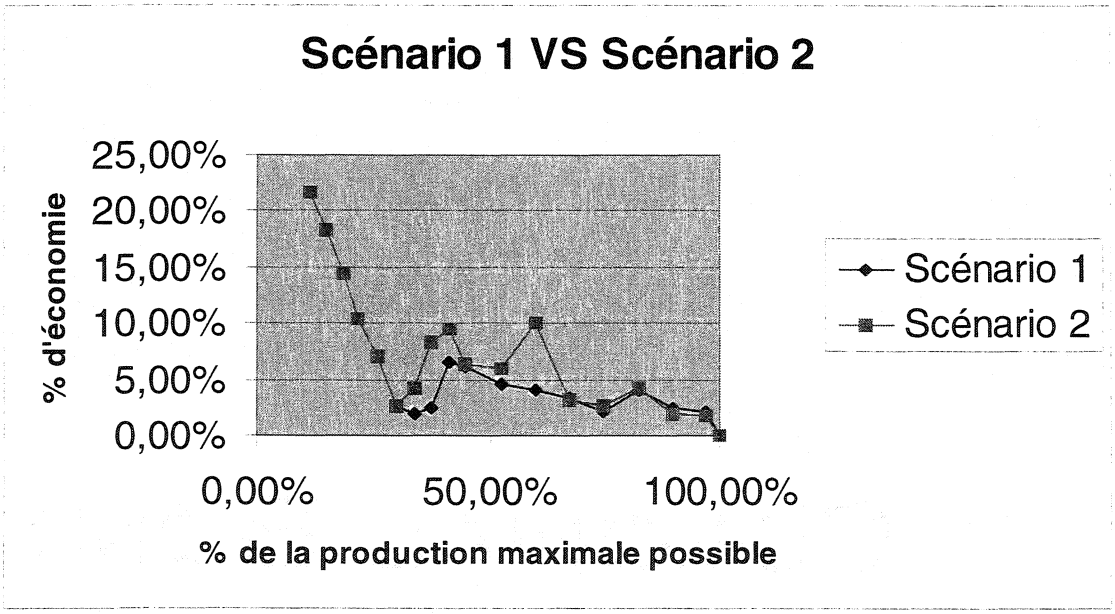


Figure 5.3 - Comparaison entre les scénarios 1 et 2

Les comparaisons entre les scénarios 3 et 4 montrent que l'économie moyenne supplémentaire possible, si le nombre d'employés est fixé par la méthode 2, et si aucune prime de soirée ou de nuit n'est payée, est de 1,5%. L'économie

moyenne supplémentaire entre 30% et 70% de la capacité maximum est de 2,5%.

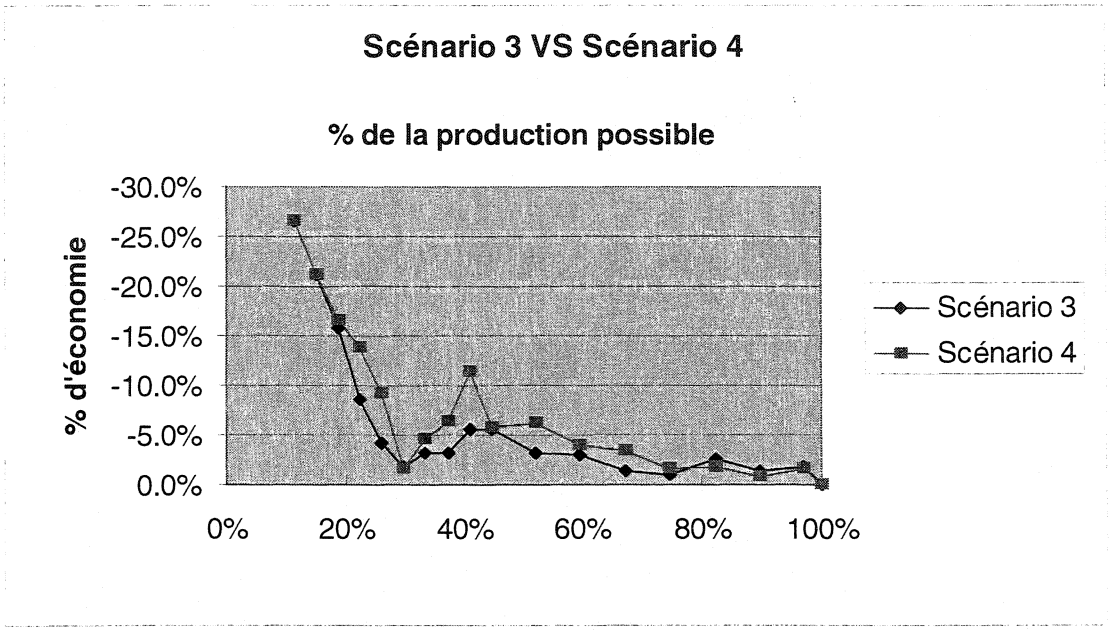


Figure 5.4 - Comparaison entre les scénarios 3 et 4

5.4 Impact du nombre de kilowatts nécessaire par mode

Un 5ème scénario a été simulé, soit l'impact du changement de kilowatts par mode de fonctionnement (voir tableau 5.5). Afin de pouvoir le comparer, les conditions de salaires et le nombre d'employés sont les mêmes que pour le scénario 1 (voir figure 5.5). La puissance (Kw) est cependant proportionnelle au nombre de lignes utilisées.

La différence d'économie entre l'utilisation des puissances fournies par J.M. Asbestos et celles établies par cette recherche, est en moyenne de 3%. Les chiffres relatifs au nombre de kilowatts sont cependant très difficiles à estimer.

Beaucoup d'impondérables tels que la température et l'usure de la machinerie entrent en ligne de compte. Une chose est cependant certaine, la consommation électrique relative à chacun des modes de fonctionnement a une importance majeure sur l'économie possible. Des moyens doivent donc être pris afin de mieux connaître les consommations. Un moyen efficace mais peu pratique serait de tester réellement les divers modes de production et d'en obtenir les consommations afférentes précises.

Tableau 5.5 - Économies possibles du scénario 5

% de la production possible	Coût total Fonctionnement actuel	Économie Scénario 1	Économie Scénario 5
11.2%	345 150 $	21.6%	28.3%
14.9%	387 440 $	18.3%	21.4%
18.7%	450 872 $	14.5%	19.3%
21.6%	493 160 $	10.3%	14.9%
26.1%	535 448 $	7.0%	9.5%
29.8%	577 737 $	2.6%	5.3%
33.6%	665 564 $	1.9%	10.4%
37.3%	714 352 $	2.4%	8.9%
41.1%	787 535 $	6.5%	8.4%
44.8%	836 323 $	6.2%	8.1%
52.3%	933 900 $	4.5%	8.1%
59.7%	1 055 871 $	4.1%	5.8%
67.2%	1 156 698 $	3.4%	3.4%
74.6%	1 267 275 $	2.2%	3.7%
82.1%	1 405 496 $	4.0%	5.8%
89.5%	1 516 072 $	2.4%	3.3%
97.0%	1 654 294 $	2.2%	2.4%
100.0%	1 681 938 $	0.0%	0.0%

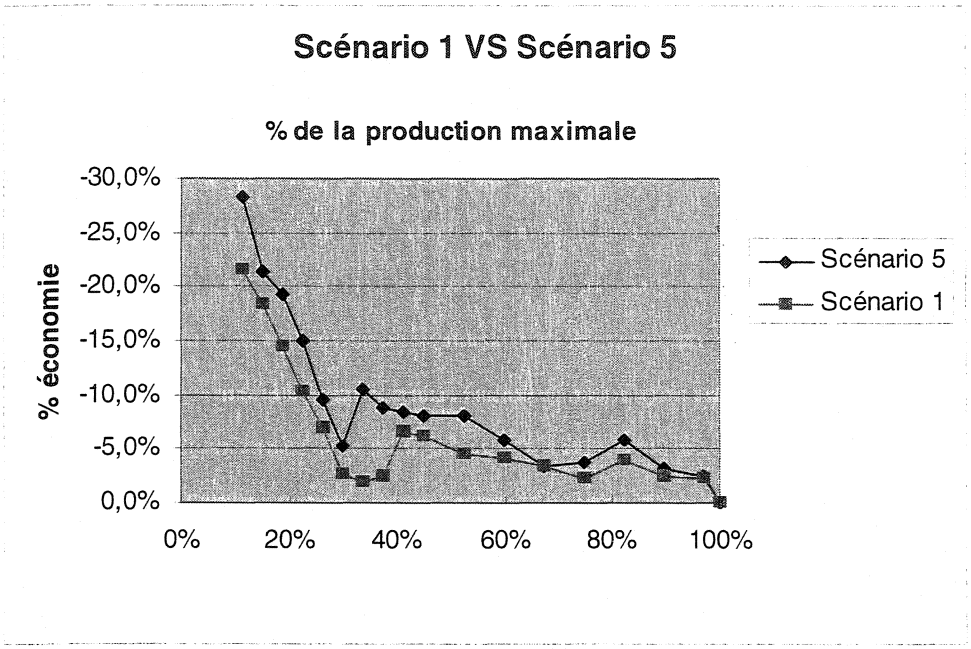


Figure 5.5 - Comparaison entre les scénarios 1 et 5

5.5 Impacts du facteur humain sur la productivité

Certains facteurs n'ont pas été considérés mais auraient cependant pu faire varier les résultats obtenus. Souvent le personnel spécialisé comme les mécaniciens et les électriciens, sont plus difficilement disponibles si le travail ne s'effectue pas de jour. C'est pourquoi les arrêts dus à des bris ou à de l'entretien préventif sont généralement plus longs lors des quarts de travail de soirée et de nuit. C'est également vrai si des ressources ou expertises extérieures sont nécessaires. De plus, s'il y a plus d'un quart de travail, il est probable que les travailleurs les plus expérimentés demanderont à être affectés au travail de jour. La production pendant ce quart y sera donc plus efficace.

Mais au-delà de toutes ces raisons, le travail de jour est plus efficace car l'horloge biologique de l'humain est programmée pour travailler le jour et dormir la nuit. Les simulations sont cependant faites en assumant une même production pour chacun des quarts de travail. Finalement, il ne faut pas oublier que si la mine Jeffrey continue à fonctionner encore de nombreuses années, il sera nécessaire, en raison de l'âge avancé de la plupart des travailleurs, de procéder à une vague d'embauche.

D'autres coûts supplémentaires sont également à considérer. Divers frais de roulement sont encourus, tels que le démarrage et l'arrêt plus fréquent de certaines machines pour faire fonctionner l'usine à moindre capacité pendant plusieurs jours. L'usure peut par conséquent en être accélérée. Aussi, si l'usine est ouverte durant plus de jours, même avec une partie de la machinerie en arrêt, les frais de chauffage, de taxes, de surveillance, d'assurance et d'autres frais fixes demeurent pratiquement les mêmes.

CHAPITRE 6 : CONCLUSION

Les apports au domaine scientifique ainsi que les futures recherches pouvant s'avérer intéressantes seront maintenant discutés.

Rappelons qu'un ERM est un système qui intègre le design des produits et des procédés dans la planification et le contrôle de la production manufacturière. De cette façon, il est possible d'identifier, de quantifier, de contrôler et de gérer le flux de déchets environnementaux en ayant toujours en tête que le but ultime est de réduire, voire d'éliminer les impacts sur l'environnement tout en maximisant l'efficacité des ressources. Le DSM consiste quant à lui à modifier les niveaux de consommation électrique et à en favoriser le lissage.

Ce projet avait pour but de démontrer qu'il est possible d'intégrer la gestion des ressources énergétiques et humaines dans celle des opérations à la compagnie minière J.M. Asbestos.

Pour le cas étudié, les résultats sont concluants et apportent une lumière sur les problèmes vécus par la compagnie minière J.M. asbestos. Les économies possibles avec cette méthode sont près du million de dollars annuellement. Même si des services de ré-ingénierie sont nécessaires pour s'ajuster à une nouvelle philosophie d'entreprise, ils se financeront très rapidement à même les gains réalisés. Un autre avantage important est qu'il n'est pas nécessaire d'investir dans l'achat d'équipements, tout se fait en réorganisant ce qui est déjà disponible.

La plus grande difficulté dans cette étude est qu'il a fallu développer notre propre nomenclature car il n'y en avait pas de disponible. Comme il y a peu

d'informations écrites, il a donc été nécessaire d'interroger certains employés parmi les plus expérimentés, et d'obtenir ainsi des renseignements utiles. L'obligation de faire un tri sur les informations reçues a été nécessaire à cause de certaines contradictions et des écarts d'une personne à l'autre.

Une méthode a ensuite été développée afin de créer des gammes et des nomenclatures mais avec seulement une dizaine de produits finis. En d'autres mots, il s'agit de faire fonctionner les installations présentes à J.M. Asbestos d'une façon structurée et non artisanale.

Le modèle montre qu'il n'est pas nécessaire d'avoir une très grande baisse de la demande totale pour appliquer ce modèle et faire des économies. Une simple baisse de 10% permet de réaliser des gains substantiels. Cependant, la mine fonctionnait lors des derniers mois d'opérations entre 10 à 12 % de sa capacité, ce qui signifie des économies possibles d'environ 20%, ce qui n'est pas négligeable.

La plus importante des conditions nécessaires à l'application de programmes de DSM et de ERM est le support de la haute direction. Les dirigeants à J.M. Asbestos sont eux-mêmes bien renseignés sur la problématique et sont donc en faveur du changement. Si J.M. Asbestos ouvre définitivement ses portes, la solution trouvée dans ce mémoire pourrait être prise en considération.

Ce domaine scientifique est encore peu exploité et de nombreuses autres recherches devront être conduites avant que toutes les entreprises comprennent et appliquent les bases de l'efficacité énergétique.

Des perspectives intéressantes par rapport au modèle testé seraient d'essayer d'autres scénarios de production. Les tests ont été faits avec un ensemble de 10

produits. La mine Jeffrey peut cependant en fabriquer plus de 200. D'autres combinaisons pourraient être testées afin de connaître les produits les plus dispendieux à fabriquer. De cette façon, les techniciens pourraient planifier d'avance les combinaisons de produits les plus économiques.

12 modes de fonctionnement ont été choisis. Il serait cependant intéressant de tester des modes de fonctionnement partiels plus complexes qui pourraient changer au cours du quart de travail. Cependant, plus l'élaboration de modes partiels est complexe, plus il est nécessaire de connaître de façon précise les gammes et les nomenclatures. Cela devient donc plus compliqué car trop de facteurs aléatoires, entre autre la qualité de la roche, ont des effets sur la production. Il est donc nécessaire de bien estimer jusqu'à quel point les modes partiels simulés peuvent refléter la réalité.

Si le cadre financier de la compagnie le permettait, il serait très intéressant de constater les effets sur la production d'une usine réaménagée en partie avec de l'équipement neuf. Le retour sur l'investissement pourrait être calculé avec le pilotage actuel de Jeffrey et comparé avec celui où il serait effectué en fonction des ressources.

Des recherches énergétiques plus approfondies de la part de plusieurs industries pourraient probablement leur faire réaliser de grandes économies. Il n'y a pas que dans les moulins où les études seraient intéressantes. Il y a également les fonderies qui sont très coûteuses au niveau énergétique et pour lesquelles des études pourraient s'avérer utiles. Un autre domaine où des recherches pourraient être payantes est celui de la ventilation et du pompage. Les ventilateurs et les pompes sont en effet très gourmands en énergie et des études afin d'assurer un meilleur contrôle de leur puissance pourraient être

faites. Le secteur minier pourrait grandement bénéficier de ces nouvelles avenues qui donneraient un nouveau souffle à cette industrie qui a décliné au cours des années 1990-2000. De plus, la consommation d'électricité est rarement un sujet prioritaire dans les mines. Les priorités étant plutôt centrées sur le contrôle des rejets et la recherche de nouveaux filons. Cette période de déclin aurait été idéale pour tester de nouvelles théories de consommation énergétique. Cependant, la récente hausse fulgurante de la valeur des métaux a forcé les mines à accélérer leur production, afin de profiter le plus possible des prix de vente élevés puisqu'il y aura tôt ou tard une baisse des marchés boursiers.

RÉFÉRENCES

AL-MANSOUR, FOUAD, TOMSIC, MIHA, and MERSE, STANE. (2003), Comparison of energy efficiency strategies in the industrial sector of Slovenia, Journal of Energy, Vol. 28, No. 5, p. 421-440.

CURKOVIC, SIME, MELNYK, A., STEVEN, CALANTONE, ROGER, and HANDFIELD, ROB. (1999), Environmentally Responsible Manufacturing : Past Research, Current Results, and Future Directions for Research, Publié par le biais du l'Université du Michigan, http://www.bus.msu.edu/erm/assets/images/ past-C-F.pdf.

DALGLEISH, A.Z., GROBLER, L.J., (2003), Measurement and verification of a motor sequencing controller on a conveyor belt, Journal of Energy, Vol. 28, No. 9, p.913-927.

DUNN, RODNEY, (1999), Site internet de l'Energy Information Administration (EIA), Electric Utility Demand-Side Management, http://www.eia.doe.gov/ cneaf/ electricity/ dsm99/dsm_sum99.html.

DUNN, RODNEY, (1999), Site internet de l'Energy Information Administration (EIA), Annual Electricity Utility Report Form EIA-861, http://www.eia.doe.gov/ cneaf/electricity/ page/eia861.html.

EVANS, M. (2001), Demand-side energy efficiency and the Kyoto mechanisms: Forging the link in countries in transition, ECEEE 2001 Summer Study Paper 6.126. PNNL-SA-34476, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington.

FARFAN, MATTHEW. (2001), CyberMagazine Patrimoine des Cantons (publié sur internet seulement), dans la section Histoire des Cantons, Industries, Mine Jeffrey d'Asbestos. http://www.townshipsheritage.com.

GABAGNOU, ANDRÉ. (2002), Quelques exemples d'application des variations électroniques de vitesse, Revue Énergie Plus, No. 284.

GREGG, LAURI, (1998), Energy management in a mining company, Caddet Energy Efficiency, Vol. 2, No. 17.

HUMPHRIES, RICK, HOGARTH, MURRAY, and GILDING, PAUL. (2002), Safe Companies : An alternative Approach to Operationalizing Sustainability, Journal of Corporate Environmental Strategy, Vol. 9, No. 4, p. 390-397.

KAMP-ROELANDS, NANCY, and HIBBITT, CHRIS. (2002), Europe's (Mild) Greening Of Corporate Environmental Management, International Journal of Corporate Sustainability, Corporate environmental strategy, Elsevier science , Volume 9, number 2, pp. 172-183.

LAITNER, A., JOHN. (2002), Improving Environmental Leadership : Asking Better Questions about Existing Inefficiencies, Journal of Corporate Environmental Strategy, Vol. 11, No. 4.

MELNYK, A., STEVEN. (1993), Environmentally Responsible Manufacturing : New Opportunities, New Challenges, New Gaps to Bridge, Publié par le biais de l'Université du Michigan. http://www.bus.msu.edu/erm/assets/images/ new.pdf.

MOHANTY, R.P., and DESHMUKH, S.G. (1999), Managing green productivity : a case study, Work Study, 48(5), pp. 165-169.

NOORLEHA, A.R., CHOUDHURY, I.A., SAIDUR, R., MASJUKI, H.H., and MAHLIA, T.M.I. (2003), Projected electricity savings from implementing minimum energy efficiency standard for household refrigerators in Malaysia, Journal of Energy, Vol. 28, No. 7, p. 751-754.

PASZKOWSKI, DAN, (2002), L'Association minière du Canada reçoit un prix pour son leadership en matière de réduction des émissions de GES, Communiqué de l'Association minière du Canada, Ottawa le 14 mars 2002. http://www.mining.ca.

PORTER, M.E. (1991), America's Green Strategy, Scientific American, p.168.

SANSÒ, B., GIRARD, P. (1997), Désynchronisation et optimisation de la puissance instantanée du métro de Montréal, Transportation Science, Vol. 31, No. 4, p. 312-323.

Site internet de Environnement Canada, http://www.ec.gc.ca.

Site internet de la Société Canadienne d'Hypothèques et de Logement, http://www.cmhc-schl.gc.ca/fr/index.cfm.

STROUFE, ROBERT, MELNYK, A., STEVEN, and MONTABON, FRANK. (2001), How does management view environmentally responsible manufacturing?, Production and Inventory Management Journal, Vol. 42, Nos. 3-4 (Third|Fourth Quarters), p. 55-63.

VINE, EDWARD. (2003), Energy efficiency in buildings as an air quality compliance approach : Opportunities for the U.S. Government, publié par OSTI

(Office of Scientific and Technical Information), Document No. 810481, http://www.osti.gov.

WOLSINK, M. (1997), New Experimental Electricity Tarif Systems for Household End Use, In: I. Spliid (ed.), Sustainable Energy Options for a Greater Europe. European Council for an Energy-Efficient Economy, Prague/Kopenhagen, pp. ID-54:1-14.

WORRELL, ERNST, FINMAN, HODAYAH, RUTH, MICHAEL, and LAITNER, A., JOHN. (2003), Productivity benefits of industrial energy efficiency measures, Journal of Energy, Vol. 28, p. 1081-1098.

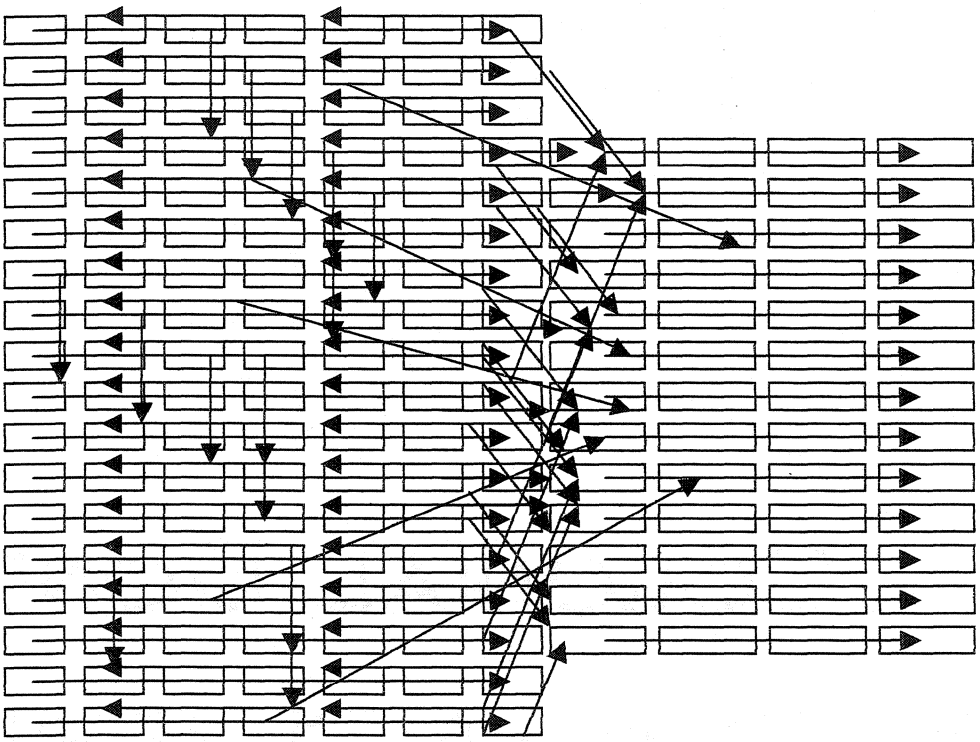
ANNEXES

ANNEXE 1

SCHÉMATISATION DU MOULIN #6

- 16 lignes

- 4000 machines



Traitement de la roche ainsi que de la fibre

Préparation des recettes

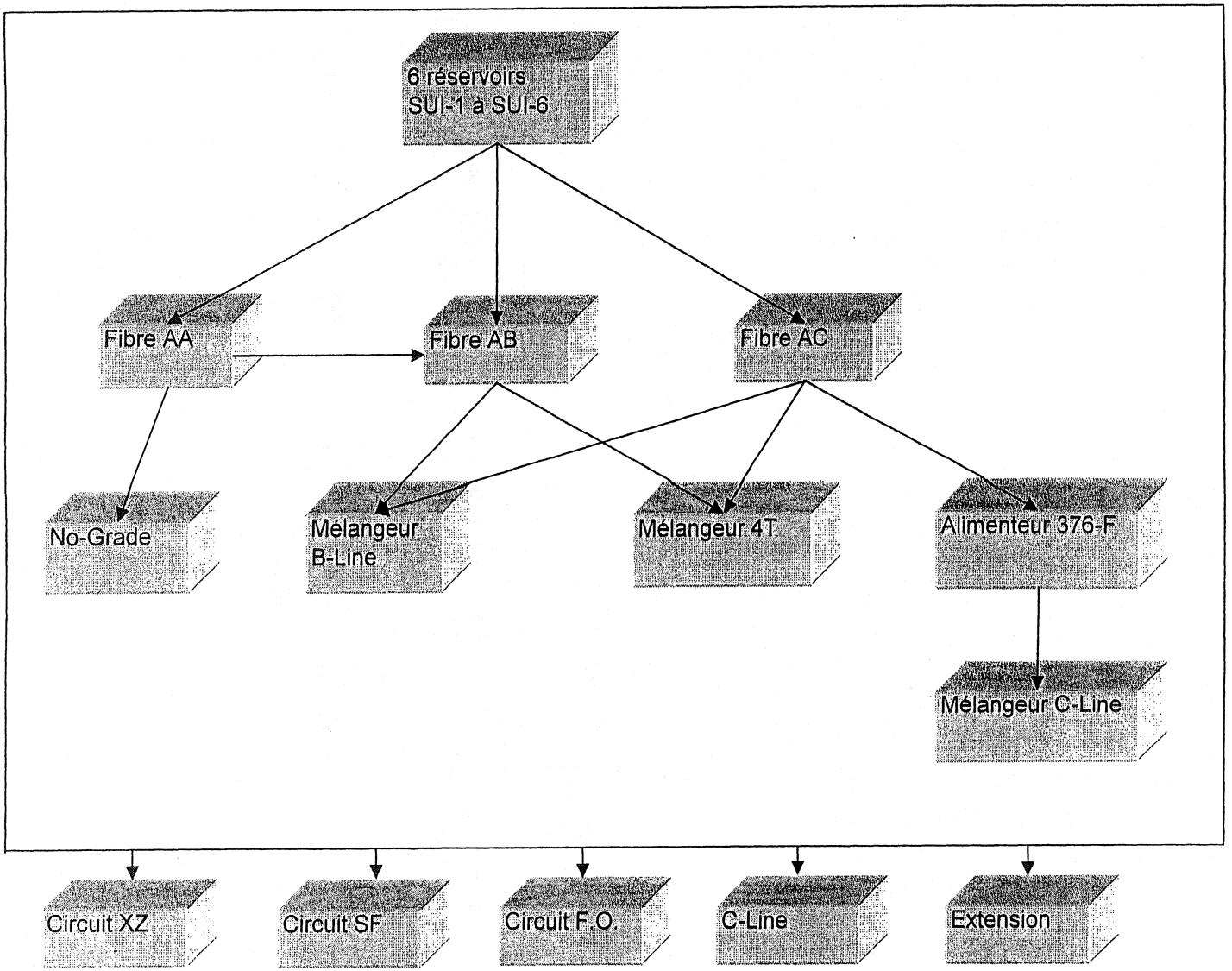
Les 16 lignes traitent mécaniquement la roche afin d'en séparer la fibre et la séparer en différentes fractions selon la longueur ou la résistance. Ces fractions sont ensuite mélangées selon divers ratio afin d'obtenir les produits finis.

ANNEXE 2

LIGNES 1 À 6

DIRECTION DES TYPES DE FIBRE

Lignes 1 à 6
Directions des types de fibres

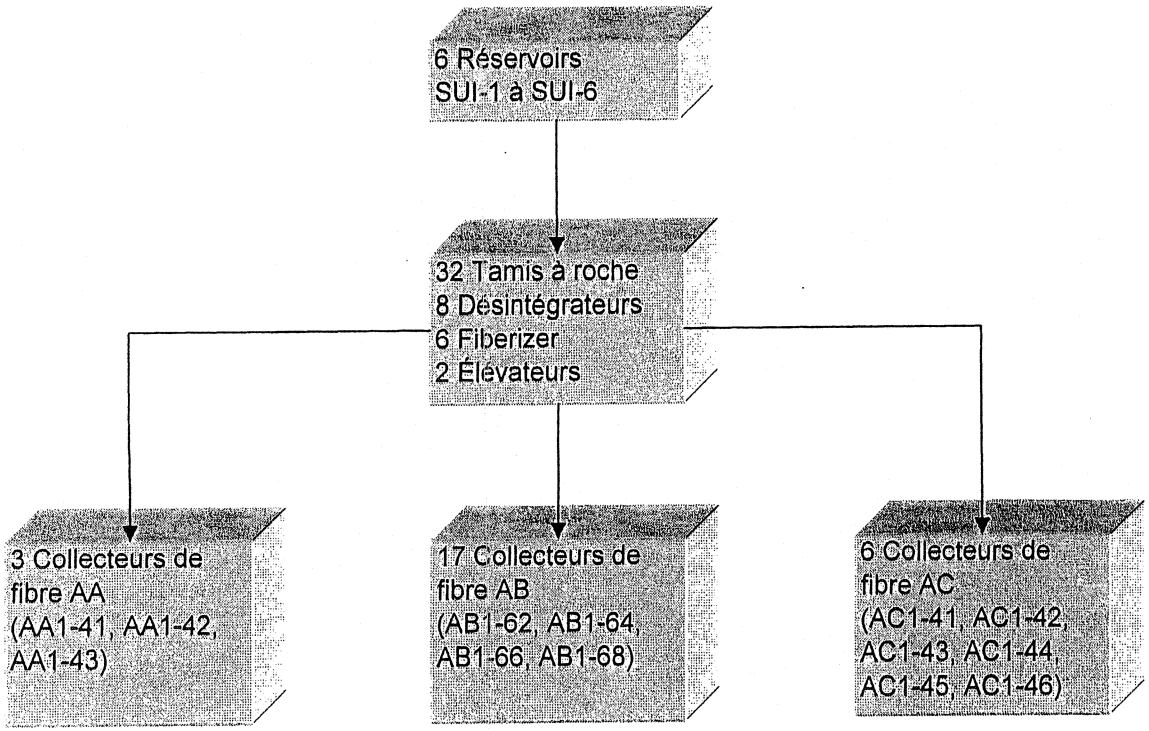


ANNEXE 3

LIGNES 1 À 6

DE L'ALIMENTATION AUX COLLECTEURS

Lignes 1 à 6
De l'alimentation aux collecteurs

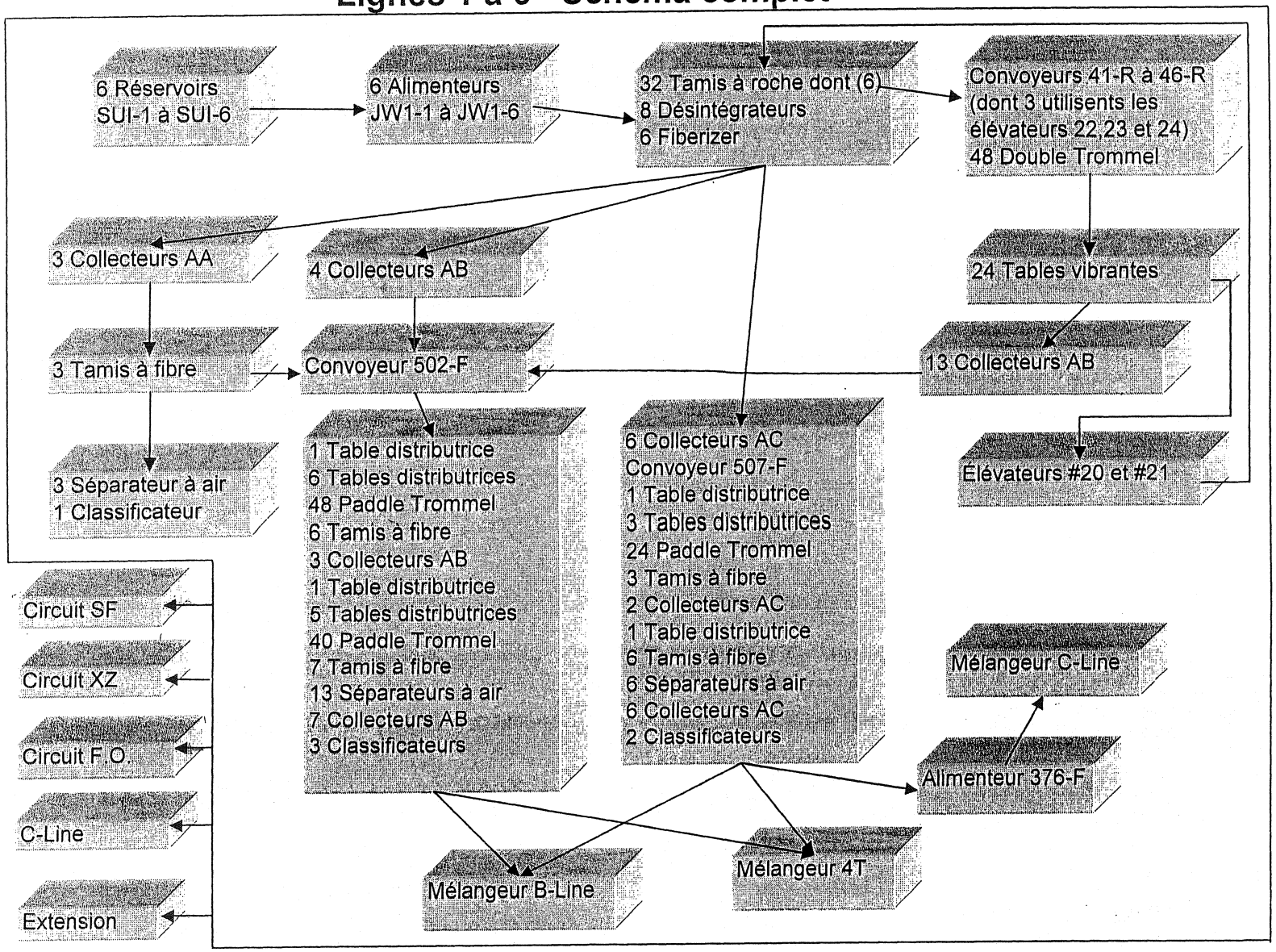


ANNEXE 4

LIGNES 1 À 6

SCHÉMA COMPLET

Lignes 1 à 6 - Schéma complet

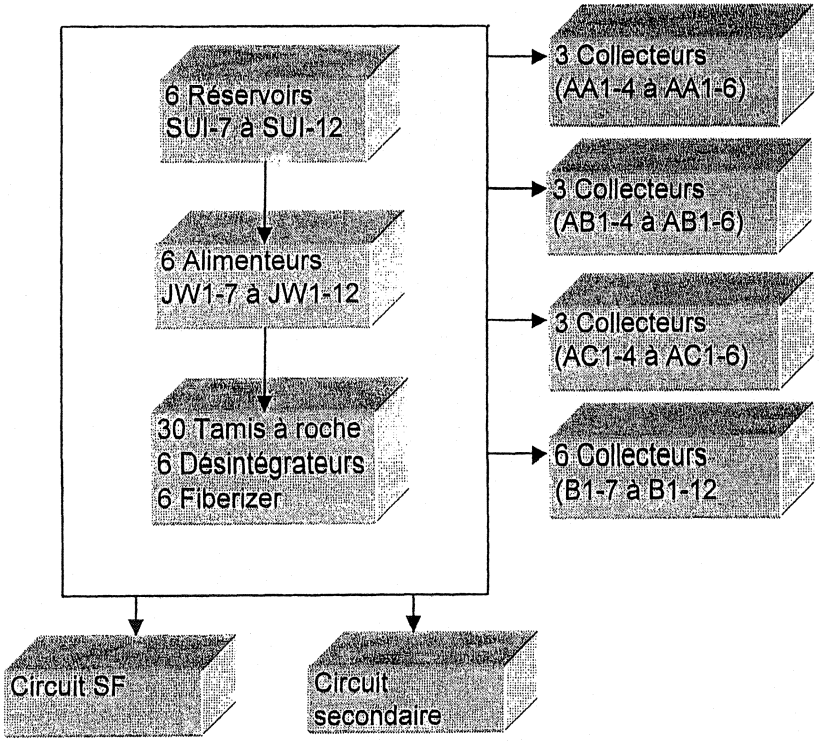


ANNEXE 5

LIGNES 7 À 12

DE L'ALIMENTATION AUX COLLECTEURS

Lignes 7 à 12
De l'alimentation aux collecteurs

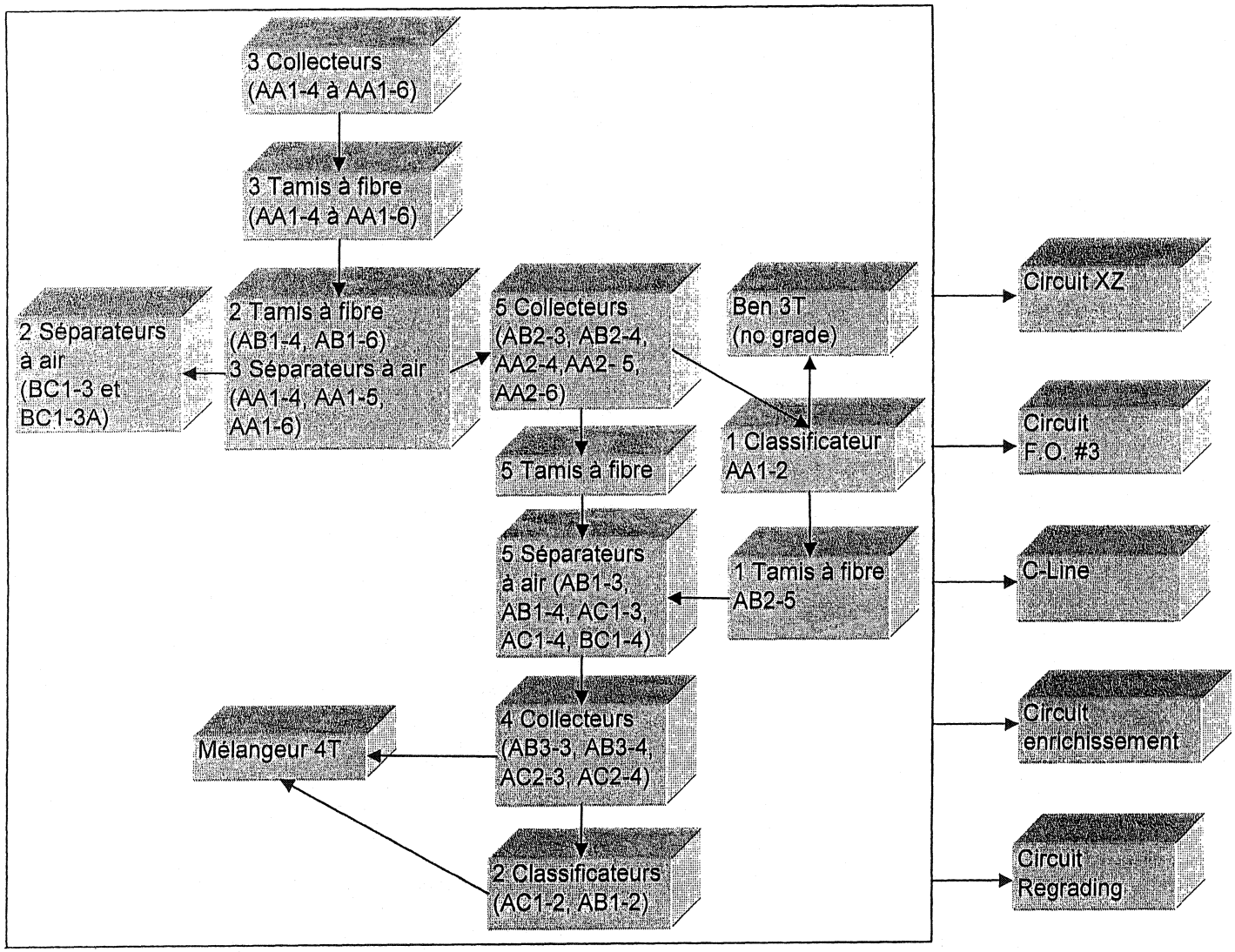


ANNEXE 6

LIGNES 7 À 12

À PARTIR DES COLLECTEURS AA

Lignes 7 à 12
À partir des collecteurs AA

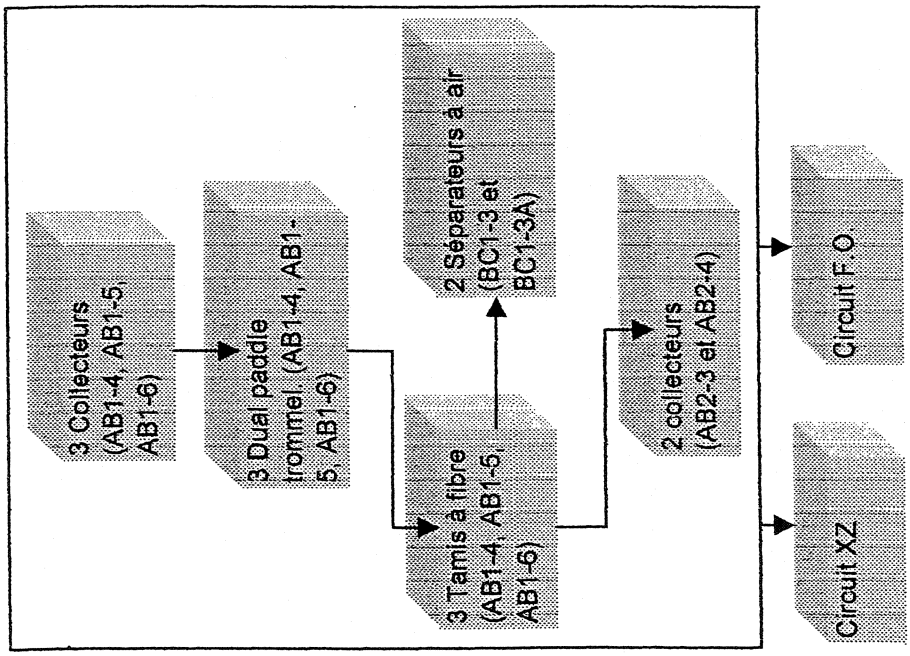


ANNEXE 7

LIGNES 7 À 12

À PARTIR DES COLLECTEURS AB

Lignes 7 à 12
À partir des collecteurs AB

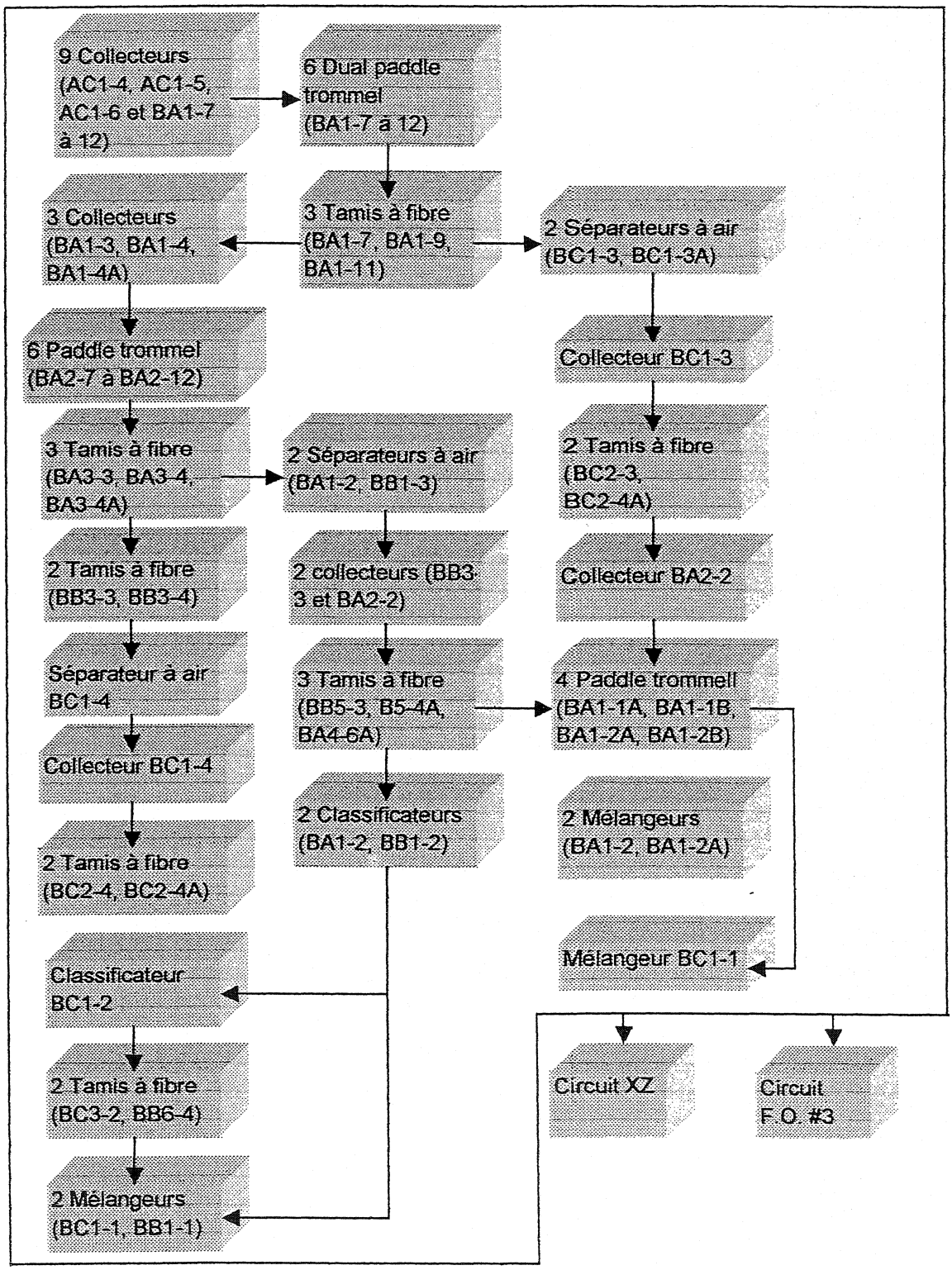


ANNEXE 8

LIGNES 7 À 12

À PARTIR DES COLLECTEURS AB ET C

Lignes 7 à 12
À partir des collecteurs AC et B

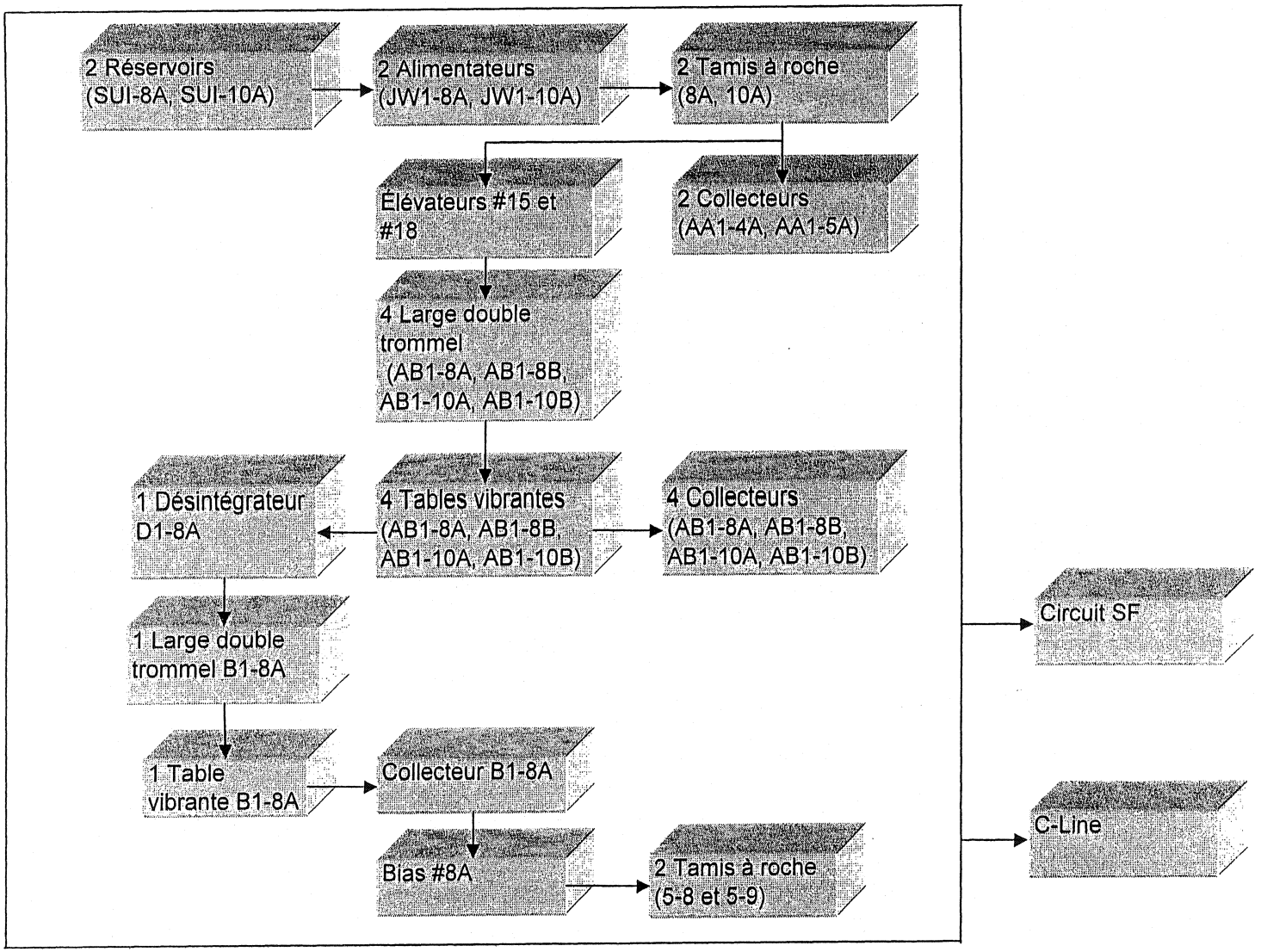


ANNEXE 9

LIGNES 8A-10A

DE L'ALIMENTATION AUX COLLECTEURS

Lignes 8A-10A
De l'alimentation aux collecteurs

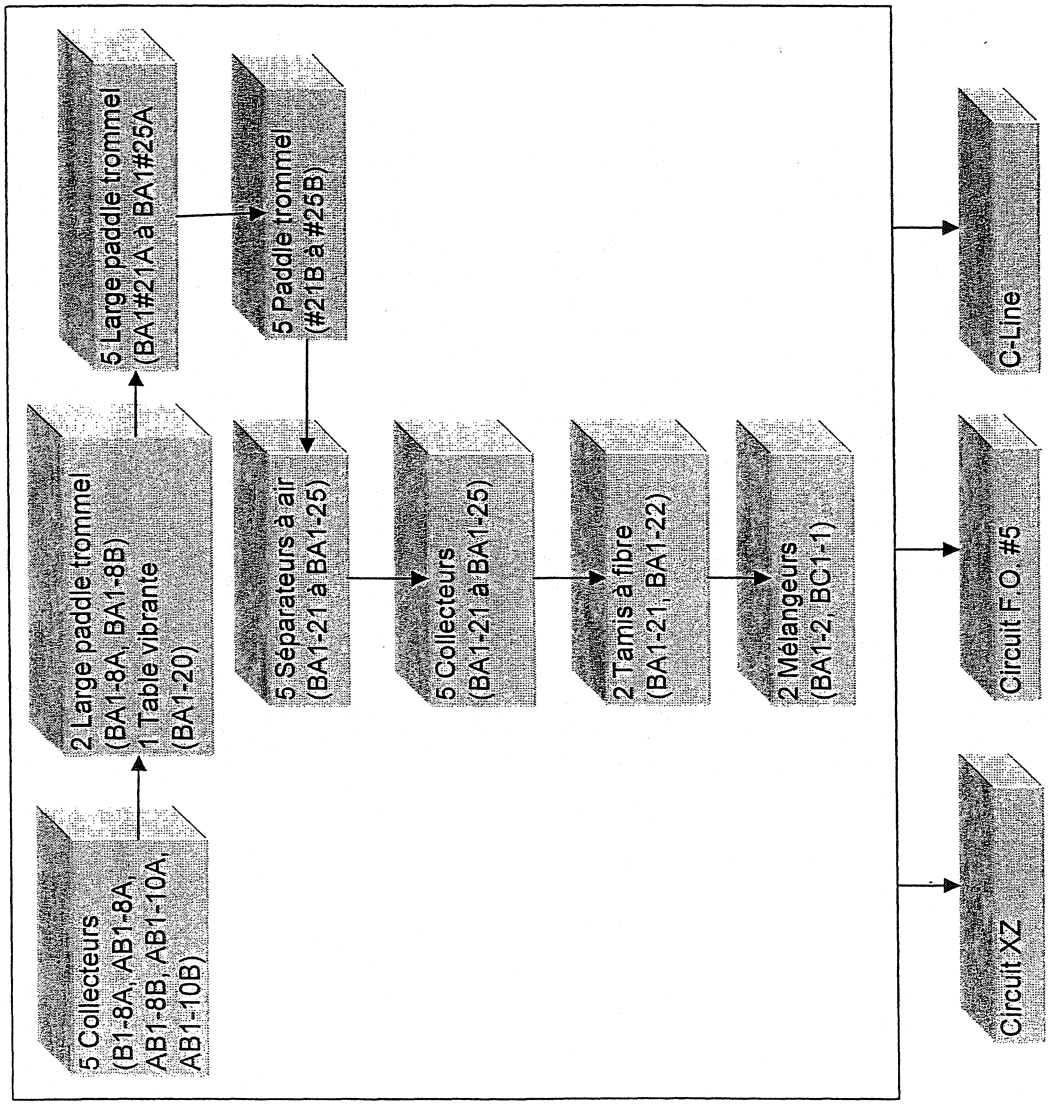


ANNEXE 10

LIGNES 8A-10A

À PARTIR DES COLLECTEURS

Lignes 8A-10A
À partir des collecteurs

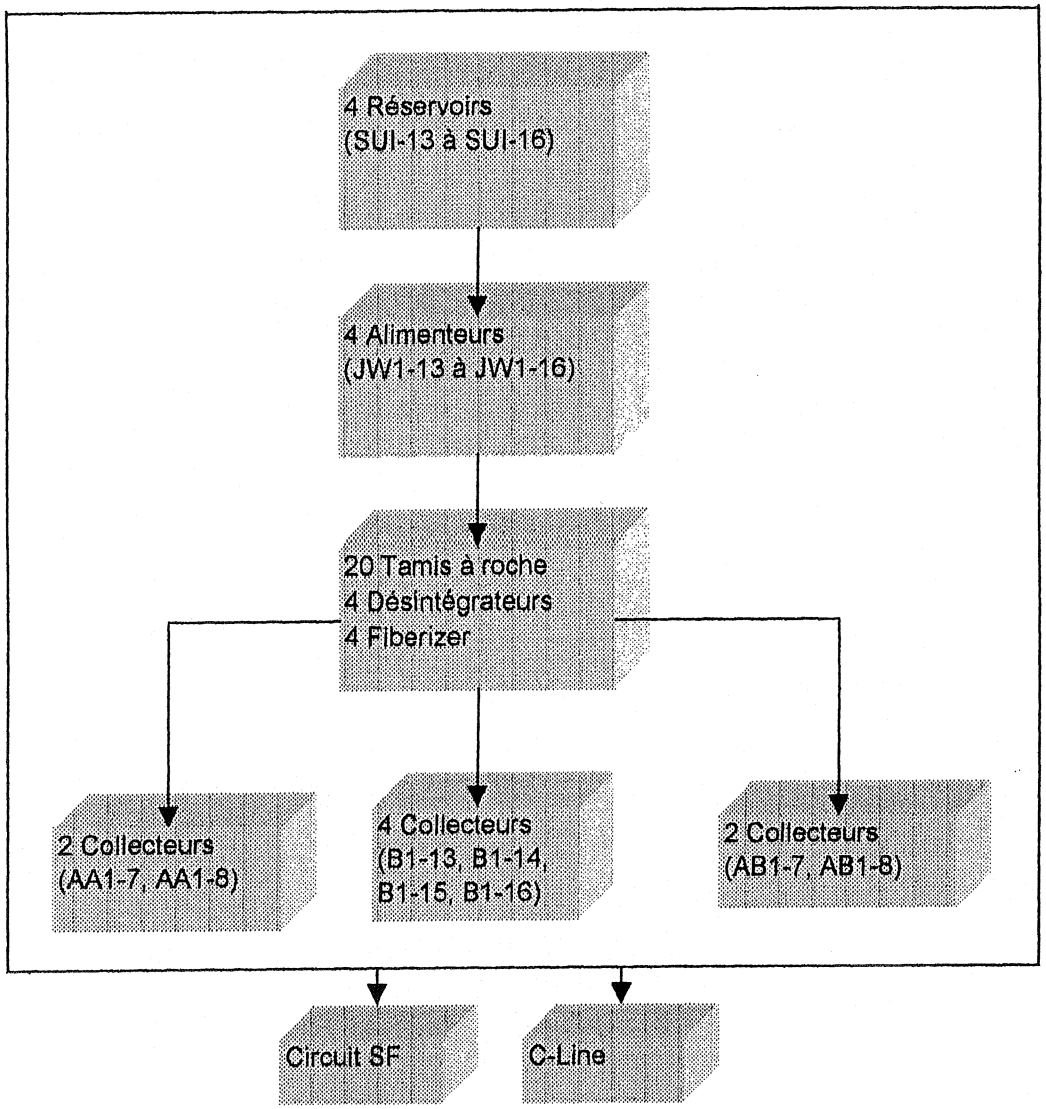


ANNEXE 11

LIGNES 13 À 16

DE L'ALIMENTATION AUX COLLECTEURS

Lignes 13 à 16
De l'alimentation aux collecteurs

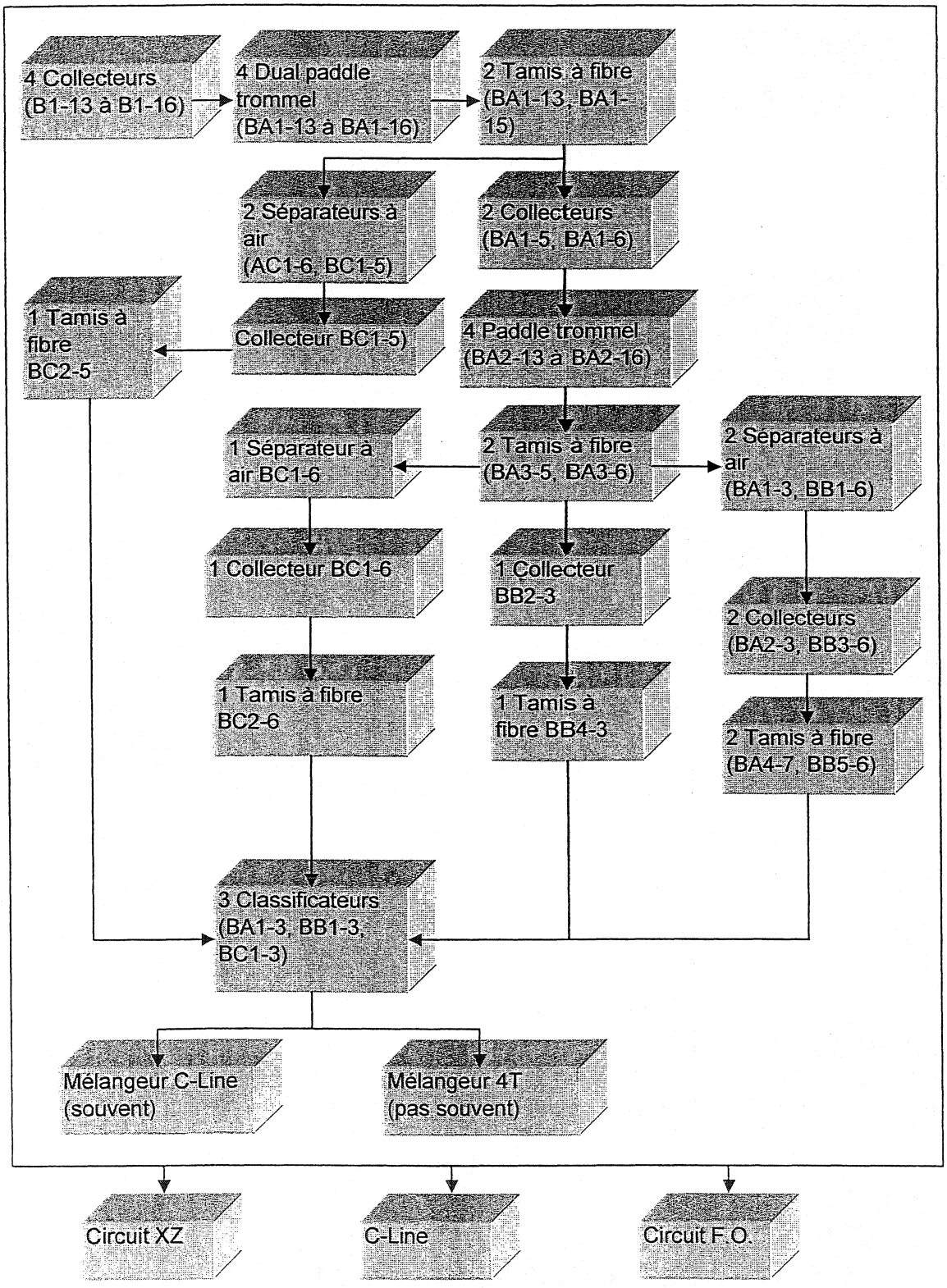


ANNEXE 12

LIGNES 13 À 16

À PARTIR DES COLLECTEURS B

Lignes 13 à 16
À partir des collecteurs B

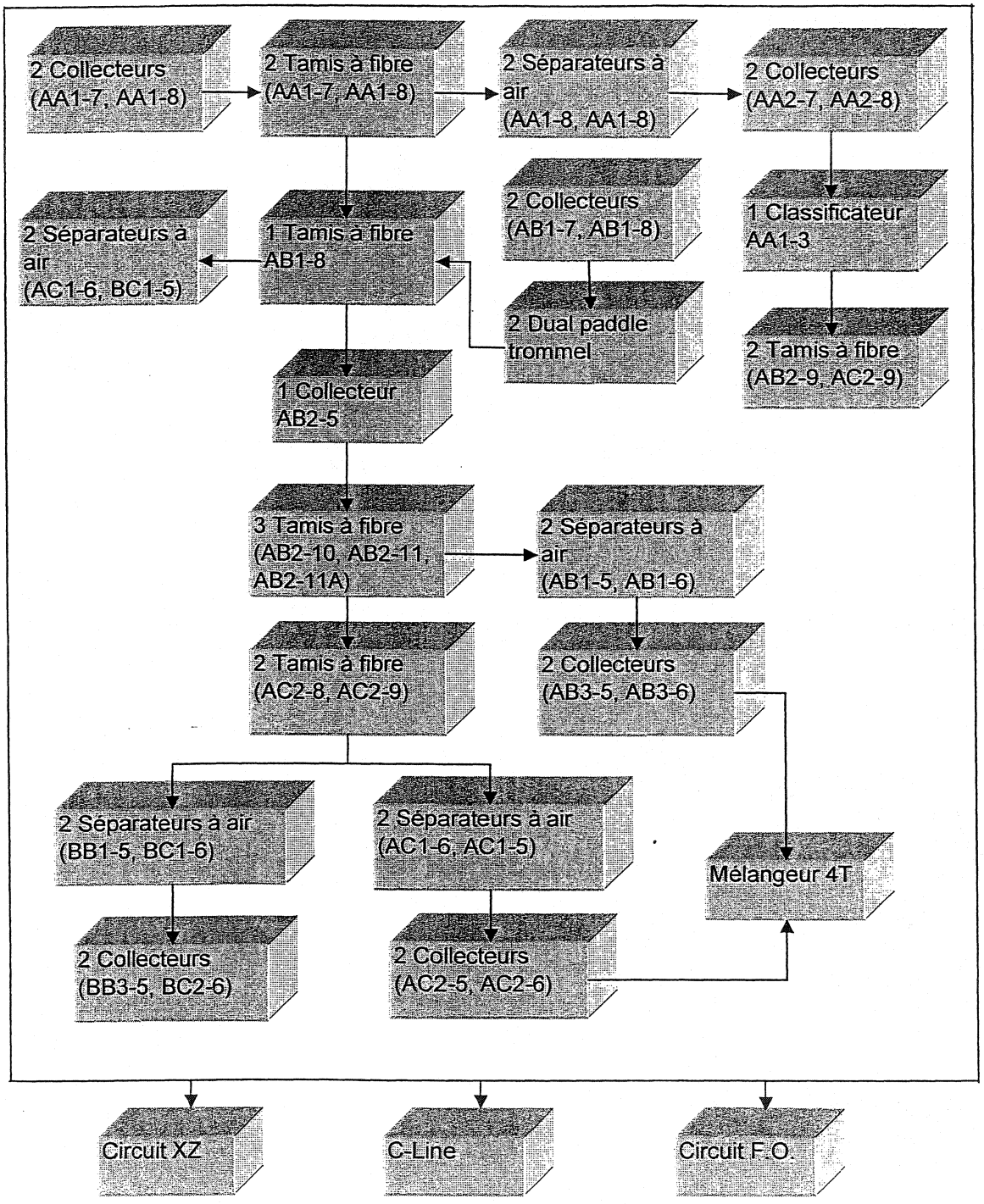


ANNEXE 13

LIGNES 13 À 16

À PARTIR DES COLLECTEURS AA ET AB

Lignes 13 à 16
A partir des collecteurs AA et AB



ANNEXE 14

CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE MENSUELLE

	2001		2002	
	Puissance (KW)	**Énergie (KWh)**	**Puissance (KW)**	**Énergie (KWh)**
Janvier	27816	12131364	25512	8134727
Février	25992	11389398	25776	9435570
Mars	26208	11746368	25584	8788866
Avril	26160	10077360	24864	8077458
Mai	24960	9840480	25344	8702640
Juin	24072	8422614	24408	8342754
Juillet	24336	6712134		
Août	24888	9963660		
Septembre	25320	8712342		
Octobre	25008	10109112		
Novembre	25728	9600924		
Décembre	24648	6105276		

ANNEXE 15

RÉPARTITION DES COÛTS ÉNERGÉTIQUES

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin
Pelles électriques	19196	13063	16391	15172	16167	15276
Mine	15597	20901	20095	18601	19821	18728
Concassage primaire	5999	6532	6279	5812	6193	5852
Mine souterraine	5999	6532	6412	5936	6325	5976
Concassage secondaire	65986	58785	63762	59023	62892	59424
Séchoirs	32393	31352	33462	30975	33005	31185
Entrepôt de minerai sec	14997	17635	15444	14296	15233	14393
Moulin #6	**242170**	**254538**	**248776**	**230287**	**245383**	**231851**
Expéditions	1380	1502	1445	1338	1425	1347
Chemin de fer	3599	3919	3162	2927	3119	2947
Usine à vapeur	14397	15676	15039	13921	14834	14016
Centrale électrique	7198	7838	7542	6981	7439	7029
Entretien et réparation	2999	3266	3117	2885	3075	2905
Bureau principal	3599	3919	3749	3470	3697	3494

TOTAL ($)	435509	445458	444675	411624	438608	414423
KWH	8134727	9435570	8788866	8077458	8702640	8342754
PUISSANCE (KW)	25512	25776	25584	24864	25344	24408
# DE JOURS	31	28	31	30	31	30

ANNEXE 16

CALCULS DE LA RÉPARTITION DES FRACTIONS PAR LIGNE

Fraction AA = 0,1

45% pour les lignes 1 à 6

55% pour les lignes 7 à 16 incluant 8A-10A

Lignes 1 à 6 : 0,45 * 0,1 tph = 0,045 tph

donc par ligne : 0,045 tph / 6 lignes = 0,0075 tph/L

Lignes 7 à 16 : 0,55 * 0,1 tph = 0,055 tph

donc par ligne : 0,055 tph / 12 lignes = 0,00458 tph/L

Fraction A (AB et AC) = 18 tph

75% de fibre AB = 0,75 * 18 tph = 13,5 tph de fibre AB

25% de fibre AC = 0,25 * 18 tph = 4,5 tph de fibre AC

AB : 50% par les lignes 1 à 6 = 0,5 * 13,5 tph = 6,75 tph

30% par les lignes 7 à 12 = 0,3 * 13,5 tph = 4,05 tph

20% par les lignes 13 à 16 = 0,2 * 13,5 tph = 2,7 tph

AB ligne 1 à 6 : 6,75 tph / 6 lignes = 1,125 tph/L

AB ligne 7 à 12 : 4,05 tph / 6 lignes = 0,675 tph/L

AB ligne 13 à 16: 2,7 tph / 4 lignes = 0,675 tph/L

AC :	40% par les lignes 1 à 6 = 0,4 * 4,5 tph = 1,8 tph		
	35% par les lignes 7 à 12 = 0,35 * 4,5 tph = 1,575 tph		
	25% par les lignes 13 à 16 = 0,25 * 4,5 tph = 1,125 tph		
AC ligne 1 à 6 :	1,8 tph / 6 lignes =	0,3	tph/L
AC ligne 7 à 12 :	1,575 tph / 6 lignes =	0,2625	tph/L
AC ligne 13 à 16:	1,125 tph / 4 lignes =	0,28125	tph/L

Fraction B = 5 tph

55% pour la fibre BA des lignes 7 à 16 = 0,55 * 5 tph = 2,75 tph

40% pour la fibre BC des lignes 7 à 16 = 0,4 * 5 tph = 2 tph

5% pour la fibre BA de la ligne 6 = 0,05 * 5 tph = 0,25 tph

Lignes 7 à 16 (BA) = 2,75 tph / 10 lignes =	0,275	tph/L
Lignes 7 à 16 (BC) = 2 tph / 10 lignes =	0,2	tph/L
Lignes 6 (BA) =	0,25	tph/L

Fraction C = 7 tph

La fibre CA est traité et devient de la fibre CB

donc : 8 tph de fibre CA - 1 tph de rebut = 7 tph de fibre CB

Cette fibre est produite uniquement par les 6 lignes du circuit secondaire

Fibre CB, circuit secondaire = 7 tph / 6 lignes = 1,16667 tph/L

Fraction CP = 4 tph

45% pour les lignes 1 à 6 = 0,45 * 4 tph = 1,8 tph

55% pour les lignes 7 à 16 incluant 8A-10A = 0,55 * 4 tph = 2,2 tph

Lignes 1 à 6 = 1,8 tph / 6 lignes =	0,3	tph/L
Lignes 7 à 16 = 2,2 tph / 12 lignes =	0,18333	tph/L

Fraction 8A - 10A = 3 tph

50% pour la ligne 8A = 0,5 * 3 tph =	1,5	tph/L
50% pour la ligne 10A = 0,5 * 3 tph =	1,5	tph/L

Fraction XZ = 17 tph

50% pour les lignes 1 à 6 = 0,5 * 17 tph = 8,5 tph

50% pour les lignes 7 à 16 incluant 8A-10A = 0,5 * 17 tph = 8,5 tph

Lignes 1 à 6 :	75% de fibre AB = 0,75 * 8,5 tph =	6,375	tph
	25% de fibre AC = 0,25 * 8,5 tph =	2,125	tph

Fibre AB : 6,375 tph / 6 lignes = 1,0625 tph/L

Fibre AC : 2,125 tph / 6 lignes = 0,35417 tph/L

Lignes 7 à 16 :	50% de fibre AB = 0,5 * 8,5 tph =	4,25	tph
	50% de fibre BA = 0,5 * 8,5 tph =	4,25	tph
	Fibre AB :	4,25 tph / 12 lignes = 0,35417 tph/L	
	Fibre BA :	4,25 tph / 12 lignes = 0,35417 tph/L	

Fraction SF = 15 tph

45% pour les lignes 1 à 6 = 0,45 * 15 tph = 6,75 tph

55% pour les lignes 7 à 16 incluant 8A-10A = 0,55 * 15 tph = 8,25 tph

Lignes 1 à 6 :	6,75 tph / 6 lignes =	1,125	tph/L
Lignes 7 à 16 :	8,25 tph / 12 lignes =	0,6875	tph/L

Fraction WD = 5 tph

45% pour les lignes 1 à 6 = 0,45 * 5 tph = 2,25 tph

55% pour les lignes 7 à 16 incluant 8A-10A = 0,55 * 5 tph = 2,75 tph

Lignes 1 à 6 :	2,25 tph / 6 lignes =	0,375	tph / ligne
Lignes 7 à 16 :	2,75 tph / 12 lignes =	0,22917	tph / ligne

Extension = 5 tph

Répartit également entre les lignes 1 à 16

5 tph / 16 lignes =	0,3125	tph / ligne

ANNEXE 17

PROGRAMME D'OPTIMISATION EN LANGAGE AMPL

```
set PROD ;
set I within {PROD} ; #produits intermédiaires
set J within {PROD}; #produits finis
set K; #modes
set T ordered;
set T1 within {T};
set T2 within {T};
set T3 within {T};
param TMAX {I,K} >= 0 default 0;
param Q1MAX {K} >= 0  default 0;
param QFINI {I,J} >= 0 default 0;
param D {J,T} >= 0 default 0;
param H {K} >= 0  default 0;
param EV {K} >= 0  default 0;  # kW
param EN {K} >= 0  default 0;  # kWh
param C1 >= 0;
param C2 >= 0;
param C3 >= 0;
param f1 >= 0;
param f2 >= 0;
param C >= 0;
param V >= 0;
var Delta {K,T} binary;
var x {PROD,T} >=0;
var y {PROD,T} >=0;
var EMAX >=0;

# un mode par période
subject to contrainteUNMODEPER {t in T} :
        sum {k in K} Delta[k,t] <= 1;

# INVENTAIRE MINERAI
# minerai inférieur ou égal à la quantité maximale de PI que l'on peut fabriquer
subject to contrainte0 {i in I, t in T, k in K}:
        y[i,t] <= Q1MAX[k];
# CONTRAINTE DE FABRICATION
subject to contraintefabINTERM_max {i in I, t in T : ord(t) > 0} :
        x[i,t] <= sum {k in K} (Delta[k,t] * TMAX[i,k] * Q1MAX[k]);

subject to contraintefabFINI {i in I, t in T : ord(t) > 0} :
```

```
        x[i,t] = sum {j in J} QFINI[i,j] * x[j,t] ;

# INVENTAIRE PRODUITS INTERMEDIAIRES
subject to balanceprodinterm0a {i in I} :
        x[i,first(T)] = 0;

subject to balanceprodinterm0b {i in I} :
        y[i,first(T)] = 0;

# INVENTAIRE PRODUITS FINIS
subject to balanceprodfini0a {j in J} :
        x[j,first(T)] = 0;

subject to balanceprodfini0b {j in J} :
        y[j,first(T)] = 0;

subject to balanceprodfini {j in J, t in T: ord(t) > 0} :
        x[j,t] + y[j,prev(t)] = D[j,t] + y[j,t] ;

# CAPACITE MAXIMALE DES ENTREPOTS
subject to contrainteCAPENT_1 {t in T} :
        sum {j in J} y[j,t] <= V;

# ENERGIE
subject to contrainte8 {k in K, t in T} :
        EMAX >= EV[k] * Delta[k,t];



# FCT DE COUT
minimize cout_total:
          f1 * EMAX
        + f2 * sum {t in T,  k in K} Delta[k,t] * EN[k]
        + C1 * sum {t in T1, k in K} Delta[k,t] * H[k]
        + C2 * sum {t in T2, k in K} Delta[k,t] * H[k]
        + C3 * sum {t in T3, k in K} Delta[k,t] * H[k];

data;
param V := 10000;
```

```
param C1 := 125;
param C2 := 150;
param C3 := 175;
param f1 := 7.7983;
param f2 := 0.0242;
```

ANNEXE 18

PROGRAMME DE LECTURE ET D'ÉCRITURE DES RÉSULTATS DANS ACCESS

```
#model jeffrey_complet_modifie_ipi.txt;
#model jeffrey_complet_modifie2.txt;
model jeffrey_complet_modifie_sim.mod
option solver cplexamp;


# options de CPLEX
 option cplex_options '\
 mipinterval=250 \
 mipdisplay=1 \
 mipemphasis=2 \
 solutionlim=10 \
 timelimit=900 \
 timing=1';


table Periodes1 "ODBC" "Jeffrey.mdb" "Periodes":
   T <- [periode_code];

#table Periodes2 "ODBC" "Jeffrey.mdb" "SQL=SELECT * FROM Periodes
WHERE type_periode_code='T1'":
#   T1 <- [periode_code], Q1 ~ VAR_periode_Q1 OUT;

#table Periodes3 "ODBC" "Jeffrey.mdb" "SQL=SELECT * FROM Periodes
WHERE type_periode_code='T2'":
#   T2 <- [periode_code], Q1 ~ VAR_periode_Q1 OUT;

#table Periodes4 "ODBC" "Jeffrey.mdb" "SQL=SELECT * FROM Periodes
WHERE type_periode_code='T3'":
#   T3 <- [periode_code], Q1 ~ VAR_periode_Q1 OUT;

table Periodes2 "ODBC" "Jeffrey.mdb" "SQL=SELECT * FROM Periodes
WHERE type_periode_code='T1'":
   T1 <- [periode_code];

table Periodes3 "ODBC" "Jeffrey.mdb" "SQL=SELECT * FROM Periodes
WHERE type_periode_code='T2'":
   T2 <- [periode_code];
```

```
table Periodes4 "ODBC" "Jeffrey.mdb" "SQL=SELECT * FROM Periodes
WHERE type_periode_code='T3'":
  T3 <- [periode_code];

table Modes "ODBC" "Jeffrey.mdb" "SQL=select * from Modes order by
mode_EV desc":
  K  <- [mode_code], Q0 ~ mode_Q0 IN, Q1MIN ~ mode_Q1MIN IN,
        Q2MIN ~ mode_Q2MIN IN, Q1MAX ~ mode_Q1MAX IN, Q2MAX ~
mode_Q2MAX IN,
        E ~ mode_EV IN, EH ~ mode_EN IN, H ~ mode_H IN;

table Produits1 "ODBC" "Jeffrey.mdb" "Produits":
  PROD <- [produit_code];

table Produits3 "ODBC" "Jeffrey.mdb" "SQL=SELECT * FROM Produits
WHERE type_produit_code='INTERM'":
  I <- [produit_code];

table Produits4 "ODBC" "Jeffrey.mdb" "SQL=SELECT * FROM Produits
WHERE type_produit_code='FINI'":
  J <- [produit_code];

table Nomenclature "ODBC" "Jeffrey.mdb" "Nomenclature":
 [produit_interm, produit_fini], QFINI ~ nom_prop IN;

table Produits_Modes "ODBC" "Jeffrey.mdb" "Produits_Modes":
 [produit_code, mode_code], TMIN ~ pm_tmin IN, TMAX ~ pm_tmax IN;

table Produits_Periodes "ODBC" "Jeffrey.mdb" "Produits_Periodes":
 [produit_code, periode_code], D ~ pp_demande IN;

table Produits_Periodes2 "ODBC" "Jeffrey.mdb" "PP":
 [produit_code, periode_code], x ~ VAR_pp_x OUT, y ~ VAR_pp_y OUT, z ~
VAR_pp_z OUT;

table Modes_Periodes "ODBC" "Jeffrey.mdb" "Modes_Periodes":
 [mode_code, periode_code], Delta ~ VAR_mp_delta OUT;

read table Periodes1;
read table Periodes2;
```

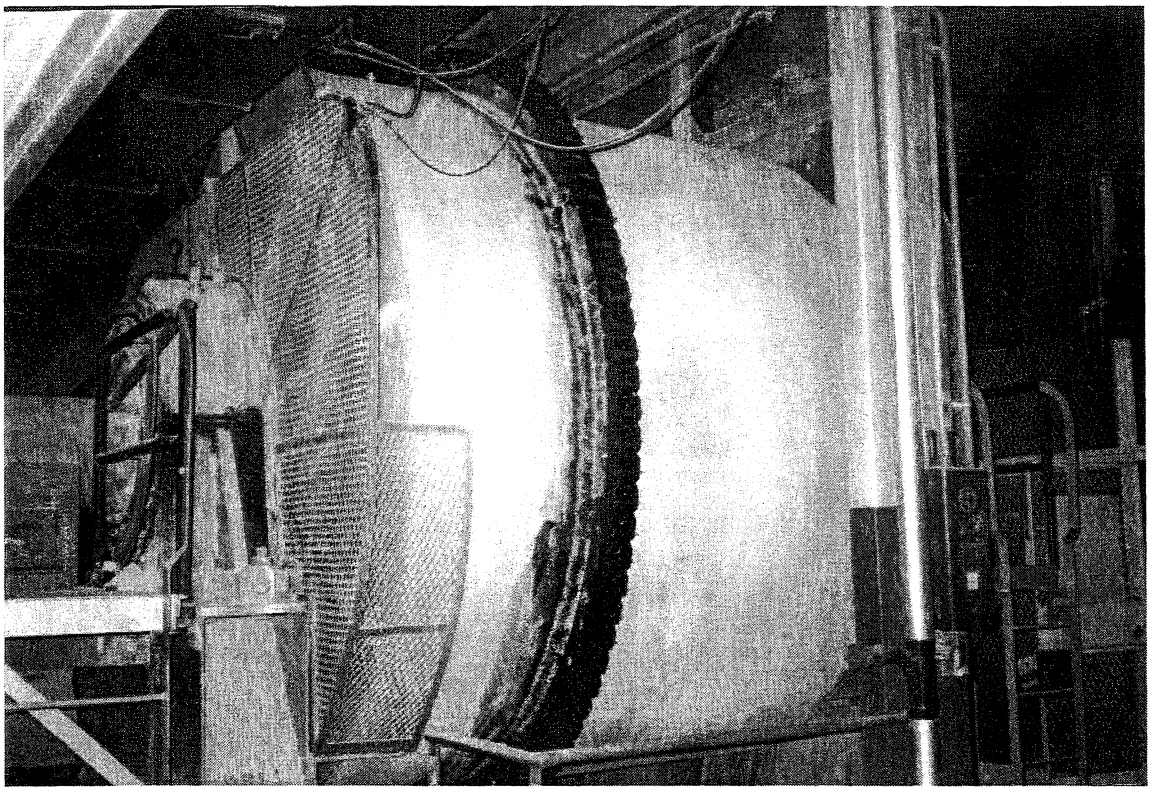
```
read table Periodes3;
read table Periodes4;
read table Modes;
read table Produits1;
read table Produits2;
read table Produits3;
read table Produits4;
read table Nomenclature;
read table Produits_Modes;
read table Produits_Periodes;

solve;

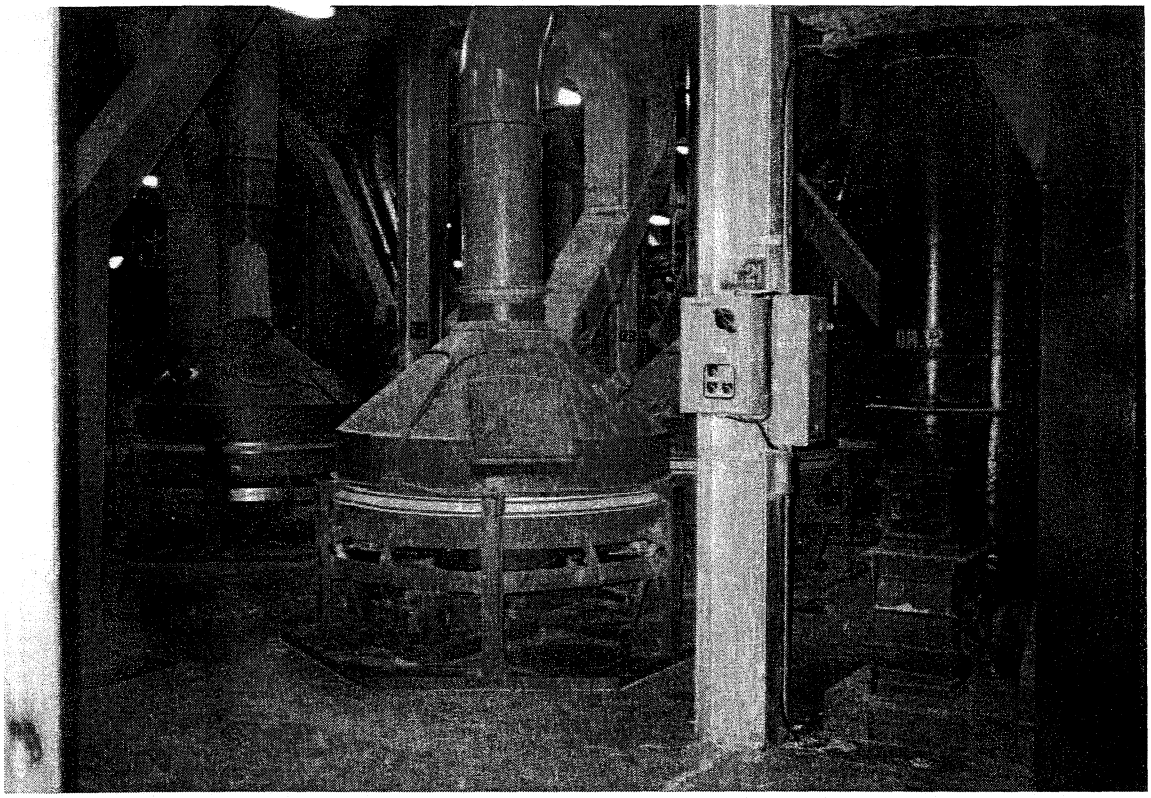
#write table Periodes1;
write table Produits_Periodes2;
write table Modes_Periodes;
#write table Periodes2;
#write table Periodes3;
#write table Periodes4;
```

ANNEXE 19

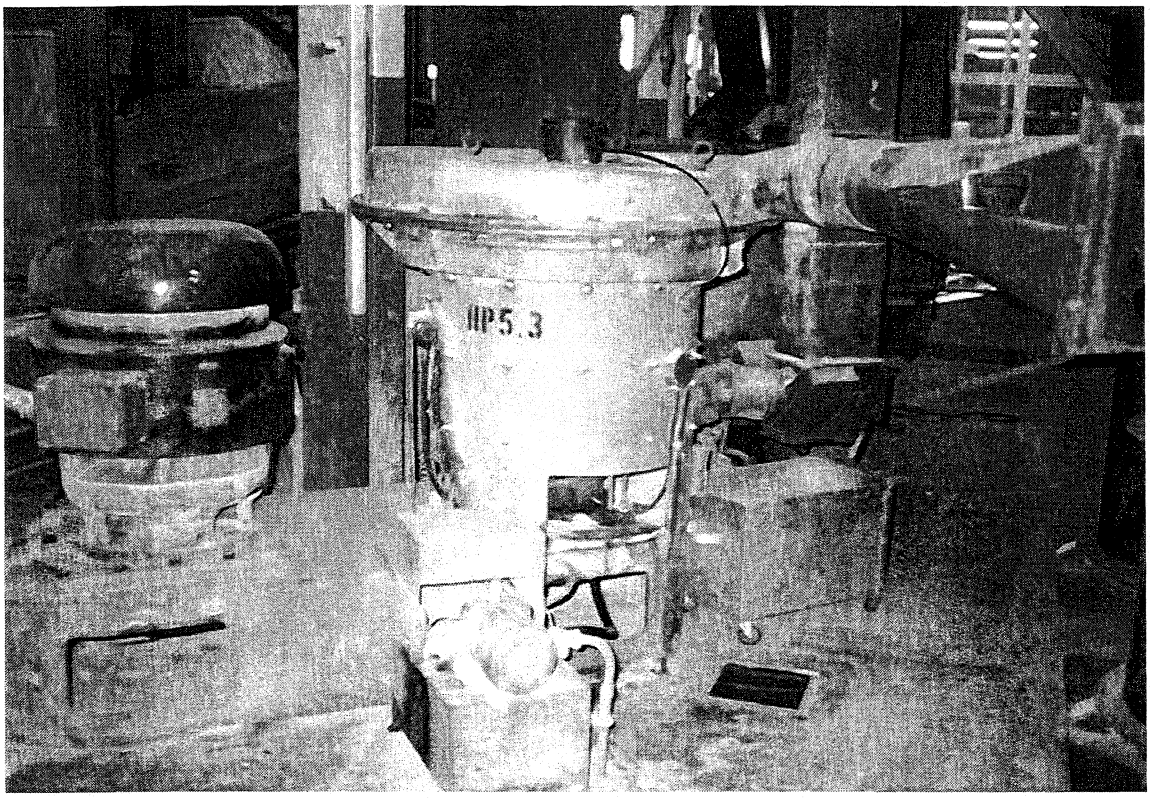
Photos



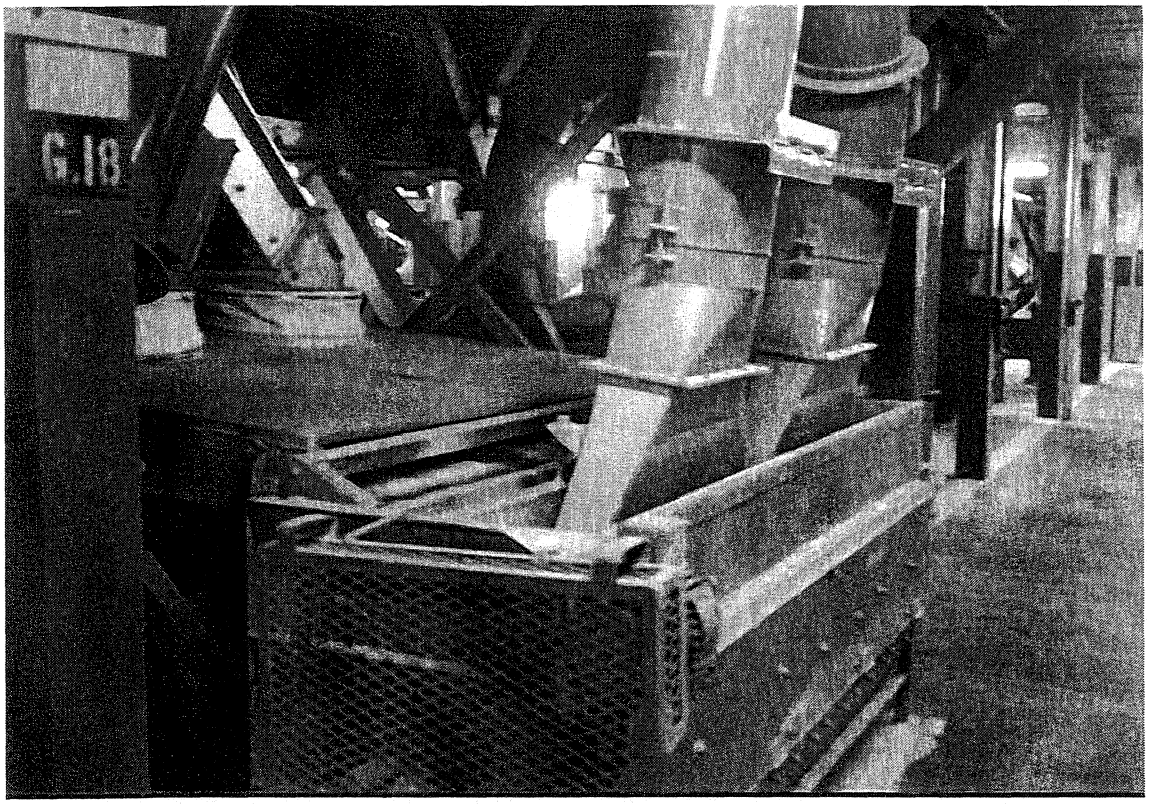
A) Mélangeur : Actionné par une chaîne, il mélange le produit final avec un mouvement de rotation. C'est après être passé par un mélangeur que les échantillons sont valides pour être testés. Après avoir été mélangé, le produit est envoyé à l'ensachage lorsque les tests sont positifs. Si les tests sont négatifs, le produit est retraité complètement.



B) Séparateur à air : Le produit arrive par le tuyau carré incliné à 45 degrés situé à l'arrière. Une pression d'air négative aspire une partie du produit par le tuyau rond sur le dessus du séparateur. Le résidu, ce qui est trop lourd pour être aspiré, est envoyé vers le bas par gravité et se constitue majoritairement de petites roches et d'impuretés. Il est dont expédié avec les rebuts.



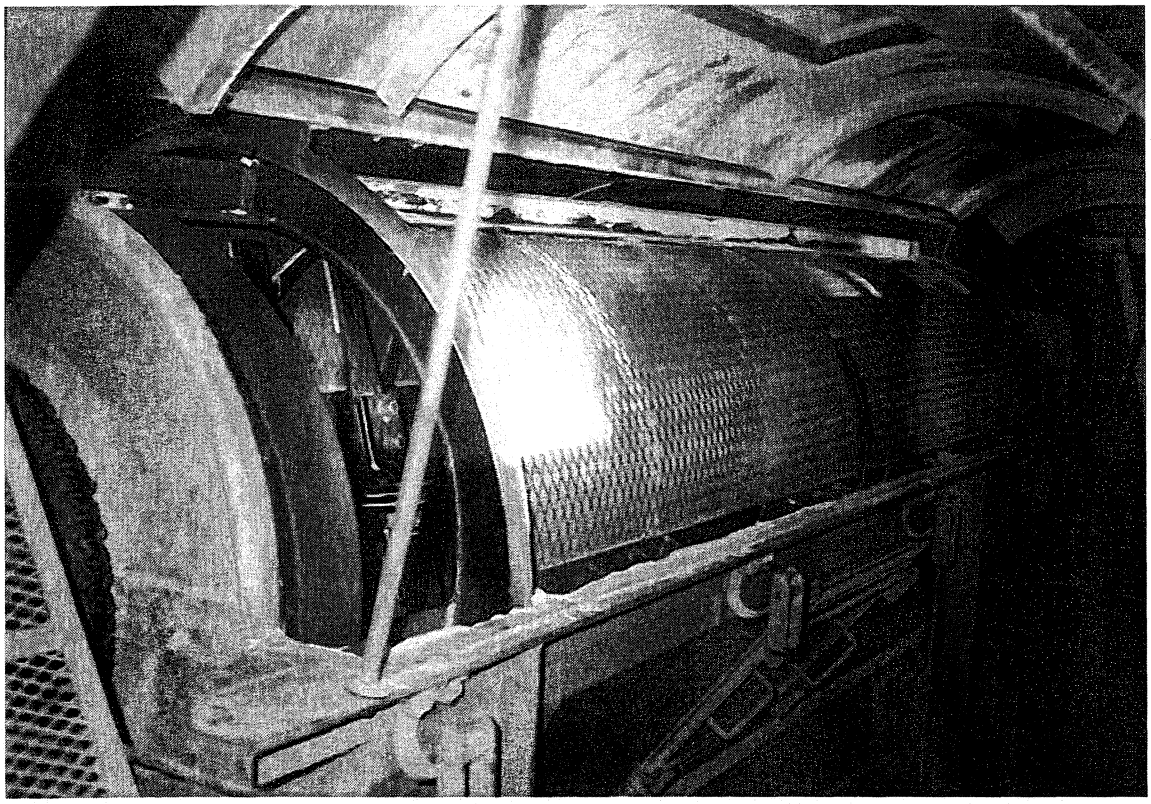
C) Pulvérisateur Hurricane : La fibre est aspirée par l'ouverture sur la droite. Devant cette ouverture, il y a un mouvement rotatif de couteaux. Le nombre de couteaux peut être facilement changé et est établi selon la longueur de fibre désirée. Une fibre plus courte s'obtient par l'ajout de couteaux et vice versa.



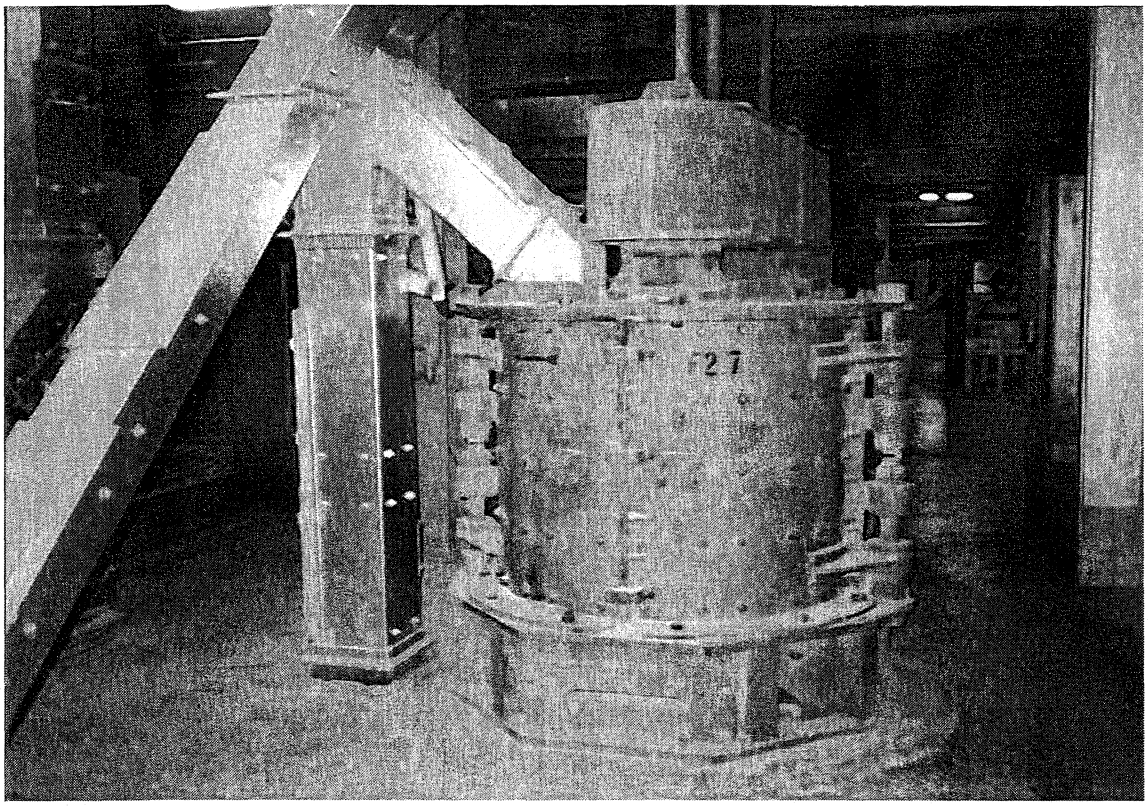
D) Table vibrante : La fibre arrive par le tuyau situé sur le dessus de la table. Elle est ensuite amenée vers la droite par le mouvement vibrant de la table. Les petites roches et les impuretés tombent tandis que la fibre utilisable est aspirée par les deux collecteurs qui sont les tuyaux verts sur la droite.



E) Marque de référence : Le moulin #6 occupe 12 étages et se compose de plus de 4000 appareils. Afin de se repérer plus facilement dans l'usine, des points de référence sont installés sur les piliers. Chaque étage est séparé en un quadrillage allant de A1 jusqu'à N30.



F) Trommel double : Le produit circule dans le cylindre rotatif. Les lames de métal incluses dans le cylindre ont pour tâche d'ouvrir la fibre. Le cylindre est légèrement incliné pour permettre à la fibre produite de circuler d'un bout jusqu'à l'autre.



G) Broyeur à marteaux : Le produit passe à travers ce broyeur du haut vers le bas et au passage est frappé par des marteaux qui en ouvrent la fibre. C'est un appareil très efficace mais difficile à entretenir lorsqu'il y a des bris de marteaux à cause de l'accessibilité restreinte. De plus, un bris qui n'est pas rapidement repéré peut endommager à son tour d'autres marteaux.