PolyPublie
Polytechnique Montréal

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
UNIVERSITÉ D'INGÉNIERIE

Titre: Title:	Optimisation en temps réel d'un système de distribution de gaz
Auteur: Author:	Lyne Woodward
Date:	2003
Type:	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis
Référence: Citation:	Woodward, L. (2003). Optimisation en temps réel d'un système de distribution de gaz [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/7209/

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: PolyPublie URL:	https://publications.polymtl.ca/7209/
Directeurs de recherche: Advisors:	Michel Perrier, & Benoît Robitaille
Programme: Program:	Non spécifié

Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal

https://publications.polymtl.ca

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

OPTIMISATION EN TEMPS RÉEL D'UN SYSTÈME DE DISTRIBUTION DE GAZ

LYNE WOODWARD
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE CHIMIQUE)
JUILLET 2003

© Lyne Woodward, 2003

National Library of Canada
Bibliothèque nationale du Canada

Acquisitions and Bibliographic Services
Acquisisitons et services bibliographiques

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence
ISBN: 0-612-91973-0
Our file Notre référence
ISBN: 0-612-91973-0

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

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

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

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

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

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

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 :

OPTIMISATION EN TEMPS RÉEL D'UN SYSTÈME DE DISTRIBUTION DE GAZ

Présenté par : WOODWARD, Lyne
En vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. STUART Paul, Ph. D., président
M. PERRIER Michel, Ph. D., membre et directeur de recherche
M. ROBITAILLE Benoit, Ph. D., membre et codirecteur de recherche
M. NADEAU Patrice, Ph. D., membre

À mes enfants, Christophe et Élizabeth
À leur père, Philippe

«Qui pense peu erre beaucoup »
Léonard de Vinci

Remerciements

Tout d'abord, j'aimerais remercier M. Michel Perrier pour avoir accepté de travailler avec moi et pour son appui au long de ce projet.

Je veux également remercier M. Benoit Robitaille pour sa disponibilité et son enthousiasme constant. Merci également à M. Patrice Nadeau pour avoir contribué par le partage de ses connaissances du procédé. Je remercie aussi toutes les personnes de QIT qui ont contribué de près ou de loin à rendre ce projet possible.

Je remercie M. André Noël pour m'avoir aidée à choisir ce projet et y avoir collaboré avec toute l'expérience et le professionnalisme que je lui connais. Je remercie également Hatch, le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie (CRSNG) et l'École polytechnique pour leur support financier. Merci à Bernard Pelletier pour son écoute et ses encouragements.

Je tiens à remercier M. Fraser Forbes et l'Université d'Alberta qui m'ont facilité l'accès au logiciel GAMS.

Je remercie tous mes collègues de l'URCPC. Ce fut un immense plaisir de vous côtoyer et de partager avec vous les hauts et les bas de notre cheminement.

Finalement, je remercie ma famille pour m'avoir encouragée dans ce retour aux études. Merci à mes parents qui m'ont appris le goût du dépassement et de l'excellence. Merci à Christophe et Élizabeth qui par leur spontanéité et leur candeur sont une source intarissable d'énergie pour moi. Je tiens à remercier tout spécialement mon conjoint Philippe, pour sa patience, ses encouragements et la confiance qu'il me porte.

Résumé

La présente recherche vise à modéliser la distribution de gaz à l'usine de *QIT Fer et Titane* (Sorel, Québec) pour ensuite appliquer un algorithme d'optimisation en temps réel. Au cours du procédé de transformation, du monoxyde de carbone est généré. Ce gaz est réutilisé comme combustible dans plusieurs secteurs de l'usine. Certains secteurs peuvent également utiliser un combustible alternatif dans l'éventualité d'une baisse du gaz CO généré.

L'usine n'a pas les équipements nécessaires pour l'entreposage du gaz CO. La seule façon de faire une utilisation variable dans le temps de ce gaz est par la fluctuation d'inventaires de produits ou de produits intermédiaires, la variation des débits et l'arrêt de certains équipements pour répartir l'utilisation du gaz selon sa disponibilité. L'optimisation tient compte de perturbations futures survenant sur un horizon de temps compris entre quelques jours et une semaine comme par exemple, une baisse de puissance électrique consommée par l'usine ou un arrêt planifié de certains équipements.

Le modèle utilisé est un modèle statique basé sur des bilans de matières et d'énergie. Ce modèle est linéaire. L'utilisation de variables discrètes pour représenter la décision d'opérer des équipements classifie le problème d'optimisation comme un problème de programmation linéaire mixte. La fonction objectif à minimiser est une sommation sur tout l'horizon de temps considéré des coûts reliés à la consommation de combustibles alternatifs, à l'arrêt d'équipements, à la manutention d'inventaire, pour chaque pas de temps. Les contraintes sont définies pour chaque pas de temps : maximum et minimum d'inventaire, débits maximaux pour la manutention d'inventaires, limites de production des équipements, disponibilité de gaz CO, nombre d'équipements disponibles à l'opération. Le logiciel GAMS a été utilisé pour faire des simulations basées sur des cas possibles en usine. Quatre principaux cas ont été simulés et analysés dans le présent

rapport. Ces cas ont été définis avec les intervenants d'usine afin d'être les plus réalistes possibles. Deux de ces cas ont été repris avec différents paramètres pour bien démontrer l'impact de changements possibles dans la définition du problème.

Les simulations ont donné des résultats réalisables et explicables selon le choix des différents critères et paramètres. Par contre, l'utilisation en usine d'un tel outil doit se faire en boucle ouverte. Le modèle utilisé pour l'optimisation est un modèle simplifié de l'usine afin de ne pas trop alourdir sa résolution. La mise à jour du modèle (courbes de combustion, revue des coûts, etc…) doit être faite régulièrement pour assurer la fiabilité des résultats. Une analyse des résultats est nécessaire avant l'implantation en usine.

Certaines améliorations pourraient être apportées à la définition du problème. Une modélisation des autres consommateurs de gaz CO et une meilleure évaluation des coûts d'arrêts des équipements rendrait le modèle plus réaliste. De plus, l'ajout d'une contrainte sur la répartition égale du combustible alternatif entre les différents équipements concernés décrirait plus fidèlement la façon actuelle d'opérer. Cette contrainte rendrait le problème non-linéaire et le choix de l'algorithme utilisé devrait être revu. Il faudrait également s'assurer que la valeur de la fonction objectif trouvée est bien un optimum global

Abstract

The main goal of this project was to build a model of an off-gas distribution system in *QIT Fer et Titane* plant (Sorel, Quebec) and to apply a real-time optimization algorithm. During process, carbon monoxide is produced. This off-gas is reused as fuel by many different plant's units. Some of those units can also use alternative fuel during low CO gas availability.

Actually, QIT does not have equipment to stock CO gas. The only way to do a time-variant using of this gas is by variable use of products and by-products stock piles and equipments flows, and by equipment shutdowns. This way, the CO gas is used when it's available. Optimization take into account future perturbations happening during time horizon going from few days up to one week. For example, those perturbations could be a downturn in electrical power consumption or planned shutdown of equipments.

The model is a static and linear one and was built using mass and energy balances. Discrete variables were used to model decisions to operate or not equipments so the optimization problem is a mixed-integer linear programming problem.

The objective function to be minimized is a sum on all horizon time of costs caused by use of alternative fuel, equipments shutdowns and material handling from stock piles for each time step. Constraints are also defined for each time step : minimum and maximum of stock piles, flow limits for stock piles handling, equipments production limits, CO gas availability, number of equipments available to operation. GAMS software is used to simulation operation cases.

Four main tests cases have been simulated and the results are analysed. Those cases were defined with help from plant engineers in order to be as realistic as possible. Two

of those four cases have also been simulated with a change in parameters values in order to show impacts of those changes on the results.

The results obtained from simulations are realistic and can be explained by choices of parameters and criterion values. The uses of the developed tool in QIT plant is recommended in open loop. The model used for RTO is simplified in order to make is resolution time acceptable. A regular model update (combustion curves, costs review, etc…) is necessary to obtain reliable results. Results analysis is also required before the implementation.

Some improvements could be done in problem definition. Other CO gas consumers could be modeled and a better cost evaluation of equipment shutdowns would take the model to be more realistic. A new constraint could also be added to ensure the equal distribution of alternative fuel between concerned equipments. This new constraint would help to get a better description of the actual way to operate but would also make the problem to be non-linear. Algorithm choice to solve the optimization problem should also be reviewed. It would be necessary to ensure that the objective function value found is a real global optimum since the problem would become a mixed integer problem non-linear.

Table des matières

Remerciements ..... **v**
Résumé ..... **vi**
Abstract ..... **viii**
Table des matières ..... **x**
Liste des tableaux ..... **xiii**
Liste des figures ..... **xiv**
Liste des sigles et abréviations ..... **xvi**
Liste des annexes ..... **xix**
1. Introduction **1**
1.1. Mise en situation 1
1.2. Objectif et Méthodologie 3
1.2.1. Objectif 3
1.2.2. Méthodologie 3
1.3. Contenu et organisation 4
2. Description du procédé **5**
2.1. Transformation de l'ilménite 7
2.2. Système de distribution de gaz CO 8
3. Revue de littérature **9**
3.1. Optimisation en temps réel 9
3.1.1. Le traitement des données 11
3.1.2. Le modèle 11
3.1.3. L'optimisation 11
3.1.4. L'Analyse 12
3.2. Programmation linéaire mixte 13
3.2.1. Représentation mathématique d'expressions logiques 14
3.2.2. Technique de résolution « branches et limites » 17

3.3. Approximation linéaire par parties 21
4. Formulation du problème 25
4.1. Modèle 25
4.2. Définition de la fonction objectif 30
4.3. Principales contraintes 32
4.4. Expression mathématique du problème d'optimisation 33
5. Simulations et analyse des résultats 41
5.1. Environnement et outils de simulation 41
5.2. Premier cas : arrêt des quatre fours rotatifs 47
5.2.1. Présentation des résultats obtenus 47
5.2.2. Analyse des résultats 52
5.3. Deuxième cas : mode « interruption » 53
5.3.1. Présentation des résultats obtenus 54
5.3.2. Analyse des résultats 58
5.4. Troisième cas : mode « interruption » pendant l'arrêt d'un des fours rotatifs.. 60
5.4.1. Présentation des résultats obtenus 60
5.4.2. Analyse des résultats 64
5.5. Quatrième cas : non-disponibilité de 2 des neufs fours de réduction. 65
5.5.1. Présentation des résultats obtenus 66
5.5.2. Analyse des résultats 70
5.6. Reprise du premier cas avec quantité initiale à la pile B inférieure 71
5.6.1. Présentation des résultats obtenus 72
5.6.2. Analyse des résultats obtenus 76
5.7. Reprise du deuxième cas avec prix du gaz naturel plus bas 77
5.7.1. Présentation des résultats obtenus 77
5.7.2. Analyse des résultats obtenus 82
5.8. Critère de précision et performances 83
5.9. Implantation en usine 85

6. Conclusion **88**

Références **91**

Annexe 1 : Contrainte sur le ratio de gaz naturel aux fours rotatifs **93**

Liste des tableaux

Tableau 3-1 : Représentation de conditions logiques en équations inégalité 15
Tableau 5-1 : Valeurs initiales et minimum des fours rotatifs..... 43
Tableau 5-2 : Valeurs initiales et minimum des piles de matériel..... 45
Tableau 5-3 : Performances des cas étudiés 85

Liste des figures

Figure 2.1 : Schéma simplifié du procédé 6
Figure 3.1 : Hiérarchie d'un système de contrôle 9
Figure 3.2 : Structure d'un système d'optimisation en temps réel 10
Figure 3.3 : Exemple d'un problème résolu par "branches et limites" 20
Figure 3.4 : Courbe de combustion du four rotatif #1 22
Figure 4.1 : Identification des variables manipulées 27
Figure 5.1 : Courbes de consommation spécifique des fours rotatifs 43
Figure 5.2 : Résultats du scénario 1 : puissance disponible, autres usagers de CO, CO aux torchères et pile A 48
Figure 5.3 : Résultats du scénario 1 : piles B et C 49
Figure 5.4 : Résultats du scénario 1 : débit de minerai alimentant les fours rotatifs 50
Figure 5.5 : Résultats du scénario 1 : débit de CO aux fours rotatifs 51
Figure 5.6 : Résultats du scénario 1 : débit de gaz naturel aux fours rotatifs 52
Figure 5.7 : Résultats du scénario 2 : puissance disponible, autres usagers de CO, CO aux torchères et pile A 54
Figure 5.8 : Résultats du scénario 2 : piles B et C 55
Figure 5.9 : Résultats du scénario 2 : débit de minerai aux fours rotatifs 56
Figure 5.10 : Résultats du scénario 2 : débit de CO aux fours rotatifs 57
Figure 5.11 : Résultats du scénario 2 : débit de gaz naturel aux fours rotatifs 58
Figure 5.12 : Résultats du scénario 3 : puissance disponible, autres usagers de CO, CO aux torchères et pile A 60
Figure 5.13: Résultats du scénario 3 : piles B et C 61
Figure 5.14 : Résultats du scénario 3 : débit de minerai aux fours rotatifs 62
Figure 5.15 : Résultats du scénario 3 : débit de CO aux fours rotatifs 63
Figure 5.16 : Résultats du scénario 3 : débit de gaz naturel aux fours rotatifs 64
Figure 5.17 : Résultats du scénario 4 : puissance disponible, autres usagers de CO, CO aux torchères et pile A 66

Figure 5.18 : Résultats du scénario 4 : piles B et C 67
Figure 5.19 : Résultats du scénario 4 : débit de minerai aux fours rotatifs 68
Figure 5.20 : Résultats du scénario 4 : débit de CO aux fours rotatifs 69
Figure 5.21 : Résultats du scénario 4 : débit de gaz naturel aux fours rotatifs 70
Figure 5.22 : Scénario 1 avec pile B plus basse : puissance disponible, autres usagers de CO, CO aux torchères et pile A 72
Figure 5.23 : Scénario 1 avec pile B plus basse : pilesB et C 73
Figure 5.24 : Scénario 1 avec pile B plus basse : minerai alimentant les fours rotatifs .. 74
Figure 5.25 : Scénario 1 avec pile B plus basse : débit de CO aux fours rotatifs 75
Figure 5.26 : Scénario 1 avec pile B plus basse : gaz naturel consommé aux 76
Figure 5.27 : Scénario 2 avec prix du gaz naturel plus bas : puissance disponible, autres usagers de CO, CO aux torchères et pile A 78
Figure 5.28 : Scénario 2 avec prix du gaz naturel plus bas : piles B et C 79
Figure 5.29 : Scénario 2 avec prix du gaz naturel plus bas : débit de minerai aux fours rotatifs 80
Figure 5.30 : Scénario 2 avec prix du gaz naturel plus bas : débit de CO aux fours rotatifs 81
Figure 5.31 : Scénario 2 avec prix du gaz naturel plus bas : gaz naturel aux fours rotatifs et fonction objectif 82
Figure 5.32 : Schéma du RTO en boucle ouverte 86

Liste des sigles et abréviations

$ARRET_{k,t}$	Variable binaire représentant le transfert de l'état de marche vers l'état d'arrêt d'un four rotatif au temps t
BON_{BIN}	Bonification associée au transfert de matériel vers la pile B en $/unité de volume
CA_{IN}	Coût de manutention du minerai des fours rotatifs vers la pile A en $/unité de volume
CA_{OUT}	Coût de manutention du minerai de la pile A vers le secteur de traitement thermique en $/unité de volume
CAK	Coût proportionnel à la durée d'arrêt d'un four rotatif en $/hre
CB_{FOURS}	Coût de manutention du minerai de la pile B vers les fours de réduction en $/unité de volume
CC_{IN}	Coût de manutention du minerai de la pile B vers la pile C en $/unité de volume
CC_{OUT}	Coût de manutention du minerai par de la pile C vers les fours en $/unité de volume
CGN	Coût du gaz naturel en $/unité de volume
$CHGF_{k,t}$	Variable binaire représentant un changement de débit sur le four rotatif k entre le temps t-1 et le temps t
$DELTA_k$	Changement maximal de débit permis en une heure à chaque four rotatif
$FCO_{fours,t}$	Débit de CO produit par les fours de réduction au temps t
$FCO_{USAGERS,t}$	Débit de CO consommé par les autres usagers que les fours rotatifs au temps t
$FGN_{k,t}$	Débit de gaz naturel consommé par le four rotatif k au temps t.
$FM_{fours,t}$	Débit de minerai alimentant les fours au temps t
$M_{A,t}$	Quantité de matière à la pile A au temps t

$M_{B,t}$	Quantité de matière à la pile B au temps t
$M_{C,t}$	Quantité de matière à la pile C au temps t
MAX_A	Inventaire maximum permis à la pile A
MAX_B	Inventaire maximum permis à la pile B
MAX_C	Inventaire maximum permis à la pile C
MAX_k	Débit maximal pouvant être atteint par le four rotatif k
MAX_{FAIN}	Débit maximum de matériel vers la pile A
MAX_{FAOUT}	Débit maximum de matériel de la pile A
MAX_{FCIN}	Débit maximum de matériel vers la pile C
MAX_{FCOUT}	Débit maximum de matériel de la pile C
$MAX_{FBFOURS}$	Débit maximum de matériel de la pile B vers les fours
MIN_A	Inventaire minimum permis à la pile A
MIN_B	Inventaire minimum permis à la pile B
MIN_C	Inventaire minimum permis à la pile C
$MIN_{COTORCH}$	Débit de CO devant être brûlé en tout temps aux torchères afin de les maintenir allumées
MIN_k	Débit minimal pouvant être atteint par le four rotatif k
$NBKFCT_t$	Nombre de fours rotatifs disponibles au temps t
P_t	Puissance électrique consommée par les fours au temps t
PEN_{Ak}	Pénalité associée au transfert marche-arrêt du four rotatif k en $/nombre de transitions
PEN_{Fk}	Pénalité associée au changement de débit du four rotatif k en $/nombre de changements de débit
$RATIO_C$	Pourcentage maximal permis de minerai provenant de la pile C vers les fours de réduction
rejetsmag	Pourcentage de pertes dues au traitement thermique
$X_{AIN,t}$	Débit de minerai alimentant la réserve A au temps t
$X_{AOUT,t}$	Débit de minerai provenant de la réserve A vers le secteur de traitement thermique au temps t

$X_{BIN,t}$	Débit de minerai alimentant la réserve B au temps t
$X_{BFOURS,t}$	Débit de minerai provenant de la réserve B vers les fours de réduction au temps t
$X_{BOK,t}$	Débit de minerai alimentant le four rotatif k au temps t
$X_{CIN,t}$	Débit de minerai alimentant la réserve C à partir de la réserve B au temps t
$X_{COK,t}$	Débit de gaz CO alimentant le four rotatif k au temps t
$X_{COUT,t}$	Débit de minerai provenant de la réserve C vers les fours de réduction au temps t
$Y_{K,t}$	Variable binaire représentant l'état de marche du four rotatif k au temps t
$\wedge$	ET logique
$\vee$	OU logique
$\oplus$	OU exclusif
$\neg$	Négation logique

Liste des annexes

Annexe 1 : Contrainte sur le ratio de gaz naturel aux fours rotatifs 93

1. Introduction

1.1. Mise en situation

Le contrôle de procédés par les contrôleurs automatiques en boucles fermées et autres stratégies de contrôle de bas niveau mènent à une production pouvant assurer la sécurité, la qualité du produit et la rencontre des objectifs quant au taux de production tout en respectant les limites physiques des équipements d'une usine. Cependant, dans plusieurs cas, un besoin d'amélioration des opérations de manière plus globale peut être comblé par l'optimisation en temps réel.

L'optimisation en temps réel d'un procédé permet de trouver, à partir des conditions d'opération actuelles, les conditions d'opération à viser pour obtenir une production maximisant les profits tout en rencontrant les contraintes d'opération (niveaux de production, niveaux d'inventaires, etc...) et d'équipements.

La présente recherche vise à modéliser la distribution de combustible à l'usine de transformation d'ilménite de QIT Fer et Titane (Sorel, Québec) pour ensuite appliquer un algorithme d'optimisation en temps réel. Au cours du procédé de transformation, du monoxyde de carbone est généré. Ce gaz présente une haute capacité calorifique et est donc réutilisé comme combustible dans plusieurs secteurs de l'usine. Certains secteurs ont également la possibilité d'utiliser un combustible alternatif pour parer un manque de gaz CO. Ces combustibles alternatifs doivent cependant être achetés et leur utilisation engendre un coût d'opération plus élevé d 'où l'importance d'optimiser l'utilisation du gaz CO.

L'usine n'a pas les équipements nécessaires pour l'entreposage du gaz CO généré qui est un gaz chargé de particules et saturé en eau. L'unique façon de faire une utilisation variable dans le temps de ce gaz est de permettre l'accumulation de produits ou produits

intermédiaires et l'arrêt de certains équipements. L'entreposage de ces produits intermédiaires peut être considéré comme l'entreposage d'énergie. En fait, lorsqu'il y a une grande disponibilité de gaz, il peut être souhaitable d'augmenter la production et d'entreposer le matériel en surplus pour puiser dans ces mêmes réserves lors d'une baisse de gaz disponible plutôt que de devoir acheter du combustible alternatif pour maintenir le taux de production des équipements constant. Une analyse des perturbations présentes dans le système a permis d'identifier trois niveaux dans la dynamique des opérations :

- Hautes fréquences : perturbations de l'ordre de quelques minutes causées par les équipements du réseau et les fluctuations en opération des générateurs et consommateurs de gaz CO.
- Moyennes fréquences : perturbations de l'ordre de quelques heures causées par des arrêts d'équipements générateurs ou consommateurs. Ces arrêts peuvent être de courts arrêts planifiés ou encore des arrêts non-planifiés pour entretien.
- Basses fréquences : perturbations de l'ordre de quelques jours pouvant même aller jusqu'à quelques mois. Arrêts d'équipements planifiés nécessitant plus de temps, contrat d'approvisionnement en électricité et en combustible alternatif, planification de la production.

Les perturbations présentant de hautes fréquences peuvent être contrôlées par des boucles automatiques. La planification à long terme (semaines, mois) est bien gérée par le groupe de planification mais un besoin existe pour une gestion optimisée des combustibles sur un horizon de temps variant de quelques heures à environ une semaine. Une approche d'optimisation en temps réel colle bien à ce type de critères.

La quantité de CO produit ainsi que la quantité de minerai transformé par les neuf fours de réduction est dépendant de la quantité de puissance électrique disponible. Comme QIT est un très gros consommateur d'électricité au Québec, il peut arriver lors de grands

froids hivernaux par exemple, que l'usine soit restreinte dans sa consommation d'électricité et soit prévenue quelques heures ou quelques jours à l'avance. La quantité de gaz CO disponible sera donc inférieure à la moyenne. Il peut aussi y avoir un arrêt des fours rotatifs pour entretien dans quelques jours. Quelle est alors la meilleure stratégie à adopter afin d'opérer de façon optimale durant ces périodes ?

Habituellement l'optimisation en temps réel se fait avec la situation actuelle et ne considère pas des perturbations futures. Dans ce cas-ci, il est intéressant d'optimiser en tenant compte de ces perturbations afin de trouver un point optimal à implanter au temps initial qui tient compte de ces perturbations qui surviendront dans un temps ultérieur. Ainsi, l'opération de l'usine se fait dans une direction optimale selon la connaissance de ces perturbations futures.

1.2. Objectif et Méthodologie

1.2.1. Objectif

L'objectif du projet est de minimiser les coûts d'opération de l'usine. Cette optimisation doit respecter le plan maître de production, les maximums contractuels d'approvisionnement en carburant alternatif, les niveaux minimums d'inventaire, les niveaux de production minimale et autres contraintes opérationnelles.

1.2.2. Méthodologie

L'approche utilisée pour la réalisation de ce projet se définit par les étapes suivantes :

- Étude des données disponibles de l'usine;
- Modélisation du système (modèle statique);
- Identification des variables manipulées;
- Identification et formulation des contraintes et de la fonction objectif;
- Élaboration d'un programme d'optimisation;
- Simulations;

- Analyses et discussion des résultats.

1.3. Contenu et organisation

Tout d'abord, une description du procédé est présentée. Cette description se fait en deux parties : la transformation du minerai et le système de distribution de gaz.

Par la suite, une revue des notions théoriques utilisées dans le cadre de ce projet est incluse au chapitre 3. Une description de la structure d'optimisation en temps réel, de la programmation mixte (MIP) et de la technique « branches et limites » utilisée pour résoudre les problèmes de ce type sont présentées. L'approximation linéaire par parties est utilisée dans ce projet et est brièvement décrite.

Au chapitre 4, le problème d'optimisation est défini. La fonction objectif, les principales contraintes et les autres particularités du modèle sont présentées.

Le chapitre 5 expose les différents scénarios utilisés pour les simulations. Les résultats obtenus sont analysés et discutés. Une discussion est faite sur le critère de précision et sur l'implantation réelle en usine.

Finalement les principales conclusions et recommandations sont présentées au chapitre 6.

2. Description du procédé

L'ilménite est la matière première de l'usine. Elle est acheminée par bateaux de la mine du lac Tio au nord d'Havre St-Pierre jusqu'à Sorel. Elle est ensuite pré-traitée et séchée pour l'enrichir avant d'être transformée en fonte et en scorie de titane par des fours de réduction. Un schéma simplifié de l'usine est présenté à la figure suivante :

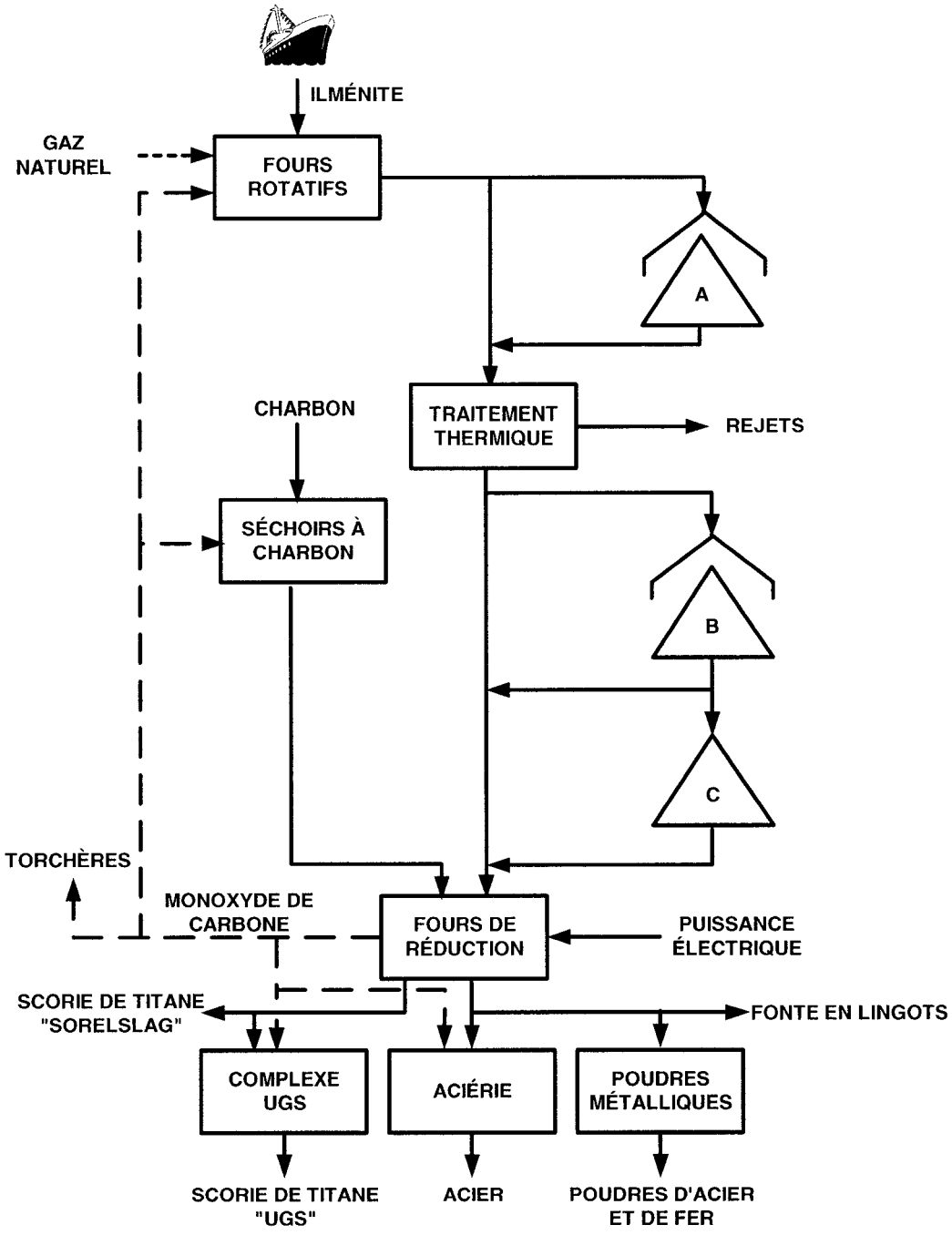

Figure 2.1 : Schéma simplifié du procédé

2.1. Transformation de l'ilménite

Quatre fours rotatifs ont pour principale fonction de sécher le minerai et de le rendre séparable par un traitement thermique dont le détail n'est pas divulgué pour des raisons de confidentialité. Ces fours peuvent fonctionner à partir de gaz CO ou de gaz naturel et présentent des caractéristiques de combustion différentes entre eux. Le minerai séché peut ensuite être entreposé dans un hangar (pile A) ou acheminé directement au secteur de traitement thermique. Le minerai accumulé à la pile A peut être réinjecté dans le processus de transformation au besoin. Le transport du minerai de ou vers la pile A est effectué par chargeur mécanique.

L 'unité de traitement thermique engendre des rejets en terme de minerai. Le minerai récupéré du traitement thermique est ensuite acheminé aux neuf fours de réduction. Du charbon est ajouté pour la réaction. Le minerai provenant de l'unité de traitement thermique peut également être entreposé dans un hangar (pile B) puis, dans une pile située à l'extérieur (pile C) si nécessaire. L'alimentation des fours de réduction en minerai peut, au besoin, être faite en partie ou en totalité par ces deux piles. Seul l'acheminement de matériel vers le hangar se fait de façon automatique par la commande d'une trappe. Le transport entre le hangar et la pile extérieure ou encore de ces deux piles vers les fours se fait aussi par chargeur mécanique. Les fours de réduction sont alimentés en électricité.

Les deux produits principaux de l'usine sont de la fonte et de la scorie de titane contenant environ 80% de bioxyde de titane. Cette scorie peut ensuite être transformée par l'usine UGS en scorie UGS contenant 94.5% de bioxyde de titane. La fonte quant à elle peut être coulée en lingots directement, transformée en billettes d'acier par l'aciérie ou en poudres d'acier et de fer par le complexe des Poudres Métalliques Du Québec.

2.2. Système de distribution de gaz CO

Le gaz CO généré par les fours de réduction est acheminé vers un gazomètre (réservoir de gaz CO) de très faible capacité avant d'être redistribué vers les différents secteurs d'usine (que nous nommerons usagers dans le présent ouvrage) utilisant ce combustible. Le gazomètre a pour unique but d'amortir les fluctuations rapides de débits de CO et pressuriser aux trois différents niveaux requis par les principaux usagers. Aucune accumulation significative de gaz CO ne peut y être faite présentement puisque le temps de résidence est inférieur à une minute. Deux torchères permettent la combustion des excès de gaz CO. Les principaux usagers de gaz CO sont les quatre fours rotatifs.

3. Revue de littérature

3.1. Optimisation en temps réel

L'utilisation d'ordinateurs pour le contrôle avancé remonte aux années 60. Depuis, l'optimisation en temps réel de procédés est devenu un outil intéressant pour améliorer ou maintenir la productivité d'une usine [Darby and White, 1988]. L'optimisation en temps réel d'un procédé permet de trouver, à partir des conditions d'opérations actuelles, les conditions d'opérations à atteindre pour obtenir une production maximisant les profits tout en respectant les contraintes imposées par le procédé et les équipements.

Le système de contrôle typique d'un procédé requiert une hiérarchie de différents niveaux comme indiqué à la Figure 3.1.

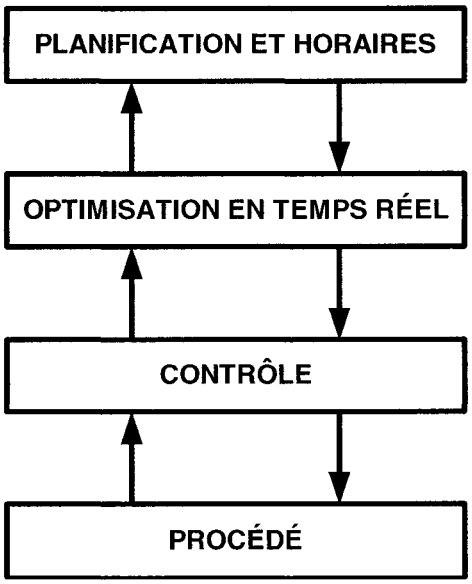

Figure 3.1 : Hiérarchie d'un système de contrôle

Le niveau « contrôle » assure la sécurité, la qualité du produit et les objectifs quant au taux de production. La technologie utilisée à ce niveau peut aller du simple contrôleur

PID jusqu'à une technique plus élaborée comme la commande prédictive avec modèle (MPC). Le niveau « optimisation » est le premier niveau considérant l'aspect économique dans ses décisions d'opérations. L'horizon de temps du système d'optimisation en temps réel est de l'ordre de quelques heures à quelques jours. Le niveau de planification présente un horizon de temps plus long. Il s'occupe de respecter par exemple, les inventaires de matériel et les taux de production cibles. Chaque niveau représenté à la Figure 3.1 fournit au niveau inférieur des objectifs à atteindre. Par exemple, le niveau d'optimisation fixe les points de consigne du niveau contrôle. [Marlin and Hrymak, 1997]

La structure d'un système d'optimisation en temps réel en boucle fermée est présentée à la figure suivante :

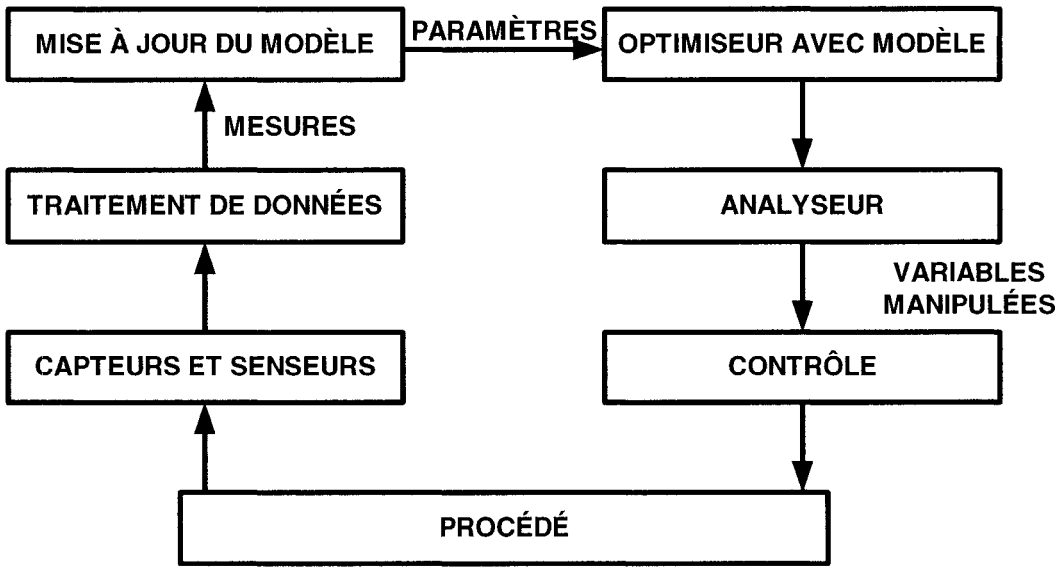

Figure 3.2 : Structure d'un système d'optimisation en temps réel

3.1.1. Le traitement des données

Le traitement des données permet d'analyser les mesures provenant des capteurs et senseurs afin d'éliminer par exemple, les erreurs flagrantes telles les erreurs de lecture. De plus, comme le modèle utilisé en est un valide en régime permanent, il faudra à cette étape détecter le régime permanent et n'utiliser que ces mesures pour la mise à jour des paramètres du modèle.

3.1.2. Le modèle

La performance de l'optimisation en temps réel d'un système repose en grande partie sur le choix d'un bon modèle pour représenter le procédé. Ce modèle doit être un bon compromis entre la complexité de calculs qui augmente le temps d'exécution et la performance du modèle. Comme le procédé est soumis à plusieurs changements au fil du temps, une mise à jour de certains des paramètres du modèle est souvent nécessaire afin de conserver le plus de fidélité possible avec le procédé. Ces paramètres sont évalués à partir de certaines mesures provenant de capteurs et senseurs. Le manque d'entretien d'un modèle est souvent une source de dégradation d'un système d'optimisation en temps réel et suscite un doute face aux résultats obtenus. [White, 1998]

Dans le cas présent la mise à jour des courbes de combustion des fours rotatifs est un exemple d'entretien du modèle puisque par exemple, la détérioration du réfractaire d'un four rotatif altère son efficacité et change considérablement les courbes de consommation spécifique.

3.1.3. L'optimisation

Le modèle est utilisé à deux fins : tout d'abord, pour décrire les conditions d'opérations actuelles du procédé et ainsi mettre à jour certains paramètres du modèle (« base case ») et puis, pour trouver les conditions optimales respectant les contraintes menant au meilleur profit ou au moindre coût d'opération possible selon l'optimiseur (« optimal case »). Le bloc d'optimisation simule alors le modèle avec un éventail de scénarios afin

de trouver l'ensemble des variables manipulées qui mèneront à une opération optimale du procédé. Ces variables manipulées sont choisies telles qu'elles pourront être facilement transmises au niveau de contrôle existant. [Van Wijk and Pope, 1992]

La fonction objectif est définie afin de maximiser le profit ou de minimiser les coûts d'opération. Les contraintes d'équipements (valves, limites de matériel, pression, températures) et les contraintes de spécifications (capacité de production, qualités de produit, contraintes environnementales) doivent être incluses dans le problème d'optimisation. [Dormer and Raynor 1998].

Le choix de l'algorithme d'optimisation dépend en grande partie de la non-linéarité de la fonction objectif et des contraintes et de la présence ou non de décisions discrètes. Selon le cas, plusieurs techniques sont envisageables :

- Programmation linéaire ou programmation linéaire séquentielle
- Programmation quadratique séquentielle
- Programmation non-linéaire
- MIP ou MINLP

Dans le présent projet, la linéarité du modèle et l'utilisation de variables discrètes ont mené au choix de la programmation linéaire mixte comme algorithme d'optimisation (MIP).

3.1.4. L'Analyse

Dans un système d'optimisation en temps réel utilisé en boucle fermée, l'analyseur permet de vérifier les sorties de l'optimiseur avant de les transmettre au niveau de contrôle. Seules les changements ayant un impact positif sur l'ensemble des conditions d'opération du procédé seront transmis au niveau contrôle.

L'optimisation en temps réel est plus souvent implantée en boucle ouverte et ce sont les responsables en usine qui analyse les résultats obtenus et décident de leur acceptation ou de leur refus.

L'analyse des résultats a pour but de vérifier si la situation de l'usine a changé depuis le début de la simulation :

- S'assurer que le procédé n'est pas en période transitoire ;
- Vérifier si les variables d'optimisation sont encore disponibles pour manipulation ;
- S'assurer que les limites de ces variables soient les mêmes que lors de l'optimisation. [Marlin and Hrymark, 1997]

3.2. Programmation linéaire mixte

Certains problèmes d'optimisation nécessitent l'utilisation de variables discrètes pour représenter la décision d'opérer ou non certains équipements. Lorsqu'un problème comporte à la fois des variables manipulées discrètes et continues et que la fonction objectif et les contraintes sont linéaires, il se classifie comme un problème de programmation linéaire mixte. Par exemple, les problèmes de planification dans les raffineries sont souvent modélisés sous forme de programmation mixte pour gérer l'opération de différentes unités et la production de plusieurs produits de façon optimale. Les problèmes de programmation mixte sont représentés sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} \text{MIN} \quad & Z = c^T y + f(x) \\ & g(x) \le 0, \\ & h(x) + My \le 0, \\ & Ay \le b, \\ & x \in R^n, y \in \{0,1\}^m, \end{aligned} \tag{3.1}$$

ou x est le vecteur des variables continues et y le vecteur des variables discrètes. M et A, c et b représentent respectivement les matrices et les vecteurs des coefficients. F(x), g(x) et h(x) sont des fonctions linéaires et les signes d'inégalités incluent les cas d'égalités également.[Raman and Grossman 1994].

3.2.1. Représentation mathématique d'expressions logiques

Dans plusieurs cas de modèles de type mixte, on possède de l'information qualitative menant à des prises de décisions représentées par des variables binaires. Cette information est souvent facile à exprimer en termes d'expressions logiques. Il faut alors les traduire en équations mathématiques pour pouvoir résoudre le problème avec les techniques connues.

Clocksin et Mellish (1981) ont formalisés la procédure pour traduire ces expressions logiques en relations mathématiques. L'unité de base d'une expression logique qui correspond soit à un état ou à une action est appelé littéral et est une variable qui peut prendre deux valeurs : vrai ou faux. Pour chaque littéral P il existe un autre littéral NOT P représenté par $\neg P$ tel que soit P ou $\neg P$ est toujours vrai . Une fois l'information qualitative exprimée sous forme d'expressions logiques, la procédure suivante peut être appliquée pour obtenir les équations mathématiques équivalentes :

- Remplacer l'implication logique par sa disjonction équivalente i.e. :

$$P_1 \Rightarrow P_2 \Leftrightarrow \neg P_1 \vee P_2 \tag{3.2}$$

- Déplacer la négation à l'intérieur en appliquant le théorème de DeMorgan :

$$\neg(P_1 \wedge P_2) \Leftrightarrow \neg P_1 \vee \neg P_2 \tag{3.3}$$

$$\neg(P_1 \vee P_2) \Leftrightarrow \neg P_1 \wedge \neg P_2 \tag{3.4}$$

- Distribuer de façon récursive les OU sur les ET en utilisant l'équivalence suivante :

$$(P_1 \wedge P_2) \vee P_3 \Leftrightarrow (P_1 \vee P_3) \wedge (P_2 \vee P_3) \tag{3.5}$$

- Appliquer les équivalences du tableau suivant pour obtenir des équations mathématiques [Raman and Grossman, 1991]

Condition logique	Commentaires	Expression logique	Représentation en inégalités linéaires
OU logique		$P_1 \vee P_2 \vee ... \vee P_r$	$y_1 + y_2 + ... + y_r \geq 1$
ET logique		$P_1 \wedge P_2 \wedge ... \wedge P_r$	$y_1 \geq 1; y_2 \geq 1; ... y_r \geq 1$
Implication	$P_1 \Rightarrow P_2$ est équivalent à $\neg P_1 \vee P_2$	$\neg P_1 \vee P_2$	$1 - y_1 + y_2 \geq 1$ ou $y_1 - y_2 \leq 0$
Équivalence	$P_1 \Leftrightarrow P_2$ ou $(P_1 \Rightarrow P_2) \wedge (P_2 \Rightarrow P_1)$	$(\neg P_1 \vee P_2) \wedge (\neg P_2 \vee P_1)$	$y_1 - y_2 \leq 0;$ $y_2 - y_1 \leq 0;$ ou $y_1 = y_2$
OU exclusif	Exactement une seule variable est vraie	$P_1 \oplus P_2 \oplus ... \oplus P_r$	$y_1 + y_2 + ... + y_r = 1$
Classification	$Q = \{P_1, P_2, ..., P_r\}$ Q est vraie si une des variables P est vraie		$y_q = y_1 + y_2 + ... + y_r$

Tableau 3-1 : Représentation de conditions logiques en équations inégalité

Il peut arriver qu'une contrainte active engendre la validité d'une autre contrainte. Par exemple :

$$f(x) \leq 0 \Rightarrow g(x) \geq 0 \tag{3.6}$$

On peut alors associer une variable binaire à chaque inégalité/égalité impliquée pour ensuite traduire la relation entre ces contraintes en termes d'expressions logiques. Il y a 3 cas possibles :

1. Associer une variable binaire y_1 à l'inégalité $f(x) \leq 0$. La relation entre cette nouvelle variable binaire et l'inégalité est représentée par :

$$L_1 y_1 + \varepsilon \leq f(x) \leq U_1 (1 - y_1) \tag{3.7}$$

où L_1 et U_1 sont les limites inférieure et supérieure de f(x) et ε est une tolérance positive. Si $f(x) \leq 0$, $y_1 = 1$ afin de satisfaire la partie droite de l'équation (3.7) et si $f(x) \geq \varepsilon$, alors $y_1 = 0$.

2. Associer une variable binaire y_2 à l'inégalité $g(x) \geq 0$. La relation entre cette nouvelle variable binaire et l'inégalité est représentée par :

$$L_2 (1 - y_2) \leq g(x) \leq U_2 y_2 - \varepsilon \tag{3.8}$$

où L_2 et U_2 sont les limites inférieure et supérieure de g(x) et ε est une tolérance positive. Si $g(x) \geq 0$, $y_2 = 1$ afin de satisfaire la partie gauche de l'équation (3.8) et si $g(x) \leq -\varepsilon$, alors $y_2 = 0$.

3. Une équation de égalité de type $h(x) = 0$ doit être considérée comme « $h(x) \leq 0$ ET $h(x) \geq 0$ ». On associe ensuite la variable binaire z_1 à $h(x) \leq 0$, z_2 à $h(x) \geq 0$ et la variable y_3 à $h(x) = 0$.
   La relation entre ces deux inégalités et les variables binaires associées peuvent être décrites par les équations suivantes :

$$L_3 z_1 + \varepsilon \leq h(x) \leq U_3 (1 - z_1) \tag{3.9}$$

$$L_3 (1 - z_2) \leq h(x) \leq U_3 z_2 - \varepsilon \tag{3.10}$$

La définition même des variables binaires ci-haut mentionnées implique :

$$Y_3 \Leftrightarrow Z_1 \wedge Z_2 \tag{3.11}$$

En appliquant la procédure décrite par les équations (3.2) à (3.5) ainsi que le Tableau 3-1, on obtient les équations suivantes :

$$z_1 + z_2 - y_3 \leq 1 \tag{3.12}$$

$$z_1 - y_3 \geq 0 \tag{3.13}$$

$$z_2 - y_3 \geq 0 \tag{3.14}$$

Les équations (3.9), (3.10) et (3.12) à (3.14) relient la variable y_3 à la contrainte $h(x) = 0$. Si $y_3 = 1$, alors la contrainte $h(x) = 0$ est active.

3.2.2. Technique de résolution « branches et limites »

La technique « branches et limites » est fréquemment utilisée dans la résolution de problème de programmation linéaire mixte. La plupart des logiciels commerciaux pour résoudre ce type de problème utilisent cette technique. Cet algorithme est une procédure d'énumération efficace pour l'évaluation des solutions possibles respectant les valeurs permises des variables discrètes.

Étape préliminaire :

La première étape dans la résolution d'un problème de programmation mixte consiste à la résolution du problème de relaxation associé dans lequel on permet aux variables discrètes de prendre des valeurs continues. Si le résultat obtenu à cette étape attribue des valeurs discrètes aux variables discrètes, le problème est résolu et la valeur optimale est trouvée. Par contre, si les valeurs obtenues des variables discrètes sont continues, il faut alors procéder au branchement et appliquer l'algorithme de branches et limites défini par les étapes suivantes :

Branchement :

Il s'agit de subdiviser le problème en sous-problèmes en ajoutant peu à peu des contraintes au problème de relaxation résolu à l'étape préliminaire. Ces contraintes agissent sur les variables discrètes qui avaient des valeurs continues dans la solution du problème de relaxation.

- A partir de la solution obtenue à l'étape précédente, choisir une variable discrète x_a dont la valeur n'est pas 0 ou 1 mais plutôt α tel que $0 < \alpha < 1$. Bâtir deux nœuds reliés à α en ajoutant les contraintes suivantes :
    i. Nœud 1 : $x_a \geq$ que le plus petit entier plus grand que α;
    ii. Nœud 2 : $x_a \leq$ que le plus grand entier plus petit que α;
- Choisir un de ces deux nœuds et résoudre le sous-problème associé. L'autre nœud sera considéré ultérieurement.

Limite :

La limite du nœud est la valeur de la fonction objectif trouvée par la résolution du sous-problème défini à ce nœud. Dans certains cas, il arrive qu'aucune solution n'existe.

Arrêt de branchement sur un nœud :

Un nœud est considéré terminé et aucun branchement n'en découlera si :

- Sa limite est supérieure (dans le cas d'une minimisation) à la meilleure solution préalablement trouvée attribuant des valeurs discrètes à toutes les variables discrètes. Si aucune solution valable au problème mixte n'a été trouvée auparavant, cette condition n'est pas remplie et il y aura branchement à partir de ce nœud à moins que les 2 autres conditions ci-bas s'appliquent.
- Aucune solution n'est possible pour ce nœud.
- Une solution avec toutes les variables discrètes ayant une valeur de 0 ou 1 est trouvée.

Si le nœud n'est pas terminé, on répète les étapes à partir du branchement. Sinon, on remonte l'arbre jusqu'au nœud qui n'a pas encore été évalué et on répète les mêmes étapes. On arrête le processus lorsque tous les nœuds ont été considérés. La meilleure solution trouvée respectant les critères des variables discrètes est la solution optimale du problème mixte.

Voici un exemple tiré de Edgar & Himmelblau (1988) pour mieux comprendre l'application de cet algorithme.
Soit le problème suivant :

$$
\begin{aligned}
Max\ \ f &= 86x_1 + 4x_2 + 40x_3 \\
& 774x_1 + 76x_2 + 42x_3 \leq 875 \\
& 67x_1 + 27x_2 + 53x_3 \leq 875 \\
& x_1, x_2, x_3 = 0,1
\end{aligned}
$$

L'arbre de l'algorithme « branches et limites » appliqué à ce problème est représenté à la figure suivante.

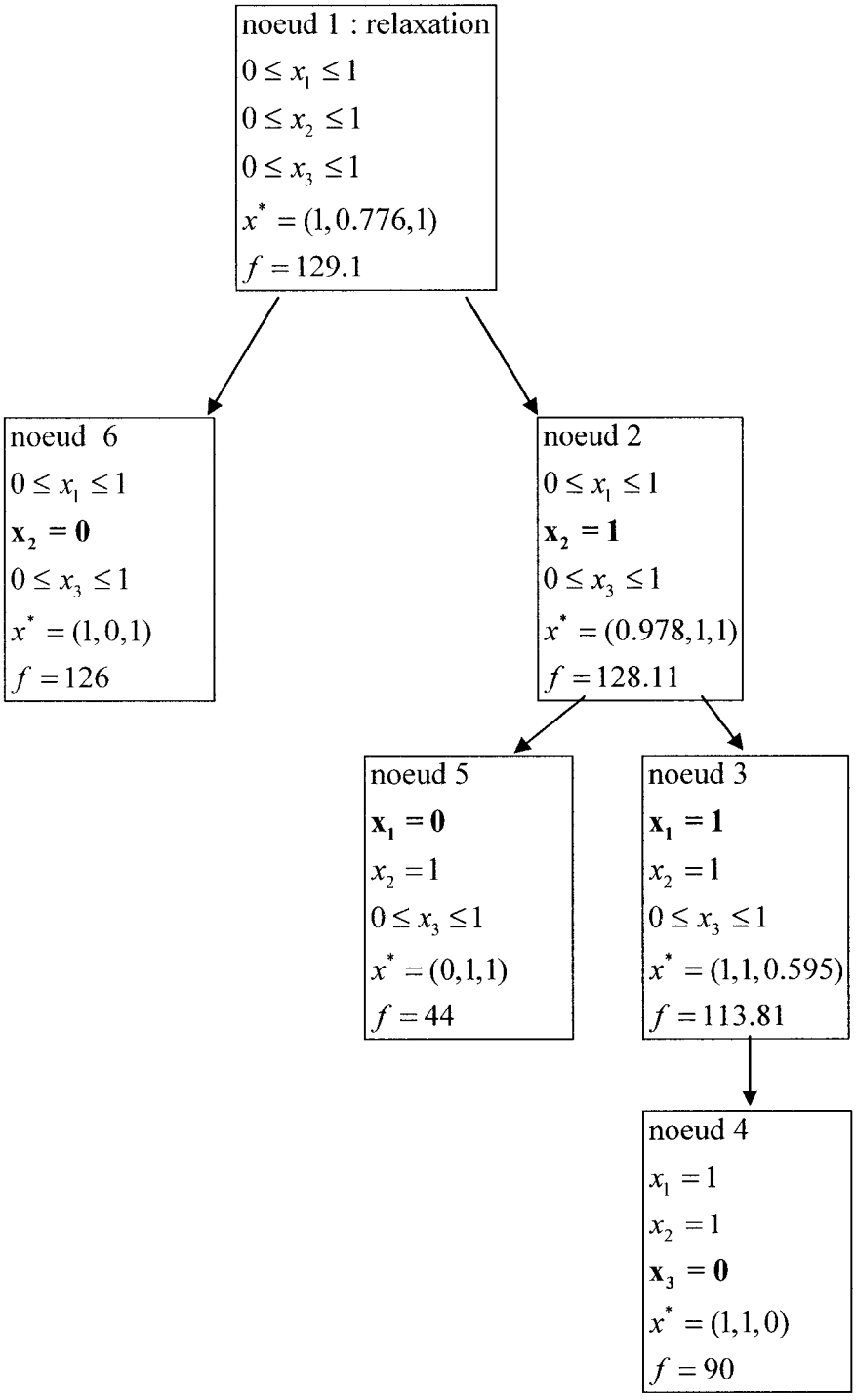

Figure 3.3 : Exemple d'un problème résolu par "branches et limites"

Au nœud 1, on fait abstraction des restrictions sur les variables discrètes et on résout le problème de relaxation. Comme la valeur de x_2 est différente de 0 ou 1, les nouvelles contraintes des nœuds 2 et 6 seront définies par la valeur de variable x_2. On choisit de résoudre le nœud 2 et on obtient alors une solution avec x_1 ayant une valeur continue. On fait donc les prochains branchements vers les nœuds 3 et 5 en fixant les valeurs de x_1. La contrainte $x_3 = 1$ n'est pas possible avec $x_1 = x_2 = 1$ car elle ne respecte pas la première contrainte du problème original. On résout le nœud 4 et on trouve une première solution optimale respectant les valeurs discrètes des variables x_1, x_2 et x_3. Le nœud 4 est donc terminé.

On remonte alors au nœud 5 et on trouve une solution optimale avec une valeur de f inférieure à la valeur de la fonction au nœud 4. Le nœud 5 est également terminé et la meilleure solution est encore celle du nœud 4. On remonte alors au nœud 6 et on résout. La solution respecte encore une fois les valeurs discrètes des 3 variables et la valeur de la fonction objectif est supérieure à celle du nœud 4. C'est donc la solution optimale du problème mixte.

Si nous avions débuté par l'évaluation du nœud 6, le nœud 3 n'aurait pas eu d'embranchement car sa valeur optimale est inférieure à la valeur optimale trouvée au nœud 6. Le temps d'exécution du programme aurait donc été plus court.

3.3. Approximation linéaire par parties

L 'approximation linéaire par parties a été utilisée dans ce projet pour linéariser les contraintes non-linéaires relatives aux courbes de combustion des fours rotatifs. L'approximation linéaire par parties permet d'approximer une fonction non-linéaire sur un grand intervalle en partitionnant cet intervalle en sections et en construisant ainsi des approximations linéaires individuelles pour chacune de ces sections. La figure suivante démontre l'approximation par parties de la courbe de combustion d'un four rotatif.

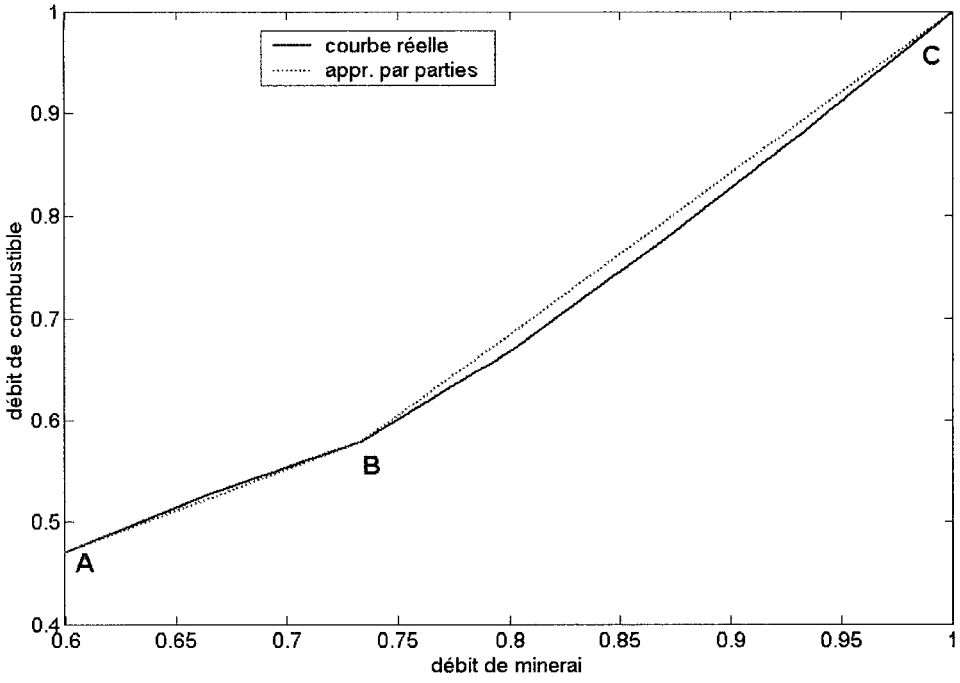

Figure 3.4 : Courbe de combustion du four rotatif #1

Les points A, B et C ont été choisi pour séparer l'intervalle non-linéaire en 2 différentes sections. Ainsi l'équation de la fonction linéaire entre les points A et B s'écrit :

$$\tilde{f}(x) = f^{(A)} + \frac{f^{(B)} - f^{(A)}}{x^{(B)} - x^{(A)}}\left(x - x^{(A)}\right) \tag{3.15}$$

La même logique s'applique entre les points B et C. L'approximation globale de la fonction non-linéaire est représentée par ces 2 fonctions linéaires valides dans leur section respective.

Toute valeur de x dans la section A-B peut être représentée par une combinaison linéaire des valeurs de x aux points A et B.

$$x = \lambda^{(A)} x^{(A)} + \lambda^{(B)} x^{(B)} \tag{3.16}$$

Où $\lambda^{(A)}$ et $\lambda^{(B)}$ sont deux paramètres non-négatifs, compris entre 0 et 1 et dont la somme est égale à 1. Si on remplace x dans l'équation (3.15) par l'équation (3.16), on obtient :

$$\tilde{f}(x) = f\left(x^{(A)}\right) + \frac{f^{(B)} - f^{(A)}}{x^{(B)} - x^{(A)}}\left[\lambda^{(B)} x^{(B)} - \left(1 - \lambda^{(A)}\right) x^{(A)}\right] \tag{3.17}$$

Puisque $1 - \lambda^{(A)} = \lambda^{(B)}$, on obtient :

$$\tilde{f}(x) = \lambda^{(A)} f^{(A)} + \lambda^{(B)} f^{(B)} \tag{3.18}$$

La même logique s'applique à l'intervalle B-C. Pour chaque valeur de x comprise dans l'intervalle A-C, la valeur de la fonction approximée peut être déterminée en assignant les valeurs appropriées aux deux variables $\lambda^{(k)}$ de la section correspondante. La valeur des variables $\lambda^{(k)}$ des autres sections sera nulle. L'approximation linéaire de la courbe à un point x quelconque peut donc se représenter comme suit :

$$x = \sum_{k=1}^{K} \lambda^{(k)} x^{(k)} \qquad \tilde{f}(x) = \sum_{k=1}^{K} \lambda^{(k)} f^{(k)} \tag{3.19}$$

avec

$$\sum_{k=1}^{K} \lambda^{(k)} = 1 \tag{3.20}$$

$$\lambda^{(k)} \geq 0 \qquad k = 1, \ldots, K \tag{3.21}$$

$$\lambda^{(i)} \lambda^{(j)} = 0 \quad \text{si } j > i+1 \text{ ; } i = 1, K\text{-}1 \tag{3.22}$$

L'équation (3.22) oblige 2 valeurs successives non-nulles de $\lambda^{(k)}$ seulement. Toutes les autres valeurs de $\lambda^{(k)}$ doivent être nulles. Le logiciel GAMS utilisé pour les simulations de ce projet permet la définition de telles variables.

La linéarisation par parties alourdit le problème d'optimisation puisque de nouvelles variables sont introduites. Il faut faire un compromis entre une bonne approximation linéaire et un programme d'optimisation plus performant. La qualité de l'approximation est dépendante du nombre de points mais aussi du choix de ces points. Dans l'exemple de la Figure 3.4, le point B est choisi au point d'inflexion de la courbe pour permettre la meilleure approximation possible avec le minimum de variables ajoutées au problème d'origine. [Reklaitis, Ravindran & Ragsdell , 1983]

4. Formulation du problème

La modélisation d'une usine comme QIT n'est pas chose simple. Afin de respecter les objectifs de ce travail et de ne pas allonger le temps d'exécution du programme de simulation outre-mesure plusieurs approximations ont été faites. Le modèle obtenu permet d'obtenir des résultats intéressants mais il en demeure un modèle simplifié de l'usine actuelle.

Tel que mentionné préalablement, l'utilisation variable du gaz CO dans le temps ne peut se faire que par la gestion des inventaires des différentes piles de matériel et l'ajustement de la quantité de minerai traité aux fours rotatifs puisque l'emmagasinage de gaz CO est impossible. De plus, l'optimisation tient compte des perturbations pouvant survenir dans les prochaines heures ou les prochains jours et le résultat obtenu doit être une projection sur cet horizon de temps.

La plupart du temps, l'optimisation en temps réel ne se fait pas sur un horizon de temps mais trouve plutôt une série de points d'opérations optimaux pour un temps précis. Il ne tient donc pas compte des perturbations futures. La planification dans les raffineries a donc été une source d'inspiration pour la formulation du présent problème d'optimisation [Göthe-Lundgren, Lundgren, Persson, 2002], [Lee, Pinto, Grossmann, Park, 1996],[Shah, 1996]. Ainsi, la fonction objectif, les contraintes et les variables manipulées sont définies pour chaque unité de temps (fixé ici à une heure). Ensuite c'est la somme de cette fonction objectif sur tout l'horizon de temps qui est minimisée.

4.1. Modèle

Le modèle élaboré est un modèle statique basé sur des bilans de matières et d'énergie. Dans notre modèle, certains secteurs du procédé de QIT, consommateurs de gaz CO,

sont identifiés comme « autres usagers de CO » et ne sont pas modélisés dans le détail. La possibilité de faire varier leur consommation dans le temps donne toutefois une certaine flexibilité à l'élaboration de scénarios de simulation.
La puissance électrique et le nombre de fours disponibles peuvent aussi être définis par l'utilisateur du système d'optimisation sur l'horizon de temps considéré. Ceci permet la simulation de différents scénarios représentant des situations possibles à l'usine.

Des bilans de matières et d'énergie ont été faits pour chacun des secteurs de l'usine. Dans un premier temps, le modèle a été bâti sous forme linéaire. La non-linéarité des courbes de combustion des fours rotatifs étant relativement faible, la simplicité du modèle a donc été privilégiée. Une fois ce modèle établi, il fut raffiné par l'approximation par parties des courbes de combustion en appliquant la méthode décrite au chapitre précédent.

La Figure 4.1 représente les variables manipulées choisies pour l'optimisation. Les variables continues sont identifiées X alors que les variables discrètes se nomment Y.

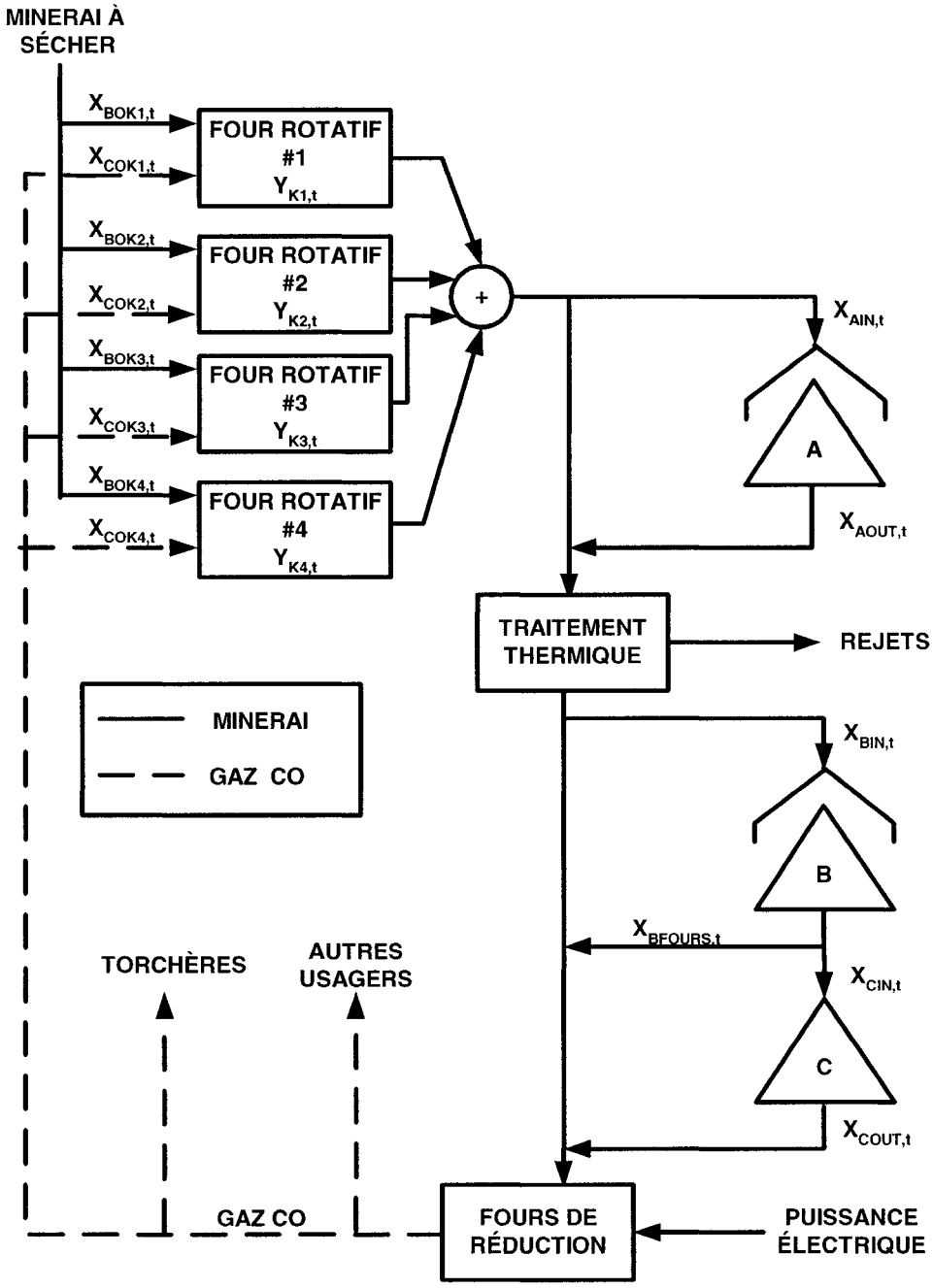

Figure 4.1 : Identification des variables manipulées

Où :

$X_{AIN,t}$ Débit de minerai alimentant la réserve A au temps t

$X_{AOUT,t}$	Débit de minerai provenant de la réserve A vers le secteur de traitement thermique au temps t
$X_{BIN,t}$	Débit de minerai alimentant la réserve B au temps t
$X_{BFOURS,t}$	Débit de minerai provenant de la réserve B vers les fours de réduction au temps t
$X_{BOK1,t}$	Débit de minerai alimentant le four rotatif 1 au temps t
$X_{BOK2,t}$	Débit de minerai alimentant le four rotatif 2 au temps t
$X_{BOK3,t}$	Débit de minerai alimentant le four rotatif 3 au temps t
$X_{BOK4,t}$	Débit de minerai alimentant le four rotatif 4 au temps t
$X_{CIN,t}$	Débit de minerai alimentant la réserve C à partir de la réserve B au temps t
$X_{COK1,t}$	Débit de gaz CO alimentant le four rotatif 1 au temps t
$X_{COK2,t}$	Débit de gaz CO alimentant le four rotatif 2 au temps t
$X_{COK3,t}$	Débit de gaz CO alimentant le four rotatif 3 au temps t
$X_{COK4,t}$	Débit de gaz CO alimentant le four rotatif 4 au temps t
$X_{COUT,t}$	Débit de minerai provenant de la réserve C vers les fours de réduction au temps t
$Y_{K1,t}$	Arrêt ou marche du four rotatif 1 au temps t
$Y_{K2,t}$	Arrêt ou marche du four rotatif 2 au temps t
$Y_{K3,t}$	Arrêt ou marche du four rotatif 3 au temps t
$Y_{K4,t}$	Arrêt ou marche du four rotatif 4 au temps t

On considère que la consommation d'électricité aux fours de réduction est connue et définie sur tout l'horizon de temps choisi. La relation entre la consommation d'électricité et la production de monoxyde de carbone est considérée linéaire tout comme la relation entre la consommation d'électricité et l'alimentation en minerai à ces fours :

$$FCO_{fours,t} = \alpha_{co} P_t \tag{4.1}$$

Où :

$FCO_{fours,t}$ débit de CO produit par les fours au temps t

P_t puissance électrique consommée par les fours au temps t

$$FM_{fours,t} = \alpha_{FM} P_t \tag{4.2}$$

Où :

$FM_{fours,t}$ débit de minerai alimentant les fours au temps t

Pour le secteur des fours rotatifs, les pertes de matériel sont très faibles et ont été négligées. De plus les courbes de consommation spécifique et les capacités des 4 fours étant différentes, ils ont été modélisés individuellement. Ce qui donne pour le four rotatif #1 par exemple :

$$\alpha_{FR1} X_{BOK1,t} + \beta_{K1} = X_{COK1,t} + FGN_{K1,t} \tag{4.3}$$

Où :

$FGN_{K1,t}$ débit de gaz naturel consommé par le four rotatif 1 au temps t

À la Figure 2.1, on peut voir que le charbon nécessaire à la réaction est séché avant d'être acheminé aux fours de réduction. Le gaz CO consommé par ces séchoirs étant très faible comparativement à la consommation des fours rotatifs, cette partie n'a pas été considérée dans la présente modélisation.

Les rejets de matériel dans le secteur de traitement thermique sont quant à elles non-négligeables et ont été considérées. Le bilan de matières pour tous les secteurs considérés est représenté par l'équation suivante :

$$\left(X_{BOK1,t} + X_{BOK2,t} + X_{BOK3,t} + X_{BOK4,t} - X_{AIN,t} + X_{AOUT,t}\right) * \left(1 - rejetsmag\right) - \tag{4.4}$$

$$X_{BIN,t} + X_{BFOURS,t} + X_{COUT,t} = FM_{FOURS,t}$$

Où :

rejetsmag pourcentages de rejets dues au traitement thermique

Un bilan de matière sur chacune des piles mène aux équations suivantes :

Pile A : $$\left(X_{AIN,t} - X_{AOUT,t}\right) * \Delta t + M_{A,t-1} = M_{A,t} \tag{4.5}$$

Pile B : $$\left[X_{BIN,t} - \left(X_{BFOURS,t} + X_{CIN,t}\right)\right] * \Delta t + M_{B,t-1} = M_{B,t} \tag{4.6}$$

Pile C : $$\left(X_{CIN,t} - X_{COUT,t}\right) * \Delta t + M_{C,t-1} = M_{C,t} \tag{4.7}$$

Où :

$M_{A,t}$ quantité de matière à la pile A au temps t

$M_{B,t}$ quantité de matière à la pile B au temps t

$M_{C,t}$ quantité de matière à la pile C au temps t

Δt durée de l'intervalle compris entre les instants t et (t-1)

4.2. Définition de la fonction objectif

Dans le présent projet, l'objectif principal est de minimiser le coût d'opération sur un horizon de temps $0 < t < T$ où T est de l'ordre de quelques heures à quelques jours. La fonction objectif est donc l'expression du coût d'opération et se définit comme suit :

- Coût d'utilisation de combustible alternatif aux fours rotatifs;
- Coût de manutention de minerai par chargeur mécanique :
    1. des fours rotatifs vers la pile A
    2. de la pile A vers le secteur de traitement thermique
    3. de la pile B vers la pile C
    4. de la pile B vers les fours de réduction
    5. de la pile C vers les fours de réduction
- Coût associé à l'arrêt d'un ou plusieurs fours rotatifs.

Le coût de transport de matériel aux piles comprend le coût de main d'œuvre pour opérer le chargeur mécanique ainsi que le coût d'utilisation du chargeur lui-même. Présentement, le coût d'arrêt d'un four rotatif a été représenté par un coût proportionnel à la durée de l'arrêt ce qui représente le coût associé au refroidissement du four rotatif (pré-chauffage lors du redémarrage).

De plus, certaines pénalités ont dues être ajoutées tout au long du développement pour mieux spécifier le problème.

- Comme on souhaite brûler le moins de gaz CO aux torchères, une pénalité a été associée au débit de gaz aux torchères.
- Afin d'éviter les arrêts-départs trop nombreux d'un four rotatif à l'autre, une pénalité a été associée aux transitions marche-arrêt de chaque four rotatif.
- Pour empêcher une trop grande fluctuation des débits de minerai aux fours rotatifs, une pénalité sur le changement de débit d'alimentation aux fours rotatifs est incluse.

De plus, une bonification a été associée au débit de minerai vers la pile B afin d'assurer l'utilisation maximale du gaz CO aux fours rotatifs d'un point de vue débit de minerai et ainsi favoriser le maintien d'une réserve de minerai au hangar de la pile B en opération

normale. Cette réserve de matériel est plus susceptible d'être utilisée que les piles A et C pour 2 principales raisons. Contrairement à la pile C, la pile B est située dans un hangar et le minerai qu'elle contient n'est pas humide. Il peut donc être acheminé aux fours de réduction en assez grande quantité. De plus, la pile A est située avant le secteur de traitement thermique ce qui signifie que son minerai contient une quantité de rejets non-négligeable. Cette quantité de rejets augmente la quantité de minerai qui doit être transportée vers le traitement thermique en comparaison avec les quantités requises si le minerai est acheminé des piles B et C vers les fours de réduction.

4.3. Principales contraintes

Voici les contraintes considérées dans le processus d'optimisation. Ces contraintes tiennent compte des limites physiques des équipements, des inventaires à respecter et de la disponibilité des équipements et de l'énergie.

1. Respecter en tout temps le maximum et le minimum de production permis sur chaque four rotatif
2. Respecter le maximum d'apport en minerai de la pile C vers les fours de réduction. Ce minerai étant entreposé à l'extérieur, il est plus humide et ne peut être réinjecté dans le procédé qu'en petites quantités.
3. Assurer un inventaire minimal à chaque pile et respecter la capacité maximale d'entreposage. L'inventaire minimal est requis pour assurer une production minimale en cas de panne catastrophique majeure.
4. Respecter l'augmentation et la diminution maximale de débit de minerai d'alimentation permise par heure aux fours rotatifs. Cette contrainte affecte grandement les performances de l'optimiseur car elle impose un pas de temps maximal d 'une heure ce qui augmente considérablement le nombre de variables et d'équations sur tout l'horizon d'optimisation.
5. Tenir compte en tout temps du gaz CO disponible pour les fours rotatifs.

6. Respecter le nombre de fours rotatifs disponibles à l'opération à chaque pas de temps (fixé par l'utilisateur du programme d'optimisation selon les arrêts planifiés durant l'horizon choisi).
7. Respecter la capacité du chargeur mécanique en terme de débit pour le transport de minerai aux piles A et C et des piles A, B et C vers le traitement thermique ou les fours de réduction.

4.4. Expression mathématique du problème d'optimisation

En regroupant tous les éléments identifiés pour la composition de la fonction objectif on obtient l'expression suivante :

$$\begin{aligned} \underset{x}{MIN}\ \text{COUTS} = {} & CGN\sum_{t=t_0}^{T}\sum_{K=K1}^{K4} FGN_{K,t}\Delta t + CA_{IN}\sum_{t=t_0}^{T} X_{AIN,t}\Delta t + CA_{OUT}\sum_{T} X_{AOUT,t}\Delta t + \\ & CB_{FOURS}\sum_{t=t_0}^{T} X_{BFOURS,t}\Delta t + CC_{IN}\sum_{t=t_0}^{T} X_{CIN,t}\Delta t + CC_{OUT}\sum_{t=t_0}^{T} X_{COUT,t}\Delta t + \\ & CAK\sum_{t=t_0}^{T}\sum_{K=K1}^{K4}\left(1-Y_{K,t}\right) + PEN_{AK}\sum_{t=t_0}^{T}\sum_{K=K1}^{K4} ARRET_{K,t} + \\ & PEN_{FK}\sum_{t=t_0}^{T}\sum_{K=K1}^{K4} CHGF_{K,t} - BON_{BIN}\sum_{t=t_0}^{T} X_{BIN,t}\Delta t \end{aligned} \tag{4.8}$$

Où :

CGN	coût du gaz naturel en $/unité de volume
CA_{IN}	coût de manutention du minerai des fours rotatifs vers la pile A en $/unité de volume

CA_{OUT}	coût de manutention du minerai de la pile A vers le traitement thermique en $/unité de volume
CB_{FOURS}	coût de manutention du minerai de la pile B vers les fours de réduction en $/unité de volume
CC_{IN}	coût de manutention du minerai de la pile B vers la pile C en $/unité de volume
CC_{OUT}	coût de manutention du minerai par de la pile C vers les fours en $/unité de volume
CAK	coût proportionnel à la durée d'arrêt d'un four rotatif en $/hre
PEN_{AK}	pénalité associée au transfert marche-arrêt d'un four rotatif en $/nombre de transitions
PEN_{FK}	pénalité associée au changement de débit d'un four rotatif en $/nombre de changements de débit
BON_{BIN}	bonification associée au transfert de matériel vers la pile B en $/unité de volume
$ARRET_{K,t}$	variable binaire représentant le transfert de l'état de marche vers l'état d'arrêt d'un four rotatif au temps t
$CHGF_{K,t}$	variable binaire représentant un changement de débit entre le temps t – 1 et le temps t

Les contraintes s'expriment comme suit :

1. Production maximale et minimale d'un four rotatif :

$$MIN_K * Y_{K,t} \leq X_{BOK,t} \leq MAX_K * Y_{K,t} \quad \text{avec K = K1, K2, K3, K4} \tag{4.9}$$

Où :

MIN_K	débit minimal pouvant être atteint par le four rotatif K
MAX_K	débit maximal pouvant être atteint par le four rotatif K

$X_{BOK,t}$ est une variable semi-continue puisqu'elle est soit nulle (si le four rotatif est arrêté i.e $Y_{K,t} = 0$) ou soit comprise entre les bornes définies positives de minimum et de maximum de production de chaque four rotatif.

2. Maximum d'ajout de minerai humide aux fours de réduction

$$X_{COUT,t} \leq RATIO_C * FM_{FOURS,t} \tag{4.10}$$

Où :

$RATIO_C$ pourcentage maximal permis de minerai provenant de la pile C vers les fours de réduction.

3. Inventaire minimal et maximal de chaque pile :

$$MIN_A \leq \left(X_{AIN,t} - X_{AOUT,t}\right) * \Delta t + M_{A,t-1} \leq MAX_A \tag{4.11}$$

$$MIN_B \leq \left[X_{BIN,t} - \left(X_{CIN,t} + X_{BFOURS,t}\right)\right] * \Delta t + M_{B,t-1} \leq MAX_B \tag{4.12}$$

$$MIN_C \leq \left(X_{CIN,t} - X_{COUT,t}\right) * \Delta t + M_{C,t-1} \leq MAX_C \tag{4.13}$$

Où :

MIN_X inventaire minimum permis à la pile X

MAX_X inventaire maximum permis à la pile X

4. Augmentation et diminution maximale permis aux fours rotatifs :

$$X_{BOK,t-1} - DELTA_K \leq X_{BOK,t} \leq X_{BOK,t-1} + DELTA_K \tag{4.14}$$

Où :

$DELTA_K$ changement maximal de débit permis en une heure à chaque four rotatif

K prend comme valeur K1, K2, K3 ou K4 (représentant les 4 fours rotatifs).

5. Gaz CO disponible :

$$\sum_{K=K1}^{K4} X_{COK,t} \leq FCO_{FOURS,t} - FCO_{USAGERS,t} - MIN_{COTORCH} \quad (4.15)$$

Où :

$FCO_{USAGERS,t}$ débit de CO consommé par les autres usagers que les fours rotatifs au temps t

$MIN_{COTORCH}$ débit de CO devant être brûlé en tout temps aux torchères afin de les maintenir allumées

6. Disponibilité des fours rotatifs :

$$\sum_{K=K1}^{K4} Y_{K,t} \leq NBKFCT_t \quad (4.16)$$

Où :

$NBKFCT_t$ nombre de fours rotatifs disponibles au temps t. Ce paramètre doit être défini par l'utilisateur du programme d'optimisation avant chaque simulation.

7. Capacité du chargeur mécanique :

$$\begin{aligned} X_{XIN,t} &\le MAX_{FXIN} \qquad \text{avec x = A ou C} \\ X_{xout,t} &\le MAX_{FXOUT} \qquad \text{avec x = A ou C} \\ X_{BFOURS,t} &\le MAX_{FBFOURS} \end{aligned} \tag{4.17}$$

Où :

MAX_{FXIN}	débit maximum de matériel vers la pile X
MAX_{FXOUT}	débit maximum de matériel de la pile X
$MAX_{FBFOURS}$	débit maximum de matériel de la pile B vers les fours

La variable binaire $ARRETS_{K,t}$ présente dans l 'expression de la fonction objectif est une variable binaire qui prend la valeur 1 lors d'un changement d'état entre l'instant t-1 et l'instant t au four rotatif K. Pour définir la variable $ARRETS_{K,t}$, 4 équations inégalité ont dues êtres ajoutées aux contraintes énumérées ci-haut. Voici la démarche pour déterminer ces équations.

Tout d'abord, l'expression des contraintes qualitatives :

Si $Y_{K,t-1} = Y_{K,t}$, $ARRETS_{K,t} = 0$
Sinon, $ARRETS_{K,t} = 1$.

En expressions logiques :

$$\left(y_{K,t-1} \wedge y_{K,t}\right) \vee \left(\neg y_{K,t-1} \wedge \neg y_{K,t}\right) \Rightarrow \neg ARRETS_{K,t} \tag{4.18}$$

$$\left(\neg y_{K,t-1} \wedge y_{K,t}\right) \vee \left(y_{K,t-1} \wedge \neg y_{K,t}\right) \Rightarrow ARRETS_{K,t} \tag{4.19}$$

En appliquant la procédure décrite au chapitre précédent sur ces deux équations, on obtient les 4 équations inégalités devant être ajoutées au problème d'origine.

- Remplacer l'implication logique par sa disjonction équivalente i.e. :

$$\neg\left[\left(y_{K,t-1} \wedge y_{K,t}\right) \vee \left(\neg y_{K,t-1} \wedge \neg y_{K,t}\right)\right] \vee \neg ARRETS_{K,t} \tag{4.20}$$

$$\neg\left[\left(\neg y_{K,t-1} \wedge y_{K,t}\right) \vee \left(y_{K,t-1} \wedge \neg y_{K,t}\right)\right] \vee ARRETS_{K,t} \tag{4.21}$$

- Déplacer la négation à l'intérieur en appliquant le théorème de DeMorgan :

$$\left[\left(\neg y_{K,t-1} \vee \neg y_{K,t}\right) \wedge \left(y_{K,t-1} \vee y_{K,t}\right)\right] \vee \neg ARRETS_{K,t} \tag{4.22}$$

$$\left[\left(y_{K,t-1} \vee \neg y_{K,t}\right) \wedge \left(\neg y_{K,t-1} \vee y_{K,t}\right)\right] \vee ARRETS_{K,t} \tag{4.23}$$

- Distribuer de façon récursive les OU sur les ET :

$$\left(\neg y_{K,t-1} \vee \neg y_{K,t} \vee \neg ARRETS_{K,t}\right) \wedge \left(y_{K,t-1} \vee y_{K,t} \vee \neg ARRETS_{K,t}\right) \tag{4.24}$$

$$\left(y_{K,t-1} \vee \neg y_{K,t} \vee ARRETS_{K,t}\right) \wedge \left(\neg y_{K,t-1} \vee y_{K,t} \vee ARRETS_{K,t}\right) \tag{4.25}$$

- Appliquer les équivalences du Tableau 3-1 pour obtenir des équations mathématiques :

$$y_{K,t-1} + y_{K,t} + ARRETS_{K,t} \leq 2 \tag{4.26}$$

$$y_{K,t-1} + y_{K,t} - ARRETS_{K,t} \geq 0 \tag{4.27}$$

$$y_{K,t-1} - y_{K,t} + ARRETS_{K,t} \geq 0 \tag{4.28}$$

$$y_{K,t-1} - y_{K,t} - ARRETS_{K,t} \leq 0 \tag{4.29}$$

Ces quatre nouvelles contraintes devront donc être définies pour chaque four rotatif et incluses dans le modèle. Elles permettront de pénaliser les transitions marche/arrêt dans la fonction objectif par le biais des variables $ARRETS_{K,t}$ où K = K1, K2, K3 ou K4.

La variable $CHGF_{K,t}$ a également due être définie par le biais du même genre de procédure. Cette variable binaire prendra la valeur 1 lorsqu'il n'y a aucun changement de débit au four rotatif K entre l'instant t-1 et l'instant t. Il faut noter que la pénalité associé et notée PEN_{FK} est négative dans l'expression de la fonction objectif.

Soit l'équation $X_{BOK,t} - X_{BOK,t} = 0$ de type $h(x) = 0$. On associe à cette équation la variable binaire $CHGF_{K,t}$ qui prendra la valeur 1 uniquement si aucun changement de débit n'est détecté entre les instants t-1 et t. Les variables binaires $CHGN_{K,t}$ et $CHGP_{K,t}$ sont respectivement associées aux équations $X_{BOK,t} - X_{BOK,t} \leq 0$ et $X_{BOK,t} - X_{BOK,t} \geq 0$. Ainsi, la variable binaire $CHGN_{K,t}$ sera à 1 lorsqu'il y aura une diminution de débit ou aucun changement entre l'instant t-1 et l'instant t alors que la variable $CHGP_{K,t}$ sera à 1orsqu'il y aura une augmentation de débit ou aucun changement entre l'instant t-1 et l'instant t. Ce qui mène aux équations suivantes :

$$L_K CHGN_{K,t} + \varepsilon \leq X_{BOK,t} - X_{BOK,t-1} \leq U_K \left(1 - CHGN_{K,t}\right) \tag{4.30}$$

$$L_K \left(1 - CHGP_{K,t}\right) \leq X_{BOK,t-1} - X_{BOK,t} \leq U_K CHGP_{K,t} - \varepsilon \tag{4.31}$$

Où :

L_K production maximale du four rotatif K en valeur négative

U_K production maximale du four rotatif K

Par définition :

$$CHGF_{K,t} \Leftrightarrow CHDP_{K,t} \wedge CHDN_{K,t} \tag{4.32}$$

En appliquant la procédure décrite par les équations (3.2) à (3.5) ainsi que le Tableau 3-1, on obtient les équations suivantes :

$$CHGN_{K,t} + CHGP_{K,t} - CHDF_{K,t} \leq 1 \tag{4.33}$$

$$CHDP_{K,t} - CHDF_{K,t} \geq 0 \tag{4.34}$$

$$CHGN_{K,t} - CHDF_{K,t} \geq 0 \tag{4.35}$$

Pour chaque four rotatif, les équations (4.30), (4.31), et (4.33) à (4.35) devront être ajoutés au modèle pour définir la variable $CHGF_{K,t}$ permettant de pénaliser les changements de débit au four rotatif K entre l'instant t-1 et l'instant t.

Le modèle décrit ci-haut est amélioré par l'approximation linéaire par parties des courbes de consommation spécifique de chaque four rotatif. Ainsi l'équation (4.3) devient :

$$comb_{K,t} = X_{COK,t} + FGN_{K,t} \tag{4.36}$$

où :

$$comb_{K,t} = \sum_{i=1}^{3} \lambda_i \overline{comb_i} \tag{4.37}$$

$$\overline{comb_i} = \left[A_y, B_y, C_y \right] \tag{4.38}$$

et :

$$X_{BOK,t} = \sum_{i=1}^{3} \lambda_i \bar{X}_i \tag{4.39}$$

$$\bar{X}_i = \left[A_x, B_x, C_x \right] \tag{4.40}$$

$$\sum_{i=1}^{3} \lambda_i = 1 \tag{4.41}$$

avec au plus deux valeurs de lambda non-nulles et adjacentes. Cette dernière contrainte est assurée par la définition même de la variable de type SOS2 utilisée dans le programme de simulation GAMS.

5. Simulations et analyse des résultats

5.1. Environnement et outils de simulation

À l'origine, le logiciel MATLAB devait être utilisé pour ce projet puisque ce logiciel est facilement accessible et couramment utilisé en industrie. Toutefois, MATLAB ne permet pas de résoudre des problèmes de programmation mathématique mixte. C'est pourquoi le logiciel GAMS (General Algebraic Modeling System) est utilisé. Ce logiciel fut créé d'abord pour être utilisé en économie mais est depuis lors utilisé dans plusieurs secteurs nécessitant un outil d'optimisation [Brooke, A., Kendrick, D. Meeraus, A. 1998]. L'expression du modèle dans ce logiciel se rapproche beaucoup de l'expression mathématique habituelle ce qui facilite son utilisation. Les paramètres sont entrés sous forme de tables et de listes et les équations sont écrites sous leur forme algébrique.

Une fois le fichier source (.GMS) bâti, il est compilé et exécuté. Un fichier (.LST) contenant les résultats, les performances de la simulation et les erreurs de compilation s'il y a lieu est retourné. Puisque GAMS ne permet pas de visualiser les résultats sous forme graphique, un fichier texte (.TXT) contenant les valeurs à visualiser est créé. Ce fichier texte est ensuite lu par un programme MATLAB écrit pour produire les différentes courbes de résultats qui sont présentées dans ce chapitre.

Le logiciel GAMS comporte différents algorithmes pour la résolution de problèmes d'optimisation. Chacun de ces algorithmes peut résoudre une ou plusieurs classes de problème d'optimisation. Dans notre cas, l'algorithme CPLEX fut utilisé. Cet algorithme est conçu pour résoudre des problèmes de programmation linéaire (LP) et de programmation linéaire mixte (MIP). Pour les problèmes de programmation linéaire mixte, la technique de résolution « branches et limites » est utilisée par cet algorithme.

Les simulations présentées ici sont faites sur un horizon de temps de 4 jours ce qui est une bonne moyenne des cas à couvrir selon l'analyse des perturbations décrites à

l'introduction. Rappelons en effet que les perturbations basses fréquences sont les cas à considérer, ou plus spécifiquement les cas allant de quelques jours à 1 semaine. Les simulations sont faites avec les données de débit exprimées en pieds cubes par minutes pour la consommation de gaz et en tonnes métriques par minute pour le minerai. Pour fin de confidentialité, tous les résultats sont présentés en valeurs relatives et non en valeurs absolues. L'unité de temps minimal pour l'optimisation a été fixé à une heure soit le maximum permis par la contrainte d'augmentation et de diminution maximale pour chaque four rotatif (contrainte 4) . Ainsi les valeurs de points de consigne trouvées par le programme d'optimisation sont valides pour chaque heure.

A chaque simulation certains paramètres doivent être définis par l'usager pour tout l'horizon choisi : puissance électrique consommée par les fours de réduction, nombre de fours rotatifs disponibles pour l'opération, quantité de CO consommée par les usagers autres que les fours rotatifs. Ces paramètres servent à caractériser les différentes perturbations possibles.

En premier lieu, une simulation sans perturbation et sans pénalité sur le changement de débit aux fours rotatifs a été effectuée afin de déterminer le point d'équilibre optimal. Ce point d'opération fut ensuite utilisé comme point initial pour les simulations avec perturbations afin de mieux visualiser les effets de chacune des perturbations étudiées. En réalité, les données initiales devraient être les données réelles de l'usine au moment où on souhaite faire l'optimisation. Le tableau suivant représente les valeurs initiales des débits de minerai de chaque four rotatif ainsi que leur débit minimal permis. Les valeurs sont présentées en terme de pourcentage de production maximale permise à chaque four rotatif.

Four Rotatif	Débit initial (% du débit maximal de ce four rotatif)	Débit minimal permis (% du débit maximal de ce four rotatif)
1	73	60
2	82	63
3	100	68
4	67	67

Tableau 5-1 : Valeurs initiales et minimum des fours rotatifs

Ainsi, on peut voir que le four rotatif 3 opère à son maximum tandis que le four rotatif 4 opère à son débit minimal. Le four rotatif 1 opère au point d'inflexion de sa courbe de consommation spécifique et le four 2 s'ajuste pour compléter le débit manquant. Ceci peut être compris en regardant la figure suivante qui présente les quatre courbes de combustion des fours rotatifs. Ici, on représente ces courbes en terme de pourcentage de production totale possible par les quatre fours rotatifs.

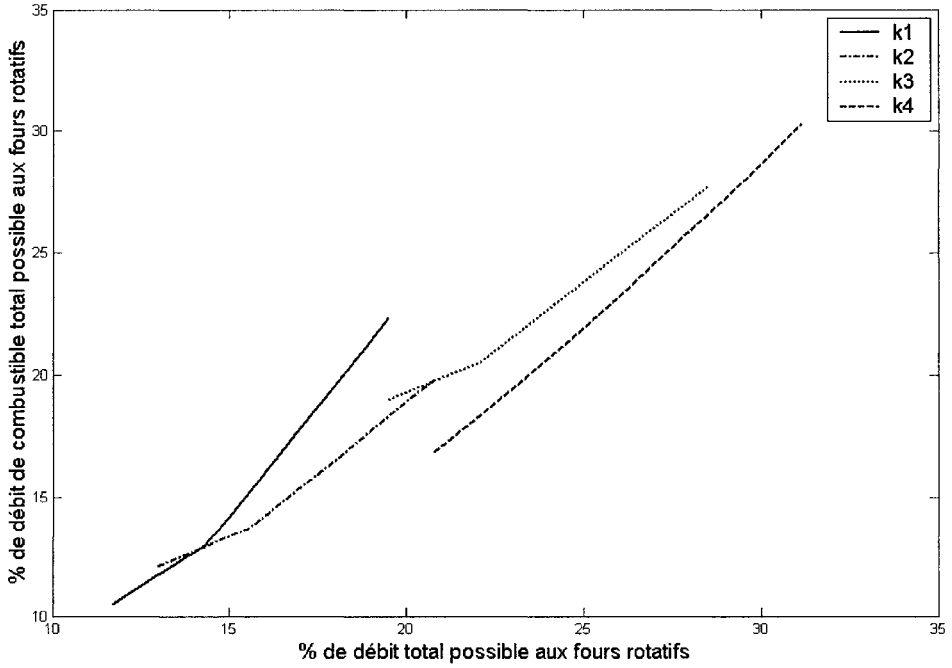

Figure 5.1 : Courbes de consommation spécifique des fours rotatifs

Les pentes de chacune de ces courbes démontrent l'efficacité de chaque four rotatif bien que les débits minimaux et maximaux aient aussi de l'influence dans le choix d'opération des fours . Ainsi, il est plus avantageux d'opérer le four rotatif 3 à son maximum puisque sa pente est plus faible que le four rotatif 4 pour une même valeur de débit de minerai. Il en coûte donc moins cher de combustible par unité de débit de minerai additionnelle pour le four rotatif 3. Le four rotatif 4 opère au minimum puisque sa pente est plus abrupte que le four rotatif 2 bien que la différence soit relativement faible. Le four rotatif 1 se maintient au point d'inflexion de sa courbe pour favoriser un minimum de consommation de combustible pour un maximum de minerai traité. Pour les points supérieurs à ce point d'inflexion, le four rotatif a la pente la plus agressive de tous les fours.

Pour fin de simplification, la consommation de combustible d'un four rotatif est considérée nulle lors d'un arrêt. En réalité, une consommation est nécessaire pour un arrêt relativement court afin de maintenir le four rotatif arrêté assez chaud pour repartir rapidement. Lors d'un arrêt plus long il peut arriver que la consommation de combustible devienne nulle et le redémarrage nécessite alors une période de préchauffage. Afin de simplifier le modèle, le coût d'arrêt d'un four rotatif est fonction de la longueur de l'arrêt et approxime en quelque sorte le coût de combustible consommé pour maintenir le four chaud lors d'arrêts courts et le coût engendré par la période de préchauffage nécessaire pour des arrêts plus longs.

La quantité initiale de matériel aux piles A, B et C est une valeur moyenne entre la quantité minimale exigée et la capacité maximale de 100%. Le tableau suivant résume les valeurs utilisées. Les valeurs sont calculées en terme de pourcentage de la capacité maximale de chacune des piles.

Inventaires	Valeur initiale	Minimum requis
Pile A	75 %	50 %
Pile B	50 %	0 %
Pile C	77 %	58 %

Tableau 5-2 : Valeurs initiales et minimum des piles de matériel

Quatre scénarios typiques ont été définis avec l'aide de deux ingénieurs de QIT. Ces scénarios représentent des situations où l'utilisation d'un outil d'optimisation serait avantageuse. D'autres cas pourraient s'ajouter mais pour fin d'analyse, les cas présentés ci-bas ont été retenus.

Pour chaque cas présenté, les résultats sont présentés sur 5 figures différentes. La première figure présente la puissance électrique consommée par les fours de réduction, la quantité de gaz CO consommé par les usagers autres que les fours rotatifs, la quantité de gaz CO brûlé aux torchères, les débits de minerai entrant et sortant de la pile A ainsi que la quantité de minerai contenue par la pile A en tout temps.

La deuxième figure contient les courbes de débits de minerai entrant aux piles B et C, le débit de minerai provenant de la pile B vers la pile C et de la pile B vers les fours de réduction. Cette figure contient également les courbes de quantité de minerai contenue par chacune de ces piles en tout temps.

La troisième figure présente les courbes de débit de minerai alimentant chaque four rotatif et le débit total de ces 4 fours tandis que la quatrième figure contient les courbes de consommation de gaz CO de chaque four rotatif.

Finalement, la cinquième et dernière figure présente la consommation en gaz naturel des fours rotatifs ainsi l'allure de la fonction objectif dans le temps.

Encore une fois, les résultats sont présentés en valeurs relatives. Afin d'être en mesure de bien interpréter les résultats voici une brève description des valeurs associées à chaque courbe.

- La puissance électrique est à 100% lorsque les 9 fours de réduction sont en opération.
- La courbe de consommation des autres usagers que les fours rotatifs est à 100% lors d'une consommation considérée normale.
- Pour la courbe de gaz CO brûlé aux torchères, 100% est le débit total de gaz produit par les 9 fours de réduction qui pourraient éventuellement être brûlé entièrement.
- Les courbes de débits de minerai vers les piles A et C ou en provenance des piles A, B et C sont exprimées en pourcentage de la capacité totale de débit possible. Ces valeurs maximales sont fixées par la capacité du chargeur mécanique transportant le minerai.
- Le débit alimentant la pile B est plutôt un pourcentage du minerai total sortant du secteur de traitement thermique. Les courbes représentant les quantités de minerai contenues par ces 3 piles en tout temps, sont un pourcentage de la quantité totale de minerai pouvant être entreposé à ces piles.
- Les courbes de débits de minerai aux fours rotatifs sont présentées en un pourcentage de capacité maximale de chaque four rotatif.
- Les débits de gaz CO et de gaz naturel consommés par chacun des fours rotatifs sont présentés en terme de pourcentage de combustible total consommé (CO + gaz naturel) pour traiter le débit de minerai correspondant. La somme des courbes de ces deux combustibles pour chaque four rotatif est de 100% lorsque le four en question est en marche.
- Finalement la fonction objectif est représentée en dollars par heure. Il faut noter que ces valeurs comprennent les pénalités énumérées précédemment. De plus, certains coûts comme les coûts d'arrêt d'équipement sont une pure estimation et

rendent les valeurs de la fonction objectif fictives. Toutefois l'allure de la fonction objectif décrit bien les décisions prises par le système d'optimisation.

Les débits de gaz naturel aux fours rotatifs ont été traités en terme de quantité de gaz CO équivalent pour deux raisons. Tout d'abord, ceci permet de clairement établir une équivalence dans la comparaison des résultats. Ensuite les intervenants de l'usine fonctionnent de cette façon et les données fournies sont exprimées de cette façon.

5.2. Premier cas : arrêt des quatre fours rotatifs

Il arrive parfois qu'un entretien majeur doive se faire dans le secteur des fours rotatifs. Les 4 fours rotatifs sont alors arrêtés simultanément pour une durée d'environ douze heures consécutives. Le reste de l'usine peut alors continuer à fonctionner en puisant la totalité du minerai nécessaire (aux fours de réduction) dans les piles.

5.2.1. Présentation des résultats obtenus

Les 5 figures suivantes illustrent les résultats d'une simulation d'un arrêt simultané des 4 fours rotatifs pour la période $49 \leq t \leq 60$. La puissance électrique et la consommation de CO par les autres secteurs que les fours rotatifs sont à leur valeur maximale.

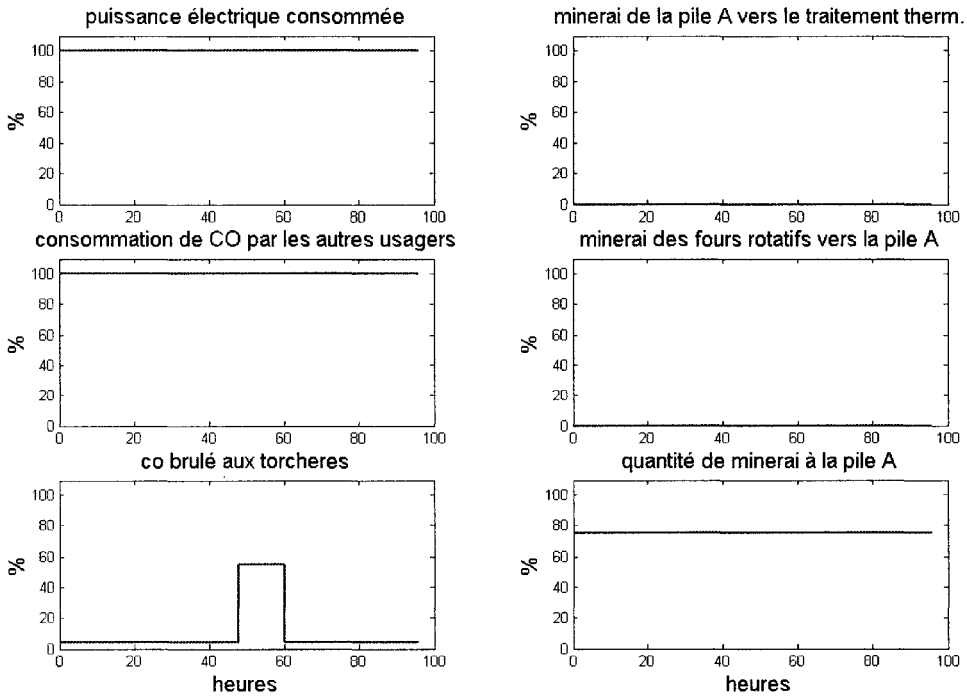

Figure 5.2 : Résultats du scénario 1 : puissance disponible, autres usagers de CO, CO aux torchères et pile

A

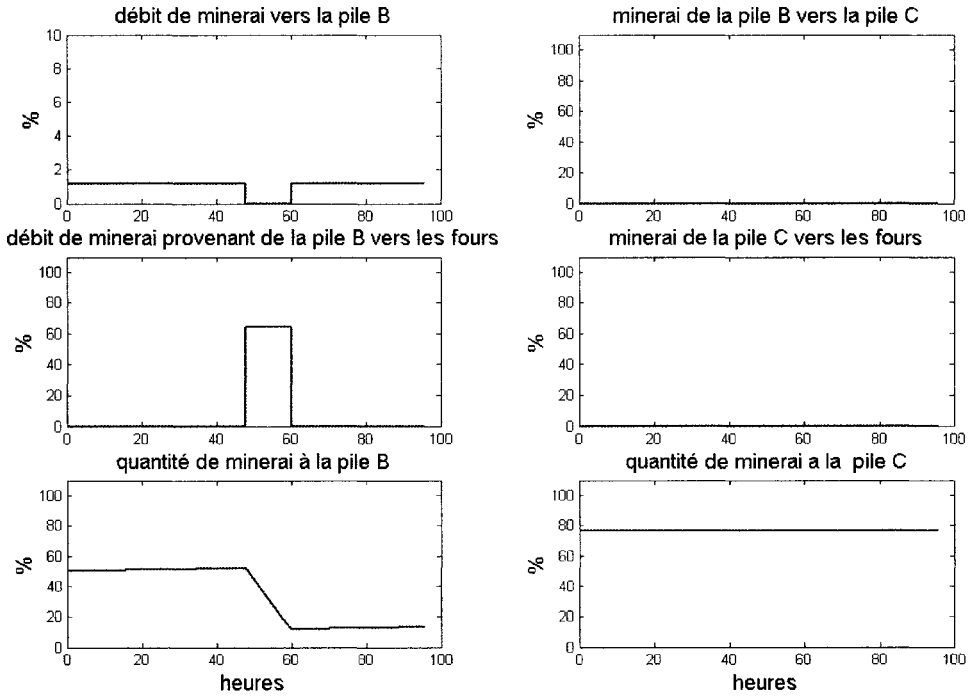

Figure 5.3 : Résultats du scénario 1 : piles B et C

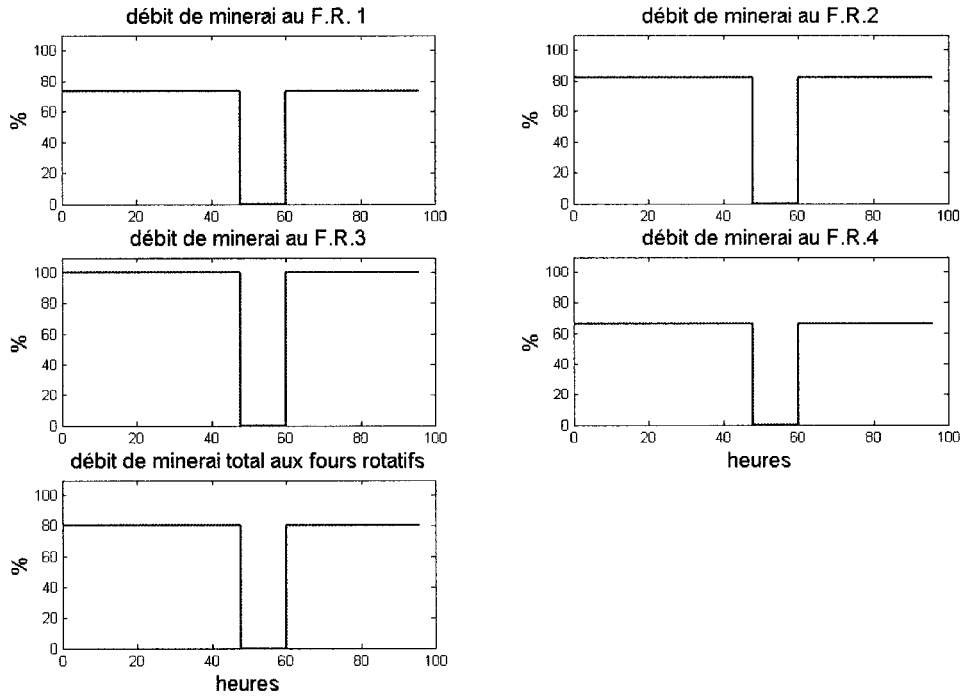

Figure 5.4 : Résultats du scénario 1 : débit de minerai alimentant les fours rotatifs

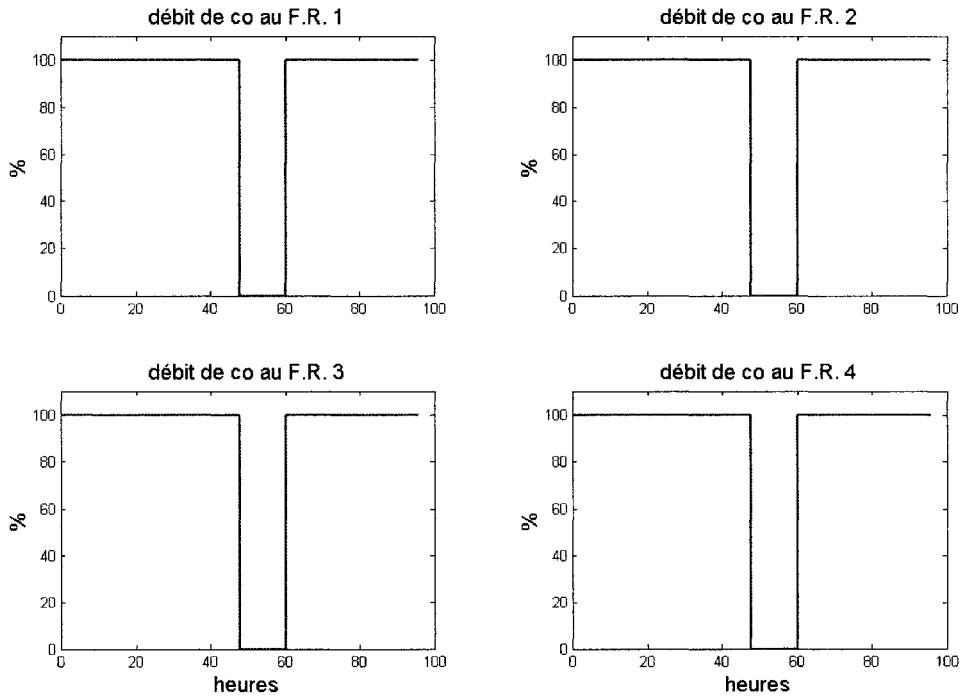

Figure 5.5 : Résultats du scénario 1 : débit de CO aux fours rotatifs

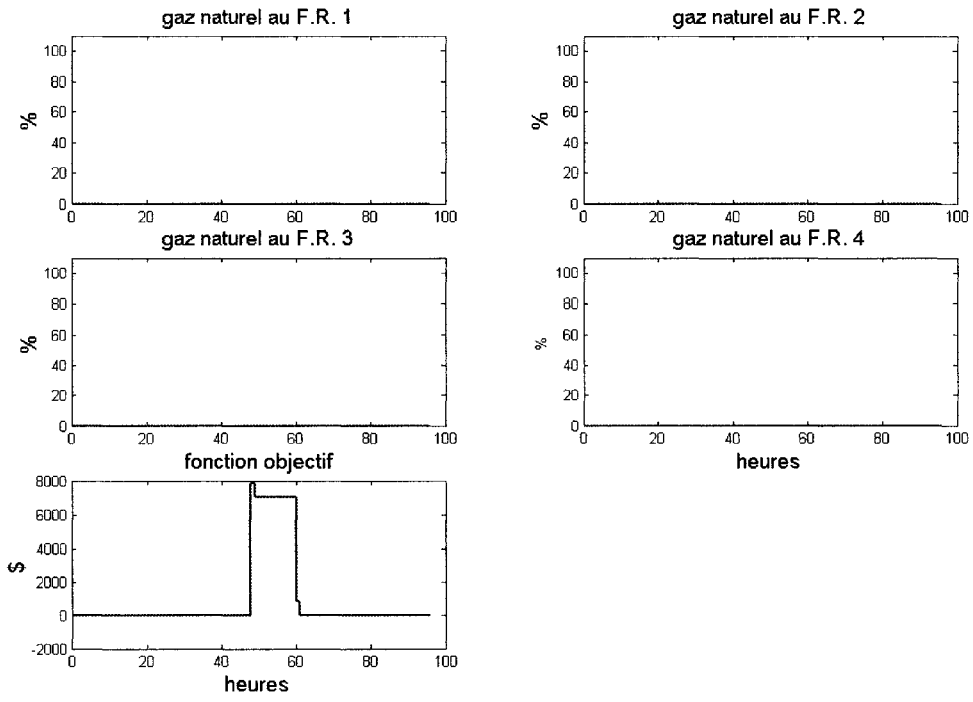

Figure 5.6 : Résultats du scénario 1 : débit de gaz naturel aux fours rotatifs et fonction objectif

5.2.2. Analyse des résultats

La Figure 5.2 démontre que le débit de CO aux torchères est constant à une valeur de 4% pour les périodes précédant et suivant les arrêts des fours rotatifs. Cette valeur représente le minimum requis en tout temps pour maintenir les torchères allumées. D'après la Figure 5.3, on remarque qu'avant et après l'arrêt imposé, la production des fours rotatifs permet d'entreposer un débit moyen de 1.13 % à la pile B. Cette accumulation quoique faible permet d'assurer une réserve en opération normale à la pile B afin d'être prêt pour un besoin de minerai lors de perturbations. La Figure 5.4 nous montre l'arrêt forcé des 4 fours rotatifs. Durant cette période d'arrêt, les fours de réduction sont alimentés avec du minerai provenant de la pile de réserve B comme en témoigne la Figure 5.3 et le gaz CO non-utilisé par les fours rotatifs est brûlé aux torchères.

Après l'arrêt, les fours rotatifs retournent aux débits initiaux en utilisant encore une fois le maximum de gaz CO disponible. L'utilisation de gaz naturel n'est pas nécessaire dans ce cas. Le matériel est pris de la pile B puisque la pile A est située en amont du secteur de traitement thermique et ce minerai contient une certaine quantité de rejets ce qui augmente la quantité de matériel nécessaire et par le fait même, les coûts de transport. La pile C étant situé physiquement plus loin des fours de réduction que la pile B, on privilégie encore une fois le minerai provenant de la pile B car le coût de manutention est fonction de la distance parcourue par le chargeur mécanique.

La Figure 5.6 représente l'allure de la fonction objectif dans le temps. Pour $t < 49$, on a un coût négatif constant très faible qui n'est pas vraiment visible sur le graphique. Ce coût négatif est dû à la bonification du débit de minerai envoyé par les fours rotatifs vers la pile B. Ensuite pour les temps $49 \leq t \leq 60$, on a une plateau supérieur avec une hausse du coût au début et à la fin de cette période. Le plateau est créé par la pénalité associée au débit de CO brûlé aux torchères, au coût d'arrêt des fours rotatifs à chaque heure et finalement au coût de transport de minerai de la pile B vers les fours de réduction. Les hausses de coût du début (à $t = 49$) et de la fin (à $t = 60$) de cette période représente les pénalités associées aux transfert marche-arrêt et arrêt-marche des fours rotatifs. Rappelons que cette pénalité a pour but d'éviter une fluctuation marche-arrêt entre plusieurs fours rotatifs de façon consécutive.

5.3. Deuxième cas : mode « interruption »

Le mode « interruption » est un mode de fonctionnement résultant de la limite en consommation d'électricité imposée par Hydro-Québec. QIT étant un important usager d'électricité au Québec, il arrive lors de grands froids hivernaux par exemple, que l'usine soit avertie quelques heures ou quelques jours à l'avance de la baisse de puissance électrique disponible pour environ 6 heures.

5.3.1. Présentation des résultats obtenus

Les 5 figures présentées ci-dessous illustrent la stratégie optimale dans ce cas. La baisse d'électricité est simulée pour les heures $60 \leq t \leq 65$. La puissance électrique disponible passe alors de 100% à 29%. Durant cette même période, les autres usagers de CO doivent diminuer leur consommation de CO puisque même si tout le CO disponible leur était distribué, ces secteurs ne pourraient opérer normalement. Ce seuil minimal a été fixé à 50% ici.

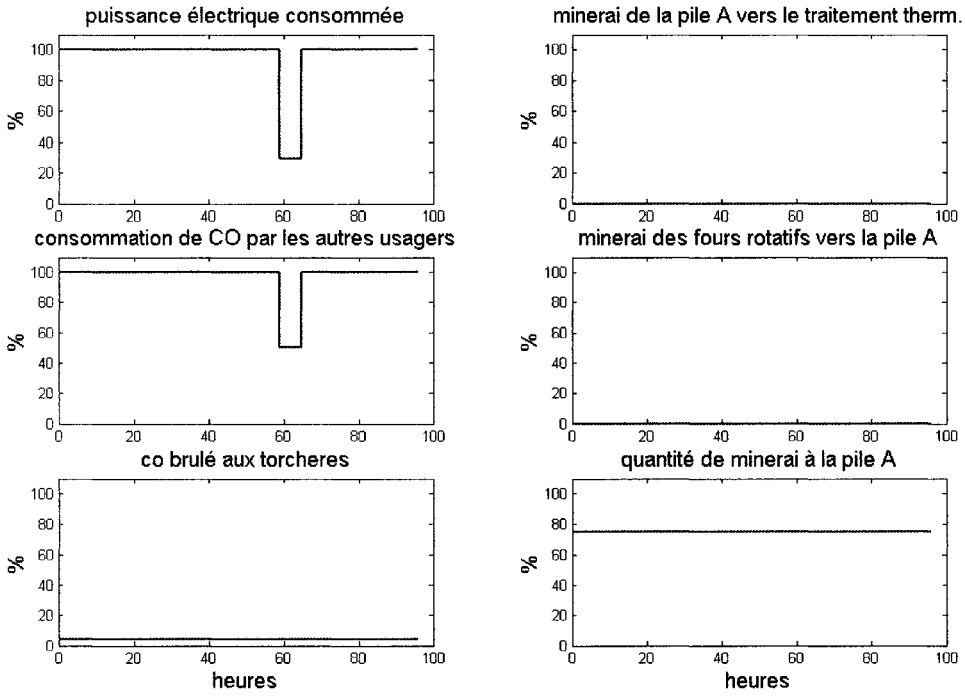

Figure 5.7 : Résultats du scénario 2 : puissance disponible, autres usagers de CO, CO aux torchères et pile A

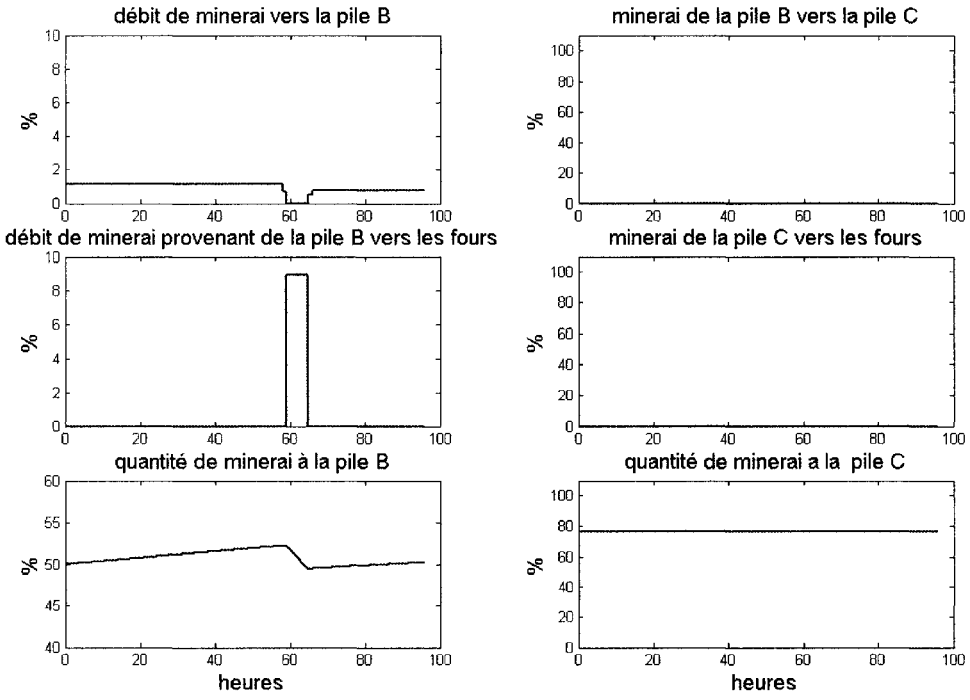

Figure 5.8 : Résultats du scénario 2 : piles B et C

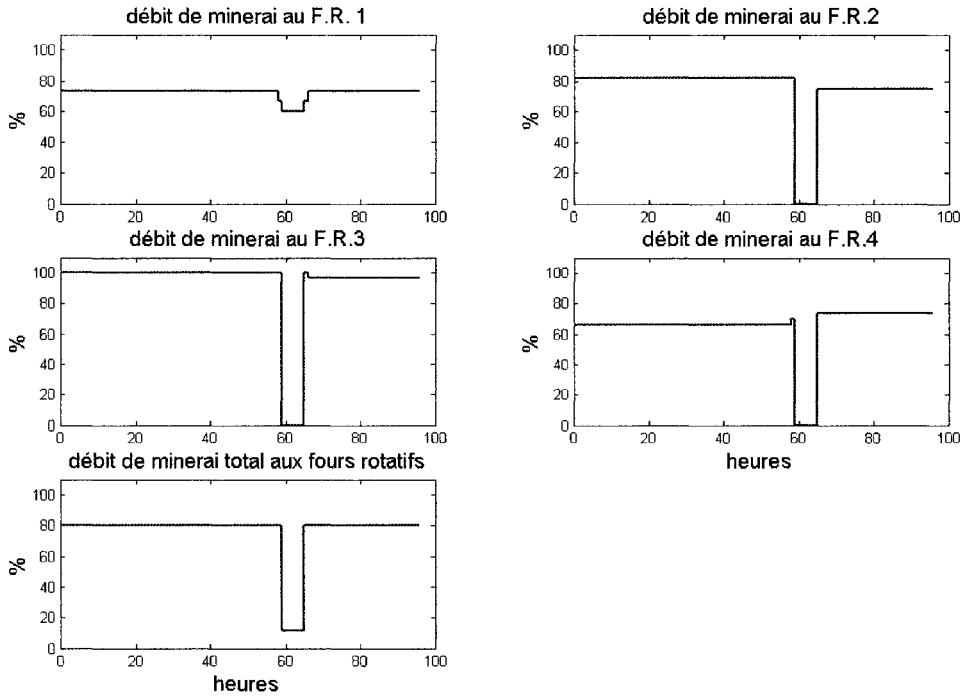

Figure 5.9 : Résultats du scénario 2 : débit de minerai aux fours rotatifs

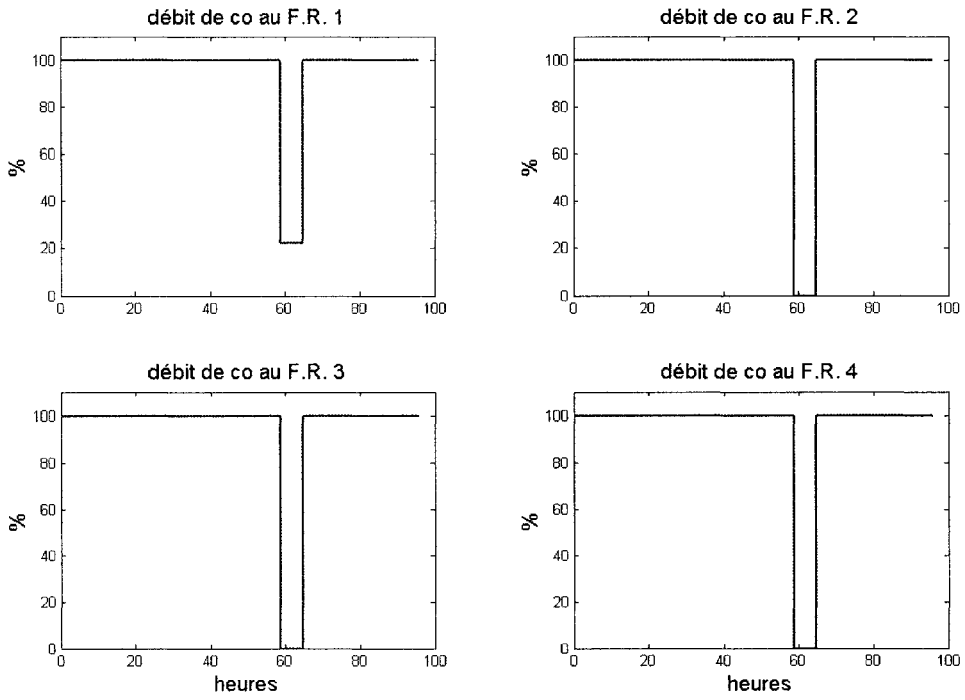

Figure 5.10 : Résultats du scénario 2 : débit de CO aux fours rotatifs

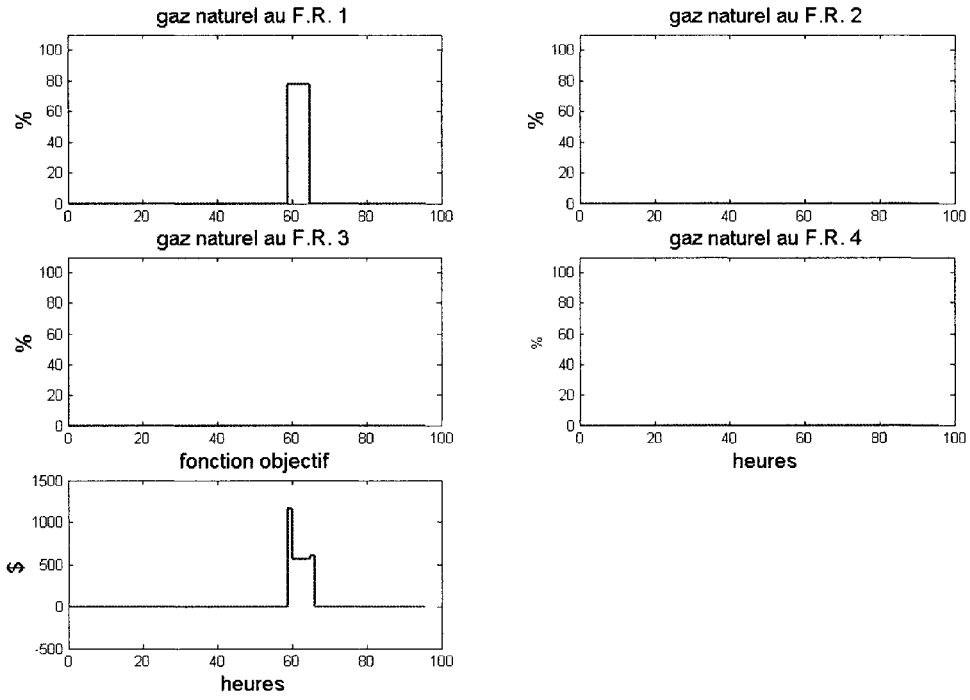

Figure 5.11 : Résultats du scénario 2 : débit de gaz naturel aux fours rotatifs et fonction objectif

5.3.2. Analyse des résultats

Encore une fois, la quantité de CO brûlé aux torchères est toujours maintenue à son minimum nécessaire de 4% en tout temps.

La deuxième figure montre l'apport en minerai vers la pile B pour $t < 60$ et $t > 66$. Cet apport est très faible et légèrement différent pour ces deux périodes soit de 1.13% avant la perturbation et de 0.78% après. Cette différence est due à la précision exigée lors des calculs d'optimisation. La bonification associée au débit de minerai vers la pile B est relativement faible comparativement au coût de gaz naturel ou encore au coût de manutention des piles de minerai A et C et ce, dans le but d'éviter par exemple, la consommation de gaz naturel pour alimenter la pile B. L'impact dans la fonction objectif globale de cette bonification est donc faible et détermine en quelque sorte le degré de

précision des calculs d'optimisation. Il faudrait ici fixer un critère de précision beaucoup plus faible pour obtenir un retour aux conditions initiales. Il faut dire que de façon plus réaliste, la différence entre ces deux valeurs de débit alimentant la pile B n'est pas très significative pour les gens d'opération. C'est pourquoi ces résultats sont jugés satisfaisants.

La Figure 5.9 permet de voir que durant la baisse de puissance électrique disponible seul le four rotatif 1 continue à opérer à son point d'opération minimal de 60%. Ceci permet d'utiliser le gaz CO disponible plutôt que de le brûler aux torchères. Par contre, cette production minimale ne suffit pas pour alimenter les fours de réduction convenablement. C'est pourquoi un débit de 9% est nécessaire de la pile B vers les fours tel que montré à la Figure 5.8. La décision d'arrêter les fours rotatifs 2, 3 et 4 ici découle du prix plus élevé du gaz naturel en comparaison au coût d'arrêt de ces fours. Le four rotatif 1 étant celui qui puisse consommer un minimum de combustible à un minimum de débit de minerai, il est donc choisi par le programme d'optimisation pour continuer à opérer pendant la baisse de puissance. La diminution de débit du four rotatif 1 vers son débit minimale se fait sur deux heures. C'est la contrainte de diminution permise (contrainte 4) qui limite cette descente.

Les deux dernières figures démontrent le fonctionnement du four rotatif 1 en mode bi-énergie : 22% de gaz CO et 78% de gaz naturel. La fonction objectif a la même allure qu'au cas précédent quoique le plateau due à la baisse de puissance électrique présente un coût plus faible. Cette fois la valeur maximale moyenne durant l'intervalle $60 \leq t \leq 65$ est composée du coût du gaz naturel consommé par le four rotatif 1, du coût du transport de minerai de la pile B vers les fours et du coût d'arrêt des fours rotatifs 2, 3 et 4.

5.4. Troisième cas : mode « interruption » pendant l'arrêt d'un des fours rotatifs.

Le troisième cas retenu est la limite de puissance électrique disponible (mode « interruption ») alors qu'un des quatre fours rotatifs n'est pas disponible. Ici, le four rotatif 1 est non-disponible pour l'opération à partir de la $48^{ième}$ heure jusqu'à la fin de la période de simulation ($96^{ième}$ heure). La baisse de puissance disponible a lieu au temps $60 \leq t \leq 65$ comme pour le cas précédent.

5.4.1. Présentation des résultats obtenus

Comme pour le cas précédent la puissance disponible connaît une baisse de 71% et les usagers de CO consomment 50% de leur consommation normale pendant cette baisse.

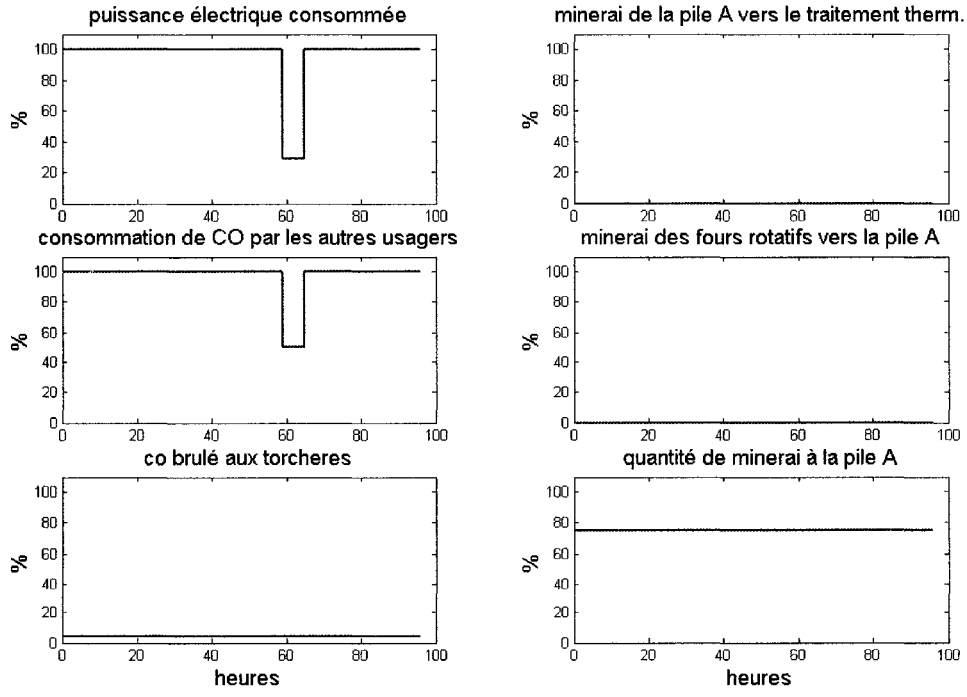

Figure 5.12 : Résultats du scénario 3 : puissance disponible, autres usagers de CO, CO aux torchères et pile A

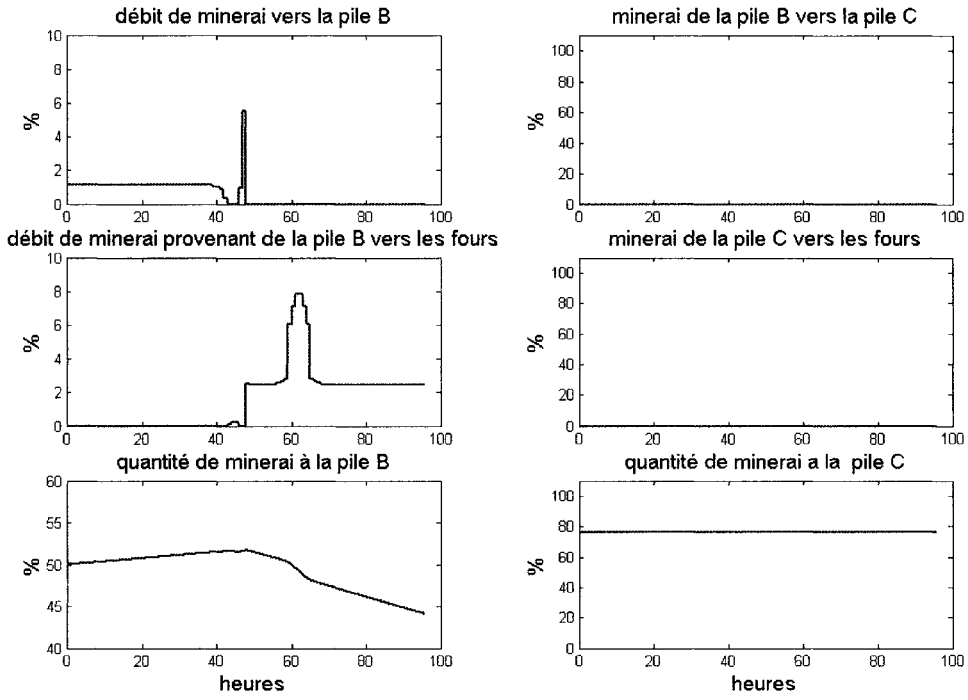

Figure 5.13: Résultats du scénario 3 : piles B et C

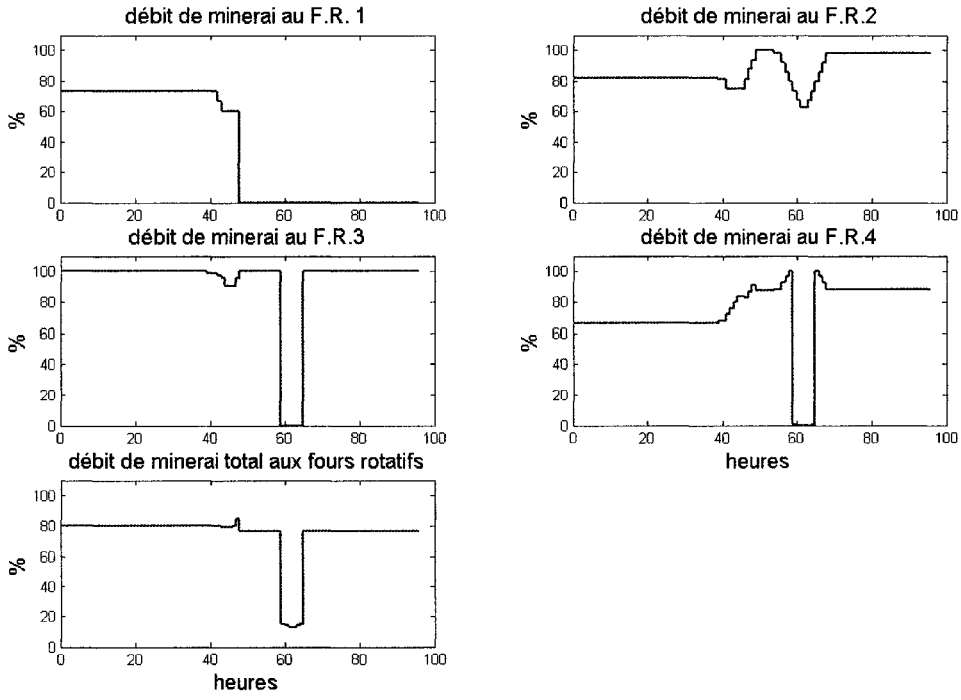

Figure 5.14 : Résultats du scénario 3 : débit de minerai aux fours rotatifs

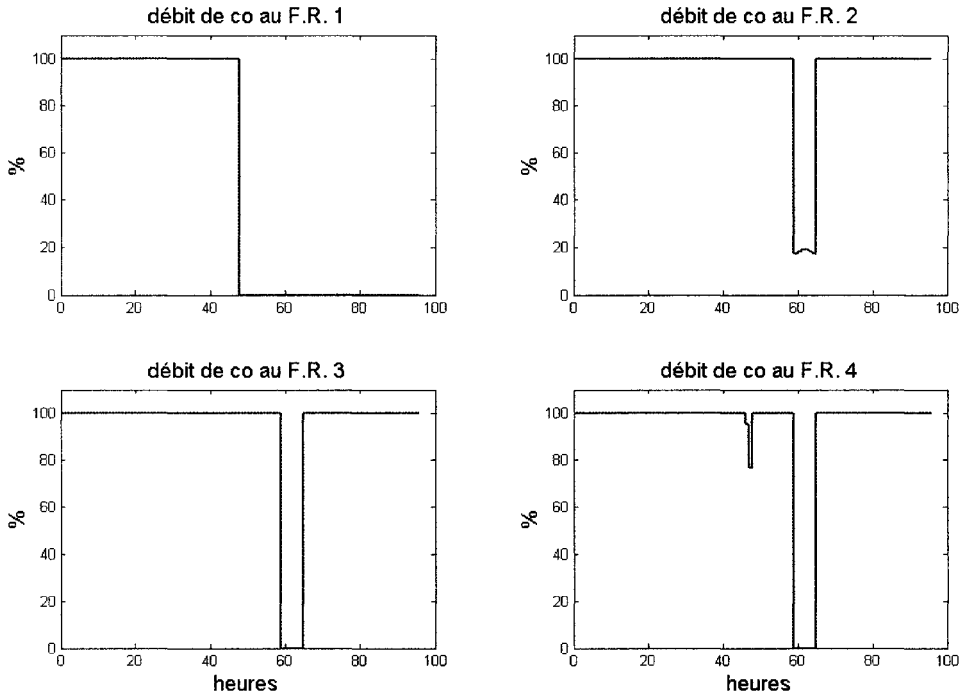

Figure 5.15 : Résultats du scénario 3 : débit de CO aux fours rotatifs

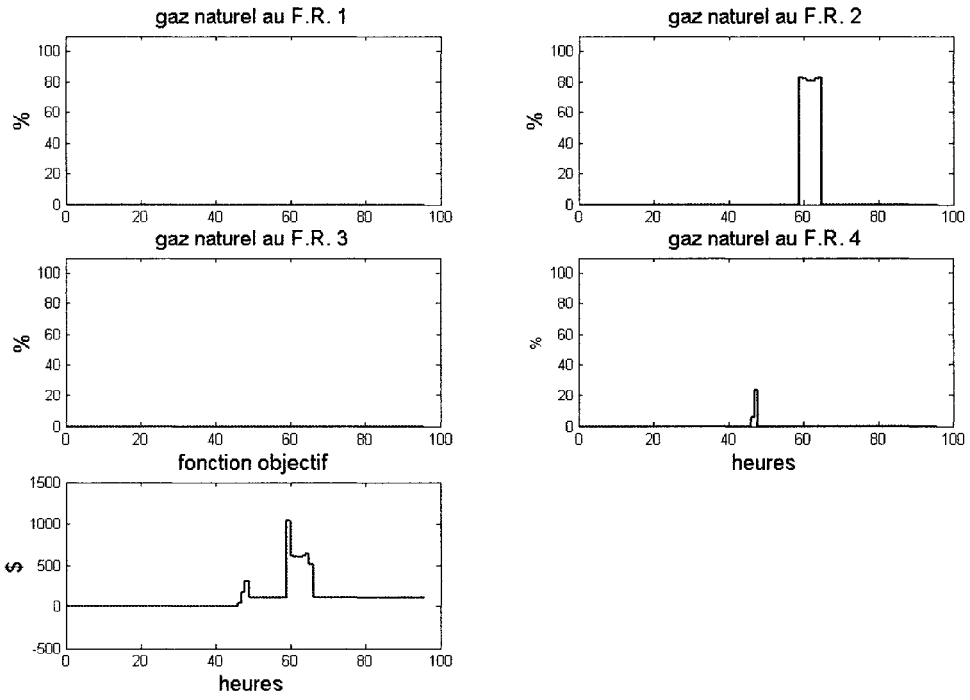

Figure 5.16 : Résultats du scénario 3 : débit de gaz naturel aux fours rotatifs et fonction objectif

5.4.2. Analyse des résultats

La Figure 5.12 présente des courbes identiques en tout point au cas précédent. Par contre, la figure suivante est un peu différente pour la pile B. L'arrêt du four rotatif 1 au temps t = 48 nécessite un apport en minerai de 2.4% de la pile B vers les fours de réduction. Ce débit augmente jusqu'à une valeur de 7.8% durant le mode « interruption » pour revenir à 2.4% à partir du temps t = 65.

Figure 5.14nous montre que c'est maintenant le four rotatif 2 qui doit être maintenu à sa valeur minimale de production de 62.5% durant la baisse de puissance ($49 \leq t \leq 60$) puisque le four rotatif 1 n'est pas disponible pour l'opération. Le four rotatif 2 est choisi puisqu'il est celui, après le four rotatif 1, dont le minimum de production est le plus bas tel que montré à la Figure 5.1. À partir du moment où le four rotatif 1 est arrêté, les fours rotatifs 2 et 3 sont à 100% de production pour compenser la production manquante. À partir du temps t = 55, le four rotatif 2 amorce une descente graduelle et limitée par la

contrainte de diminution maximale pour arriver à sa production minimale au temps t = 60. Le four rotatif 4 amorce quant à lui une montée jusqu'à 100% de production afin de garder un débit total constant pour l'intervalle $49 \leq t \leq 60$. Après la perturbation, les fours rotatifs 2 et 3 reviennent à 100% de débit de minerai traité et le four 4 à 89% afin de consommer le tout le gaz CO disponible.

Les courbes de consommation de gaz CO de la Figure 5.15 démontrent que les fours 2 et 3, lorsqu'ils sont en fonction, fonctionnent entièrement au gaz CO. Le four rotatif 2 fonctionne en bi-énergie lors de la période d'interruption de puissance : 19% de gaz CO et 81% de gaz naturel. Le four rotatif 4 consomme 5% et 24% de gaz naturel aux temps t = 47 et t = 48 respectivement. Ce gaz naturel est nécessaire pour permettre aux fours rotatifs 2, 3 et 4 d'amorcer leur augmentation de débit d'alimentation avant l'arrêt du four rotatif 1 à l'instant t = 49.

Finalement, on peut voir le léger impact du coût de manutention du minerai de la pile B vers les fours de réduction sur la fonction objectif pour les périodes $49 \leq t \leq 59$ et $66 \leq t \leq 96$.

5.5. Quatrième cas : non-disponibilité de 2 des neufs fours de réduction.

Lors d'un arrêt d'un des 9 fours de réduction, il n'y a peu d'impact pour le reste de l'usine puisque la même quantité d'électricité peut être consommée par les huit autres fours de réduction. Par contre, si un des fours est en arrêt pour entretien régulier et qu'un autre four doive arrêter d'urgence, nous simulerons une baisse de consommation d'électricité totale par les sept fours restants.

5.5.1. Présentation des résultats obtenus

Cette baisse de puissance électrique consommée par les fours de réduction est de 9% pour l'intervalle $60 \leq t \leq 65$. Cet écart représente la puissance ne pouvant être consommée par les 7 fours de réduction disponibles pour l'opération. Ici, la consommation de CO par les autres secteurs que les fours rotatifs est constante à 100%.

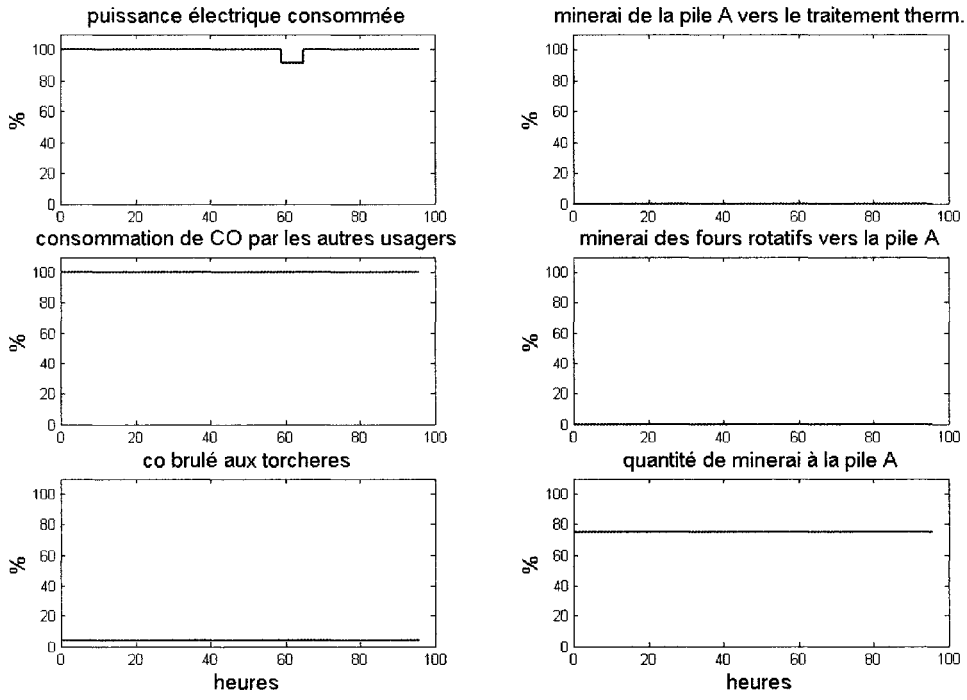

Figure 5.17 : Résultats du scénario 4 : puissance disponible, autres usagers de CO, CO aux torchères et pile A

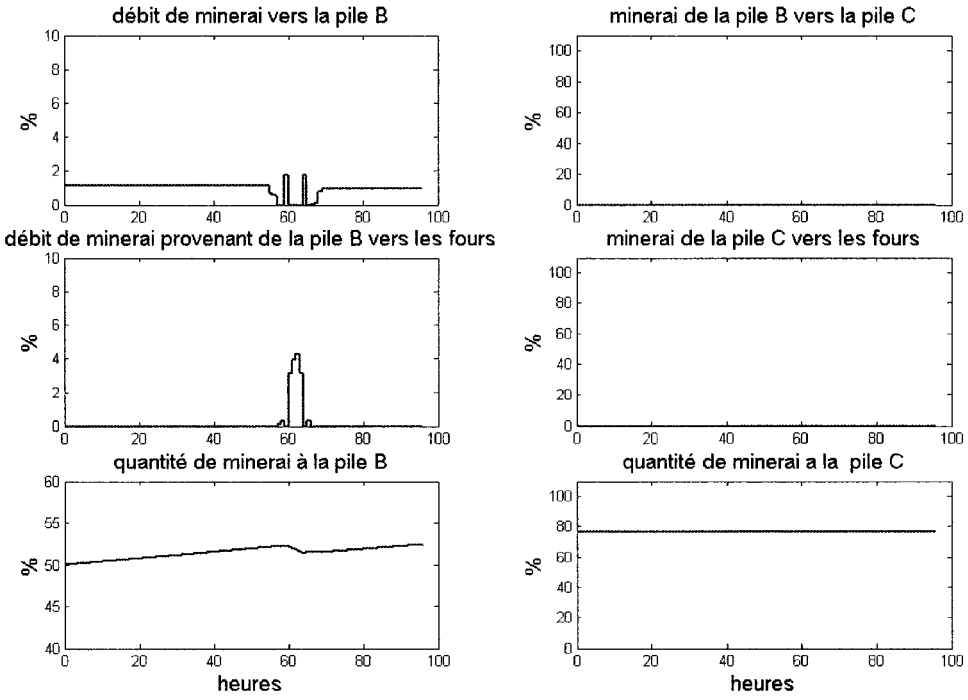

Figure 5.18 : Résultats du scénario 4 : piles B et C

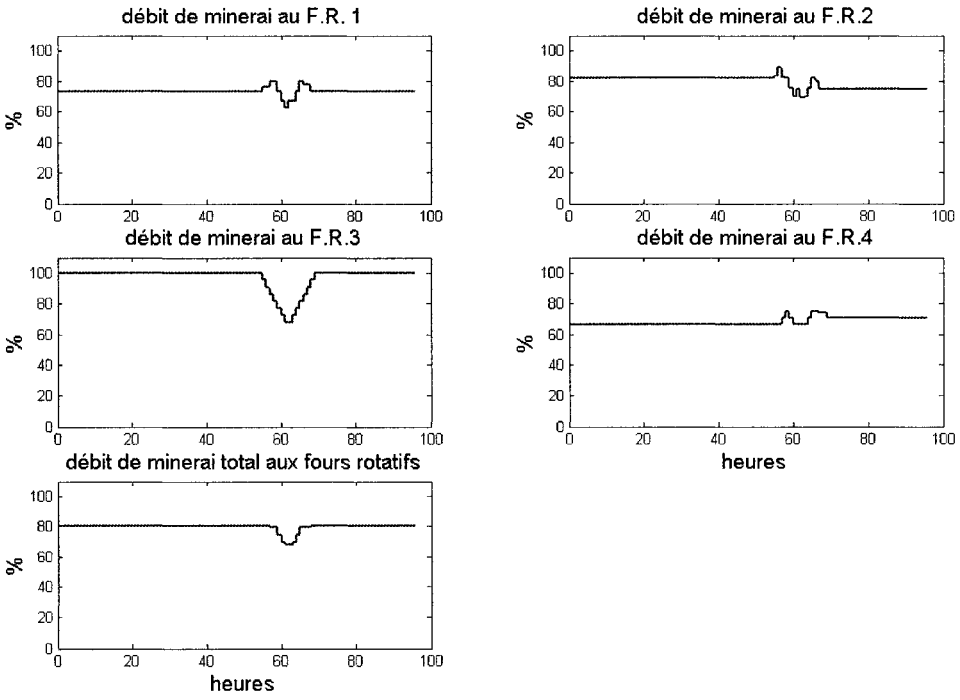

Figure 5.19 : Résultats du scénario 4 : débit de minerai aux fours rotatifs

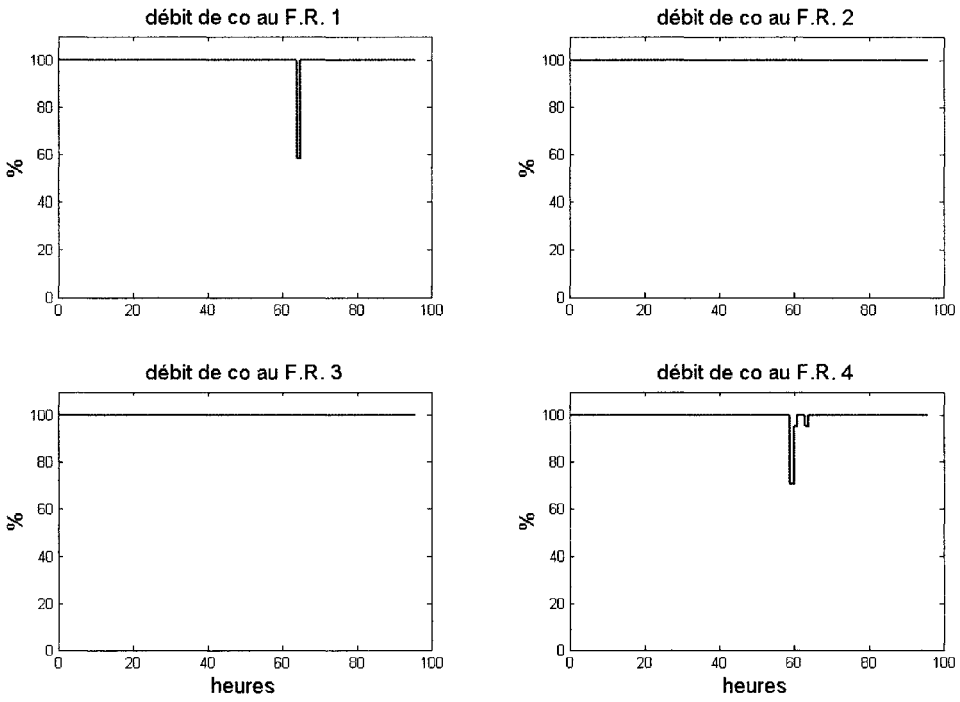

Figure 5.20 : Résultats du scénario 4 : débit de CO aux fours rotatifs

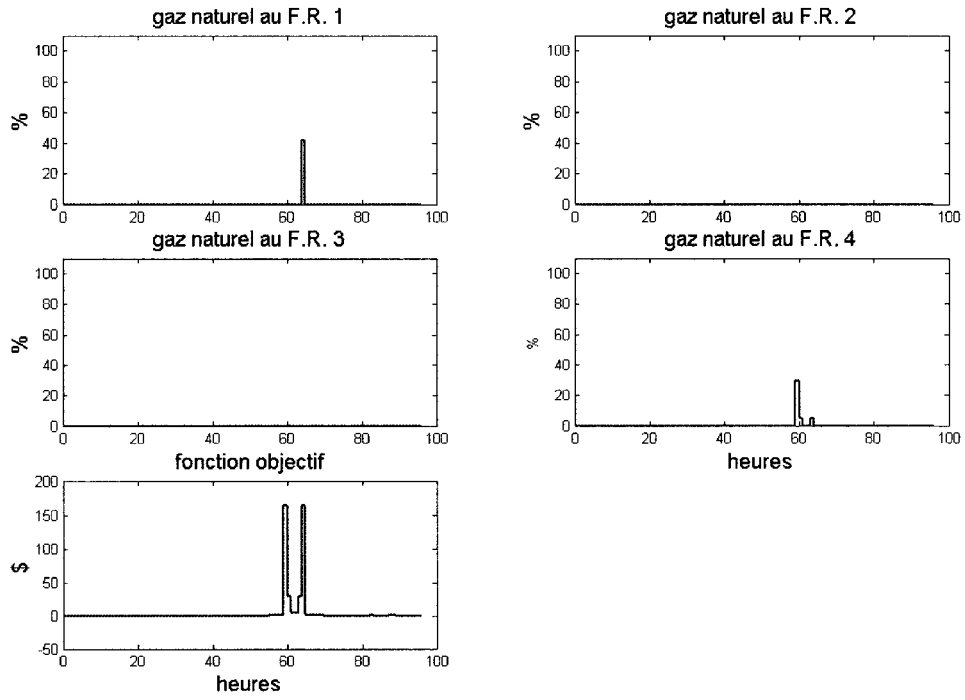

Figure 5.21 : Résultats du scénario 4 : débit de gaz naturel aux fours rotatifs et fonction objectif

5.5.2. Analyse des résultats

Encore une fois, le débit de CO brûlé aux torchères est toujours au minimum requis de 4% ce qui signifie que tout le CO disponible est utilisé par les fours rotatifs.

Dans ce cas-ci aucun arrêt de four rotatif n'est nécessaire. Par contre, les fours rotatifs 3 et 4 sont à leur débit minimal de 68% et 67% respectivement durant la baisse de puissance électrique. Le four rotatif 1 sera également diminué jusqu'à 62.5% de sa production maximale tandis que le débit du four rotatif 2 atteindra une valeur de 69% au temps t = 63. On remarque ici que les valeurs de débits des fours rotatifs 2 et 4 pour $t > 65$ ne sont pas les mêmes que pour $t < 60$. Par contre le débit total traité par les 4 fours rotatifs est toujours le même pour ces mêmes intervalles. Il existe donc au moins deux points d'équilibre pour ce cas particulier. Si on regarde les courbes de combustion des fours rotatifs de la Figure 5.1, on peut constater que les pentes des courbes des fours

2 et 4 sont très semblables pour les parties supérieures aux points d'inflexion de ces courbes. Cela explique donc que différentes combinaisons de débit peuvent donner la même consommation de combustible avec le même débit total de minerai.

Si on revient maintenant à la Figure 5.18, on peut voir que le minerai en surplus traité par les fours rotatifs est acheminé à la pile B. Par contre, pour l'intervalle $60 \leq t \leq 65$, on compense la baisse de minerai traité en soutirant de la pile B.

Les four rotatif 1 fonctionne à 42% de gaz naturel à l'instant $t = 65$. Le four rotatif 4 quant à lui utilise 30% de gaz naturel au temps $t = 60$ et 5% aux temps $t = 61$ et $t = 64$. Durant ces intervalles, la quantité de gaz CO n'est pas suffisante pour répondre à la demande des 4 fours rotatifs et le débit total de minerai alimentant les fours rotatifs ne peut descendre plus bas considérant que l'interruption de puissance ne dure que 6 heures. Il faut être en mesure de revenir à l'opération normale une fois toute la puissance disponible.
Finalement, la fonction objectif démontre clairement le coût du gaz naturel utilisé par les fours rotatifs 1 et 4 ainsi que l'apport en minerai de la pile B vers les fours de réduction pour la durée du mode « interruption ».

5.6. Reprise du premier cas avec quantité initiale à la pile B inférieure

Dans les quatre cas présentés jusqu'à présent les piles A et C ne sont pas utilisées puisque la pile B contient suffisamment de minerai pour répondre à la demande. Le cas présenté ici est le cas où les quatre fours rotatifs sont arrêtés simultanément (premier cas) alors que la pile B contient beaucoup moins de minerai que lors de la simulation présentée précédemment. La valeur initiale de la pile B n'est plus de 50% mais plutôt de 31%. Les piles A et C ont toujours les mêmes valeurs initiales de 75% et 77% respectivement.

5.6.1. Présentation des résultats obtenus

Encore une fois, l'arrêt des 4 fours rotatifs survient à la période $49 \leq t \leq 60$. La puissance électrique consommée et la quantité de gaz CO consommée par les autres secteurs sont toujours constantes.

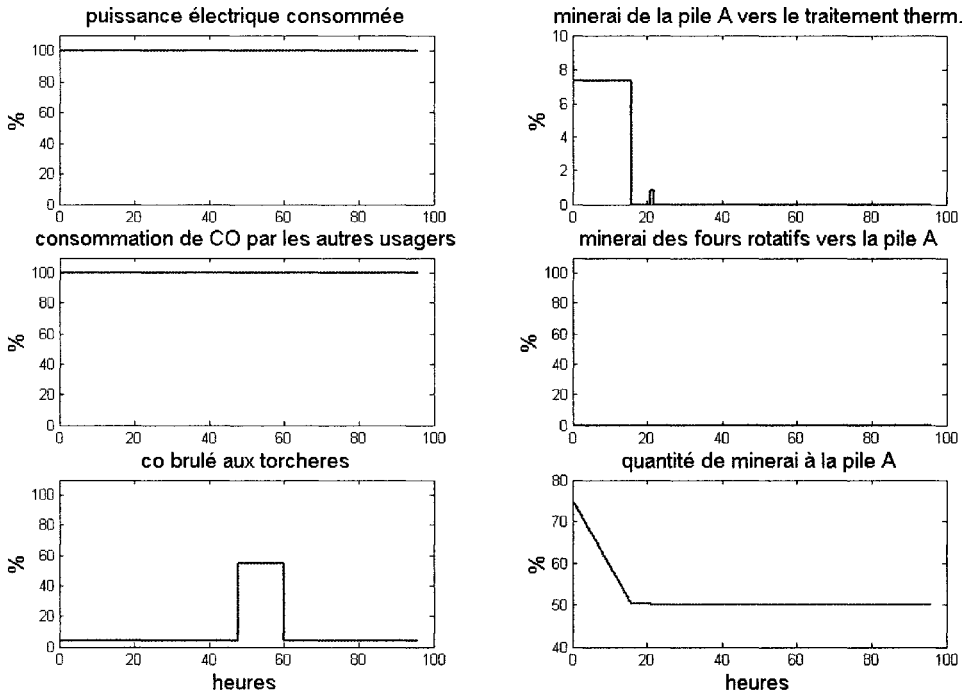

Figure 5.22 : Scénario 1 avec pile B plus basse : puissance disponible, autres usagers de CO, CO aux torchères et pile A

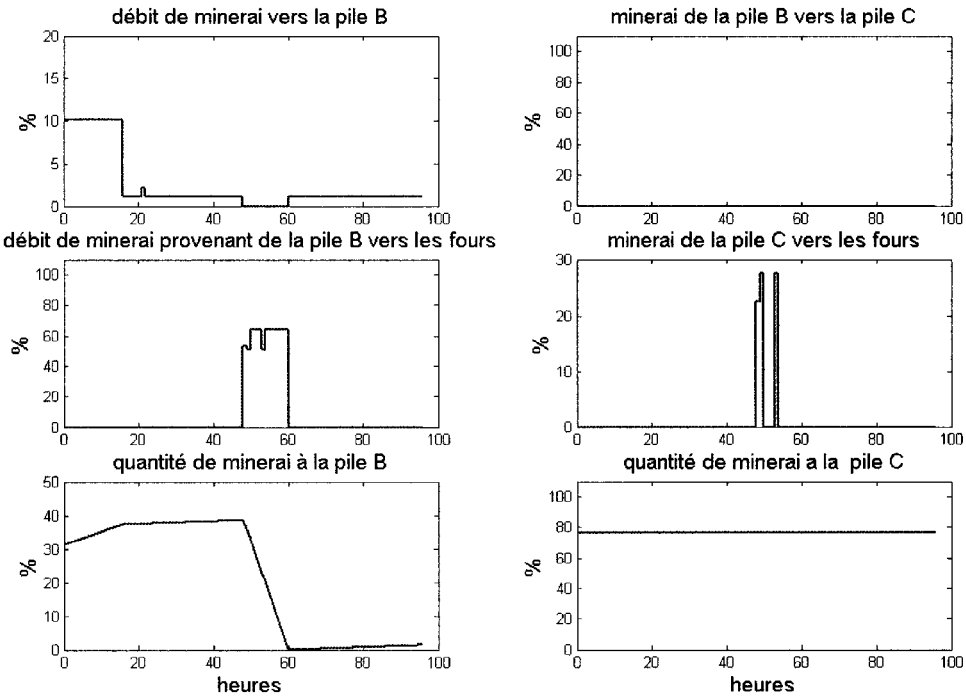

Figure 5.23 : Scénario 1 avec pile B plus basse : pilesB et C

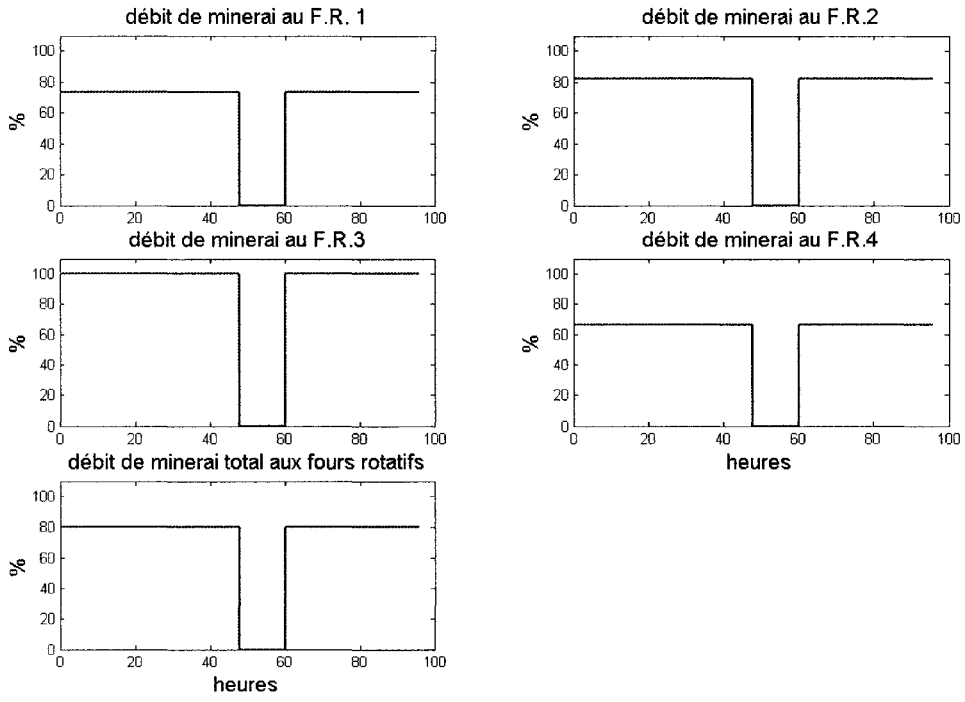

Figure 5.24 : Scénario 1 avec pile B plus basse : minerai alimentant les fours rotatifs

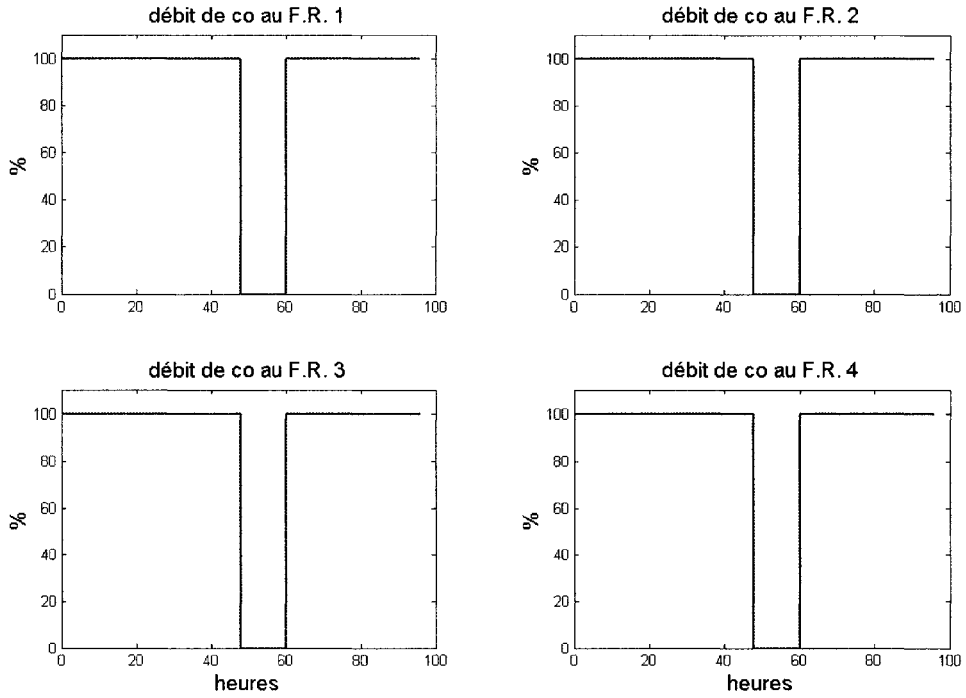

Figure 5.25 : Scénario 1 avec pile B plus basse : débit de CO aux fours rotatifs

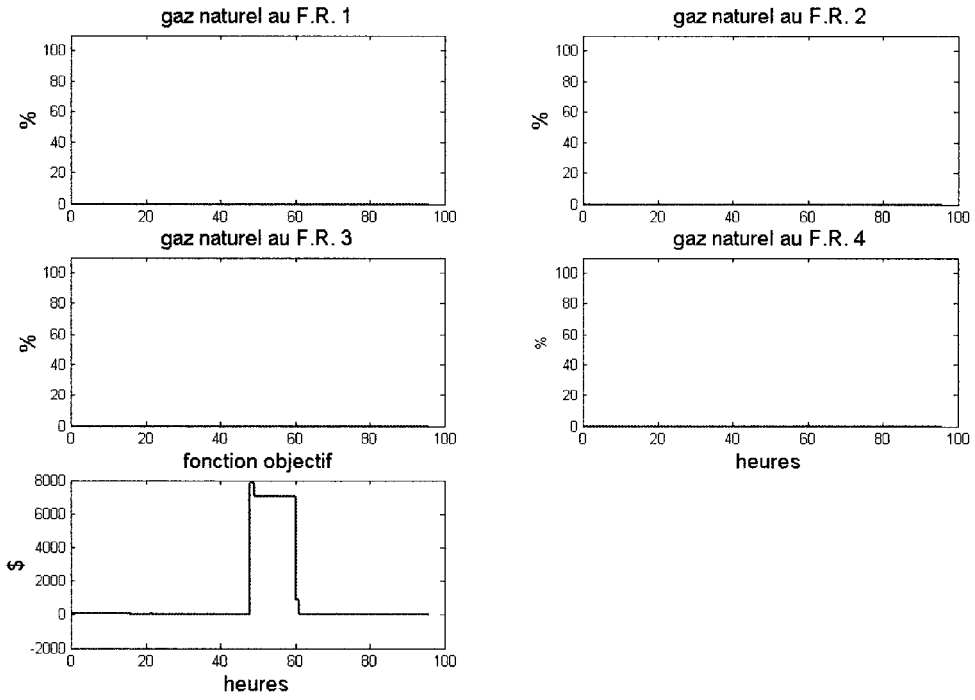

Figure 5.26 : Scénario 1 avec pile B plus basse : gaz naturel consommé aux fours rotatifs et fonction objectif

5.6.2. Analyse des résultats obtenus

La Figure 5.22 nous montre l'utilisation de minerai en provenance de la pile A pour alimenter le secteur de traitement thermique. Ce débit de 7.3% sert à augmenter la pile B dans l'intervalle $0 \leq t \leq 16$. Cet apport de minerai est visible sur la première courbe de la figure suivante (débit de minerai vers la pile B). Par la suite, seuls les fours rotatifs alimentent la pile B avec un débit de 1.13% comme pour le cas originel. Lors de l'arrêt des 4 fours rotatifs, il est nécessaire de puiser dans la pile C pour arriver à satisfaire la demande en minerai des fours de réduction. Ici, les valeurs maximales de débit provenant de la pile C vers les fours ($t = 50$ et $t = 54$) sont limitées par la contrainte de minerai humide. Rappelons que la pile C est situé à l'extérieur et contient un minerai humide. On peut donc puiser au maximum 28% de la capacité maximale du chargeur

mécanique dans ce cas-ci. La contrainte réelle est plutôt en terme de pourcentage de minerai alimentant les fours de réduction.
Avec ces profils de débits pour les 3 piles , la pile B est complètement vide au temps t = 60 mais sera de nouveau ré-alimentée par les fours rotatifs à partir de ce moment. Toutefois, cette alimentation est très faible. L'optimisation se termine au temps T = 96 et ne tient aucunement compte que l'usine continue à opérer par la suite. Si on désire forcer la pile B à contenir une plus grande quantité de minerai au temps final dans le but d'assurer une meilleure réserve, il suffit de fixer les bornes supérieure et inférieure de la variable de quantité de minerai à la valeur désirée.

Les coûts de manutention pour les piles A et C sont difficiles à percevoir dans la figure de la fonction objectif puisque ces coûts sont très faibles par rapport au coût d'arrêts des fours rotatifs. On peut toutefois apercevoir une légère hausse de la fonction objectif pour la période $0 \leq t \leq 16$ ou on soutire de la pile A.

5.7. Reprise du deuxième cas avec prix du gaz naturel plus bas

Cette fois nous reprenons ici le cas du mode « interruption » avec un prix de gaz naturel 6 fois inférieur à celui utilisé lors de la simulation de la section 5.3.

5.7.1. Présentation des résultats obtenus

Rappelons que le mode « interruption » consiste en une limite de la puissance électrique disponible pour la période $60 \leq t \leq 65$. Durant cet intervalle, les autres consommateurs de gaz CO doivent réduire leur consommation de 100% à 50%.

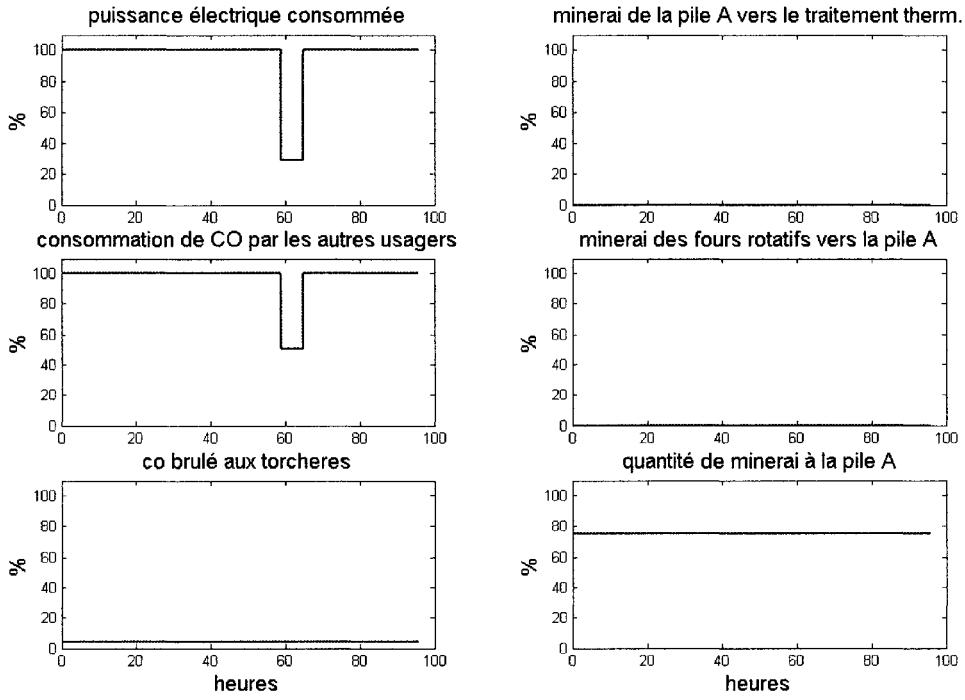

Figure 5.27 : Scénario 2 avec prix du gaz naturel plus bas : puissance disponible, autres usagers de CO, CO aux torchères et pile A

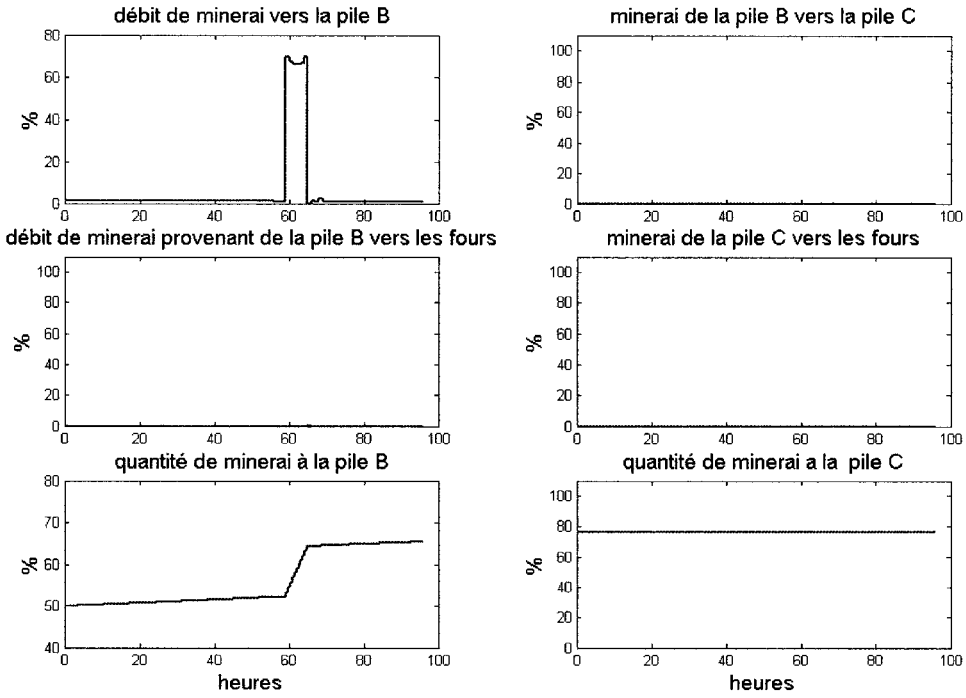

Figure 5.28 : Scénario 2 avec prix du gaz naturel plus bas : piles B et C

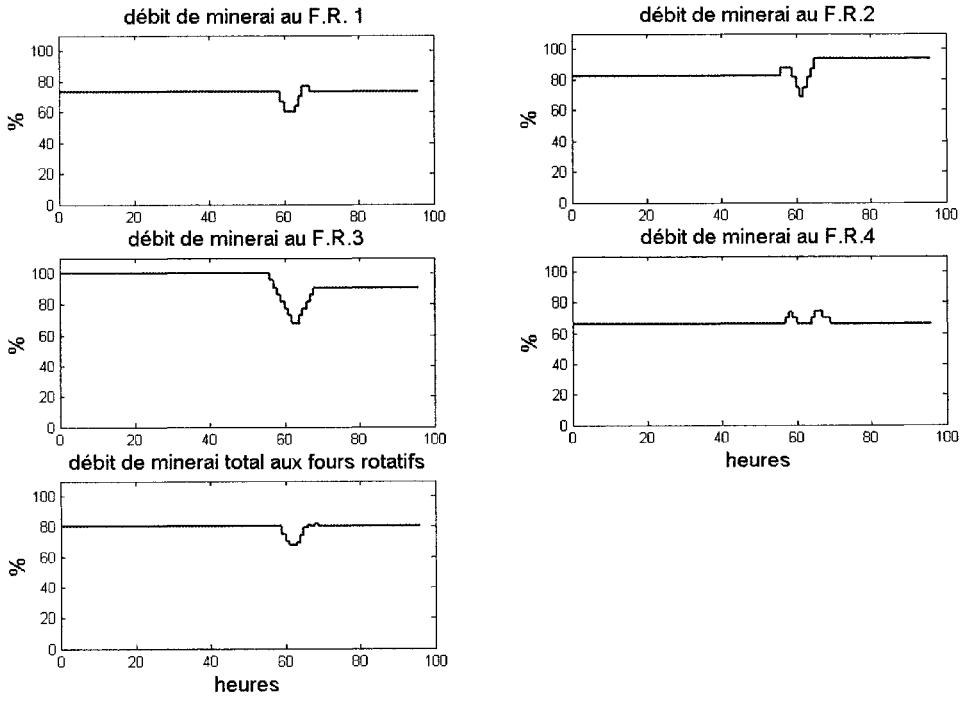

Figure 5.29 : Scénario 2 avec prix du gaz naturel plus bas : débit de minerai aux fours rotatifs

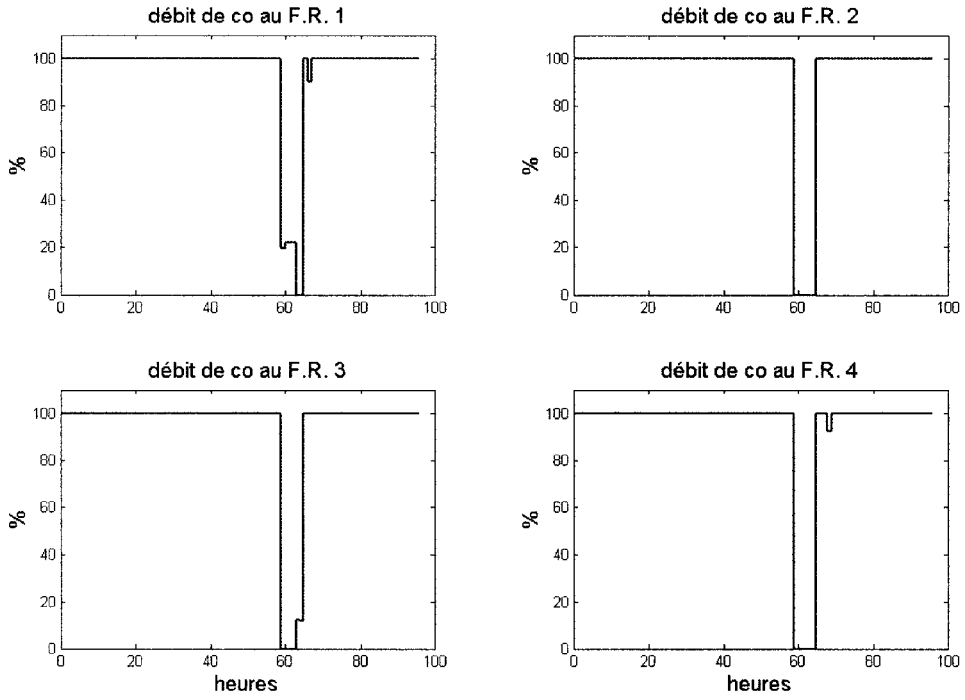

Figure 5.30 : Scénario 2 avec prix du gaz naturel plus bas : débit de CO aux fours rotatifs

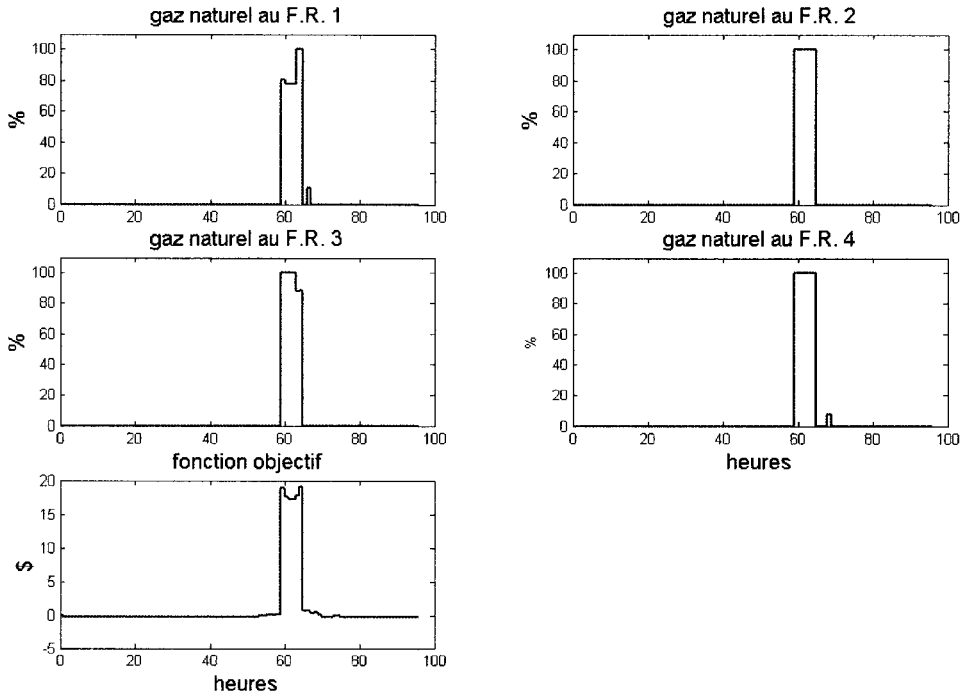

Figure 5.31 : Scénario 2 avec prix du gaz naturel plus bas : gaz naturel aux fours rotatifs et fonction objectif

5.7.2. Analyse des résultats obtenus

Les deux premières figures sont les mêmes que pour le scénario originel présenté à la section 5.2. Le changement majeur se situe au niveau du fonctionnement des fours rotatifs. Avec une baisse importante du coût du gaz naturel, il est maintenant avantageux de continuer à opérer les 4 fours rotatifs en tout temps plutôt que de procéder à l'arrêt de 3 fours rotatifs. Durant la période de limite de puissance électrique, les fours rotatifs 1 et 4 sont à leur débit minimum de 60% et 67% respectivement. Comme le four rotatif 3 est à 100% de débit de minerai avant la perturbation, il doit débuter sa descente vers le minimum dès l'instant t = 57. C'est pourquoi les fours rotatifs 2 et 4 connaissent une légère hausse de débit de minerai au même instant.

Encore une fois on constate ici que les fours rotatifs 2 et 3 ne reviennent pas aux mêmes valeurs de débits après la perturbation ($t > 65$). Toutefois si on compare le débit total de minerai traité par les 4 fours on obtient une baisse de seulement 0.14% entre l'instant $t < 60$ et $t > 65$. Ceci est dû aux pentes très semblables pour les fours rotatifs 2 et 3 tel que le démontre la Figure 5.1. Ainsi, le critère de précision absolue devrait être encore plus faible pour obtenir un retour vers les conditions initiales. Toutefois, de façon plus réaliste cette différence n'est pas très significative pour les gens d'opération.

Les deux dernières figures nous montrent le mode bi-énergie des fours rotatifs lors de la baisse de puissance électrique. On remarque toutefois que le gaz naturel n'est pas également réparti entre les 4 fours rotatifs. Pour l'instant aucune contrainte quant au ratio de gaz naturel/combustible total n'est incluse dans le modèle. L'ajout d'une telle contrainte serait souhaitable pour l'opération mais rendrait le problème non-linéaire. La non-linéarité rend le problème plus fidèle à la réalité mais augmente souvent le temps de résolution et n'assure pas toujours que l'optimum trouvé est un optimum global.

La façon de traiter cette contrainte est décrite en annexe.

5.8. Critère de précision et performances

Pour les résultats présentés dans le présent chapitre, le critère de précision absolue est de 10. Ce critère de précision ne signifie pas que les valeurs de fonction objectif sont toutes à 10$ de la meilleure valeur possible. Il faut se souvenir que l'algorithme utilisé est celui de « branches et limites ». La simulation se termine lorsque l'écart entre les deux dernières solutions satisfaisant les critères des variables discrètes est inférieur à 10. Tous les autres nœuds restants ne sont pas évalués et cette solution est alors retenue.

Le critère de précision en valeur absolue doit être du même ordre de grandeur que le plus faible des coûts et pénalités composant la fonction objectif. Ainsi, tous les coûts et

pénalités auront un impact sur le résultat. Il est important de travailler avec la précision en valeur absolue et non en valeur relative puisque la fonction objectif à minimiser est une somme dans le temps. En travaillant en valeur absolue, on assure une même précision indépendamment de la durée de la perturbation par rapport à la durée totale de simulation.

Le tableau qui suit regroupe les différents critères de performances des simulations présentées dans ce chapitre. On y retrouve la valeur de la fonction objectif total (sommation dans le temps), le nombre d'itérations nécessaires pour la résolution ainsi que la précision obtenue entre les 2 derniers nœuds ayant une solution repectant les contraintes discrètes et continues.

	Fonction objectif globale ($)	Nombre d'itérations	Écart de précision
Cas #1 : Arrêt des fours rotatifs	86048	2900	4 e-06
Cas #2 : mode « interruption »	4509	5921	2.7
Cas #3 : mode « interruption » pendant l'arrêt du four rotatif 1	9226	56896	4.8
Cas #4 : Arrêt de 2 fours de réduction	379	61922	8.0

	Fonction objectif globale ($)	Nombre d'itérations	Écart de précision
Cas #5 : Arrêt des fours rotatifs avec pile B très basse.	86149	3082	8.3 e-06
Cas #6 : mode « interruption » avec coût du gaz naturel très faible	91	22505	6.5

Tableau 5-3 : Performances des cas étudiés

On peut voir que tous les écarts de précision absolue sont inférieurs à 10. Le nombre d'itérations varie beaucoup d'un cas à l'autre. Lorsque les données initiales du problème changent, l'arbre de la technique « branches et limites » est complètement changé et le parcours pour arriver à une solution satisfaisante varie également. Finalement on peut constater que les coûts d'arrêts d'équipement sont relativement élevés et ont beaucoup d'impact sur la valeur de la fonction objectif global (cas #1 et #5). Rappelons que ces coûts ne sont pas des valeurs réelles et ont été fixés à titre indicatif seulement. L'écart réel entre les différentes valeurs de fonction objectif dépendra de l'ajustement de ces coûts lors de l'implantation en usine du système.

5.9. Implantation en usine

Le modèle d'optimisation bâti dans le cadre de ce projet donne des résultats intéressants. L'utilisation de ce modèle en usine doit par contre se faire en boucle ouverte. Les résultats obtenus doivent être évalués par un responsable en usine avant d'être implantés dans les différents secteurs visés. Les données utilisées pour bâtir le modèle ont été définies à partir des données recueillies par différents intervenants de l'usine mais une revue de ces données est nécessaire avant l'utilisation. Notamment, le coût d'arrêt des

fours rotatifs est très difficile à évaluer et devrait être revu plus en détail. De plus, la mise à jour du modèle est nécessaire périodiquement. Les courbes de combustion des fours rotatifs devraient être mises à jours de façon régulière pour avoir des résultats réalistes. La figure de la structure de l'optimisation en temps réel peut être reprise et adaptée de la façon suivante :

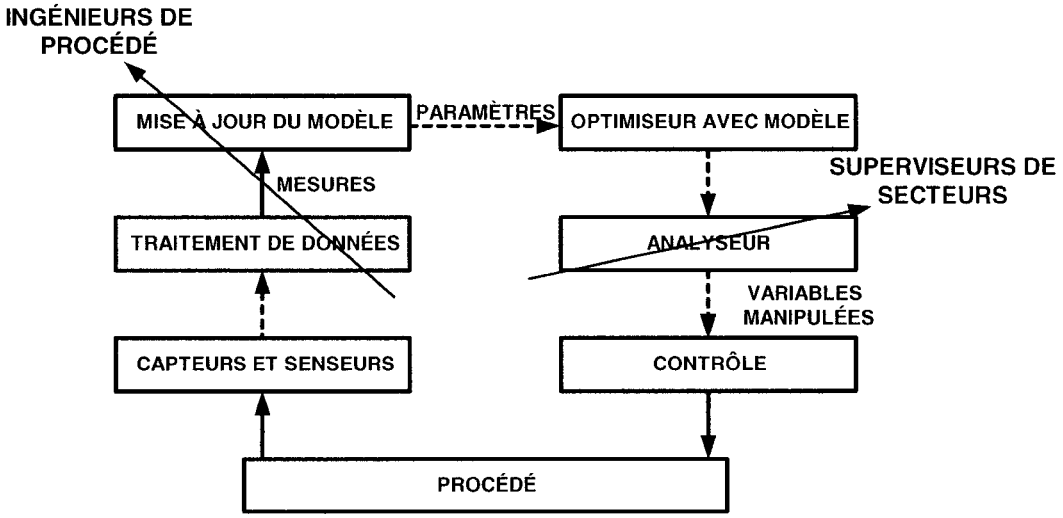

Figure 5.32 : Schéma du RTO en boucle ouverte

Ainsi la boucle est ouverte à deux endroits où l'intervention humaine est nécessaire. La mise à jour du modèle doit être faite par les ingénieurs de procédé tandis que les superviseurs de production ont la responsabilité de revoir les données avant de les transmettre aux opérateurs comme valeurs cibles. Si les valeurs optimales proposées sont acceptées, il faut les implanter pour toutes les variables concernées. Si seulement quelques valeurs de certaines variables manipulées sont implantées, la solution d'opération n'est pas optimale. Il devra également y avoir un bon dialogue avec les membres du groupe de planification afin de connaître les plans de production à respecter en tout temps.

Le choix de l' utilisateur du programme d'optimisation repose sur certains critères. Cette personne (ou équipe) devra avoir une bonne connaissance du procédé, des coûts impliqués dans la fonction objectif, des limites et de la fidélité du modèle. De plus, quelques notions fondamentales d'optimisation et une connaissance du logiciel utilisé sera nécessaire à une bonne interprétation des résultats obtenus.

Le programme d'optimisation peut être ré-exécuter au besoin si des changements surviennent en cours de route. Comme la réponse obtenue est une trajectoire, l'implantation des données obtenues pour les premiers pas de temps est toujours la meilleure jusqu'à ce que de nouvelles informations parviennent aux utilisateurs et que le besoin d'une nouvelle simulation soit créé. Cette façon d'utiliser le système d'optimisation se rapproche de l'utilisation d'un système de contrôle prédictif avec modèle où on prédit plusieurs pas pour la commande mais où on implante seulement le premier pas. Ensuite, une nouvelle trajectoire est recalculée pour le prochain pas de commande.

Finalement, un effort de communication entre les différents secteurs de l'usine sera crucial pour obtenir la meilleure information possible nécessaire à l'obtention des résultats les plus réalistes possibles.

6. Conclusion

L'objectif principal de ce projet était d'appliquer un processus d'optimisation en temps réel au système de distribution de gaz CO de l'usine de QIT Fer et Titane Inc. L'optimisation devait tenir compte de certaines perturbations futures connues par l'utilisateur. L'horizon de temps à couvrir s'étendait de quelques jours à une semaine. Les résultats de l'optimisation devaient être des trajectoires optimales à suivre durant cet horizon de temps.

La plupart du temps, l'optimisation en temps réel ne se fait pas sur un horizon de temps mais trouve plutôt une série de points d'opérations optimaux pour un temps précis. Le besoin de considérer des perturbations futures connues a mené à la définition d'un problème d'optimisation basé sur les modèles utilisés dans la planification de procédés.

Afin de rencontrer ces objectifs il a fallu dans un premier temps bâtir un modèle statique et formuler le problème d'optimisation. Le modèle simplifié de l'usine est un modèle linéaire mixte puisque l'utilisation de variables discrètes pour représenter la décision ou non d'opérer chacun des fours rotatifs est nécessaire. De plus, la fonction objectif à minimiser est la somme sur tout l'horizon choisi des fonctions objectifs pour chaque pas de temps. Le problème d'optimisation se classifiait comme un problème de programmation linéaire mixte. Par la suite un programme d'optimisation a été écrit à l'aide du logiciel d'optimisation GAMS dans le but de simuler des cas les plus réalistes possibles.

Quatre cas principaux ont été identifiés et retenus pour les simulations. Ces quatre cas représentent des situations pouvant survenir à l'usine et où l'utilisation d'un outil d'optimisation en temps réel serait utile. Ces cas comportent différentes perturbations

connues et survenant dans le futur. Deux autres cas ont été présentés afin de bien saisir l'impact du changement de certains paramètres dans le problème d'optimisation.

Dans l'ensemble les résultats obtenus sont logiques. Avec les paramètres utilisés pour les quatre cas de base, on préfère arrêter des fours rotatifs plutôt que d'utiliser trop de gaz naturel car le coût d'arrêt de ces fours est moins grand que la consommation de gaz naturel. De plus la pile B est la pile la plus utilisée comme tampon dans la gestion énergétique. Ceci est dû à plusieurs facteurs. Tout d'abord, il n'y a pas de coût associé au transport de minerai vers cette pile puisque ce transport se fait par le biais d'une trappe automatique. La pile B est préférée à la pile C pour alimenter les fours de réduction car elle est plus près physiquement ce qui diminue le coût de transport du minerai. De plus comme la pile B est située dans un hangar contrairement à la pile C, le minerai qu'elle contient est plus sec et peut être acheminé vers les fours en assez grande quantité. La pile A est moins avantageuse économiquement puisqu'elle contient du minerai dont une certaine partie sera rejetée par le secteur de traitement thermique. En cas de manque de minerai à la pile B, il a été démontré que les piles A et C étaient sollicitées pour alimenter les fours de réduction.

Les résultats d'une simulation avec un coût de gaz naturel beaucoup plus faible ont démontré qu'il serait alors plus avantageux de continuer à opérer les fours rotatifs et de consommer du gaz naturel pendant les périodes de manque de CO.

Bien que les résultats soient logiques, l'utilisation d'un tel outil en usine doit se faire avec quelques précautions. Tout d'abord, l'application de l'optimisation en temps réel devrait se faire en boucle ouverte. Ensuite, le modèle devrait être constamment maintenu à jour pour assurer la fiabilité des résultats. De plus une analyse des résultats sera nécessaire par les superviseurs de production afin de les valider avant l'implantation.

Le modèle utilisé pourrait être amélioré notamment par l'ajout de l'usine UGS qui est un consommateur important de gaz CO. De plus, l'ajout d'une contrainte sur le ratio du gaz naturel consommé par rapport au combustible total consommé par chaque four rotatif serait intéressant. Cette contrainte forcerait les fours rotatifs a avoir tous le même ratio lors des périodes de consommation de gaz naturel. Cette contrainte rendrait le problème non-linéaire et le choix d'algorithme de résolution devrait être revu en conséquence. Enfin, une modélisation plus réaliste des coûts d'arrêts des fours rotatifs selon le type d'arrêt pourrait également être considérée. Il faudrait toutefois s'assurer de conserver une certaine simplicité du modèle afin de ne pas alourdir le programme d'optimisation.

Références

AMAN, R., GROSSMAN, I. E. 1991. "Relation between MILP modelling and logical inference for chemical process synthesis".*Computers and chemical engineering.*15: 2. 73-84

BROOKE, A., KENDRICK, D., MEERAUS, A. 1998. *GAMS : A User's Guide.* RedWood City, CA : The Scientific Press. 289 p.

DARBY, M. L., WHITE, D. C. 1988. "On-line optimization of complex process units". C*hemical engineering progress.* 84:10. 51-59.

DORMER, A., RAYNOR, S. 1998. "Real-time optimization : an alternative approach". *Hydrocarbon processing.* 77:9. 81-89.

EDGAR, Thomas F., HIMMELBLAU, David M. 1988. McGraw-Hill Inc. 652 p.

GÖTHE-LUNDGREN, M., LUNDGREN, J. T., PERSSON, J. A. 2002. "An optimization model for refinery production scheduling". *International Journal of Production Economics.* 78:3. 255-270.

HILLIER. Federick. S., LIEBERMAN, Gerald J.1990. *Introduction to mathematical programming.* 2ième edition. McGraw Hill Inc. 716p.

LEE, H., PINTO, J. M., GROSSMANN, I. E., PARK, S. 1996. "Mixed-Integer linear Programming Model for Refinery Short-Term Scheduling of Crude Oil Unloading with Inventory Management". *Industrial & Engineering Chemistry Research.* 35:5. 1630-1641.

MARLIN, Thomas.E., HRYMAK, Andrew.N. 1997. « Real-time Operations Optimization of Continuous Processes ». n 316 p.156

RAMAN, R. ,GROSSMAN, I. E. 1994. "Modelling and computational techniques for logic based integer programming", n 7 1994 p.563-578

REKLAITIS, G. V., RAVINDRAN, A.,RAGSDELL, K. M. 1983. *Engineering optimization : methods and applications.* Jonh Wiley & Sons, Inc. 684p.

SHAH, N. 1996. "Mathematical Programming Techniques for Crude Oil Scheduling". *Computers & Chemical Engineering.* 20:Suppl pt B. S1227-S1232.

VAN WIJK, IR. R.A, POPE, M.R. 1992. Advanced process control and on-line optimization in shell refineries. *European Symposium on Computer Aided Process Engineering.* 16:suppl. S69-S80.

WHITE, D.C. 1998. "Online optimization : What have we learned?"*Hydrocarbon processing.*77:6. 55-59.

Annexe 1 : Contrainte sur le ratio de gaz naturel aux fours rotatifs

L'ajout des équations résultant du développement suivant permettrait d'avoir un ratio de consommation gaz naturel égal pour tous les fours rotatifs en tout temps. Par contre, ces équations rendraient le problème d'optimisation non-linéaire.

On désire que le ratio de consommation de gaz naturel sur la consommation total de combustible (gaz naturel et gaz CO) soit le même pour tous les fours rotatifs en marche en tout temps. Pour ce faire on détermine un ratio cible qui est défini comme suit :

$$ratiocible_t = \frac{\sum_{k=k1}^{k4} FGN_{k,t}}{\sum_{k=k1}^{k4} \left(FGN_{k,t} + XCO_{k,t} \right) + 1 - z_t} \tag{A1.1}$$

La variable binaire z est utilisée pour éviter une division par zéro. Cette variable a les propriétés suivantes :

$$\begin{aligned} & NBKFCT_t > 0 \Rightarrow z_t = 1 \\ & et \\ & NBKFCT_t = 0 \Rightarrow z_t = 0 \end{aligned} \tag{A1.2}$$

En appliquant la procédure de Clocksin et Mellish (1981) décrite au chapitre 3, on obtient l'équation suivante :

$$(-0.5)(1 - z_t) < NBKFCT_t \leq 4z_t + \varepsilon \tag{A1.3}$$

Par la suite, pour chaque four rotatif k il faudrait ajouter la contrainte suivante :

$$FGN_{k,t} = \left(FGN_{k,t} + X_{COk,t}\right)\left(ratiocible_t\right)\left(Y_{k,t}\right) \qquad \text{(A1.4)}$$

Ainsi, lorsque le four rotatif est en fonction, la variable binaire Y est à 1 et le ratio de gaz naturel/combustible total du four en question devra égaler le ratio cible défini par l'équation (A1.1).

Les équations (A1.1) et (A1.4) rendent le problème non-linéaire et l'algorithme choisi devrait être apte à résoudre des problèmes de type MINLP. Quelques essais ont été fait en ce sens mais la principale difficulté rencontrée était la présence de la non-linéarité lors du fonctionnement d'un des 4 fours rotatifs. Dans le cas où les 4 fours rotatifs sont à l'arrêt, les équations non-linéaires sont nulles et le problème redevient alors linéaire. Ce problème nécessite plus de temps pour trouver une façon adéquate de traiter ce cas particulier.