

Titre: Modélisation de la durée de vie des poches de coulée dans une aciérie
Title: Modélisation de la durée de vie des poches de coulée dans une aciérie

Auteur: Michel Brissette
Author: Michel Brissette

Date: 1996

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Brissette, M. (1996). Modélisation de la durée de vie des poches de coulée dans une aciérie [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/8978/>

Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/8978/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Michel Rigaud
Advisors:

Programme: Non spécifié
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

MODÉLISATION DE LA DURÉE DE VIE
DES POCHES DE COULÉE DANS UNE ACIÉRIE

MICHEL BRISSETTE

DÉPARTEMENT DE MÉTALLURGIE ET DE GÉNIE DES MATÉRIAUX
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

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

AOÛT 1996



National Library
of Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions et
services bibliographiques

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

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 autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-26460-2

Canad*a*

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

MODÉLISATION DE LA DURÉE DE VIE
DES POCHE DE COULÉE DANS UNE ACIÉRIE

présenté par : BRISSETTE Michel

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

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

M. ALLAIRE Claude, Ph.D., président

M. RIGAUD Michel, D.Sc.A., membre et directeur de recherche

M. LALANCETTE Gilles, M.Sc.A., membre

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, j'aimerais remercier tous les participants qui ont répondu aux questionnaires envoyés en avril 1994. Ensuite, je remercie *Stelco McMaster Ltée* qui a fourni les données nécessaires à la construction du modèle proposé. Je remercie les personnes concernées, qui sont M. Jim Malone, M. Angello Grandillo, M. Louis Plante, M. Marcel Lepage et M. Luc de Courval, pour leur patience, leur aide et leurs conseils. Et, plus particulièrement, je tiens à remercier M. Michel Rigaud, mon directeur, pour ses conseils et son support.

Dans le cadre d'un stage effectué au CRDM de *Sollac* (Dunkerque), je remercie M. Gilbert Provost et M. Jacques Poirier d'avoir accepté de me recevoir. Je remercie aussi les ingénieurs, M. Christophe Salanbier et M. Dominique Thémines, et les techniciens, M. Jacky De Baecker et M. Jean Van Houte, pour leur aide et leur collaboration. Ce stage a aussi été possible grâce à l'O.F.Q.J., que je remercie énormément de s'être occupé des documents nécessaires pour ce stage.

Finalement, je remercie ma famille et tous mes amis pour leur support financier et moral.

RÉSUMÉ

Le but de ce mémoire est de construire un modèle de régression linéaire afin de prédire la durée de vie des poches de coulée utilisées dans les aciéries en fonction des différentes variables opératoires de la métallurgie secondaire.

Pour atteindre ce but, les objectifs visés sont : 1) envoyer un questionnaire sur la métallurgie en poche aux aciéries canadiennes ; 2) comparer, expliquer ou construire un modèle sur les performances réfractaires entre plusieurs aciéries ; 3) obtenir ou récupérer l'historique des opérations effectuées ou les données de différentes variables opératoires pour plusieurs poches dans une aciérie témoin ; 4) construire un modèle de régression exprimant la durée de vie des poches de coulée en fonction des variables opératoires.

Au total, 17 aciéries ont répondu au questionnaire envoyé, mais 14 ont été retenues car deux d'entre elles produisent des aciers inoxydables et l'autre possède une poche de trop faible capacité (5 t). L'enquête couvre 12,5 des 14,6 millions de tonnes, soit plus de 85 % des aciers produits au Canada. Il n'a pas été possible de construire un modèle car le nombre d'aciéries est trop faible par rapport aux nombres de variables considérées (plus de 40). En plus, les valeurs collectées représentent plutôt des conditions opératoires typiques alors qu'en réalité, elles fluctuent d'une coulée à l'autre. Le questionnaire était aussi incomplet à plusieurs niveaux : 1) la basicité ou la composition

du laitier pour les différentes nuances élaborées ; 2) la température de l'acier ou du garnissage ; 3) la consommation des réfractaires. Tout de même, il est possible de diviser la performance des poches en trois catégories : 1) les poches d'une capacité entre 50 t et 140 t qui ont une vie moyenne de 65 coulées ; 2) les poches d'une capacité entre 230 t et 300 t qui ont une vie moyenne de 100 coulées ; 3) les poches utilisées pour les aciers inoxydables qui ont une vie moyenne de 17 coulées. La vie de la poche est limitée par le réfractaire du plancher, des blocs de coulée et par une usure prématuée de la ligne de laitier. Les aciéries électriques utilisent des briques en dolomie pour la paroi d'usure. Quelques aciéries de conversion installent encore des briques à haute teneur en alumine alors que les autres utilisent des briques en alumine-carbone. Pour la ligne de laitier, le choix réfractaire n'est pas encore établi car plusieurs qualités sont installées : dolomie enrichie de magnésie, magnésie-carbone, dolomie-carbone ou magnésie-chrome.

Dans l'aciérie témoin, la compilation des données retrace l'historique de 45 poches, totalisant plus de 1 970 coulées. Seulement 27 d'entre elles servent à construire le modèle. Une interruption est nécessaire pour remplacer les blocs de coulée et du bouchon poreux. La variation observée sur la vie totale de la poche se reflète dans la deuxième partie de la campagne. En fixant une valeur seuil, établie à partir du coefficient de corrélation entre la demi-vie et la variable, il est possible de comptabiliser le nombre de coulées qui sont inférieures ou supérieures à cette limite pour chaque variable opératoire. Cette dernière conserve la même unité de mesure que la variable à prédire, exprimée en nombre de coulées. La variable devient ainsi une mesure précise et sans biais, hypothèse

nécessaire pour la construction d'un modèle de régression linéaire simple ou multiple par la méthode des moindres carrés. Le modèle proposé est le suivant :

$$y_2 = 0,372 \cdot N_{\text{Attente} < 45 \text{ min}} + 0,267 \cdot N_{\%S(i) - \%S(f) < 0,055 \%} + 0,187 \cdot N_{\text{Basicité} > 1,2} \\ + 0,149 \cdot N_{\text{CaSi} < 60 \text{ kg}} + 0,177 \cdot N_{\text{Barbotage} < 90 \text{ min}} + 0,122 \cdot N_{\text{Puissance} < 10 \text{ MW}}$$

La précision du modèle est de 1½ coulée. Le modèle est validé par une moyenne presque nulle des résidus et par une bonne répartition des points dans le graphique des résidus.

Selon ce modèle, il est néfaste de laisser une poche au repos. Cette attente de la poche se produit surtout après son remplissage au four primaire. Le laitier primaire ne serait pas toujours neutralisé par le laitier synthétique. Le temps de contact total du laitier primaire est plus important que la quantité transportée, variable qui a été rejetée. Le deuxième paramètre est la basicité, qui varie d'une coulée à l'autre. Le laitier est soit acide, soit basique. Il arrive souvent que la basicité soit inférieure à 2. Ces variations affectent la performance générale de la poche. La quantité injectée de silico-calcium influence aussi la durée de vie. Cet additif joue un rôle important pour la désoxydation et la désulfuration du bain. D'ailleurs, un degré de désulfuration trop élevé diminue la performance de la poche. Une puissance trop élevée et un temps de barbotage prolongé au four-poche sont aussi des facteurs qui diminuent la durée de vie de la poche.

Avec la méthode proposée, l'optimisation de la variable opératoire consiste à diminuer ou à augmenter la valeur seuil pour augmenter la durée de vie de la poche. Les variables à optimiser seront celles retrouvées dans le modèle de prédiction. Ce dernier est donc sujet à changement car il est fonction de valeurs seuils ou des changements des pratiques métallurgiques. Il est important de noter que la vie de la poche peut être prédite indépendamment de la raison invoquée pour interrompre la campagne de cette poche. Le principal défaut de ce modèle est qu'il ne prédit que la vie de la deuxième partie de la campagne de la poche, causée par un arrêt systématique à 30 coulées pour changer les blocs de coulée et du bouchon poreux. Le modèle peut être utilisé en continu dans l'aciérie témoin en imposant une valeur de 30 coulées à toutes les variables et en diminuant d'une coulée chaque fois que la variable concernée dépasse la valeur seuil. À ce moment, le modèle devient un outil indispensable pour une meilleure gestion opérationnelle des poches de coulée.

ABSTRACT

The main goal of this memoir is to build a linear regression model to predict the ladle's life used in steelmaking plant in respect to ladle furnace operating variables. To reach this goal, objectives are : 1) to conduct a ladle performance survey to Canadian steelmaking plants ; 2) to compare, explain or construct a mathematical model on refractories' performance from different plants ; 3) to retrieve a historical data for all or most of operating variables for many ladles in a pilot steelmaking plant ; 4) to build a regression model for predicting the ladles' life as a function of the operating variables.

From all surveys sent, 17 steelplants responded but 14 are considered because two of them produce stainless steels and the other one has a very low capacity ladle (5 t). This survey covers 12,5 of 14,6 millions tons, which represent 85 % of all steel production in Canada. However, it was not possible to build a regression model because the number of respondent was too low for the number of operating variables covered (more than 40). Collected values represent typical operating conditions rather than real values, which vary from heat to heat. The survey was also incomplete since : 1) slag's basicity or composition for many steel grades were ill-defined ; 2) steels and refractory temperatures not comparable ; 3) refractory specific consumption not calculated on the same basis. However, ladle's performance have been divided in three categories : 1) 50-140 t capacity ladles with an average life of 65 heats ; 2) 230-300 t capacity ladles with an average life

of 100 heats ; 3) stainless steel ladles with an average life of 17 heats. The ladle's life is limited by two refractory zones : 1) the bottom and the well or porous plug blocks ; 2) excessive wear of the slag line. Electric arc furnace plants use dolomite bricks in the sidewall. Some converter plants continue to use high alumina bricks while the others install alumina-carbon bricks. Refractory choice for the slag line has not been established yet and many qualities are installed : magnesia enriched doloma, magnesia-carbon, doloma-carbon or magnesia-chrome.

For the reference plant, data accumulated represents historical operations for 45 ladles, covering more than 1 970 heats. Only 27 of them were used to build the model. The ladle's campaign must be interrupted to replace the well and the porous plug blocks. Total life's variations are observed in the second part of the campaign. With a fixed limit value, established by a correlation coefficient between the mid-life and the variable, it is possible to express each operating variable as a number of heats lower or higher than this limit value. All predictor variables possess the same unit as the ladle's life, which can be accurately measured and unbiased. Those hypothesis are necessary to construct a simple or multiple linear regression by using least squares method. The proposed model is :

$$y_2 = 0,372 \cdot N_{\text{Waiting Time} < 45 \text{ min}} + 0,267 \cdot N_{\%S(i) - \%S(f) < 0,055 \%} + 0,187 \cdot N_{\text{Slag Basicity} > 1,2} \\ + 0,149 \cdot N_{\text{CaSi} < 60 \text{ kg}} + 0,177 \cdot N_{\text{Stir Time} < 90 \text{ min}} + 0,122 \cdot N_{\text{Input Power} < 10 \text{ MW}}$$

The model has a precision of 1½ heat. It is also validated by an almost zero mean of residuals and a good distribution of points in the residual graph.

With this model, it is harmful for the refractory to leave the ladle at rest when filled. The delay between its tapping and transfer to the ladle furnace is detrimental. Carryover slag is not always neutralized by the synthetic slag. The slag's total contact time is more important than the amount carryover, which has been rejected as a meaningful variable. Another parameter is the slag's basicity, which vary from heat to heat. It can be either acid or basic, whether the basicity is lower or higher than 2. Those variations affect the ladle's performance. Amount of CaSi injected is also important. It plays an important role in the deoxidization and desulfuration process. A high desulfuration rate contributes to reduce ladle's life. An high input power and a longer stirring time in the ladle furnace are also factors which decrease the ladle's performance.

With the proposed method, operating variable optimization consists to increase or to decrease the limit value to increase the ladle's life. Optimized variables are the ones found in the prediction model. It can be changed upon limit value or metallurgical operation changes. The life of a ladle can be predicted, whatever reason invoked to interrupt the campaign. The main inconvenience of the model is that only second part of the campaign can be predicted. This fact is caused by a systematic interruption at 30 heats to replace well and porous plug blocks. However, the model can be put on a real time basis by giving a 30 heats value for each operating variables and by decreasing one heat each time when the variable exceeds the limit value. In this manner, the model becomes an useful tool to manage ladle operations in the plant.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	iv
RÉSUMÉ.....	v
ABSTRACT	ix
TABLE DES MATIÈRES	xii
LISTE DES TABLEAUX.....	xvi
LISTE DES FIGURES	xxiii
LISTE DES SIGLES ET DES ABRÉVIATIONS.....	xxvii
LISTE DES ANNEXES	xxxiv
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I MISE EN SITUATION	5
1.1 Les filières technologiques	5
1.2 Les traitements en poche	6
1.3 Le four-poche	7
1.3.1 Laitier primaire résiduel	8
1.3.2 Brassage du bain.....	9
1.3.3 Chauffe par arc électrique	10
1.3.4 Système d'injection	12
1.4 Les poches de coulée	14
1.4.1 Forme et dimension.....	14

1.4.2	Zonage réfractaire.....	16
1.5	Matériaux réfractaires.....	21
1.5.1	Silice-alumine.....	22
1.5.2	Basique	24
1.5.3	Spéciaux	30
1.6	Construction réfractaire	31
1.6.1	Avec des façonnés	31
1.6.2	Avec des non façonnés	33
1.7	Facteurs influençant la durée de vie	35
1.8	Revue bibliographique	39
1.8.1	Facteurs extrinsèques	39
1.8.2	Facteurs intrinsèques	42

CHAPITRE II RELEVÉ D'UNE ENQUÊTE SUR LES ACIÉRIES

2.1	Première classification	57
2.2	Caractéristiques des poches de coulée.....	61
2.2.1	Vie moyenne.....	61
2.2.2	Formes, dimensions et poids réfractaires	62
2.2.3	Temps de contact.....	64
2.2.4	Variation des vies	66
2.3	Analyse de la cause d'arrêt d'une campagne.....	66

2.4	Analyse du cycle de la poche	68
2.5	Pratique du laitier pour un acier bas carbone	72
2.5.1	Techniques de séparation du laitier transporté	72
2.5.2	Composition du laitier après traitement	73
2.5.3	Fondants	74
2.5.4	Désoxydants	75
2.6	Construction et entretien réfractaire	76
2.6.1	Formats des briques	76
2.6.2	Designs réfractaires	77
2.6.3	Comportements thermiques	80
2.6.4	Taux d'usure moyen	82
2.6.5	Méthodes et planifications de la construction	82
2.6.6	Réparations des zones réfractaires	83
2.7	Satisfaction et nouvelles tendances	84
2.8	Interprétation du questionnaire	85
2.9	Conclusion	89

CHAPITRE III INFLUENCE DES VARIABLES OPÉRATOIRES SUR LA VIE

DES POCHE.....	90	
3.1	Cycle opératoire d'une poche de coulée	90
3.2	Raisons invoquées pour l'arrêt d'une campagne	92
3.3	Variables opératoires	94

3.3.1	Nuance d'acier.....	98
3.3.2	Température de l'acier au remplissage de la poche.....	100
3.3.3	Laitier primaire transporté.....	101
3.3.4	Basicité du laitier.....	103
3.3.5	Temps de barbotage.....	105
3.3.6	Injection de CaSi	106
3.3.7	Puissance moyenne.....	108
3.3.8	Temps d'attente total	109
3.3.9	Degré de désulfuration	111
3.3.10	Corrélations entre les variables opératoires.....	112
3.4	Analyse du cycle de la poche	114
3.5	Construction du modèle	116
3.5.1	Variables exprimant le nombre de coulées néfastes.....	116
3.5.2	Variables exprimant le nombre de coulées inoffensives	119
3.5.3	Optimisation du modèle	123
3.5.4	Choix du modèle	128
3.6	Interprétation du modèle	132
3.7	Conclusion.....	135
	CHAPITRE IV SYNTHÈSE.....	136
	CONCLUSION.....	144
	RÉFÉRENCE	148
	ANNEXES.....	156

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Exemple des poudres utilisées pour l'injection	13
Tableau 1.2 : Sévérité relative de l'usure réfractaire pour différentes routes métallurgiques.....	45
Tableau 1.3 : Effet du temps de résidence et du nombre d'impulsions des arcs électriques sur la vie de la poche	45
Tableau 1.4 : Influence d'une variation des valeurs opérationnelles sur celle de la vie de la ligne de laitier.....	53
Tableau 2.1 : Estimation de la capacité de production canadienne d'acier en milliers de tonnes	58
Tableau 2.2 : Capacité des poches selon le mode d'élaboration.....	58
Tableau 2.3 : Caractéristiques des mini-aciéries électriques	60
Tableau 2.4 : Caractéristiques des aciéries de conversion	60
Tableau 2.5 : Forme des poches de coulée	62
Tableau 2.6 : Temps de contact de l'acier et vie moyenne des poches.....	65
Tableau 2.7 : Principales raisons pour interrompre une campagne	67
Tableau 2.8 : Zones faibles dans les poches par ordre d'importance	67
Tableau 2.9 : Critères décisionnels pour interrompre une campagne	68
Tableau 2.10 : Conditions opératoires des poches durant le cycle opérationnel en minute	70

Tableau 2.11 : Nombre d'usines utilisant un couvercle.....	72
Tableau 2.12 : Techniques utilisées pour séparer le laitier primaire transporté	72
Tableau 2.13 : Quantité du laitier primaire et totale dans la poche en kg.....	73
Tableau 2.14 : Composition type du laitier après traitement secondaire pour un acier bas carbone.....	74
Tableau 2.15 : Fondants ajoutés au laitier synthétique en kg	75
Tableau 2.16 : Désoxydants ajoutés pour le laitier synthétique en kg	76
Tableau 2.17 : Formats des produits réfractaires installés dans les poches de coulée	77
Tableau 2.18 : Designs réfractaires des poches de coulée pour les aciéries électriques .	78
Tableau 2.19 : Designs réfractaires des poches de coulée pour les aciéries de conversion	79
Tableau 2.20 : Caractéristiques thermiques pour les poches de coulée des aciéries électriques	81
Tableau 2.21 : Caractéristiques thermiques pour les poches de coulée des aciéries de conversion	81
Tableau 2.22 : Taux d'usure moyen des poches de coulée en mm/coulée	82
Tableau 2.23 : Méthodes de planification et d'évaluation de l'usure des poches de coulée	83
Tableau 2.24 : Méthodes de réparation pour les revêtements des poches de coulée	83
Tableau 2.25 : Nombre d'usines procédant à des réparations dans les poches de coulée selon les différentes zones	84

Tableau 2.26 : Degré de satisfaction et méthodes de compilation pour les performances réfractaires des poches de coulée	85
Tableau 2.27 : Zones réfractaires en essai	85
Tableau 3.1 : Durée de vie et raison invoquée du retrait en service des poches qui ont eu une campagne complète	92
Tableau 3.2 : Durée de vie et raison invoquée du retrait en service des poches qui ont eu une demi-campagne	93
Tableau 3.3 : Statistiques sur la durée de vie des poches de coulée	94
Tableau 3.4 : Statistiques descriptives des variables opératoires pour la deuxième mi-campagne des poches	95
Tableau 3.5 : Nombre de très bas, bas, moyen et haut carbone par campagne pour les poches ayant eu une campagne complète	98
Tableau 3.6 : Nombre de très bas, bas, moyen et haut carbone par campagne pour les poches qui ont eu une demi-campagne	99
Tableau 3.7 : Matrice de corrélation entre le nombre reçu pour chaque grade et la vie des deux campagnes de la poche	99
Tableau 3.8 : Coefficient de corrélation et de détermination pour différents seuils de la température d'acier au four à arc électrique	100
Tableau 3.9 : Résumé de la régression linéaire de $N_{T < 1710^{\circ}\text{C}}$ sur y_2 et sur y_{total}	100
Tableau 3.10 : Coefficient de corrélation et de détermination pour différents seuils de la masse de laitier primaire transporté	102

Tableau 3.11 : Résumé de la régression linéaire de $N_{m < 1500 \text{ kg}}$ sur y_2 et sur y_{total}	102
Tableau 3.12 : Coefficient de corrélation et de détermination pour différents seuils de la basicité.....	103
Tableau 3.13 : Résumé de la régression linéaire de $N_{B > 1.2}$ sur y_2 et sur y_{total}	104
Tableau 3.14 : Coefficient de corrélation et de détermination pour différents seuils du temps de barbotage	105
Tableau 3.15 : Résumé de la régression linéaire de $N_{\text{barb} < 90 \text{ min}}$ sur y_2 et sur y_{total}	105
Tableau 3.16 : Coefficient de corrélation et de détermination pour différents seuils de la quantité de CaSi	106
Tableau 3.17 : Résumé de la régression linéaire de $N_{\text{CaSi} < 60 \text{ kg}}$ sur y_2 et sur y_{total}	107
Tableau 3.18 : Coefficient de corrélation et de détermination pour différents seuils de la puissance moyenne au four-poche.....	108
Tableau 3.19 : Résumé de la régression linéaire de $N_{P < 10 \text{ MW}}$ sur y_2 et sur y_{total}	108
Tableau 3.20 : Coefficient de corrélation et de détermination pour différents seuils du temps d'attente total.....	109
Tableau 3.21 : Résumé de la régression linéaire de $N_{\text{att} < 45 \text{ min}}$ sur y_2 et sur y_{total}	109
Tableau 3.22 : Coefficient de corrélation et de détermination pour différents seuils du degré de la désulfuration.....	111
Tableau 3.23 : Résumé de la régression linéaire de $N_{\text{Si-Sr} < 0,055\%}$ sur y_2 et sur y_{total}	111
Tableau 3.24 : Matrice des corrélations entre les variables opératoires	112
Tableau 3.25 : Nombre de coulées pour un cycle opérationnel type et anomalies survenues lors de la deuxième mi-campagne.....	115

Tableau 3.26 : Résumé de la régression multiple des variables opératoires néfastes sur y_2	116
Tableau 3.27 : Résumé de la régression multiple des variables opératoires néfastes sur y_{total}	117
Tableau 3.28 : Résumé de la régression multiple des variables $N_{att} > 45 \text{ min}$ et $N_{sf-si} > 0,055\%$ sur y_2	117
Tableau 3.29 : Résumé de la régression simple de la variable $N_{att} > 45 \text{ min}$ sur y_{total}	117
Tableau 3.30 : Résumé de la régression multiple des variables opératoires inoffensives sur y_2	119
Tableau 3.31 : Résumé de la régression multiple des variables opératoires inoffensives sur y_{total}	120
Tableau 3.32 : Résumé de la régression multiple des variables $N_{B>1,2}$, $N_{att<45 \text{ min}}$ et $N_{si-sf < 0,055\%}$ sur y_2	120
Tableau 3.33 : Résumé de la régression simple de la variable $N_{CaSi} < 60 \text{ kg}$ sur y_{total}	121
Tableau 3.34 : Résumé de la régression multiple des variables $N_{B>1,2}$, $N_{att<45 \text{ min}}$ et $N_{si-sf < 0,055\%}$ sur y_{total}	121
Tableau 3.35 : Analyse des cas aberrants et influents	123
Tableau 3.36 : Résumé de la régression multiple du modèle complet sans le cas 20... ..	124
Tableau 3.37 : Colinéarité entre les variables opératoires	125
Tableau 3.38 : Résultats de la méthode ascendante	126
Tableau 3.39 : Résultats de la méthode descendante	127

Tableau 3.40 : Résultats de la méthode du coefficient de détermination maximal	127
Tableau 3.41 : Critères de sélection pour déterminer le nombre de paramètres dans le modèle optimal.....	128
Tableau 3.42 : Résultats de la régression multiple du modèle optimal	129
Tableau 3.43 : Analyse des cas aberrants et influents pour le modèle optimal	129
Tableau 4.1 : Designs et performances réfractaires entre plusieurs aciéries.....	138
Tableau 4.2 : Liste des variables opératoires considérées pour la détermination de la durée de vie des poches de coulée.....	140
Tableau A.1 : Caractéristiques et dimensions des poches de coulée	157
Tableau A.2 : Poids des réfractaires et préchauffe initiale	158
Tableau A.3 : Caractéristiques des aciéries et des traitements en poche	159
Tableau A.4 : Cycle opérationnel des poches de coulée.....	160
Tableau A.5 : Pratique des couvercles sur les poches de coulée	161
Tableau A.6 : Grade d'acières et techniques de contrôle du laitier primaire	162
Tableau A.7 : Fondants ajoutés pour un acier bas carbone.....	163
Tableau A.8 : Désoxydants ajoutés et composition du laitier pour un acier bas carbone	164
Tableau A.9 : Méthodes utilisées pour la construction des poches de coulée	165
Tableau A.10 : Performance réfractaire des poches de coulée	166
Tableau A.11 : Principales raisons invoquées pour interrompre une campagne	167
Tableau A.12 : Critères d'arrêts de campagne et réparations du garnissage	168

Tableau A.13 : Type d'essais effectués	169
Tableau B.1 : Propriétés des produits argileux et haute teneur en alumine.....	171
Tableau B.2 : Propriétés des produits basiques	172
Tableau B.3 : Propriétés des produits carbonés.....	173
Tableau C.1 : Historique de la nuance d'acier (très bas, bas, moyen et haut carbone) 175	175
Tableau C.2 : Historique de la température de l'acier en °C	176
Tableau C.3 : Historique de la masse de laitier transporté en kg	177
Tableau C.4 : Historique de la basicité du laitier	179
Tableau C.5 : Historique du temps de barbotage en min.....	180
Tableau C.6 : Historique de la quantité de CaSi injectée en kg	181
Tableau C.7 : Historique de la puissance moyenne en MW	182
Tableau C.8 : Historique du temps d'attente total en min.....	183
Tableau C.9 : Historique du temps de résidence en min	184
Tableau C.10 : Historique du temps de coulée en min.....	185
Tableau C.11 : Historique du temps de rotation en min.....	186
Tableau C.12 : Historique du temps du cycle en min.....	187
Tableau C.13 : Historique de la désulfuration (%Si-%Sf) en % poids.....	188
Tableau D.1 : Analyse des résidus pour le modèle de l'équation (3.7)	190
Tableau D.2 : Analyse des résidus pour le modèle de l'équation (3.9)	191
Tableau D.3 : Analyse des résidus pour le modèle complet.....	192
Tableau D.4 : Analyse des résidus pour le modèle optimal.....	193

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 :	Section transversale d'une poche de coulée.....	14
Figure 1.2 :	Forme du plancher	15
Figure 1.3 :	Zones réfractaires d'une poche de coulée	16
Figure 1.4 :	Forme standard des briques disponibles pour les produits façonnés	32
Figure 1.5 :	Facteurs influençant la durée de vie réfractaire d'une poche de coulée..	36
Figure 1.6 :	Effet de la basicité et de la puissance fournie sur la vie de la ligne de laitier	47
Figure 1.7 :	Effet d'un changement de puissance sur la vie de la ligne de laitier	47
Figure 1.8 :	Vie de la ligne de laitier en fonction de la basicité et du nombre de coulées dégazées pour différentes préchauffes et puissances	47
Figure 1.9 :	Influence du degré de la préchauffe sur la vie de la ligne de laitier.....	47
Figure 1.10 :	Influence du temps de contact moyen par coulée sur la durée de vie de la ligne de laitier.....	49
Figure 1.11 :	Facteur de performance relatif en fonction du temps de contact moyen de l'acier.....	51
Figure 1.12 :	Facteur de performance relatif en fonction du nombre de coulées chauffées par exothermie	51
Figure 1.13 :	Facteur de performance relatif en fonction du nombre de coulées désulfurées	51

Figure 1.14 :	Facteur de performance relatif en fonction du temps de barbotage	51
Figure 1.15 :	Matrice du facteur de performance relatif.....	52
Figure 1.16 :	Effet des paramètres opératoires du four-poche sur la durée de vie de la ligne de laitier.....	54
Figure 1.17 :	Relation entre la qualité du laitier pour différentes nuances d'acier et la durée de vie de la ligne de laitier	55
Figure 2.1 :	Les traitements en poche au Canada	59
Figure 2.2 :	Vie moyenne des poches de coulée selon leur grosseur	61
Figure 2.3 :	Capacité de la poche en fonction de la superficie intérieure du garnissage de travail.....	63
Figure 2.4 :	Capacité de la poche en fonction du poids total des réfractaires	63
Figure 2.5 :	Poids total des réfractaires en fonction de la superficie intérieure du garnissage de travail.....	64
Figure 2.6 :	Vie moyenne des poches de coulée en fonction du temps total de contact au cours d'une campagne	65
Figure 2.7 :	Fluctuation de la durée de vie des poches pour chaque aciéries.....	66
Figure 2.8 :	Temps de rotation, de résidence et de coulée pour chaque aciéries	69
Figure 2.9 :	Temps de résidence en fonction du temps de rotation.....	70
Figure 3.1 :	Cycle opérationnel d'une poche de coulée dans l'usine témoin	91
Figure 3.2 :	Vie de la deuxième moitié d'une campagne de la poche en fonction du nombre de coulées dont la température est inférieure à 1 710 °C....	101

Figure 3.3 :	Vie de la deuxième moitié d'une campagne de la poche en fonction du nombre de coulées dont la masse du laitier primaire est inférieure à 1 500 kg.....	102
Figure 3.4 :	Vie de la deuxième demi-campagne de la poche en fonction du nombre de coulées ayant une basicité supérieure à 1,2.....	104
Figure 3.5 :	Vie de la deuxième demi-campagne en fonction du nombre de coulées ayant un temps de barbotage inférieur à 90 min	106
Figure 3.6 :	Vie de la deuxième demi-campagne en fonction du nombre de coulées avec une quantité de CaSi inférieure à 60 kg.....	107
Figure 3.7 :	Vie de la deuxième demi-campagne en fonction du nombre de coulées dont la puissance moyenne ne dépasse pas 10 MW.....	109
Figure 3.8 :	Vie de la deuxième demi-campagne en fonction du nombre de coulées ayant un temps d'attente total inférieur à 45 min.....	110
Figure 3.9 :	Vie de la deuxième demi-campagne en fonction du nombre de coulées avec une désulfuration inférieure à 0,055 %.....	112
Figure 3.10 :	Graphique de la matrice des corrélations des variables opératoires	113
Figure 3.11 :	Graphique des résidus pour le modèle défini à l'équation (3.7)	118
Figure 3.12 :	Valeurs observées de la vie de la deuxième mi-campagne en fonction des valeurs prédictes calculées avec le modèle de l'équation (3.7).....	118
Figure 3.13 :	Graphique des résidus pour le modèle défini à l'équation (3.9)	122

Figure 3.14 :	Valeurs observées de la vie de la deuxième mi-campagne en fonction des valeurs prédites calculées avec le modèle de l'équation (3.9).....	122
Figure 3.15 :	Graphique des résidus pour le modèle optimal.....	130
Figure 3.16 :	Valeurs observées de la vie de la deuxième mi-campagne en fonction des valeurs prédites calculées avec le modèle optimal	130

LISTE DES SIGLES ET DES ABRÉVIATIONS

β_i	Estimé du paramètre i
λ	Diffusivité thermique
κ	Colinéarité
ρ	Densité
A	Briques couteaux (<i>Arch</i>)
AC	Alumine-carbone
AIC	Critère de Akaike (<i>Akaike Information Criterion</i>)
Avg.	Moyenne (<i>Average</i>)
AW	Briques couteaux-coins (<i>Arch-Wedge</i>)
AWB	Briques couteaux-coins-biseaux (<i>Arch-Wedge-Bevel</i>)
AISE	<i>Association of Iron and Steel Engineers</i>
ASK	Calmé au silicium et à l'aluminium (<i>Aluminium-Silicium Killed</i>)
BC	Bas Carbone
BF	Briques d'argile avec gonflement (<i>Bloating Fireclay</i>)
BIC	Critère de Sawa Bayesian (<i>Bayesian Information Criterion</i>)
BOF	Four avec insufflation d'oxygène par le fond (<i>Bottom Oxygen Furnace</i>)
b.p.	Bouchon Poreux
BVL	Briques biseaux (<i>Bevel</i>)
C	Béton réfractaire (<i>Castable</i>)

CAS-OB	Ajustement de la composition par barbotage à l'argon scellé et insufflation d'oxygène (<i>Composition Adjustement by Sealed Argon Bubbling and Oxygen Blowing</i>)
CBT	Trou de coulée concentrique (Concentric Bottom Tapping)
c_i	Coefficient i
Coef. Corr.	Coefficient de Corrélation
Conf.	Confiance
Conv.	Convertisseur
c_p	Chaleur spécifique
C_p	Critère ou statistique de Mallow
D	Dolomie
DC	Dolomie-Carbone
Désulf	Désulfuration
DFFITS	Statistique de DFFITS
DM	Dolomie-Magnésie
DMC	Dolomie-Magnésie-Carbone
Disp.	Disponible
EBT	Trou de coulée excentrique (Excentric Bottom Tapping)
E.T.	Écart Type
Ext.	Externe
F(x,y)	Statistique de Fisher

FAE	Four à Arc Électrique
FP	Four-Poche
HA	Haute teneur en alumine (<i>High Alumina</i>)
HC	Haut Carbone
HF	Cuits à haute température (<i>High-Fired</i>)
HM	Haute teneur en magnésie (<i>High Magnesia</i>)
I	Informatique
IISI	<i>International Iron & Steel Institute</i>
Inox..	Inoxydable
Int.	Interne
J_p	Erreur finale des prédictions
k_i	Conductivité thermique de la couche i
M	Manuel
Max	Maximum
MC	Moyen Carbone
MCa	Magnésie-Carbone
MCr	Magnésie-Chrome
MD	Magnésie enrichie de Dolomie
MDC	Magnésie enrichie de Dolomie avec Carbone
Min	Minimum
MK	Briques mini-clés (<i>Mini-Keys</i>)

<i>MKR</i>	Briques mini-clés installées en rangées (<i>Mini-Keys in Rows</i>)
<i>Moy</i>	Moyenne
<i>MSE</i>	Erreur des prédictions par la méthode des moindres carrés (<i>Mean Square Error</i>)
<i>n</i>	Nombre d'échantillons observés
<i>N</i>	Non
<i>n^o</i>	Numéro
<i>N_{att<45 min}</i>	Nombre de coulées ayant un temps d'attente total inférieur à 45 min
<i>N_{att>45 min}</i>	Nombre de coulées ayant un temps d'attente total supérieur à 45 min
<i>N_{B < 1,2}</i>	Nombre de coulées ayant une basicité inférieure à 1,2
<i>N_{B > 1,2}</i>	Nombre de coulées ayant une basicité supérieure à 1,2
<i>N_{barb<90 min}</i>	Nombre de coulées ayant un temps de barbotage inférieur à 90 min
<i>N_{barb>90 min}</i>	Nombre de coulées ayant un temps de barbotage supérieur à 90 min
<i>N_{m < 1500 kg}</i>	Nombre de coulées ayant une quantité de laitier primaire inférieure à 1 500 kg
<i>N_{m > 1500 kg}</i>	Nombre de coulées ayant une quantité de laitier primaire supérieure à 1 500 kg
<i>N_{CaSi<60 kg}</i>	Nombre de coulées ayant une quantité de CaSi inférieure à 60 kg
<i>N_{CaSi>60 kg}</i>	Nombre de coulées ayant une quantité de CaSi supérieure à 60 kg
<i>N_{P<10 MW}</i>	Nombre de coulées ayant une puissance inférieure à 10 MW
<i>N_{P>10 MW}</i>	Nombre de coulées ayant une puissance supérieure à 10 MW

$N_{Si-Sr<0,055\%}$	Nombre de coulées ayant un degré de désulfuration inférieur à 0,055 %
$N_{Si-Sr>0,055\%}$	Nombre de coulées ayant un degré de désulfuration supérieur à 0,055 %
$N_{T<1710^{\circ}C}$	Nombre de coulées ayant une température inférieure à 1 710°C
$N_{T>1710^{\circ}C}$	Nombre de coulées ayant une température supérieure à 1 710°C
<i>No.</i>	Nombre
<i>O</i>	Oui
<i>Ord.</i>	Ordonnée
<i>p</i>	Probabilité
P_c	Critère de prédiction Amemiya
PC	Pièce Pré-Coulée
<i>Puis</i>	Puissance
<i>r</i>	Coefficient de corrélation
R^2	Coefficient de détermination
R_e	Résistance équivalente
r_i	Rayon intérieur de la couche i
R_i	Rayon extérieur de la couche i
<i>RH-OB</i>	Procédé Rheinstahl-Heraeus avec insufflation d'oxygène (<i>Rheinstahl-Heraeus Oxygen Blowing</i>)
<i>RMSE</i>	Racine de l'erreur des prédictions par la méthode des moindres carrés (<i>Root Mean Square Error</i>)
<i>S</i>	(<i>Soldier</i>)

SBC	Statistique de SBC
S_p	Statistique de S _p
SSE	Somme des carrés de l'erreur des prédictions (<i>Sum of Square Error</i>)
STR	Briques rectangulaires (<i>Straight</i>)
Stud.	Student
SU	Briques semi-universelles (<i>Semi-Universal</i>)
SUS	Briques semi-universelles installées en spirale (<i>Semi-Universal in Spiral</i>)
<i>t(x)</i>	Statistique de Student
<i>t_{coulée}</i>	Temps de coulée
<i>t_{cycle}</i>	Temps du cycle
<i>t_{résidence}</i>	Temps de résidence
<i>t_{rotation}</i>	Temps de rotation
TBC	Très Bas Carbone
Temp.	Température
Trait.	Traitement
V	Réfractaire installé par Vibration
VAD	Four-poche sous vide avec barbotage (<i>Vacuum Arc Degasser</i>)
Var.	Variance
VOD	Traitement sous vide avec décarburation (<i>Vacuum Oxygen Decarburation</i>)
W	Briques coins (<i>Wedge</i>)
X_i	Prédicteur i

y_1	Durée de vie de la première campagne des poches observées
y_1^*	Durée de vie des poches observées n'ayant eu qu'une campagne
y_2	Durée de vie de la deuxième campagne des poches observées
y_{total}	Durée de vie totale des poches observées

LISTE DES ANNEXES

Annexe A :	Compilation brute du questionnaire	156
Annexe B :	Propriétés des réfractaires installés	170
Annexe C :	Historique des variables opératoires.....	174
Annexe D :	Analyse des résidus	189

INTRODUCTION

Les poches de coulée ont longtemps été utilisées comme récipient servant à transférer l'acier liquide du four primaire à la coulée pour la production de lingots et, depuis une vingtaine d'années, la production continue de billettes, de blooms ou de brames. Des briques réfractaires argileuses et silico-argileuses étaient alors installées pour protéger la coquille.

Mais, la production d'acières de plus haute qualité a exigé des modifications technologiques importantes autant au niveau des fours primaires qu'à la coulée continue. L'innovation la plus importante est sans doute le four-poche et les différents traitements en poche qui lui sont associés. Cette technologie sert dorénavant d'intermédiaire pour raffiner davantage l'acier entre le four et la coulée. Par conséquent, ces nouvelles opérations métallurgiques ont été néfastes pour les réfractaires. Pour répondre à ce virage technologique, des nouveaux produits réfractaires ont été développés et ont surtout conduit à la production de réfractaires basiques. Ensemble, tous ces facteurs ont changé la performance réfractaire des poches. C'est pourquoi, dans un premier temps, le premier chapitre résume la situation actuelle, les qualités et les zones réfractaires des poches de coulée et les différents facteurs qui influencent sa durée de vie.

Dans la bibliographie, trois auteurs ont relié la durée de vie des poches ou d'une zone réfractaire en particuliers avec certaines variables opératoires. Pour Van Wijngaarden [1], une faible basicité (inférieure à 1,8), un taux de chauffe élevé (exprimé en kW·h/t), un grand nombre de coulées qui ont eu un traitement sous vide et une mauvaise préchauffe du garnissage de travail sont tous des facteurs qui diminuent la durée de vie du réfractaire installé à la ligne de laitier de 5 à 30 coulées. Selon Erny et Sistilli [2], un prolongement du temps de résidence de l'acier (supérieur à 145 minutes), un grand nombre de coulées chauffées par arc ou désulfurées (plus de 20) et un temps de barbotage élevé (plus de 17 minutes) diminuent de 5 à 10 % chacun la performance relative de la poche. De leur côté, Bailey, Bell et Walker [3] montrent des relations linéaires entre différentes variables (temps de barbotage, de préchauffe, de résidence et de contact, puissance fournie, nuances d'acier) et la durée de vie de la ligne de laitier. Bien que ces relations soient faibles, elles restent statistiquement significatives. Lorsque ces variables sont prises séparément, une variation excédante entraîne une diminution de 1 à 2,5 coulées de la durée de vie de la ligne de laitier. Malgré ces relations, aucun modèle général de régression n'a été élaboré en présence de plusieurs variables.

Ensuite, un questionnaire a été envoyé à 21 aciéries canadiennes en avril 1994 afin de compiler différentes configurations réfractaires et leur condition opératoire type. Le but était de comparer les performances réfractaires entre les différentes zones réfractaires et de vérifier si les différents facteurs ou variables opératoires propres à chaque aciérie expliquent les variations de la durée de vie des poches de coulée. Ce questionnaire sert

aussi à connaître la situation actuelle de la métallurgie secondaire et de l'évolution des garnissages réfractaires au Canada.

La performance d'une poche se divise en trois catégories : 1) les poches d'une capacité entre 50 t et 140 t qui ont une vie moyenne de 65 coulées ; 2) les poches d'une capacité entre 230 t et 300 t qui ont une vie moyenne de 100 coulées ; 3) les poches utilisées pour les aciers inoxydables qui ont une vie moyenne de 17 coulées. La durée de vie de la poche dépend de celle d'une des zones réfractaires (ligne de laitier, blocs, plancher) ou d'un nombre de coulées préétabli. La principale zone affectée est le plancher avec les blocs de coulée. Pour le garnissage en contact avec le bain, les aciéries électriques utilisent des briques en dolomie et les aciéries de conversion, des briques à haute teneur en alumine ou d'alumine-carbone. Pour la ligne de laitier, on retrouve différentes qualités : dolomie enrichie de magnésie, magnésie-carbone, dolomie-carbone ou magnésie-chrome. Bien que les aciéries canadiennes suivent bien les nouvelles tendances c'est-à-dire l'utilisation de laitiers et réfractaires basiques avec présence d'un ou plusieurs traitements en poche, il n'est pas possible de relier la performance générale des poches avec les différentes variables opératoires pour trois raisons : 1) le nombre de répondants n'est pas assez élevé pour la quarantaine de variables répertoriées ; 2) la vie des poches varie peu ; 3) les valeurs collectées représentent des conditions opératoires typiques qui sont des moyennes annuelles alors qu'elles fluctuent d'un mois à l'autre, et même plus, d'une coulée à l'autre. Aussi, le questionnaire était incomplet au niveau de la

basicité ou de la composition du laitier pour les différentes nuances élaborées et de la température de l'acier ou du garnissage.

En parallèle, des données de production susceptibles d'influencer la durée du garnissage d'usure ont été accumulées dans une aciéries témoin. Le but de cette partie est d'établir un modèle de régression linéaire entre les différentes variables opératoires et la durée de vie des poches. Il s'agit de déterminer si les variations des vies des poches suivent les variations opératoires.

La campagne d'une poche est séparée en deux parties à cause d'une faiblesse dans une des zones réfractaires, celle des blocs installés au fond de la poche. La variation observée sur la durée de vie de la poche se reflète plutôt sur la deuxième partie de la campagne. En définissant une valeur seuil pour chaque variable opératoire compilée, un modèle de régression linéaire a pu être élaboré à partir des variables suivantes : le temps total d'attente de la poche lorsque la poche est pleine, le temps de barbotage, la basicité, la quantité de silico-calcium injectée au four-poche, la puissance de la chauffe par arc et le degré de désulfuration. Le nombre de bas, moyen et haut carbone n'a pas montré de relation significative. La température de l'acier au four primaire et la quantité de laitier primaire transporté dans la poche ont été rejetées car elles n'étaient pas significatives en présence des six autres variables mentionnées plus haut.

CHAPITRE I

Mise en situation

Ce chapitre passe en revue les procédés d'aciérage jusqu'au moment où l'acier est élaboré dans une poche de coulée et contient une revue bibliographique des articles concernant la durée de vie de ces poches.

1.1 Les filières technologiques

Il existe deux filières technologiques à partir desquelles l'acier est élaboré. La première méthode d'élaboration s'obtient en réduisant le carbone par l'oxygène dans un mélange de fonte et de ferrailles, avec un ajout d'additifs (calcaire, chaux vive, chaux dolomitique, fluospar) pour former un laitier qui contient les impuretés oxydées. Cette fonte, riche en carbone, a été préalablement préparée dans des hauts fourneaux à partir de concentré de minerais de fer, de coke et de chaux. L'outil métallurgique qui permet cette transformation de la fonte s'appelle le convertisseur. Il existe plusieurs sortes de convertisseur (BOF, KOBM, QBOP) dont la principale caractéristique est le soufflage de l'oxygène. Aucune source d'énergie externe n'est nécessaire car la réaction principale du carbone avec l'oxygène est exothermique.

La deuxième méthode d'élaboration est basée sur la fusion de ferrailles. Il est aussi possible d'utiliser des pré-réduits d'hématite. Ces ferrailles ou les pré-réduits sont

fondu dans un four à arc électrique où sont effectuées diverses opérations métallurgiques (décarburation, désoxydation et mise à la nuance avec un laitier réactif) pour former ainsi un nouvel acier.

Quelle que soit la filière technologique, l'acier liquide doit être transféré à la coulée continue pour obtenir le produit brut sous trois formes différentes : la brame, le bloom ou la billette. Cette fonction de transfert est assurée par un récipient métallique : une poche de coulée. Pour résister aux conditions imposées, ce récipient doit être garni de matériaux réfractaires.

1.2 Les traitements en poche

Au cours des vingt dernières années, l'arrivée de nouvelles technologies a permis d'augmenter la régularité, la qualité, la propreté et les propriétés des aciers, qu'il faut sans cesse ajuster à la demande des clients. De plus, l'élaboration complète d'un acier dans un convertisseur et surtout, dans un four à arc, devenait un procédé long et coûteux. Le traitement en poche constituait alors une solution économique. Ainsi, il est dorénavant possible de modifier la température, la composition et les inclusions de l'acier liquide entre le remplissage de la poche au four et le début de sa vidange à la coulée continue. Le principal avantage est que la durée des opérations métallurgiques au four primaire a pu être diminuée, augmentant directement la productivité de l'aciérie. Les procédés alors effectués dans la poche sont divers : barbotage avec un gaz inerte, brassage par induction, système de chargement d'additifs et d'injection de poudres, présence d'un laitier réactif,

chauffe du bain par arc électrique, traitement sous vide ou sous atmosphère contrôlée. Le but de ces opérations est de raffiner l'acier avec un ajustement approprié à la nuance (désoxydation, désulfuration, déhydrogénéation, dénitration, déphosphoration), une meilleure homogénéisation de la composition et de la température du bain et une augmentation de la qualité en contrôlant la quantité, la forme et la distribution des inclusions nuisibles aux propriétés physiques de l'acier. La poche possède alors une nouvelle fonction, celle d'un réacteur où diverses opérations métallurgiques peuvent être effectuées, maintenant appelées la métallurgie secondaire.

1.3 Le four-poche

Parmi tous les procédés disponibles, seul, le four-poche est considéré dans ce travail. Amblard et Legrand [4] et Fruehan [5] ont déjà présenté les principales caractéristiques du four-poche dans leurs travaux. En résumé, la technologie du four-poche permet d'effectuer les quatre opérations suivantes :

- 1) le brassage du bain ;
- 2) la chauffe du bain par arc électrique ;
- 3) l'injection d'additifs sous forme de poudres et la mise à la nuance ;
- 4) le contrôle des inclusions.

Le four-poche a tout d'abord été installé dans les aciéries électriques qui élaborent des aciers de haute qualité à cause des longues périodes d'affinage nécessaires.

1.3.1 Laitier primaire résiduel

Avant d'effectuer tout traitement, il est important de tenir compte du premier laitier utilisé lors de la première élaboration (décarburation et déphosphoration) de l'acier dans le four ou dans le convertisseur. Lors du remplissage de la poche, une certaine quantité de ce laitier est aussi transférée dans la poche. Selon Cotchen [6], ce laitier contient plusieurs oxydes (FeO, SiO₂ , MnO, Cr₂O₃ et P₂O₅) qui causent plusieurs problèmes reliés à l'efficacité du traitement en poche. En résumé, l'oxyde de fer et l'oxyde de manganèse représentent une source importante d'oxygène encore active et peuvent causer l'oxydation du bain. Ces deux oxydes sont facilement réduits en ajoutant un oxydant (Al, Si, Mn, CaC₂) nécessaire à la désoxydation même du bain. Mais, ils peuvent aussi causer un enrichissement du bain en phosphore, en manganèse ou en chrome. D'un autre côté, la silice et l'alumine, s'ils se retrouvent en trop grande quantité, réduisent le pouvoir de désulfuration du laitier nécessaire pour le raffinement. Par conséquent, il faut ajouter une plus grande quantité de désulfurants (chaux, silico-calcium, etc.) pour obtenir une bonne désulfuration. Cet ajout supplémentaire affecte directement le coût des intrants.

Il existe plusieurs techniques pour minimiser la quantité de ce laitier primaire dont les plus courantes sont : l'utilisation d'un bouchon de type sphérique ou conique inséré par un appareillage mécanique, le décrassage du four, du convertisseur ou de la poche, un trou de coulée excentrique (EBT) ou concentrique (CBT) du four électrique ou un

système de vanne-tiroir. Les avantages et les inconvénients de ces techniques dépassent le cadre de ce mémoire : il faut juste souligner que chaque aciéries utilise sa technique pour retenir ou contrôler ce laitier primaire.

1.3.2 Brassage du bain

Les principales fonctions métallurgiques du brassage sont :

- 1) homogénéiser la température et la composition de l'acier ;
- 2) assurer une surface d'interaction entre le bain et le laitier pour la désoxydation et la désulfuration ;
- 3) favoriser la dissolution, l'agglomération et la flottaison des inclusions.

Le brassage peut être magnétique, mécanique ou pneumatique. Ce dernier est le plus utilisé d'après l'IISSI [7] et s'appelle le barbotage. Le gaz inerte utilisé est soit l'argon, soit l'azote. Mais, ce dernier est soluble dans l'acier liquide et forme des inclusions de nitrides indésirables, d'où l'utilisation de l'argon. La vitesse de barbotage joue un rôle important. Une vitesse élevée permet un mélange de l'alliage et améliore la surface d'interaction métal/laitier pour la désoxydation et la désulfuration tandis qu'une vitesse plus faible assure une meilleure homogénéisation de la température et la flottaison des inclusions. D'après Carrington et Tomazin [8], il est préférable de commencer avec un barbotage fort pour accélérer les réactions entre le laitier et le bain et de diminuer

l'intensité graduellement pour la flottaison des inclusions formées par l'ajout des additifs. Il faut cependant faire attention car un brassage à vitesse élevée pendant une période prolongée expose aussi le bain à l'atmosphère ambiante, riche en oxygène, qui provoque l'oxydation du bain.

Le barbotage se fait principalement par une lance insérée au-dessus du bain ou par un bouchon poreux installé au fond de la poche. Bien que ce dernier soit plus facile d'entretien et d'utilisation qu'une lance, il est beaucoup plus facile de changer la lance que de changer le bouchon si une défectuosité se produit. Le choix d'une lance ou d'un bouchon repose en premier lieu sur une décision opérationnelle. Il est aussi restreint à l'espace disponible au four-poche. Il existe plusieurs sortes de bouchon poreux, dont l'exposé dépasse le cadre de ce mémoire. La référence [9] peut être consultée à ce sujet. Finalement, le réfractaire de la poche doit résister à l'érosion provoquée par le mouvement du bain.

1.3.3 Chauffe par arc électrique

Les principales fonctions de la chauffe sont :

- 1) ajuster la température du bain avant sa coulée ;
- 2) compenser les pertes thermiques entre le four et la coulée continue.

Pour des raisons techniques, l'avènement de la coulée continue a exigé un meilleur contrôle de la température de l'acier comparativement à la coulée en lingots. Les pertes thermiques étaient causées par l'ajout des additifs pour la désoxydation et la désulfuration, par le séjour prolongé du métal dans la poche à cause du barbotage ou du dégazage sous atmosphère contrôlée ou par l'attente de la poche pour passer à la prochaine étape de son cycle opérationnel. La première solution pour compenser ces pertes a été de remplir la poche avec un acier dont la température est plus élevée à la sortie du four. Par conséquent, cette nouvelle pratique a augmenté directement le taux de dissolution, le degré de pénétration du laitier et les chocs thermiques du réfractaire.

Avec le four-poche, une partie de ces problèmes a été réglée. Selon les travaux de Amblard et Legrand [4] et de Cotchen [10], l'efficacité de la chauffe est grandement augmentée par une plus petite superficie du bain par rapport au four. Mais, il faut respecter les restrictions du facteur de puissance pour être économique. Les électrodes produisent une zone de radiation intense, définie par le diamètre du cercle d'électrode, qui se propage dans le bain par diffusion à travers le laitier. Selon son épaisseur, une durée prolongée de la chauffe peut provoquer une surchauffe du laitier, qui devient alors plus fluide et plus agressif. L'utilisation d'un arc court empêche d'endommager le réfractaire avec une plus faible épaisseur du laitier. Mais, il est aussi associé à un facteur de puissance plus faible et peut provoquer la carburation du bain par les électrodes, fabriqués en carbone, selon la performance du système de régulation. Ce phénomène est plutôt critique pour les aciers à plus faible teneur en carbone. Il est donc important de bien

choisir le réfractaire selon le laitier utilisé car ce dernier peut parfois être très agressif à certaines périodes du procédé d'élaboration secondaire.

1.3.4 Système d'injection

Le système d'injection a comme principales fonctions :

- 1) contrôler la forme, la nature et la quantité des inclusions ;
- 2) éliminer ou contrôler les éléments indésirables (l'oxygène, le soufre, le phosphore, l'hydrogène et l'azote) ;
- 3) ajouter et dissoudre les additifs sous forme de poudres très fines et très réactives.

Initialement, l'injection servait principalement à la désulfuration de l'acier et au contrôle des inclusions d'alumine. Le matériel injecté se présente sous forme de poudres, qui ont un diamètre moyen de 1 mm, mélangées avec un gaz neutre, généralement l'argon. Le rendement du procédé dépend de la granulométrie de la poudre, de la durée et de l'intensité du brassage, de la température du bain, de la pression du gaz injecté, de la fluidité du mélange, du régime d'écoulement (nombre de Mach), de la distance d'insertion de la lance, du champ de vitesse et de l'énergie cinétique induite par le brassage. Dans ses travaux, Szekely [11] explique l'influence de ces différents paramètres d'opération sur le rendement de l'injection. Aujourd'hui, l'injection sert aussi à la déphosphoration, à la désoxydation et à la mise à la nuance de l'alliage. Le Tableau 1.1

contient une liste des mélanges utilisés pour les différentes opérations métallurgiques [11,12].

Tableau 1.1 : Exemple des poudres utilisées pour l'injection

Opération métallurgique	Mélange utilisé
Déphosphoration	$\text{CaO} + \text{CaF}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ Cendres de Soda (Soda Ash)
Désulfuration	$\text{CaO} (+ \text{CaCO}_3)$ $\text{CaO} + \text{Al}$ $\text{CaO} + \text{CaF}_2 (+ \text{Al})$ Cendres de Soda $\text{CaC}_2 (+\text{CaO}, \text{CaCO}_3)$ CaSi $\text{Mg} (+ \text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3)$
Désoxydation	Al $\text{CaSi}, \text{CaSiBa}$ CaSiMnAl
Alliages	$\text{FeSi}, \text{CaCN}_2, \text{C}, \text{FeTi}, \text{FeZr}, \text{FeW}$, $\text{NiO}, \text{MoO}_2, \text{FeB}, \text{SiZr}, \text{Pb}, \text{FeSe}, \text{Te}$

Le désavantage de ce procédé repose sur sa sensibilité aux conditions opératoires. Selon Heaslip et Sommerville [13,14], les trois composantes en jeu dans le système (la poche, le bain et le laitier) doivent être préparées adéquatement. Premièrement, la poche doit être nettoyée et le réfractaire, chauffé. Les résidus de scorie ou du bain des coulées précédentes représentent des sources possibles d'oxygène et de soufre et influencent l'efficacité de la désulfuration et le recouvrement des éléments d'alliage. Les désulfurants sont aussi avides pour l'oxygène que pour le soufre, d'où une resulfuration possible du bain. La quantité de laitier primaire transporté doit être minimale ou nulle. Deuxièmement, les paramètres du procédé doivent être ajustés en fonction de la thermodynamique, de la cinétique et des constantes physiques. Et,

finalement, la qualité de l'acier ne doit pas être altérée durant le transfert subséquent du bain à la coulée continue sinon toutes ces opérations deviennent inutiles et coûteuses

1.4 Les poches de coulée

Les caractéristiques physiques des poches de coulée diffèrent énormément d'une usine à l'autre.

1.4.1 Forme et dimension

La poche est caractérisée principalement par sa capacité de contenir de l'acier fondu. Sa grosseur varie entre 50 t et 400 t selon la capacité du four ou du convertisseur. D'après la Figure 1.1, la section transversale d'une poche possède trois formes différentes : circulaire, ovale et oblongue. Le plancher est soit plat, soit en bassin, tel qu'illustré à la Figure 1.2. En règle générale, la coquille possède une faible conicité pour assurer une meilleure stabilité de la paroi réfractaire. Généralement, il est préférable d'obtenir le plus grand volume possible avec un minimum de surface afin de minimiser les pertes thermiques et l'usure des couches réfractaires.

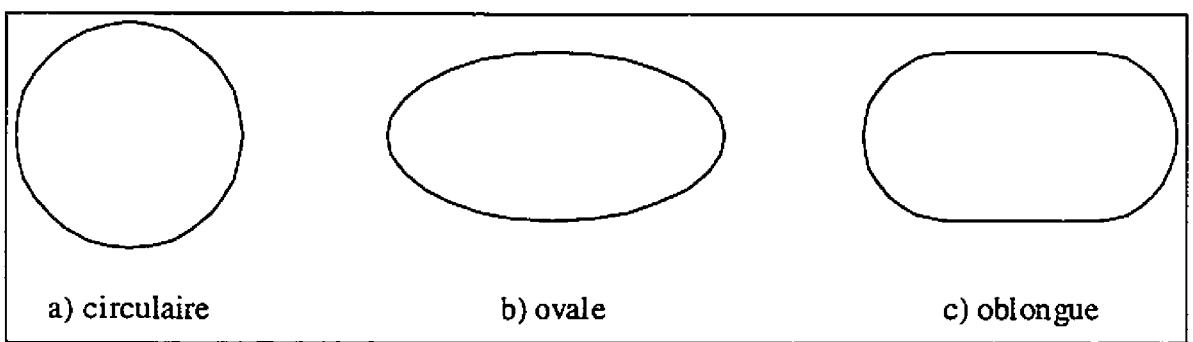


Figure 1.1 : Section transversale d'une poche de coulée

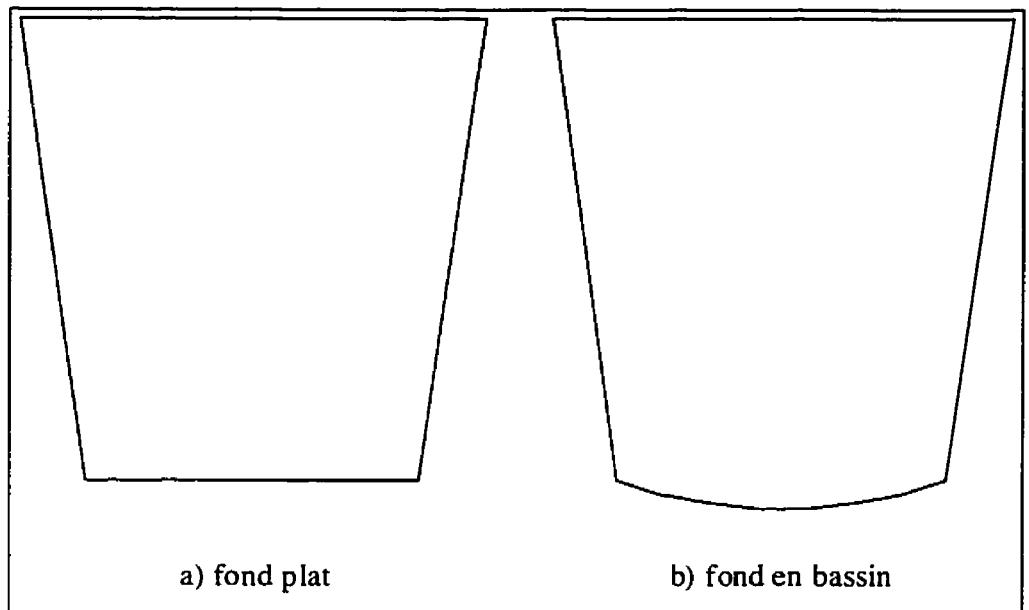


Figure 1.2 : Forme du plancher

Une poche possède deux tourillons qui permettent son déplacement à l'aide d'un pont roulant. La coquille est renforcée à l'aide de membrures et de plaques sur une certaine partie de sa hauteur. Et, finalement, un bras de levage permet le basculement complet de la poche pour le déversement du bain et/ou du laitier. Un rapport technique de l'AISE [15] décrit les différents critères de design (calcul des contraintes induites dans la coquille, l'emplacement des tourillons, de la bande de renforcement et du bras de levage) et l'utilisation générale des poches de coulée. Le principal critère de design est la température maximale en service que la coquille, le fond ou les tourillons peuvent supporter. Aussi, il faut déterminer d'avance le poids total supporté par la poche. Ce total inclut le poids des composantes suivantes : l'acier liquide, le garnissage réfractaire, la coquille métallique et le couvercle.

1.4.2 Zonage réfractaire

Le garnissage réfractaire est divisé en deux parties distinctes : un garnissage de protection ou de sécurité en cas d'infiltration, qui dure plusieurs campagnes, et un garnissage d'usure, changé après un certain nombre de coulées. La Figure 1.3 montre toutes les zones réfractaires possibles dans une poche de coulée [16,17,18]. Les principales causes d'usure de ces réfractaires sont : a) la nature du laitier; b) la nature de l'acier; c) l'atmosphère ambiante; d) la température ou les variations brusques de température.

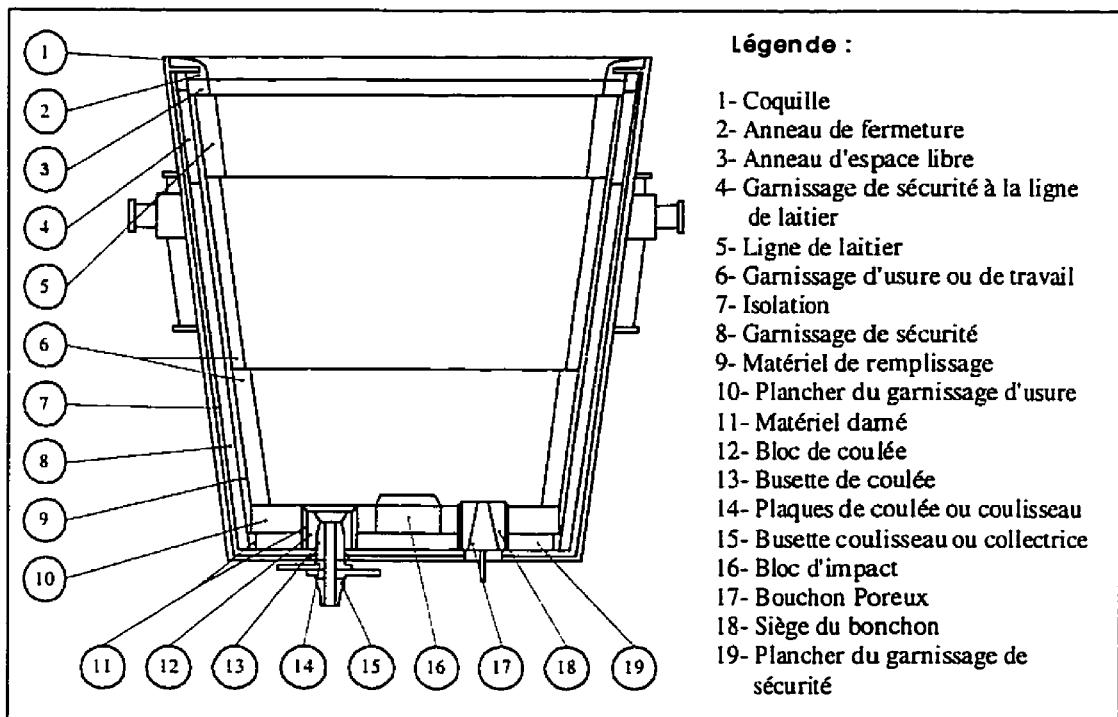


Figure 1.3 : Zones réfractaires d'une poche de coulée

Anneau de fermeture (2)

L'anneau de fermeture est composé d'un réfractaire plastique damé. Il assure la protection de la collerette métallique et peut bloquer verticalement le garnissage de

travail. Il empêche la pénétration de la scorie derrière l'espace libre ou la ligne de laitier lors de la vidange de la poche. Le réfractaire doit avoir un bon coefficient de dilatation thermique pour assurer la fermeture des joints horizontaux du garnissage de travail ou une bonne résistance mécanique pour enlever les loups.

Anneau d'espace libre (3)

Cet anneau sert à compléter le garnissage de la ligne de laitier jusqu'à la collierette métallique. Il faut s'assurer que cette partie ne soit jamais en contact prolongé avec le laitier car la qualité du réfractaire peut être moindre que celle de la ligne de laitier, plus dispendieuse. Cette zone est parfois absente dans certaines poches. L'arrivée du dégazage en poche a exigé un espace libre entre le haut de la poche et la ligne de laitier. Le réfractaire doit quand même avoir une bonne résistance à la corrosion, à l'usure et aux chocs thermiques.

Ligne de laitier (5)

Le réfractaire de la ligne de laitier est en contact direct avec le laitier réactif pour les différentes opérations métallurgiques dans la poche. Ce laitier, dont l'agressivité augmente avec la température, peut attaquer très rapidement le réfractaire. Il faut donc que le réfractaire possède une excellente résistance à la corrosion.

Garnissage de travail (6 et 10)

Cette zone est en contact direct avec l'acier liquide. Il faut donc que le réfractaire soit thermodynamiquement stable ou inerte afin d'empêcher sa dissolution dans le bain. Il

doit posséder une bonne résistance à l'érosion, provoquée par la turbulence du bain au remplissage ou par l'agitation du bain au brassage. Finalement, le réfractaire doit aussi avoir une bonne résistance aux chocs thermiques. La différence de température entre l'acier ($>1\ 650\ ^\circ\text{C}$) et le réfractaire (entre $800\ ^\circ\text{C}$ et $1\ 400\ ^\circ\text{C}$) provoque l'écaillage du réfractaire lorsque cet écart est trop grand.

L'épaisseur du garnissage peut varier avec la hauteur de la poche pour obtenir une usure uniforme à la fin d'une campagne. Le plancher a généralement une épaisseur plus élevée que le mur pour des questions d'échanges thermiques, de déformation et surtout, de protection.

Isolation (7)

La zone isolante permet de respecter la température maximale en service de la coquille. Cette isolation conserve aussi la chaleur emmagasinée dans les différentes couches réfractaires. Ainsi, ces couches deviennent moins sujettes aux chocs thermiques. Le choix de l'isolant dépend de la conductivité thermique des autres couches.

Garnissage de sécurité (4,8 et 19)

La couche de sécurité empêche une pénétration d'acier liquide d'atteindre la coquille de la poche et causer de graves incidents. Généralement, le réfractaire possède un caractère isolant. Un matériau de faible conductivité thermique diminue la profondeur de la pénétration. La qualité du réfractaire peut différer à la ligne de laitier lorsque le réfractaire de cette couche a une conductivité thermique beaucoup plus élevée que celle

du garnissage d'usure. Le réfractaire utilisé doit posséder une bonne résistance mécanique afin d'éviter sa détérioration lors de la démolition de la paroi d'usure.

Matériel de remplissage (9)

Il arrive que l'espace entre la couche de sécurité et de travail soit rempli d'un sable réfractaire pour éliminer le vide qui existe entre ces deux couches. Cette zone protège aussi le garnissage de sécurité lors d'une pénétration. Cette zone peut être supprimée pour alléger la masse réfractaire et pour augmenter la capacité de la poche, mais diminue la stabilité structurale entre les briques.

Matériel dame (11)

Selon le type de construction installé, un jeu existe entre le plancher et le mur. Ce vide est comblé avec pisé réfractaire compatible avec le réfractaire d'usure.

Bloc de coulée (12)

Le bloc de coulée possède un trou de forme conique qui permet le passage de l'acier liquide. Il contient une partie du système de la vanne-tiroir. Il faut donc un réfractaire qui possède une bonne résistance à l'érosion et aux chocs thermiques.

Système de vanne-tiroir (13, 14 et 15)

Ce système permet l'ouverture de la poche pour la vidange de l'acier à la coulée continue. Les composantes réfractaires et leur nombre varient d'un système à l'autre. Les deux composantes principales sont la busette de coulée et les deux plaques coulissantes. Une autre busette est installée à la sortie du passage, mais elle devient de plus en plus une

partie intégrante des plaques. Les plaques sont sujettes à des contraintes thermiques très élevées et doivent posséder une excellente résistance à l'usure et une bonne dureté.

Bloc d'impact (16)

Le bloc d'impact reçoit le jet d'acier du four lors du remplissage de la poche. L'impact dépend de la hauteur entre la poche et le four, de la pression et de la forme du jet (direct ou éparpillé). Cette zone est parfois omise. Le réfractaire doit posséder une bonne résistance à l'impact, aux chocs mécaniques et à l'érosion.

Bouchon poreux (17)

Le bouchon, composé d'un réfractaire poreux, permet l'agitation du bain par le fond. Ce réfractaire ne doit pas être mouillé par l'acier liquide car ce dernier pénètre dans les pores et empêche le passage du gaz. Si la durée du barbotage par coulée devient trop longue, il faut prévoir un système qui permet de changer le bouchon rapidement durant la campagne. Le réfractaire doit avoir une bonne résistance aux chocs thermiques et à l'érosion.

Siège du bouchon poreux (18)

Un autre bloc réfractaire est installé pour contenir le bouchon poreux. De cette façon, si le bouchon bloque, il peut être changé à chaud indépendamment du bloc durant la campagne de la poche. Le réfractaire demande les mêmes propriétés que le bloc de coulée.

La durée de vie de la poche dépendra de la faiblesse d'une de ces zones. Dans ce cas, il faut remplacer les zones faibles avec des réfractaires de qualité supérieure, changer leur dimension ou leur nature. En règle générale, il est préférable de diminuer les épaisseurs des différentes couches pour contenir une plus grande quantité d'acier liquide.

1.5 Matériaux réfractaires

L'arrivée des nouveaux traitements en poche a modifié complètement les conditions thermiques et métallurgiques auxquelles étaient soumis le garnissage. La vie de ce dernier dépend de la stabilité thermodynamique, de la résistance à la corrosion (chimique ou dissolution) et de la pénétration du produit, avec ou sans réaction avec le matériau. Cette imprégnation peut modifier complètement les propriétés et la microstructure du matériau par réaction de frittage avec retrait, qui provoque des fissures superficielles majeures.

Pour tout réfractaire, leurs propriétés dépendent de la matière première utilisée, de leur granulométrie, du type de liant, de la microstructure du produit et de la température de cuisson. À ce sujet, Carniglia [19] explique l'influence et l'importance de chacune de ces variables sur les propriétés. Dans le cadre de cette maîtrise, l'essentiel est de comprendre le mécanisme de dégradation pour chacun des réfractaires utilisés dans les poches de coulée et leurs propriétés générales pour les produits façonnés.

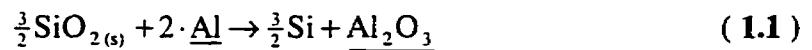
1.5.1 Silice-alumine

Il existe plusieurs composés naturels formés de silice et d'alumine. La présence du composé $3\text{Al}_2\text{O}_3 \bullet 2\text{SiO}_2$, la mullite, divise le système en deux domaines minéralogiques différents : le système silice-mullite avec un eutectique à 1 595 °C et le système mullite-corindon avec un eutectique à 1 840 °C. La tenue réfractaire dépend du système en jeu, de la température de fusion, du nombre et de la composition de chacune des phases (corindon, mullite, silice libre et vitreuse). De façon générale, la réfractarité et la résistance à la corrosion d'un produit silice-alumine augmentent avec la teneur en alumine. La présence d'impuretés telles que les alcalins (Na_2O , K_2O et Li_2O), l'oxyde de fer (Fe_2O_3) ou l'oxyde de titane (TiO_2) affecte la performance du produit car ils réagissent avec la silice pour former des silicates à bas point de fusion lorsque le produit est utilisé ou cuit à haute température [20].

Silico-argileux et argileux

Longtemps utilisée dans l'industrie métallurgique, cette famille de réfractaire résiste à une température qui varie entre 1 580 °C et 1 750 °C selon la teneur en alumine et en impuretés. Les produits argileux et silico-argileux possèdent une résistance mécanique moyenne à chaud et une bonne tenue aux chocs thermiques à cause de leur faible coefficient de dilatation thermique, qui diminue avec la teneur en alumine. Ils ont aussi une bonne résistance à la corrosion pour des laitiers riches en silice ou acides, mais une mauvaise tenue en présence d'un laitier basique, qui contient les oxydes suivants : CaO , MgO , Fe_2O_3 , FeO et MnO [21].

Initialement, la couche de sécurité était constitué de briques de sable ou d'argile avec ou sans gonflement. Ce gonflement permettait d'éliminer le jeu entre cette couche et la coquille métallique. La paroi d'usure était plutôt constituée de briques silico-argileuses ou argileuses. Pour ces produits, l'aluminium ajouté pour la désoxydation du bain réagissait avec la silice de la brique selon la réaction suivante [22] :



Par conséquent, le bain contenait plusieurs inclusions d'alumine et le réfractaire de la brique se diluait fort rapidement. En plus, le laitier de désulfuration formé de chaux ou de spath attaquait rapidement le réfractaire par la formation de silicates, d'où une piètre performance de la poche. Aujourd'hui, cette famille est plutôt utilisée comme garnissage de sécurité grâce à leur faible conductivité thermique et leur faible poids, fonction de la porosité du produit.

Haute teneur en alumine

Les principales matières premières utilisées sont l'alumine, la bauxite, l'andalousite et la cyanite calcinée. Ces réfractaires sont formés de mullite et d'une phase vitreuse. Ils possèdent une résistance satisfaisante aux chocs thermiques grâce à un coefficient de dilatation thermique moyen et s'usent généralement par corrosion. Les réfractaires à base de mullite synthétique (70 % Al_2O_3) contiennent peu de phases vitreuses et possèdent une excellente résistance au fluage à haute température. La teneur en alumine des réfractaires à base de bauxite, de gibbsite ou de diaspose varie entre 60 %

et 85 % selon la quantité de liaison d'argile. Ils contiennent plutôt un ensemble mal cristallisé de corindon dans une phase vitreuse causé par un frittage à une température de l'ordre de 1 400 °C et 1 450 °C, qui empêche un gonflement important. Bien que ce produit possède des propriétés mécaniques plus faibles à haute température et s'imprègne plus facilement par un laitier, leur coefficient de dilatation élevé lui confère une excellente résistance aux chocs thermiques. Ils résistent mieux à la corrosion que les briques d'andalousite. Et, finalement, les réfractaires à base de corindon électrofondu ou d'alumine tabulaire ont une teneur en alumine qui varie entre 85 % et 99,5 %. Ils possèdent une excellente résistance mécanique et abrasion à froid, mais sont plus sensibles aux chocs thermiques [21].

1.5.2 Basique

Les réfractaires basiques sont des produits très réfractaires qui résistent à l'action corrosive des scories. Suite à l'évolution technologique des procédés d'élaboration secondaire de l'acier, ces produits ont été rapidement utilisés pour le revêtement des garnissages des poches de coulée. Les propriétés sont grandement affectées par la présence d'additifs, notamment le carbone, qui se présente sous diverses formes (graphite, brai, goudron, etc.). En général, la conductivité des produits basiques est plus élevée que les produits à haute teneur en alumine.

Magnésie

La magnésie provient de deux sources différentes (naturelles ou marines) et la qualité du produit dépend du degré de frittage et de la teneur en impuretés. Ces derniers

sont nombreux : Fe_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 , CaO et B_2O_3 . La réfractarité du produit dépend surtout du ratio de CaO et de SiO_2 dans la matrice. Le silicate de dicalcium ou de tricalcium fondent à 2 130 °C ou 2 070 °C respectivement [20,23]. L'utilisation de la magnésie marine est favorisée à cause de sa plus grande pureté. Les impuretés forment aussi d'autres liens de silicates à plus bas point de fusion, entre 1 370 °C et 1 575 °C. Ceci explique la présence de phases liquides à des températures inférieures à celles indiquées dans les diagrammes binaires et ternaires. La corrosion est causée par la pénétration du laitier, suivie d'une dilution de la matrice avec une formation de silicates et une dissolution des grains de magnésie. Le processus est accéléré si le laitier est acide ou riche en silice avec un rapport CaO/SiO_2 inférieur à 2 et une faible teneur en MgO .

En général, les réfractaires cuits à haute teneur en magnésie (entre 90 % et 95 %) possèdent une bonne résistance mécanique, mais ont une mauvaise tenue aux chocs thermiques.

Magnésie-Carbone

Un réfractaire de magnésie, dont la teneur en carbone dépasse 7 % ou 8 %, porte le nom de magnésie-carbone. L'ajout de graphite améliore la résistance aux chocs thermiques, à l'écaillage et à la corrosion, mais diminue les propriétés mécaniques. Le liant peut être de brai ou de résine. Par contre, la conductivité thermique du produit augmente à cause du carbone. Le phénomène de corrosion est beaucoup plus complexe

pour ce type de matériau. Le carbone, sous forme de liant ou dans la matrice, entoure les grains de magnésie et les réduit selon la réaction suivante :



Les impuretés peuvent aussi être réduites par le carbone et affaiblir davantage les liens dans la matrice. Ce phénomène affecte l'intégrité du réfractaire et ses propriétés à chaud, surtout lorsque la température d'opération devient trop élevée. À cause de cette sensibilité du carbone à l'oxydation, ce matériau contient généralement des antioxydants (Al, Si, Mg, AlSi, etc.). Ces antioxydants augmentent les propriétés mécaniques. Ils forment des carbures (d'aluminium ou de silicium) qui occupent les pores et réduisent la perméabilité. Un des problèmes associés à ce type de briques est la présence des carbures d'aluminium qui réagissent avec l'humidité atmosphérique [23]. Le produit de cette réaction cause une expansion importante, qui provoque la rupture de la brique. Ce phénomène est retardé par la présence de silicium.

Dolomie

La dolomie est un carbonate mixte équimolaire de calcium et de magnésium (CO_3Ca et CO_3Mg). Calcinée à une température supérieure à 1 700 °C, elle devient un matériau fritté à densité élevée. D'après le diagramme binaire $\text{CaO}-\text{MgO}$, la phase liquide n'apparaît qu'à 2 300 °C avec une dolomie pure (58% CaO - 42% MgO) [20]. Mais, la présence des mêmes impuretés que la magnésie (Al_2O_3 , FeO et SiO_2) abaisse le point de fusion par la formation de silicates. D'après Loeffelholz et Marr [24], la corrosion est provoquée par une dissolution du CaO par les oxydes (SiO_2 , $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$, Al_2O_3 , MnO_2 ,

Cr_2O_3 , etc.) retrouvés dans un laitier ferritique. Pour minimiser l'usure, il est conseillé de saturer le laitier en CaO en premier et en MgO en deuxième. L'ajout de chaux augmente la proportion de phase liquide dans le laitier à la température d'élaboration de l'acier tandis que la magnésie permet la formation de spinelles à haut point de fusion, qui diminue l'agressivité du laitier.

La dolomie est cuite avec des liaisons directes, tempérée ou crue avec des liaisons résines, brais ou carbone. Ces processus de fabrication affectent la tenue à chaud et la résistance au fluage. La dolomie cuite formée de liens directs de CaO par frittage résiste faiblement au phénomène d'écaillage causé par les chocs thermiques. Elle s'imprègne facilement par un laitier riche en oxyde de fer. Au refroidissement, il se produit un retrait irréversible du 2-CaO-SiO_2 qui cause un écaillage structurel et provoque l'ouverture des joints. Cette faiblesse a été observée par Brown et Tindyala [25] et par Riedl et Stendera [26] dans leurs travaux. Le contrôle de la gestion thermique de la poche reste donc un facteur prépondérant. La dolomie cuite coûte moins cher que les réfractaires magnésiens, mais a le principal défaut d'être hydratable. Elle nécessite donc des précautions à l'entreposage. La dolomie tempérée à liaison brai a une meilleure tenue face à un laitier riche en chaux grâce à la présence du carbone et a une résistance élevée aux chocs thermiques [1]. Une dolomie tempérée à liaison résine possède une meilleure résistance à chaud et à l'hydratation. Elle est exempte de volatiles toxiques à la cuisson initiale. La liaison résine diminue la déformation et le retrait de la brique, mais un écaillage peut se produire. L'usure de la dolomie tempérée est influencée par la rapidité de l'oxydation du

carbone et le retrait associé à la décarburation à la face chaude ou à la face froide du garnissage.

Dolomie-Carbone

En général, cette famille contient plus de 5 % de graphite avec des liaisons résines et possède les mêmes caractéristiques que la magnésie-carbone. D'après Beurrotte, Provost et Tassot [27], le problème de la transformation cristalline du silicate de dicalcium reste présent. L'écaillage causé par les contraintes thermiques est moins important que la brique à liaison brai. D'après Riedl et Stendera [26], il faut s'assurer que le graphite ne soit pas oxydé durant la chauffe du garnissage entre deux coulées pour obtenir une bonne performance de la brique.

Magnésie-Chrome

Le terme spinelle désigne un groupe de minéraux ayant la formule générale suivante : $XO - Y_2O_3$ où X représente Mg^{2+} ou Fe^{2+} et Y, Fe^{3+} , Al^{3+} ou Cr^{3+} [20]. Pour les réfractaires, cela concerne un mélange de magnésie avec l'oxyde de chrome ou d'alumine.

Pour la première catégorie, les réfractaires de magnésie-chrome et de chrome-magnésie sont constitués de trois phases différentes : 1) la magnésie qui contient des phases spinelles en solution solide ; 2) des grains de magnésie liés avec des spinelles ; 3) des phases silicatées. La qualité de ces produits dépend de la nature de la chromite, de la méthode utilisée pour la préparation et la cuisson des grains. Même si le mineraï contient

des phases silicatées, elles réagissent avec la magnésie pour former de la forstérite à haut point de fusion (1 850 °C) [23]. D'après Alcock et Spencer [28], un laitier riche en silice dissout les liens de magnésie dans la matrice par la formation de la monticellite (1 500 °C). Ce phénomène est accéléré en présence d'un laitier basique. À ce moment, la phase spinelle se dissout rapidement par la présence de composés de chromites, d'aluminates ou de ferrites de calcium à bas point de fusion.

Une brique magnésie-chrome à liaison directe est obtenue par une cuisson à très haute température de magnésie calcinée et d'oxyde de chrome de haute pureté. Ce matériau possède une excellente résistance à la corrosion face à des scories acides et une résistance mécanique moyenne à chaud. Elle est moins sujette aux chocs thermiques que la magnésie. Au lieu de la magnésie calcinée, on peut utiliser des grains de magnésie et d'oxyde de chrome électrofondus. Ce matériau possède une excellente résistance à la corrosion grâce à une faible porosité des grains et à leur faible inertie chimique. On peut aussi utiliser des grains obtenus par la clinkérisation préalable de la magnésie et de l'oxyde de chrome.

Cependant, le chrome hexavalent présente un danger pour l'environnement car il est cancérigène et toxique pour l'homme. Même si le chrome trivalent est inoffensif, il se transforme en chrome hexavalent sous des conditions particulières : 1) lorsqu'il est en présence de chaux à haute température ; 2) lorsqu'il est en présence d'alcalins dans la

nature. Il est donc maintenant sujet à des réglementations gouvernementales, d'où la nécessité de les remplacer ou de les réutiliser.

1.5.3 Spéciaux

Les réfractaires spéciaux sont plutôt utilisés en laboratoire ou pour des usages spéciaux à cause de leur coût plus élevé. Deux de ces produits peuvent être utilisés pour le garnissage des poches : les spinelles $MgAl_2O_4$ et les produits à base de zircon ou de zircone.

Spinelle

La deuxième catégorie de spinelle est celle formée par le mélange de magnésie et d'alumine synthétique frittée ou électrofondu. Sa raison d'être vient du problème environnemental du chrome car son prix reste encore très élevé. Le terme magnésie-spinelle se réfère plutôt au produit $MgO \cdot Al_2O_3$. En général, ces produits ont une bonne résistance à l'écaillage et présentent une excellente résistance à la corrosion [21].

Zircon et Zircone

Cette famille est classée dans les réfractaires spéciaux. Il est surtout utilisé au Japon, mais peu en Amérique [7]. Le zircon est un silicate de zirconium $ZrSiO_4$. Il possède une bonne inertie chimique face à des laitiers acides et une bonne résistance aux chocs thermiques. Sa température d'opération est limitée entre 1 500 °C et 1 650 °C car il se dissocie dans cet intervalle [23]. La zircone est considérée comme un matériau très réfractaire avec un point de fusion de 2 680 °C, mais son utilisation est limitée à cause de

son prix fort élevé. La transformation instantanée entre la forme monoclinique et tétraédrique est responsable de la dégradation du produit [23]. Pour éviter ce phénomène, deux solutions existent. La première est de répartir une poudre fine de zircone à travers la matrice. L'autre approche consiste à stabiliser la forme cubique de la zircone avec de la magnésie, de la chaux ou de l'oxyde d'yttrium à une température entre 1 500 °C et 1 700 °C. La forme cubique possède une dilatation thermique plus uniforme par rapport aux deux autres formes, mais a tendance à se déstabiliser en fines particules lorsque le produit est laissé trop longtemps à une température entre 800 °C et 1 400 °C en présence de silicium [29]. La zircone peut aussi servir d'additif pour augmenter la résistance aux chocs thermiques ou aux laitiers acides.

1.6 Construction réfractaire

Un produit réfractaire est disponible sous deux formes différentes : 1) produits façonnés, c'est-à-dire sous la forme de briques cuites ou tempérées de dimension standard ; 2) produits non façonnés, c'est-à-dire de béton réfractaire, monolithique plastique ou matériau gunité.

1.6.1 Avec des façonnés

La Figure 1.4 illustre les différentes formes disponibles. La poche peut être montée en spirale ou par assise (anneau par anneau). Dans le premier cas, il faut utiliser un kit de départ pour amorcer la spirale et un kit de fermeture pour terminer graduellement la dernière rangée. Dans le deuxième cas, chaque rangée représente un anneau dans la poche. La fermeture se fait par un ajustement serré de deux briques

coupées manuellement et mises en place à l'aide d'un maillet en caoutchouc dur. Dans les deux cas, il est important de ne pas faire coïncider les joints verticaux. Les joints du garnissage de travail ne doivent pas coïncider avec ceux du garnissage de sécurité afin de limiter les infiltrations d'acier [30]. La pose de ces briques peut être effectuée à sec, qui a comme avantage la rapidité de montage du garnissage, ou avec un produit de jointoiement. Les briques de format semi-universel permettent une plus grande flexibilité et stabilité de construction, surtout pour les poches de grande capacité [31].

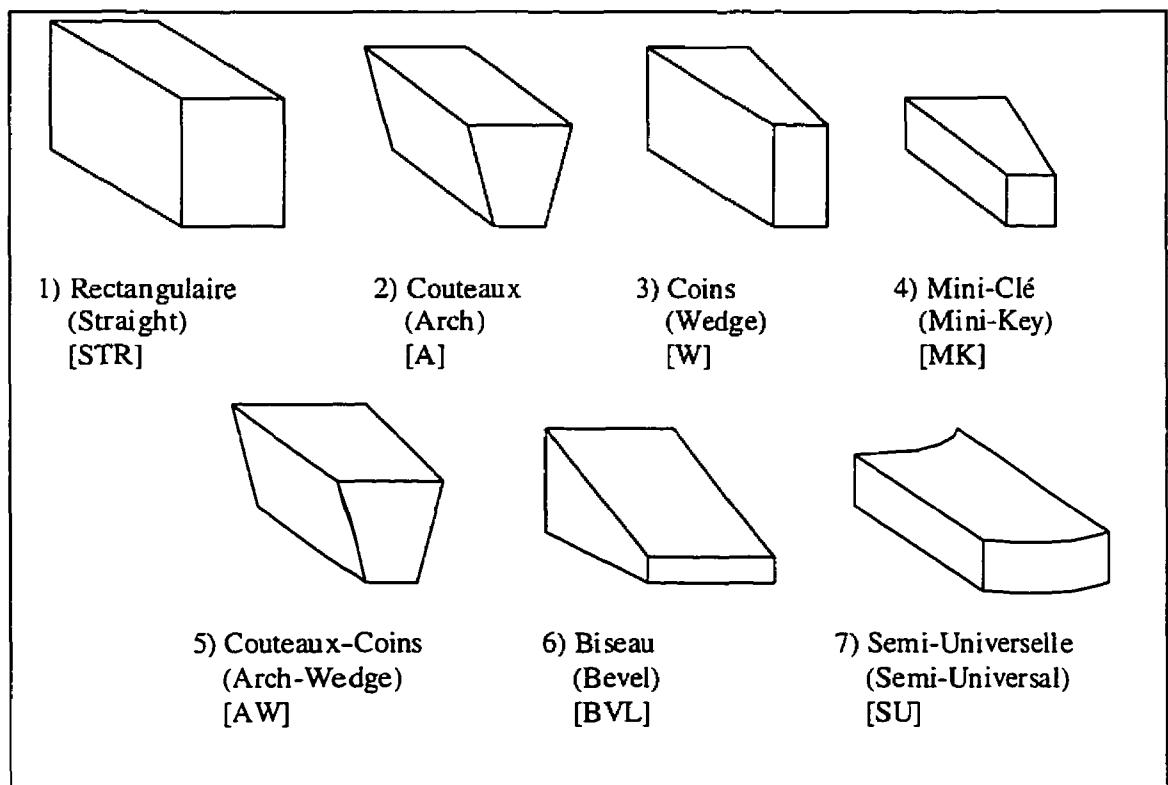


Figure 1.4 : Forme standard des briques disponibles pour les produits façonnés

1.6.2 Avec des non façonnés

Les réfractaires non façonnés étaient d'abord utilisés comme produits servant à la réparation à chaud ou à froid des garnissages façonnés ou comme remplissage d'espace vide non comblé par les briques [32]. Depuis quelques années, ils peuvent être utilisés comme construction monolithique pour la paroi de sécurité et, plus rarement, la paroi d'usure. Ils sont installés par coulage ou par vibration. Comme plusieurs auteurs ont déjà mentionné [33,34,35,36], les avantages recherchés sont :

- 1) réduire la consommation spécifique des réfractaires (kg/t d'acier) ;
- 2) réduire les coûts d'installation (main-d'œuvre, intrants) ;
- 3) augmenter la disponibilité des poches de coulée ;
- 4) améliorer les réparations pour obtenir un garnissage infini ;
- 5) simplifier les installations nécessaires pour le garnissage ;
- 6) réduire ou éliminer les joints.

La route pour arriver à ces résultats est encore parsemée d'embûches. La première cause des problèmes rencontrés a longtemps été associée au non respect des procédures d'installation [32]. Mais, ils étaient aussi reliés à la nature du béton, qui n'était qu'un mélange d'agrégats et de ciment alumineux. La présence du CaO dans le ciment (15 % à 25 %) augmente sensiblement la proportion de phase liquide à haute température et nécessite 8 % à 15 % d'eau. Le produit final possédait alors une très forte porosité [36].

Aujourd’hui, une plus grande importance a été portée aux différentes méthodes d’installation et de préparation du réfractaire. Le béton représente maintenant un mélange précis d’agrégats de différentes grosseurs et de haute qualité avec un liant et des additifs (défloculants, adjuvants, liquéfiants, plastifiants, accélérateurs et retardateurs de prise), qui servent à améliorer certaines propriétés [37]. La deuxième cause est reliée aux méthodes de fixation qui assurent le maintien et l’intégrité du béton.

Les matériaux utilisés sont les mêmes que ceux des produits façonnés : bétons d’alumine (andalousite, bauxite, silicates d’alumine, alumine tabulaire et fondu, mullite), bétons basiques (dolomie, magnésie, spinelle) et bétons à base de zircone. Les propriétés des bétons dépendent essentiellement de la nature des agrégats (synthétiques, naturels, calcinés ou non), de la granulométrie, de la nature de la liaison (céramique, hydraulique, chimique ou organique), de la porosité et de leur distribution [36]. Les premiers développements ont conduit à des bétons alumineux à basse, ultra basse teneur et sans ciment. Ceci a été possible par l’utilisation de poudres ultra fines, de fumée de silices et d’alumines réactives, de défloculants et par une diminution de la teneur en ciment et de la quantité d’eau nécessaire. Ces produits présentent généralement une faible porosité, une meilleure résistance à l’abrasion, au fluage et à la fissuration qu’un béton conventionnel. Un béton sans ciment montre une meilleure résistance à la corrosion que les bétons à faible teneur en ciment. Les propriétés peuvent aussi être améliorées par l’ajout d’additifs. Les fibres en acier inoxydable permettent d’augmenter la résistance mécanique à chaud et aux chocs thermiques. Mais, les bétons alumineux sont

incompatibles avec un laitier basique. C'est pourquoi les développements actuels se concentrent sur les bétons basiques. Des bétons de magnésie-spinelle [38], d'alumine-spinelle [39], de magnésie-zircon [40] ont déjà donné des résultats satisfaisants ou du moins encourageants comme revêtement monolithique d'usure.

1.7 Facteurs influençant la durée de vie

D'une part, plusieurs types de réfractaire sont disponibles pour le design d'une poche de coulée : des produits façonnés ou non façonnés, alumineux, basiques ou spéciaux. D'autre part, des conditions opératoires très variées affectent la performance réfractaire d'une poche.

Prendergast [41,42] a défini un facteur de sévérité d'usure en divisant les variables en deux catégories : les facteurs intrinsèques et extrinsèques. La pondération de ces facteurs varie selon les conditions opératoires de chaque aciérie et conduit à différents mécanismes d'usure selon leur sévérité respective, ce qui entraîne des procédures différentes de sélection réfractaire. Le facteur général de sévérité permet ainsi de déterminer la performance du réfractaire approprié sous des opérations similaires, mais des conditions différentes. Pour obtenir une meilleure performance réfractaire, il s'agit de trouver le facteur prédominant et de se concentrer sur ce dernier afin de diminuer ou d'augmenter son effet. La Figure 1.5 illustre l'interaction entre ces facteurs selon Prendergast [41,42] et Hubble [43].

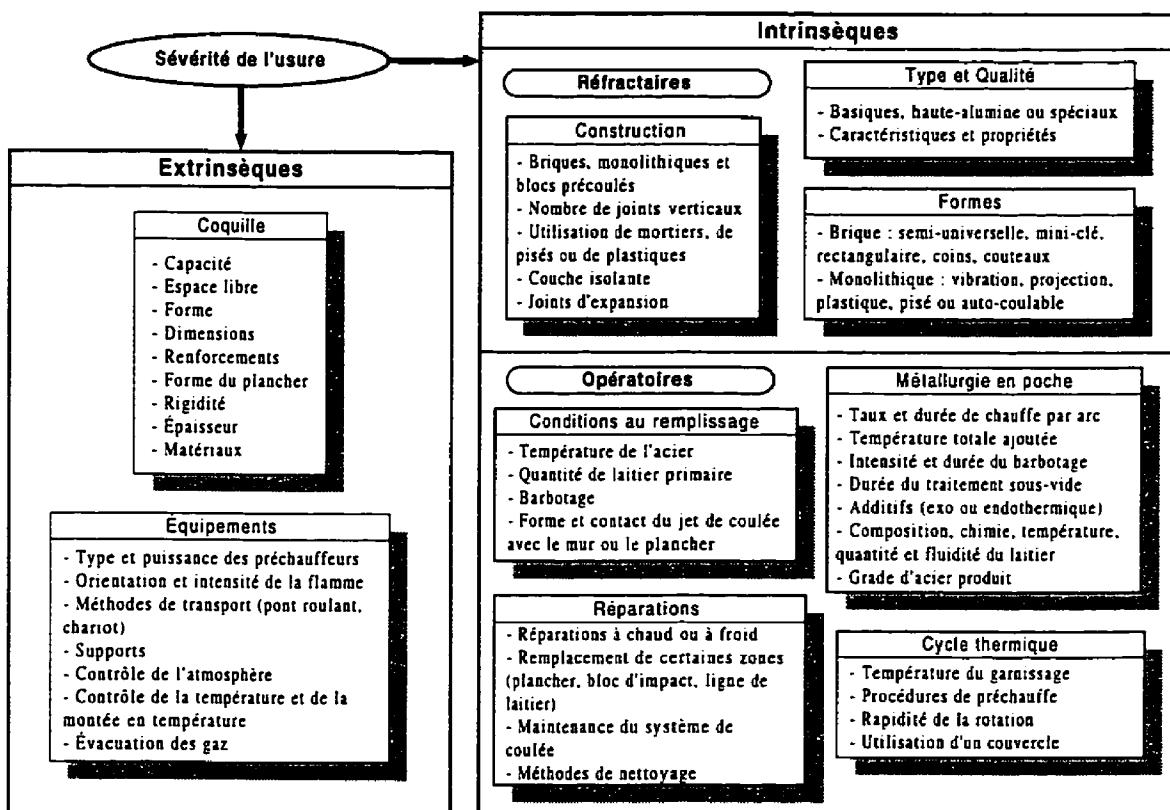


Figure 1.5 : Facteurs influençant la durée de vie réfractaire d'une poche de coulée

La rigidité de la coquille devient un facteur important lorsque des matériaux basiques sont installés à cause de leur plus grande conductivité thermique. Par conséquent, surtout pour les poches ovales ou oblongues, les briques ont tendance à se déplacer vers l'intérieur à cause des contraintes thermiques de compression. Des espaces vides entre le garnissage de travail et de sécurité sont ainsi créés et causent l'instabilité du garnissage. C'est pourquoi il faut minimiser les contraintes et les dilatations thermiques en choisissant des matériaux avec un faible coefficient de dilatation et un module d'élasticité élevé. Au besoin, des mortiers ou des joints de dilatation peuvent être installés pour ajuster les joints d'expansion. Il faut aussi considérer le fond de la poche car la force

d'impact causée par le jet de coulée excède parfois le critère de résistance de la coquille métallique, surtout pour les fonds en bassin non renforcés. Cet effet était autrefois masqué par l'installation de briques argileuses avec gonflement. Peu de solutions existent pour corriger ce problème, excepté de recommencer complètement le design de la coquille. Outre le design, une importance est accordée aux procédures et à l'équipement nécessaire pour une chauffe et une dilatation thermique adéquate du réfractaire. Non seulement la face chaude du garnissage de travail doit être à une certaine température, mais il faut aussi que les couches réfractaires emmagasinent une certaine quantité d'énergie thermique. Les chauffes rapides causent des contraintes supplémentaires à la coquille et des chocs thermiques. Une période prolongée de chauffe et une atmosphère riche en oxygène causent l'oxydation du carbone dans les briques de magnésie carbone.

En ce qui concerne les facteurs opératoires, il faut minimiser le cycle thermique de la poche en utilisant des couvercles, en respectant les périodes de chauffe et par une rotation rapide des poches. Ceci permet de conserver un régime thermique permanent du garnissage et empêche les chocs thermiques. La dolomie est grandement affectée par ce facteur. Les pratiques erronées, causées par simple négligence et mauvaise gestion thermique et opérationnelle de la poche, conduisent souvent à un arrêt prématuré de la campagne de la poche. La température joue un rôle important car la cinétique des réactions est grandement affectée. C'est pourquoi la température de l'acier au four doit être la plus basse possible afin de limiter les chauffes par arc électrique et ajouter des additifs exothermiques. Un barbotage adéquat permet une neutralisation plus rapide du

laitier primaire en ajoutant les oxydants lors du remplissage de la poche. Le laitier est sans aucun doute le facteur le plus important. Sa composition doit être compatible avec le réfractaire. Son agressivité augmente avec la fluidité, la température, la quantité totale et le temps de contact, mais est atténuée par l'ajout de magnésie ou de chaux dolomitique. La présence de carbone permet de diminuer la mouillabilité et la pénétration du laitier dans la brique. Il faut aussi considérer la porosité et la perméabilité du matériau. Le choix réfractaire dépendra donc des différents laitiers nécessaires à la production des divers grades et qualités d'acier (désulfurés, teneur en carbone, calmés à l'aluminium ou au silicium). Pour des laitiers de différentes compositions, les briques de magnésie-chrome constituent un bon compromis. Pour des laitiers basiques ou de désulfuration, les briques de magnésie-carbone et de dolomie donnent d'excellents résultats. La production d'acier à ultra basse teneur en carbone nécessite un réfractaire qui contient peu ou pas de carbone. Les méthodes de construction réfractaire de la poche dépendent des formes choisies. Les briques semi-universelles permettent de diminuer le nombre de joints par rapport aux briques ordinaires. Les blocs en béton précuit possèdent de meilleures propriétés que les briques et prolongent ainsi la durée du plancher. À cause des variations de prix, il se peut qu'il soit préférable de choisir un réfractaire de plus faible qualité avec réparation durant la campagne de la poche qu'un réfractaire de haute qualité plus dispendieux. L'important est de balancer l'usure des différentes zones réfractaires à un niveau acceptable avec ou sans réparation.

1.8 Revue bibliographique

Plusieurs auteurs ont tenté de quantifier l'influence des variables opératoires sur la durée de vie des poches de coulée. Prendergast [41,42] a classé les facteurs en deux catégories bien distinctes : intrinsèques et extrinsèques. Mais, il ne discute que de l'influence qualitative des variables. Cette section traite des travaux qui ont contribué à codifier la durée de vie des poches en fonction de ces différents facteurs.

1.8.1 Facteurs extrinsèques

Aucun modèle n'a été élaboré pour relier directement les facteurs extrinsèques à la durée de vie de la poche. En effet, ces variables ont plutôt une influence indirecte et sont fixes dans une aciéries. Les poches possèdent le même design et l'équipement pour les brûleurs est rarement changé après leur achat. Il faut beaucoup de temps pour observer leurs impacts sur la performance réfractaire, même si ces paramètres ne sont pas négligeables. Il est essentiel de rappeler leur influence.

Design de la coquille

Le changement réfractaire et l'arrivée du four-poche ont modifié complètement les contraintes induites dans la coquille. Les propriétés thermomécaniques des réfractaires basiques diffèrent des réfractaires alumineux. Les articles de Bell et de Palin [44] ou de Alder et de Masaryk [45] peuvent être consultés à ce sujet. Les couches réfractaires peuvent subir une dilatation thermique importante qui exerce des contraintes supplémentaires sur la coquille. Selon son design, la valeur de ces contraintes peut excéder rapidement la résistance mécanique du matériau à certains endroits de la coquille.

Il faut aussi considérer l'aspect conducteur des réfractaires basiques qui peuvent augmenter la température de la coquille et causer une déformation permanente. Le comité AISE a même dû réviser et modifier certains critères de design de la coquille [46]. Hubble [43] a même remarqué que la performance réfractaire d'une poche, qui subit un barbotage magnétique, est inférieure à cause des fissures associées à la structure spéciale de la coquille. Wei et Singh [47] ont montré qu'un niveau de températures trop élevées génère des contraintes supplémentaires dans la coquille et dans les couches réfractaires qui causent une flexion ou une déformation excessive de la coquille ou une instabilité du garnissage. La durée de vie de la poche en est donc affectée. C'est pourquoi ils ont développé une méthode simplifiée pour évaluer rapidement le choix réfractaire et le design de la coquille. Pour corriger ce problème, Schacht [48] a remarqué que l'utilisation d'un réfractaire ayant un faible module d'élasticité augmente la durée de vie du garnissage à cause du plus faible niveau des contraintes engendrés. Il accorde une grande importance à la déformation de rupture du matériau au détriment de la résistance mécanique à chaud. Bien que la mesure du module d'élasticité donne une idée de la réfractarité du matériau, la courbe de la contrainte induite en fonction de la déformation du matériau doit être utilisée pour étudier la structure de la coquille [49]. Il faut s'assurer que l'intégrité structurale de la poche soit respectée pour obtenir de meilleures performances réfractaires.

Équipements de préchauffe

Il existe très peu d'articles sur ce sujet. Le plus important est celui de Saunders [50] qui a démontré l'importance du contrôle du maintien en température et de la montée en température et de l'efficacité d'absorption ou de la quantité de chaleur absorbée par le réfractaire sur l'intégrité réfractaire. La position du préchauffeur entre aussi en compte. Lorsque la poche est chauffée avec un brûleur positionné horizontalement, la partie supérieure du garnissage est toujours un peu plus chaude que la partie inférieure. Par conséquent, la dilatation et les contraintes thermiques peuvent être différentes entre ces deux zones. C'est pourquoi un brûleur positionné à la verticale permet une expansion uniforme du garnissage avec un niveau minimum de contraintes thermiques. Aussi, une chauffe trop rapide a plusieurs conséquences. Premièrement, la face chaude du garnissage est chauffée à une température normale d'opération, mais la chaleur n'a pas été emmagasinée dans les autres couches réfractaires. Elles ne seront pas nécessairement à la température prévue. Deuxièmement, l'expansion thermique de la face chaude génère des contraintes radiales de traction qui sont transmises à la coquille encore froide. Ces contraintes ne sont pas libérées jusqu'à ce que l'énergie thermique soit absorbée par le garnissage et permette la dilatation de la coquille. Une solution est de chauffer l'extérieur de la coquille. Troisièmement, elle est la principale cause des chocs thermiques de la brique ou du réfractaire utilisé. Le taux de chauffe doit être déterminé selon le type de réfractaire installé [41].

1.8.2 Facteurs intrinsèques

À l'opposé des facteurs extrinsèques, certaines relations ont été trouvées pour évaluer quantitativement l'influence des facteurs intrinsèques.

Design réfractaire

Hubble [43] est le premier qui a réussi à expliquer les différences de performance réfractaire entre quatre aciéries. Le choix de la qualité et de la forme du réfractaire, la méthode de réparation et les traitements effectués au four-poche représentent les principales variables. Au point de vue réfractaire, la paroi en contact avec le bain était constituée de réfractaires alumineux (briques et béton). Le béton à haute teneur en alumine avec une faible teneur en ciment a donné les mêmes performances que des briques de la même famille. Les lignes de laitier étaient construites avec des briques en magnésie-carbone (5 % et 15 % C) avec ou sans fibre métallique. La vie de cette zone pour une aciérie qui effectuait seulement un barbotage était plus élevée qu'une aciérie qui possédait un four-poche. La vie d'un plancher construit avec des blocs en béton précuit a permis d'atteindre celle de la poche avec quelques réparations mineures. Généralement, le plancher est remplacé ou réparé au milieu de la campagne. L'utilisation d'un réfractaire différent derrière la ligne de laitier au garnissage de sécurité n'a pas amélioré la performance de la ligne de laitier. Dans un autre article, Hubble a modifié le garnissage pour des briques semi-universelles à 70 % Al_2O_3 pour la ligne de sécurité sauf le plancher où des briques standards sont encore utilisées [51]. Des briques semi-universelles en magnésie-chrome ont été installées pour la ligne de laitier et le plancher. Le baril est

monté avec des briques à 80 % Al_2O_3 . Le bloc d'impact est fait à partir de briques magnésie-carbone à 5 % C avec ajout de fibres métalliques car ce matériau possède une bonne résistance à chaud. La vie de la poche a pu ainsi être triplée.

Bailey, Bell et Walker [3] ont doublé la vie de la poche en changeant la configuration réfractaire. Pour le garnissage de travail, des briques en magnésie-carbone (10 % C) ont été installées à la ligne de laitier, des briques de magnésie-carbone (5 % C) au baril et des briques de dolomie à liaison résine au plancher. Pour le garnissage de sécurité, des briques de magnésie-chrome ont été installées derrière la ligne de laitier et des briques à haute teneur en alumine (60 % Al_2O_3) derrière la paroi de travail.

Depuis, l'utilisation des réfractaires basiques a grandement augmenté la durée de vie des poches. Les exemples sont nombreux [17,22,25,26,28,31,52,53]. Cette augmentation de performance, qui provient de plusieurs aciéries, est suffisante pour justifier l'influence du choix réfractaire sur la durée de vie. La principale raison est leur compatibilité avec le laitier de désulfuration [13,14]. La basicité du laitier joue un rôle déterminant et devient un des facteurs clés qui affecte l'usure du réfractaire. Aussi, la présence du carbone a permis de diminuer grandement la mouillabilité du réfractaire par le laitier ou l'acier. Dans les travaux de Beurotte, Provost et Tassot [27], l'utilisation de briques en dolomie-carbone (noir ou graphite) a permis d'augmenter la durée de vie de 10 à 20 % pour atteindre 74 coulées avec un traitement RH-OB. Ce matériau montre une bonne résistance à la corrosion et à l'écaillage, mais une résistance mécanique inférieure à

celle des briques de dolomie. L'inconvénient des briques basiques est leur plus grande conductivité thermique. Dans certains cas, il est nécessaire d'ajouter une couche isolante supplémentaire pour éviter une déformation permanente à chaud de la coquille. Sinon, Dawson, Lythe et Williams [31] ont remarqué qu'une dilatation et une flexion excessive de la coquille peuvent se produire et provoquent l'ouverture des joints et le développement de profondes fissures verticales. Les matériaux basiques sont aussi sensibles aux chocs thermiques et exigent des procédures plus rigoureuses pour maintenir la température du garnissage entre 950 °C et 1 100 °C. De plus, une période prolongée d'une chauffe conduit à la dégradation prématuée des liens carbones dans un réfractaire à basse teneur en carbone ou à l'oxydation du carbone pour une plus forte teneur en carbone. L'ajout d'antioxydants a permis de régler partiellement ce problème.

Conditions opératoires

Dans ses travaux, Hubble [51] réussit à tripler la vie de ses poches (15 à 45 coulées) en modifiant le design réfractaire et les conditions opératoires. Le Tableau 1.2 montre l'importance relative de la sévérité des six principaux facteurs. La première et la troisième route métallurgique incluent un ajout d'additifs exothermiques et d'alliages après l'écumage de la poche, une chauffe de l'acier par arc électrique et un traitement de dégazage. La deuxième et cinquième route excluent le dégazage. La quatrième route ne subit aucun traitement en poche ni écumage. Elle ne reçoit que les additifs nécessaires avant d'être envoyé à la coulée continue. L'échelle 10 correspond à une plus forte sévérité alors que l'échelle 5 correspond à une plus faible sévérité.

Tableau 1.2 : Sévérité relative de l'usure réfractaire pour différentes routes métallurgiques

Facteurs	Blooms		Brames		
	1	2	3	4	5
Routes métallurgiques					
Température de l'acier	7	7	7	10	7
Érosion du jet de coulée	8	8	8	10	8
Temps de résidence	10	9	7	5	8
Agressivité du laitier	10	9	7	5	8
Fissures thermomécaniques	10	9	7	5	8
Cycles thermiques	10	10	6	5	6
Total	55	52	42	40	45

Tableau 1.3 : Effet du temps de résidence et du nombre d'impulsions des arcs électriques sur la vie de la poche

Facteur	Vie en nombre de coulées					
	25	30	35	40	45	50
Temps de résidence (min)	280	260	230	200	170	130
Nombre d'impulsions	750	670	560	440	350	200

D'après le Tableau 1.3, la vie de la poche augmente énormément lorsqu'on diminue le temps de résidence moyen par coulée et le nombre d'impulsions électriques. Un ajout de 6 à 8 % de magnésie dans la chaux a permis de diminuer l'agressivité du laitier. L'épaisseur de ce dernier a été ajustée pour éviter les dommages causés par les étincelles de l'arc et pour optimiser la durée du barbotage selon l'excès en température nécessaire du laitier pour chauffer l'acier à la bonne température. La diminution du temps de résidence a permis une rotation plus rapide des poches. Il suggère l'utilisation d'additifs exothermiques car cette méthode permet de réduire la température de l'acier au four et la durée de la chauffe par arc. Ces deux variables peuvent être très nuisibles à la

poche. Finalement, des couvercles sont déposés lorsque la poche est au repos, avec ou sans acier à l'intérieur.

Après la démonstration des résultats de Hubble, Van Wijngaarden [1] a tenté de démontrer quantitativement l'effet des différents facteurs sur la durée de vie de la ligne de laitier car l'usure de cette zone limite la vie de la poche. Il s'est surtout concentré sur la composition chimique du laitier, l'intensité de barbotage, de la puissance fournie au four-poche et du degré de la préchauffe du garnissage. La composition du laitier dépend du grade d'acier et de la route métallurgique. Le procédé métallurgique inclut un four-poche et une unité VOD. La production d'acier resulfuré ($S < 0,10\%$) conduit à un laitier plus riche en FeO (3 à 5 %) et en MnO (10 à 20 %) avec une faible basicité (1,5 à 2). Ce laitier est donc plus néfaste aux réfractaires basiques, plus spécialement ceux qui contiennent du carbone. La production d'acier au silicium ($< 1,5\%$) possède aussi une faible basicité. Les aciers désulfurés conduisent à un laitier qui a une faible teneur en FeO et MnO ($< 1\%$) et une basicité élevée (2,5 à 3,5). C'est pourquoi des briques de magnésie-carbone ont été installées à la ligne de laitier. Une période prolongée ou une négligence de la préchauffe du garnissage, un faible barbotage en présence d'un laitier surchauffé ou une chauffe trop rapide par arc électrique sont tous des facteurs qui diminuent de façon drastique la durée de vie de la poche. Ils causent une corrosion prématuée ou un écaillage de la brique, généralement localisé aux joints.

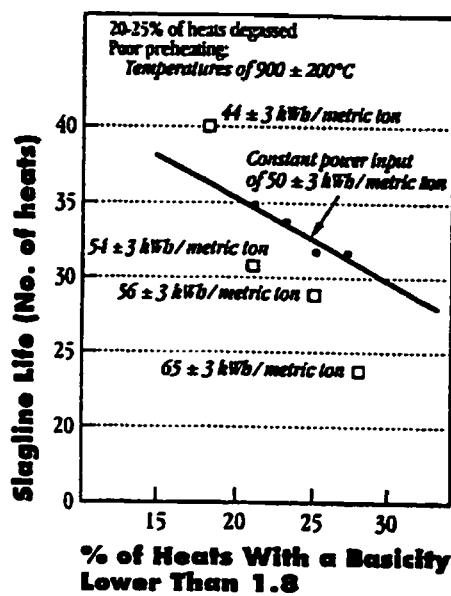


Figure 1.6 : Effet de la basicité et de la puissance fournie sur la vie de la ligne de laitier

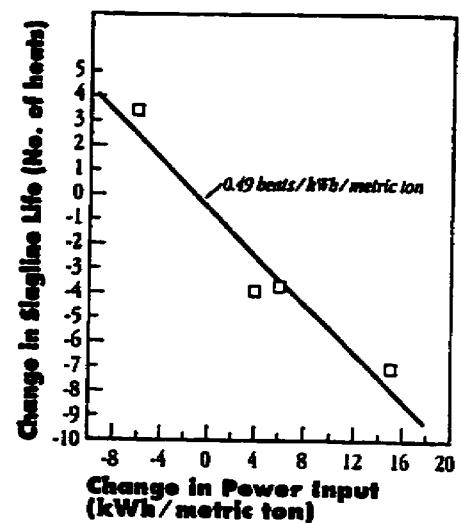


Figure 1.7 : Effet d'un changement de puissance sur la vie de la ligne de laitier

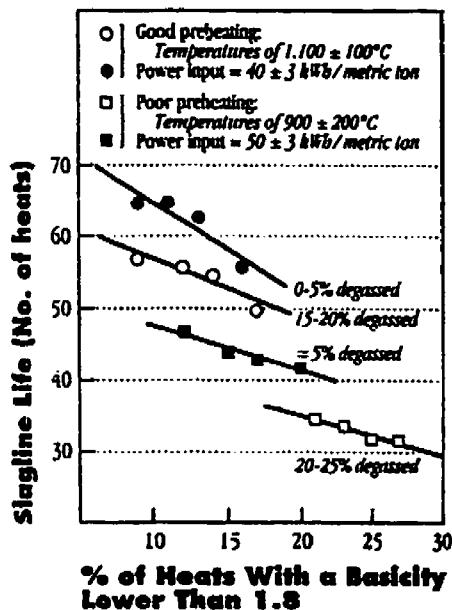


Figure 1.8 : Vie de la ligne de laitier en fonction de la basicité et du nombre de coulées dégazées pour différentes préchauffes et puissances

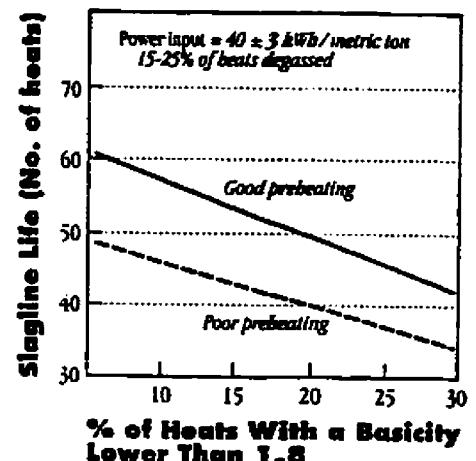


Figure 1.9 : Influence du degré de la préchauffe sur la vie de la ligne de laitier

La basicité du laitier est exprimée en pourcentage selon la proportion de coulées reçues avec une basicité inférieure à 1,8. D'après la Figure 1.6, avec un taux de chauffe constant de 50 kW-h/t, une augmentation du pourcentage relatif de 10 à 30 % du nombre de coulées ayant une basicité inférieure à 1,8 diminue la vie de la ligne de laitier de 10 coulées. Pour une proportion de 28 %, la vie de la ligne de laitier passe de 24 à 31 coulées lorsque la puissance est diminuée de 65 à 50 kW-h/t. Selon la Figure 1.7, sachant que la puissance de base fournie doit être de 50 kW-h/t, la vie diminue d'une demi-coulée pour chaque kW-h/t supplémentaire. Au four-poche, augmenter la température du bain de 20 °C nécessite 10 kW-h/t supplémentaire. Par conséquent, la vie est diminuée de 5 coulées. D'après la Figure 1.8, pour une poche qui est soumise aux mêmes conditions de préchauffe et de puissance et qui a reçu la même proportion de coulées avec une basicité inférieure à 1,8, une augmentation de 15 % de la proportion de coulées dégazées diminue la vie de 5 à 8 coulées. Finalement, à la Figure 1.9, une mauvaise préchauffe de la poche peut diminuer la vie de la ligne de laitier de 10 coulées. Avec ces résultats, il est possible de prédire la vie de la ligne de laitier constituée de briques en magnésie-carbone pour différentes opérations métallurgiques.

Il est très difficile d'accumuler manuellement toutes les données opératoires pour une poche en particulier pour différentes raisons pratiques : négligence du personnel, oubli, perte des feuilles, etc. C'est pourquoi Coates, Jacobs et Miglani [54] ont développé un système informatisé d'acquisition de données. Les variables observées sont : la composition et la quantité du laitier, la température de l'acier, le temps de résidence,

l'énergie fournie pendant le barbotage, les conditions imposées à la poche durant sa rotation et la fréquence des coulées ayant eu une injection ou un traitement sous vide. L'étude couvre 116 campagnes complètes qui représentent plus de 4 000 coulées. Seules, les poches retirées à cause d'une usure de la ligne de laitier ont été conservées. Les campagnes dont l'acier est resté plus de 8 heures dans la poche ont aussi été retirées car la vie ne semblait pas affectée par cette période prolongée de l'acier dans la poche. D'après la Figure 1.10, la vie de la ligne de laitier diminue avec le temps de contact moyen par coulée.

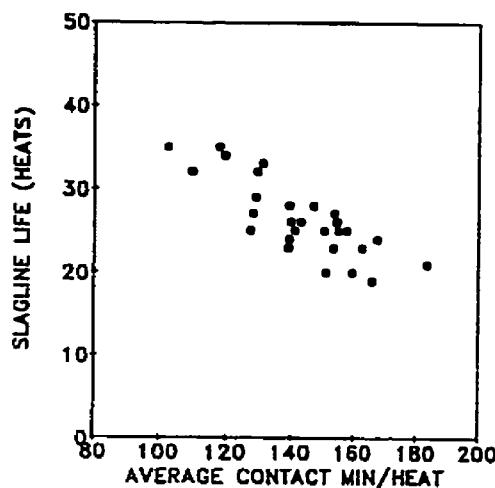


Figure 1.10 : Influence du temps de contact moyen par coulée sur la durée de vie de la ligne de laitier

Aucun autre résultat n'est montré. Par contre, ils ont remarqué que le temps d'attente entre le remplissage de la poche au four et le traitement en poche varie énormément d'une coulée à l'autre. Pour chaque période de 10 minutes d'attente, le temps de raffinage au four-poche augmente de 12 minutes. Par conséquent, il faut ajouter 50 kW·h additionnels au four-poche pour compenser les pertes thermiques. En plus, la

présence du laitier primaire résiduel reste en contact plus longtemps avec la ligne de laitier et cause une usure prématuée. La diminution de ce temps d'attente a permis d'augmenter considérablement la durée de vie du réfractaire. Elle augmente aussi lorsque le nombre de coulées par jour est augmenté. Ceci s'explique par l'oxydation du carbone dans les briques de magnésie-carbone lors de la préchauffe du garnissage. Les auteurs notent l'importance de définir les raisons pour lesquelles une campagne de la poche est interrompue. Non seulement ceci permet de déterminer les zones faibles de la poche, mais empêche une fausse interprétation des résultats. Effectivement, l'amélioration de la performance de la ligne de laitier a été possible en changeant le matériau du bloc d'impact car cette zone s'usait très rapidement. Aucun modèle complet n'a été élaboré.

De leur côté, Erny et Sistilli [2] ont aussi développé un système informatisé qui a permis de compiler plus de 900 variables opérationnelles pour chaque coulée produite. L'historique des opérations effectuées a pu facilement être récupéré. L'étude inclut les données de 63 campagnes complètes. Les variables opératoires retenues sont : la température de l'acier au remplissage de la poche, la température du réfractaire durant la rotation, le temps de contact moyen de l'acier, le temps de barbotage et la fréquence des chauffes par exothermie et de désulfuration. Pour déterminer l'influence d'une variable, une distribution de fréquence est définie et la vie moyenne des poches est calculée pour chacune de ces fréquences. Le facteur de performance relative est défini par le ratio de la vie moyenne obtenue pour chacune de ces fréquences prédéfinies sur la vie moyenne de toutes les poches.

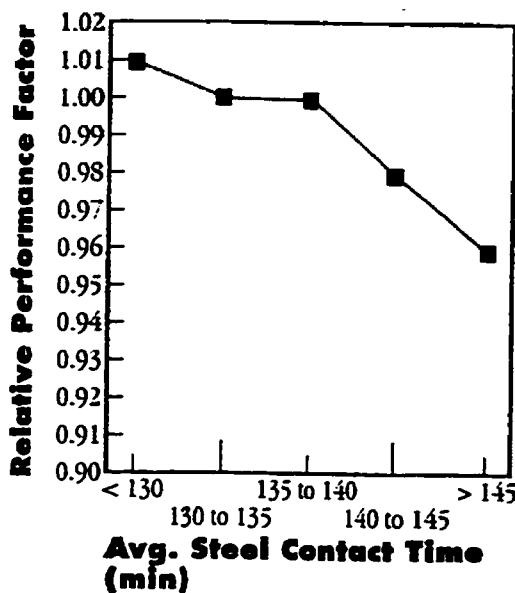


Figure 1.11 : Facteur de performance relatif en fonction du temps de contact moyen de l'acier

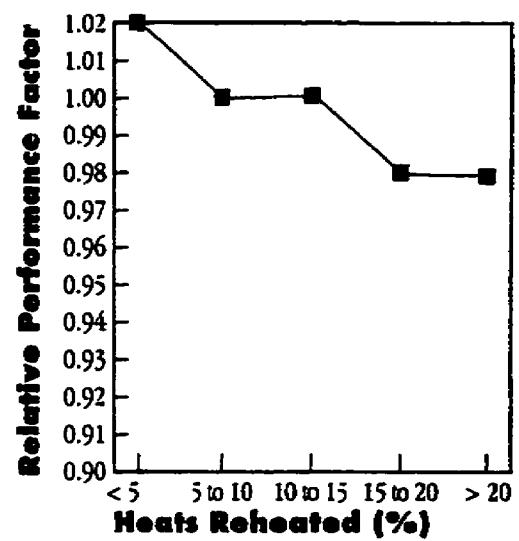


Figure 1.12 : Facteur de performance relatif en fonction du nombre de coulées chauffées par exothermie

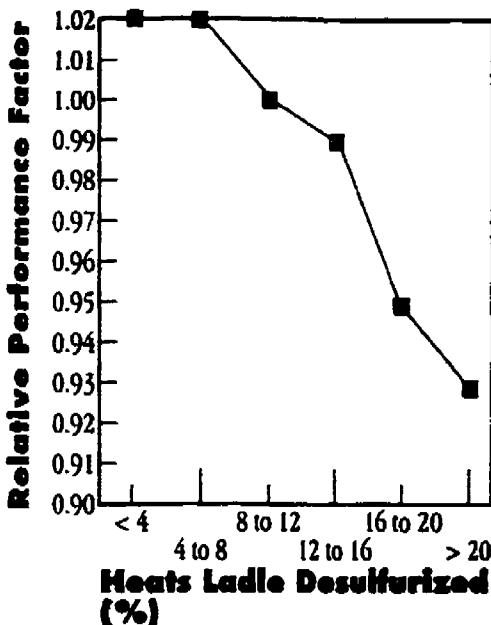


Figure 1.13 : Facteur de performance relatif en fonction du nombre de coulées désulfurées

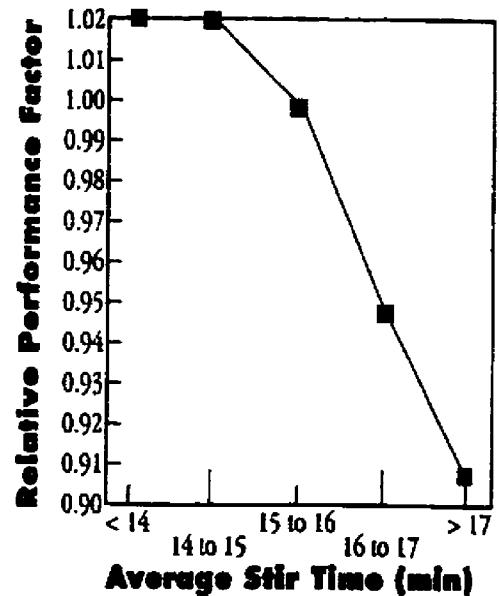


Figure 1.14 : Facteur de performance relatif en fonction du temps de barbotage

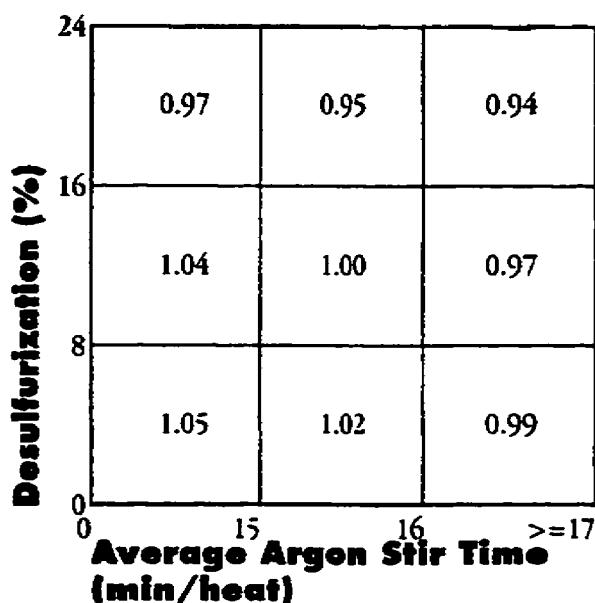


Figure 1.15 : Matrice du facteur de performance relatif

D'après les Figures 1.11 à 1.14, les variables les plus influentes sont le temps de barbotage et la fréquence de désulfuration. La température du garnissage et de l'acier au remplissage n'ont pas montré de tendances significatives. La vie est prédictive en combinant ces deux variables comme montré à la Figure 1.15. Cette méthode permet de visualiser la vie prédictive de la poche au fur et à mesure qu'elle est utilisée. La précision obtenue est de deux coulées. L'amélioration du modèle est en cours de manière à inclure le temps de résidence et la fréquence des chauffes par arc au four-poche.

Bailey, Bell et Walker [3] se sont aussi penchés sur l'influence quantitative des facteurs sur la durée de vie de la ligne de laitier. Les problèmes reliés à la pénétration du laitier dans les joints et les fissures causées par chocs thermiques ont été solutionnés en gérant mieux le cycle thermique de la poche durant sa rotation. À cause des différents

traitements en poche effectués (brassage pneumatique et magnétique, four-poche, système d'injection, traitement sous vide), une optimisation de la composition du laitier a permis d'augmenter la vie de la poche. Au four, le laitier primaire est neutralisé en ajoutant de l'aluminium et du ferro-silicium. La basicité doit être supérieure à 2 avec une teneur inférieure à 5 % en MgO. L'étude totalise les données pour 120 campagnes complètes. D'après la Figure 1.16, il existe une relation linéaire entre les variables opératoires (temps de barbotage, temps de chauffe par arc, temps de résidence, temps de contact moyen par coulée, puissance moyenne fournie) et la durée de vie de la ligne de laitier. Bien que ces relations soient faibles, les statistiques sont significatives. À la Figure 1.17, cinq autres régressions ont été obtenues pour différentes compositions du laitier utilisées ayant toutes des routes métallurgiques différentes. La performance des poches augmente considérablement avec la proportion relative des nuances non désulfurées, mais diminue avec les nuances utilisées pour les rails et les plaques lourdes. D'après le Tableau 1.4, la plupart des variables opératoires diminuent la durée de vie de la ligne de laitier de 1 à 2,5 coulées lorsqu'elles sont prises individuellement.

Tableau 1.4 : Influence d'une variation des valeurs opérationnelles sur celle de la vie de la ligne de laitier

Facteurs opératoires	Unité	Variation	Influence
Temps de contact par coulée	min	+10	-1,66
Puissance moyenne fournie	kW-h	+300	-1
Temps moyen de barbotage	min	+5	-2
Temps moyen de chauffe par arc	min	+5	-2,5
Nuance pour les rails	%	+10	-1,66
Nuance pour les plaques lourdes	%	+1	-1
Nuance non désulfurée	%	+10	+1,43

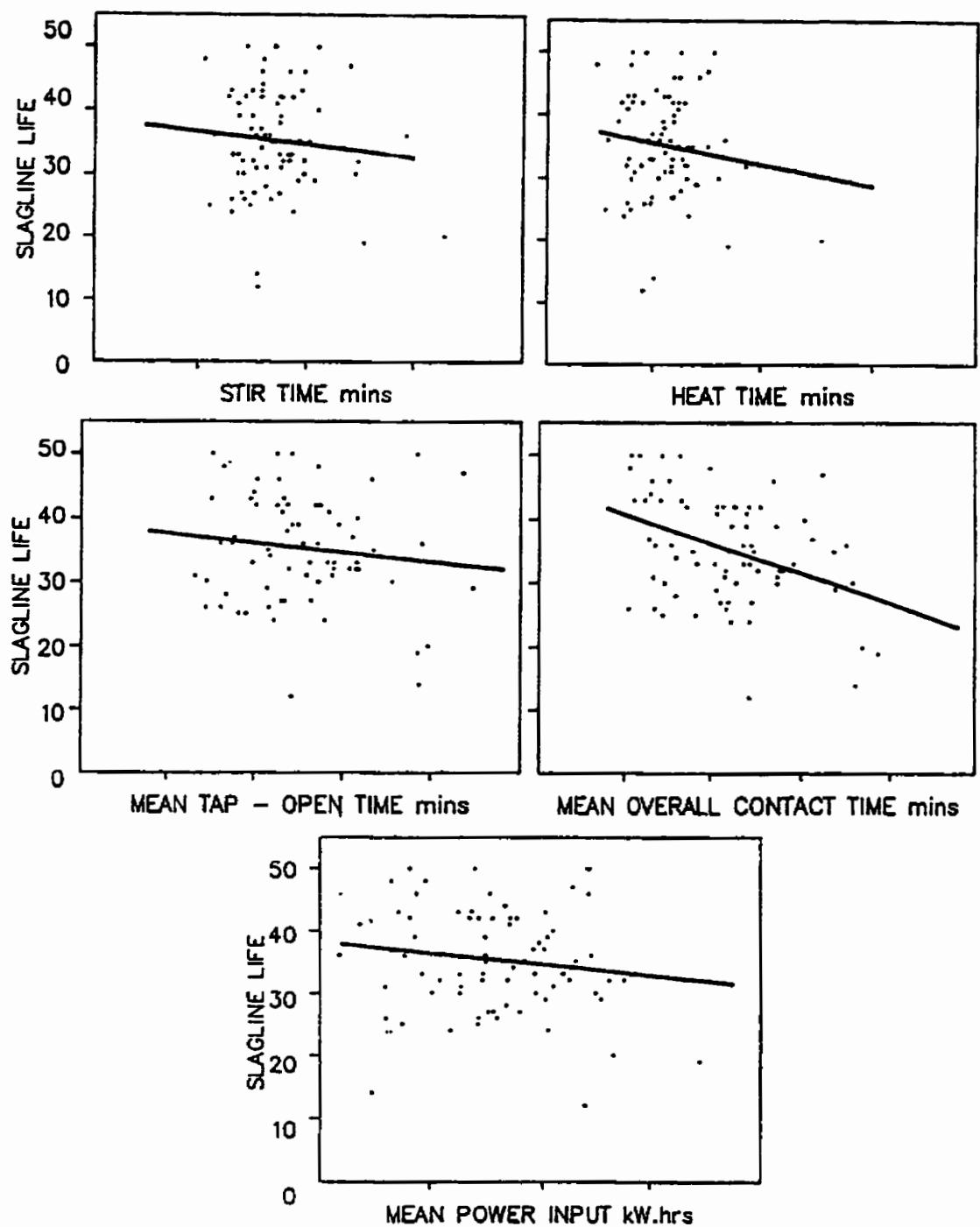


Figure 1.16 : Effet des paramètres opératoires du four-poche sur la durée de vie de la ligne de laitier

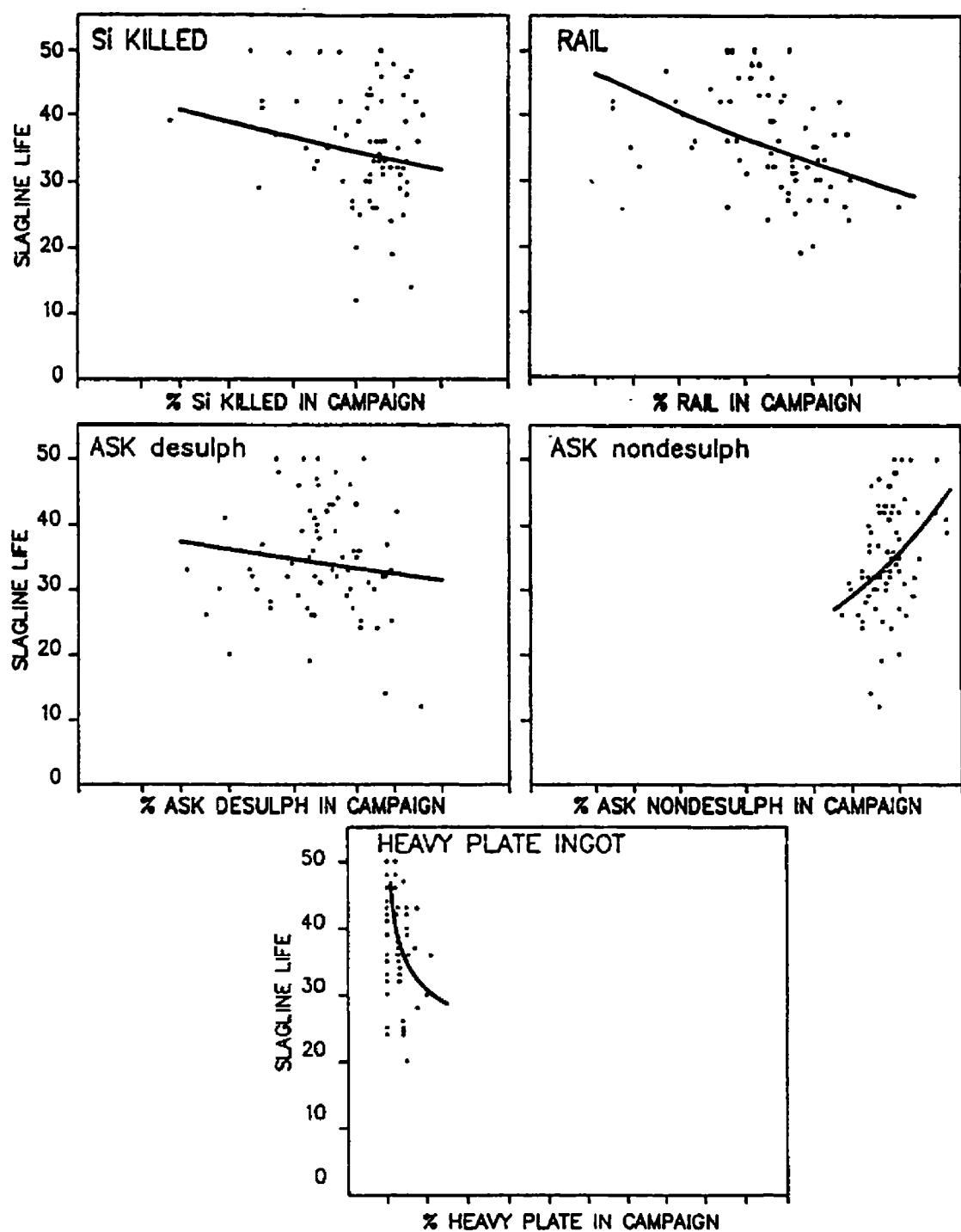


Figure 1.17 : Relation entre la qualité du laitier pour différentes nuances d'acier et la durée de vie de la ligne de laitier

Finalement, Norris a trouvé que les principaux facteurs sont le temps de résidence de l'acier, la durée de la chauffe par arc, le temps de barbotage et la basicité du laitier. Mais, il ne présente aucun résultat [55]. Il a dû modifier complètement le design réfractaire avant d'étudier les paramètres opératoires. À ce moment, il testait encore plusieurs types de réfractaire pour maximiser la vie des différentes zones de la poche (ligne de laitier, bloc de coulée, plancher, la partie inférieure du baril). Il travaille actuellement sur l'élaboration d'un modèle pour prédire la vie de la poche en fonction des paramètres reliés à la corrosion ou l'usure du garnissage de travail. Ce modèle n'a pas encore été publié.

Maintenant que les différentes variables qui peuvent affecter la durée de vie des poches de coulée ont été décrites, il s'agit maintenant de construire un modèle de régression qui permettra de prédire la vie des poches en fonction des facteurs intrinsèques ou extrinsèques. Le prochain chapitre porte sur la compilation d'une enquête envoyée à 21 aciéries canadiennes sur le design réfractaire et les traitements en poche.

CHAPITRE II

Relevé d'une enquête sur lesaciéries canadiennes

À cause des variations technologiques du four-poche et de ses conditions opératoires, chaque aciéries possède une configuration réfractaire bien particulière. Le but de ce chapitre est de modéliser ou d'expliquer la durée de vie des poches de coulée entre plusieurs aciéries qui ont des pratiques métallurgiques différentes. Un questionnaire a été envoyé à 21 aciéries canadiennes en avril 1994. Au total, 16 d'entre elles ont répondu, donnant ainsi 17 configurations réfractaires différentes. Pour préserver l'anonymat, 3 ensembles de réponse ne seront pas montrés : deux usines qui produisent des aciers inoxydables (250 000 tonnes pour 1993) et une troisième, des aciers au carbone. L'annexe A contient la compilation originale brute des résultats.

2.1 Première classification

Les poches ont été divisées selon les deux filières technologiques existantes (four à arc électrique (FAE) ou convertisseur) et en deux sous-catégories différentes, c'est-à-dire selon le produit final et la capacité de la poche. D'après le Tableau 2.1, la capacité de la production canadienne s'élève à 14,6 millions de tonnes en 1993. L'enquête couvre 12,5 de ces 14,6 millions, soit plus de 85 % des aciers produits. Au Tableau 2.2, les poches de coulée sont classées en 3 catégories selon leur capacité : 1) 50-75 tonnes ; 2) 90-140 tonnes ; 3) 230-300 tonnes.

Tableau 2.1 : Estimation de la capacité de production canadienne d'acier en milliers de tonnes

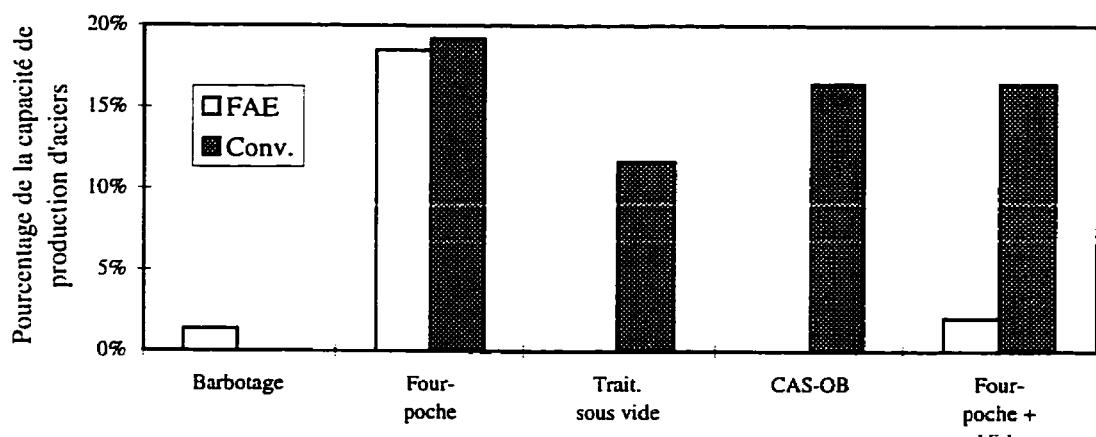
Produits Filière	Billettes		Blooms		Brames		Total	
	Enquête	Manquant	Enquête	Manquant	Enquête	Manquant	Enquête	Manquant
FAE	2 300	1 600	200	-	700	500	3 200	2 100
Convertisseur	1 900	-	2 950	-	4 450	-	9 300	
Total	4 200	1 600	3 150		5 150	500		14 600

Tableau 2.2 : Capacité des poches selon le mode d'élaboration

Grosseur (tonnes)	FAE	Convertisseur
50-75	4	1
90-140	4	2
230-300	-	3
Total	8	6

Les poches considérées se divisent en 4 catégories principales indiquées en caractère italique au Tableau 2.2. Le cas unique sera combiné avec les poches de 90-140 t afin de préserver l'anonymat. La Figure 2.1 illustre les types de traitements en poche en pourcentage de la capacité de production d'acières et montre l'omniprésence de la métallurgie secondaire au Canada. Au Tableau 2.3, les usines marquées par le symbole (†) représentent la même usine, mais avec deux configurations réfractaires différentes des poches de coulée selon le produit à la coulée continue. D'après ce dernier tableau, les mini-aciéries produisent principalement des billettes d'acier bas, moyen et haut carbone. Seulement deux d'entre elles produisent des aciers à faible teneur en soufre (moins de 0,015 %). La production journalière moyenne des mini-aciéries est de 16 coulées pour les poches de 50-75 t et de 12 coulées pour les poches de 90-140 t. Au Tableau 2.4, les usines marquées par le symbole (‡) représentent la capacité de production pour chaque

produit de la coulée continue. À la différence des aciéries électriques, les usines de conversion utilisent la même configuration réfractaire pour leur poche, indépendamment du produit final. Ils produisent principalement des brames (4 450 kt/année) et des blooms (2 950 kt/année) d'acier à faible teneur en carbone, dont la plupart sont désulfurés. Par contre, leur production journalière varie entre 9 et 24 coulées. La numérotation des aciéries sera conservée tout au long de ce chapitre. Pour certains résultats, les réponses de deux aciéries (n° 15 et 16) qui produisent des aciers inoxydables seront présentées pour vérifier leur tendance avec les autres poches. Ces poches ne seront pas analysées à cause de leur différence dans leur procédé métallurgique (VAD/VOD).



Catégorie Procédé	50-75 t		90-140 t		230-300 t		Total
	FAE	Conv.	FAE	Conv.	FAE	Conv.	
Barbotage	1						1
Four-poche	3	1	3	1			8
Trait. Sous vide					1		1
Four-poche + Vide			1		1		2
CAS-OB				1	1		2
Total	4	1	4	2	-	3	14

Figure 2.1 : Les traitements en poche au Canada

Tableau 2.3 : Caractéristiques des mini-aciéries électriques

Catégorie Aciérie n°	50-75 t				90-140 t			
	1	2	3	4	5	6	7†	8†
Capacité annuelle (kt)	300	400	400	200	400	300	600	600
Produit à la coulée continue	Billettes	Billettes	Billettes	Billettes	Billettes	Blooms Brames	Billettes	Brames
Bas carbone	15 %	50 %		5 %	16 %		40 %	75 %
Moyen carbone	65 %	30 %	20 %	35 %	32 %		30 %	23 %
Haut carbone	20 %	20 %	70 %	60 %	52 %	100 %	30 %	2 %
%S < 0,010		60 %			1 %	40 %		20 %
0,010 < %S < 0,015	10 %	40 %	10 %		11 %	30 %		10 %
Barbotage par bouchon	O	O	O	N	O	O	O	O
Barbotage par lance	N	N	N	O	N	N	N	N
Chauffe par arc électrique	O	O	O	N	O	O	O	O
Chauffe par exothermie	N	N	N	N	N	N	N	O
Vide/atmosphère contrôlée	N	N	N	N	N	O	N	N
No. de coulées/jour	16	17	17	8	12	7	12	12
No. de poches disp.	9	7	8	6	6	7	8	8
No. de poches en service	3	4	4	3	3	5	4	4
Capacité de la poche (t)	50	63,5	65,3	72,6	95,3	117,9	136,1	136,1
Vie moyenne (no. coulées)	60	65	40	68	70	60	60	68

Tableau 2.4 : Caractéristiques des aciéries de conversion

Catégorie Aciérie n°	50-140 t			230-300 t		
	9	10	11‡	12‡	13	14
Capacité annuelle (kt)	400	300	1200	850	2100	2400
Produit de la coulée continue	Billettes	Billettes	Billettes Brames	Blooms	Blooms	Brames
Bas carbone	30 %		56 %	80 %	55 %	90 %
Moyen carbone	10 %	90 %	23 %	20 %	40 %	10 %
Haut carbone	60 %	10 %	21 %		5 %	
%S < 0,010		50 %	15 %	75 %	35 %	50 %
0,010 < %S < 0,015		50 %	33 %	25 %	63 %	40 %
Barbotage par bouchon	O	O	O	N	O	O
Barbotage par lance	N	N	N	N	N	O
Chauffe par arc électrique	O	N	O	N	N	O
Chauffe par exothermie	N	O	N	O	N	N
Vide	N	N	N	O	N	O
No. de coulées/jour	15	9	24	10	24	22
No. de poches disp.	8	12	20	9	12	12
No. de poches en service	4	6	11	4	6	5
Capacité de la poche (t)	75	93,4	136,1	230	240	300
Vie moyenne (no. coulées)	55	65	60	100	140	100

2.2 Caractéristiques des poches de coulée

2.2.1 Vie moyenne

La vie moyenne des poches de coulée est illustrée à la Figure 2.2. Les poches peuvent être regroupées en trois régions distinctes : 1) la région A où la capacité des poches varie entre 50 et 140 t avec une vie moyenne de 65 coulées ; 2) la région B où la capacité des poches varie entre 230 et 300 t avec une vie moyenne de 100 coulées ; 3) la région C pour les aciers inoxydables avec une vie moyenne de 17 coulées.

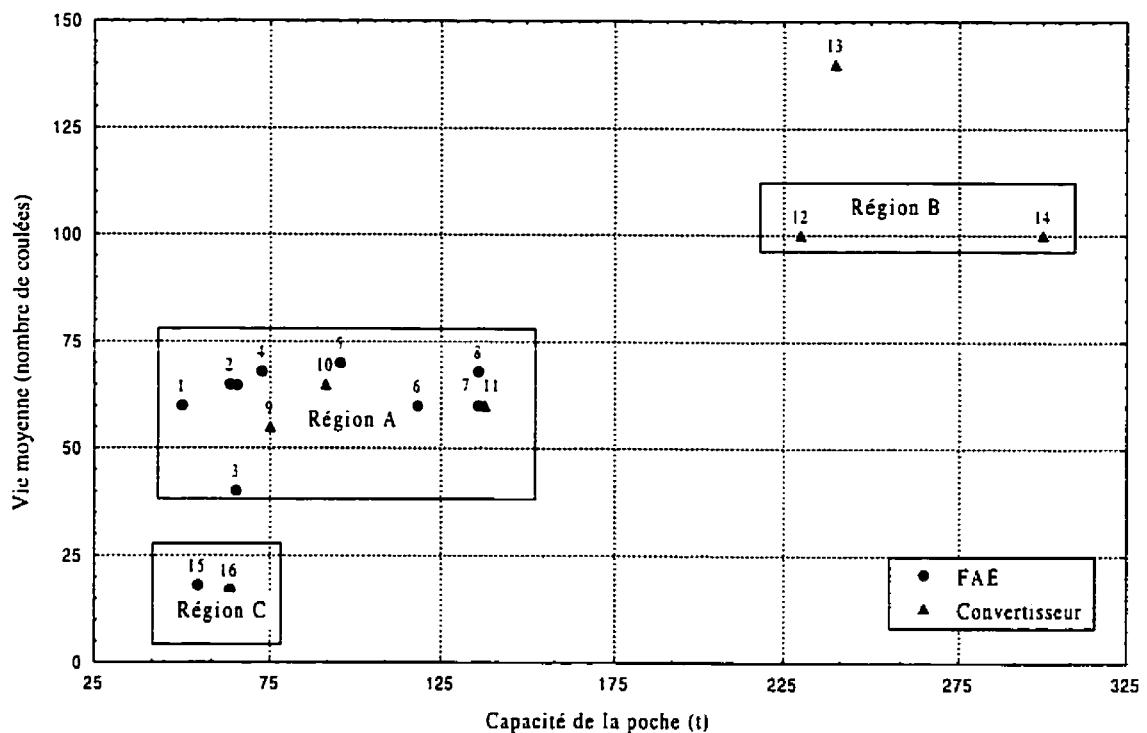


Figure 2.2 : Vie moyenne des poches de coulée selon leur grosseur

2.2.2 Formes, dimensions et poids réfractaires

D'après le Tableau 2.5, la plupart des poches sont circulaires. Par contre, les aciéries électriques utilisent des poches de coulée avec un plancher en bassin tandis que les aciéries de conversion utilisent plutôt un plancher plat.

Tableau 2.5 : Forme des poches de coulée

FAE														
Catégorie Aciérie n°	50-75 t				90-140 t				Convertisseur					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Coquille Plancher	Circulaire Bassin	Circulaire Bassin	Circulaire Bassin	Circulaire Plat	Circulaire Bassin	Circulaire Plat	Circulaire Plat	Circulaire Bassin	Circulaire Plat	Oblongue Bassin	Ovale Plat	Circulaire Plat	Circulaire Plat	Circulaire Plat

La Figure 2.3 montre la relation entre la superficie du garnissage de travail et la capacité de la poche. Cette figure illustre l'influence de la dimension laissée pour l'espace libre. La Figure 2.4 révèle d'autres différences : le poids total des réfractaires n'est pas une fonction directe de la capacité de la poche. Finalement, la Figure 2.5 montre la relation entre le poids total des réfractaires installés et la superficie intérieure du garnissage de travail. Ensemble, ces trois figures montrent que les dimensions de la poche sont des variables à considérer. Les poches se comparent seulement entre une même catégorie.

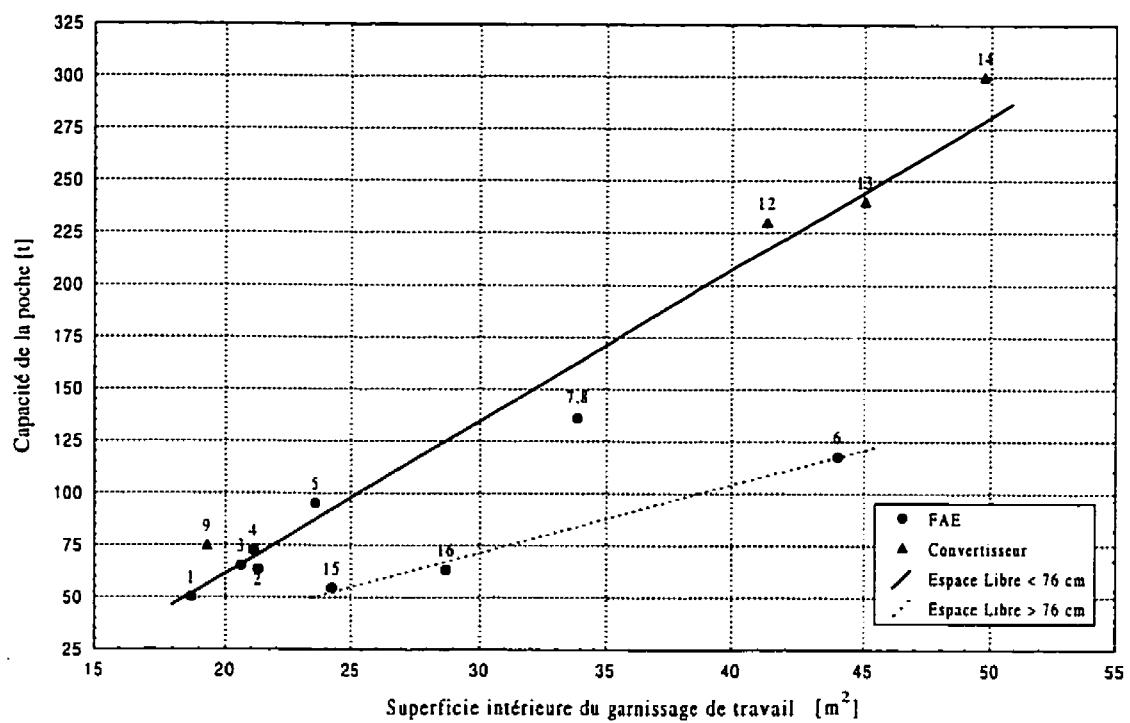


Figure 2.3 : Capacité de la poche en fonction de la superficie intérieure du garnissage de travail

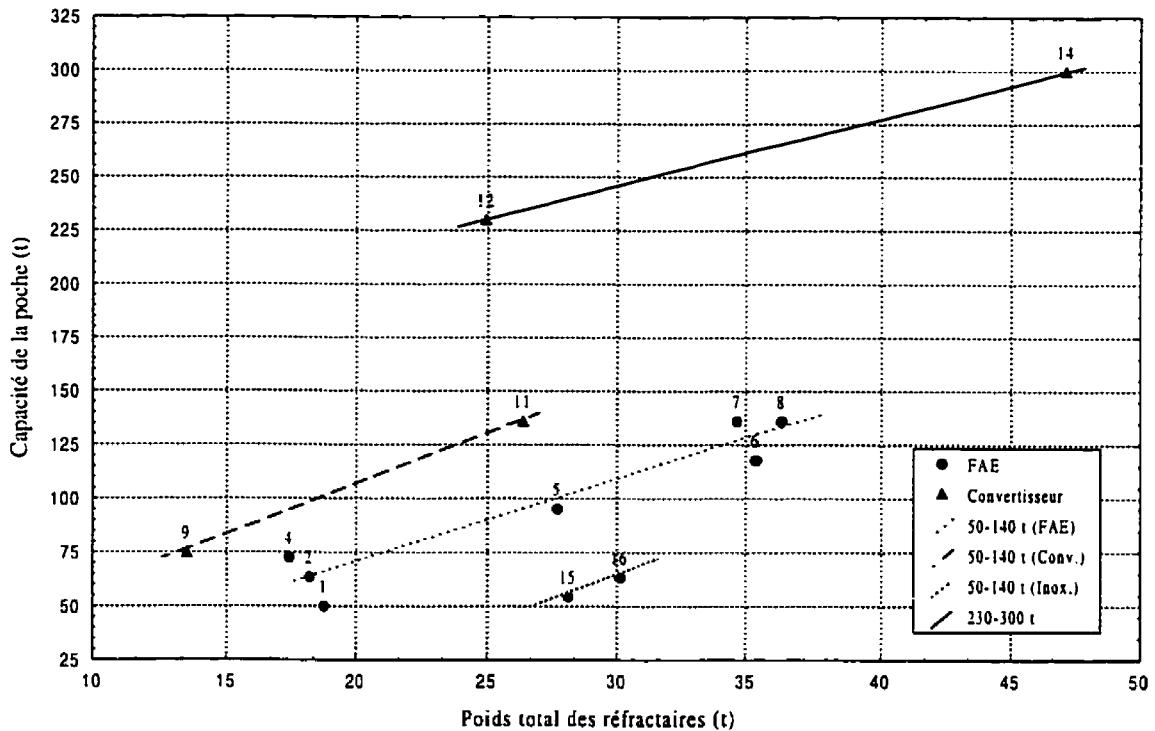


Figure 2.4 : Capacité de la poche en fonction du poids total des réfractaires

Il est quand même possible de distinguer les trois catégories A, B et C. Il existe pas de corrélation directe entre la vie moyenne et le temps de contact. Toutefois, représentent les poches utilisées pour l'acier inoxydable. La Figure 2.6 montre qu'il chaque poche avec sa vie correspondante. Les vies identifiées par un astérisque (*) coulée est donc inclus. Le Tableau 2.6 montre le temps de contact calculé en heure pour les réfractaires étaisent en contact avec l'acier durant toute sa campagne. Le temps de séjour dans la poche. En d'autres termes, ce temps représente la durée pendant laquelle le temps de contact d'une poche est défini par la durée totale que l'acier liquide a

2.2.3 Temps de contact

garde à l'air

Figure 2.5 : Poids total des réfractaires en fonction de la superficie intérieure du

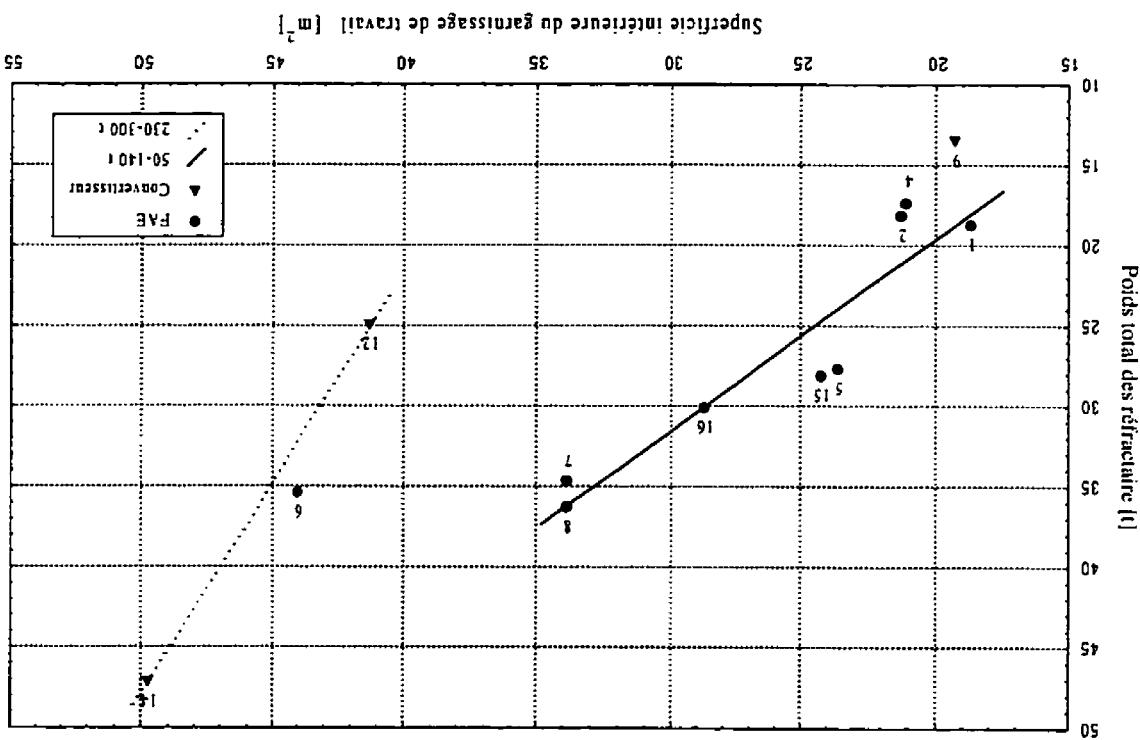
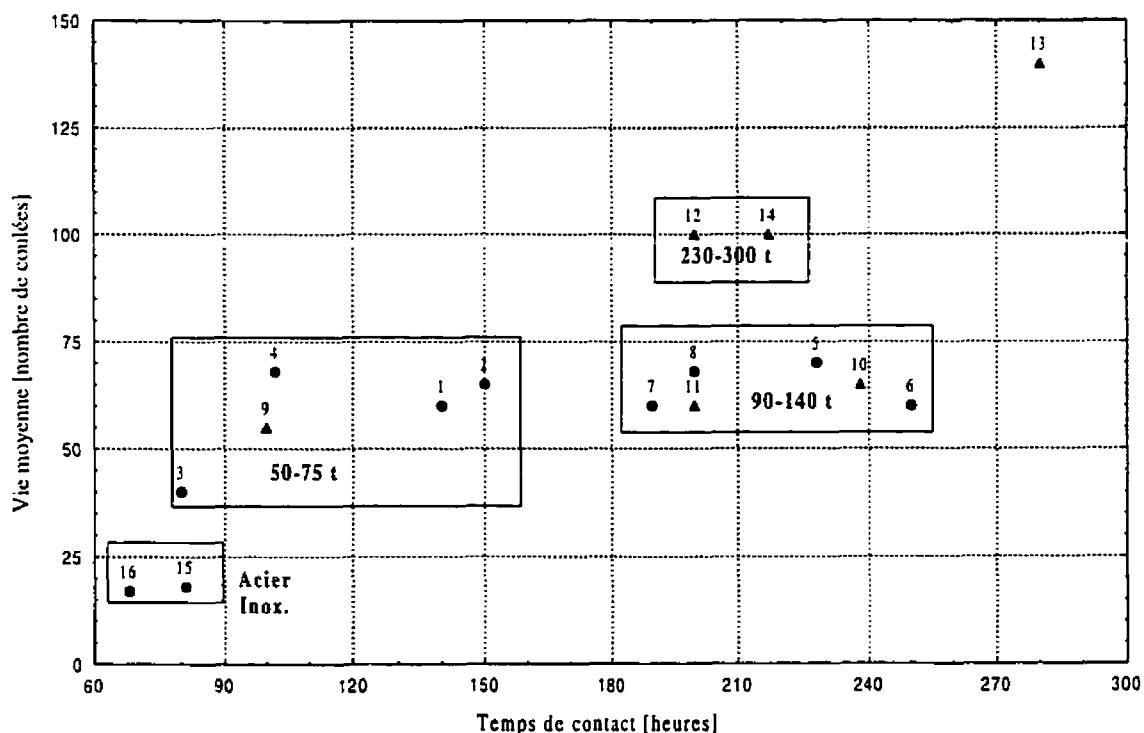


Tableau 2.6 : Temps de contact de l'acier et vie moyenne des poches

Filière Catégorie	FAE		Convertisseur			
	Temps contact [heures]	Vie [no. coulées]	Temps contact [heures]	Vie [no. coulées]		
50-75 t	81	18*	100	55		
	68	17*				
	80	40				
	102	68				
	140	60				
90-140 t	150	65	200	60		
	190	60				
	200	68				
	228	70				
	250	60				
230-300 t			200	100		
			217	100		
			280	140		

**Figure 2.6 : Vie moyenne des poches de coulée en fonction du temps total de contact au cours d'une campagne**

2.2.4 Variation des vies

À la Figure 2.7, les données sont classées par ordre croissant de la vie moyenne des poches de coulée. Cette figure montre que les extremums varient énormément. Or, la vie moyenne de la plupart de ces poches se situe près de la vie maximale atteinte, ce qui signifie que la vie minimale n'arrive pas souvent.

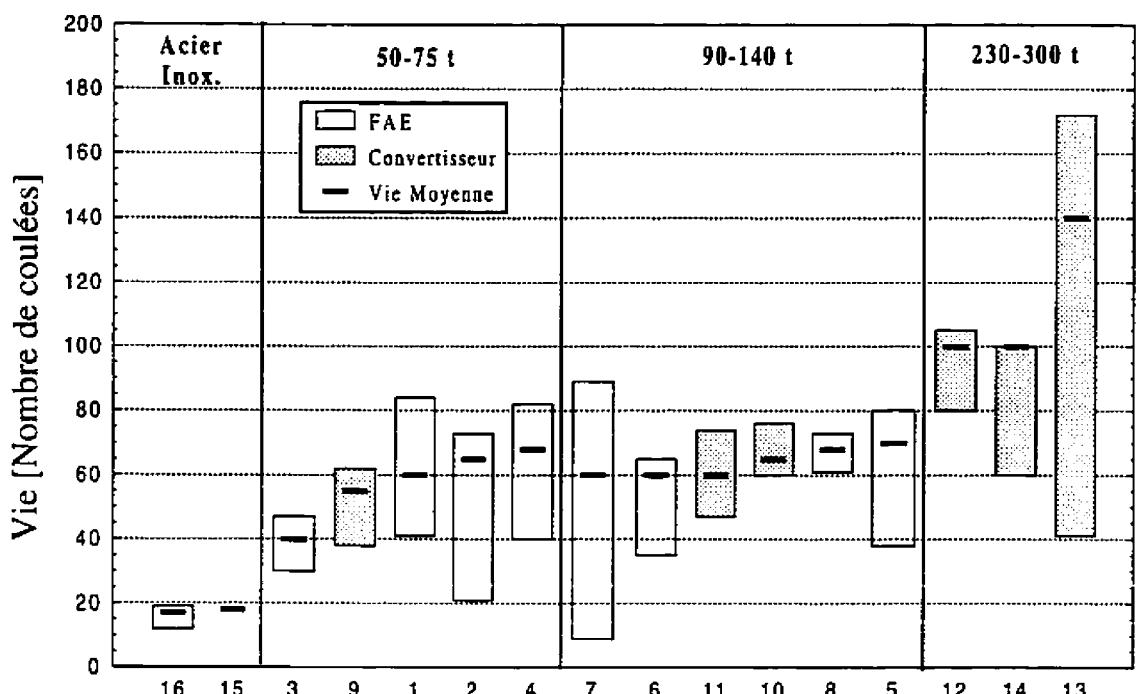


Figure 2.7 : Fluctuation de la durée de vie des poches pour chaque aciéries

2.3 Analyse de la cause d'arrêt d'une campagne

Les principales raisons invoquées pour arrêter une campagne sont montrées au Tableau 2.7. Le plancher, qui inclut les blocs, représente la zone principale affectée sauf pour les poches de 90-140 t des aciéries électriques. Pour cette catégorie, la pénétration par les joints semble être la cause majeure. Le Tableau 2.8 montre les mêmes résultats

sous une forme différente. Les pourcentages représentent des valeurs moyennes. Il est important de noter que très peu de poches sont mises hors service à cause d'une usure uniforme du garnissage de travail. Selon le Tableau 2.9, le critère de décision pour interrompre une campagne vient principalement du premier pocheur. Les poches de grande capacité reçoivent un nombre fixe de coulées alors que le contremaître intervient sur la prise décisionnelle pour les poches de faible capacité.

Tableau 2.7 : Principales raisons pour interrompre une campagne

Catégorie	FAE	Convertisseur
50-75 t (Acier inoxydable)	Fond et bloc 70 % Usure uniforme 5 % Ligne de laitier 25 %	
50-75 t (Acier au carbone)	Fond et bloc 63 % Usure uniforme 21 % Ligne de laitier 13 %	
90-140 t	Joints 37 % Fond et bloc 30 % Laitier 22 % Usure uniforme 6 %	Fond et bloc 58 % Ligne de laitier 40 %
230-300 t		Fond et bloc 36 % Ligne de laitier 30 % Usure uniforme 28 %

Tableau 2.8 : Zones faibles dans les poches par ordre d'importance

Zones affectées	FAE	Convertisseur	50-75 t	90-140 t	230-300 t
Fond et blocs	51 %	39 %	58 %	40 %	36 %
Ligne de laitier	19 %	27 %	14 %	28 %	30 %
Joint	15 %	-	-	25 %	-
Usure uniforme	12 %	27 %	21 %	5 %	28 %
Autres	3 %	7 %	7 %	2 %	6 %

Tableau 2.9 : Critères décisionnels pour interrompre une campagne

Filière Catégorie	FAE		Convertisseur	
	50-75 t	90-140 t	50-140 t	230-300 t
Nombre fixe de coulées	1	3	1	2
Décision du pocheur	2	4	2	3
Décision du contremaître	3	1	2	1

2.4 Analyse du cycle de la poche

Durant son cycle opérationnel, la poche est soit remplie, soit vide. Dans ce dernier cas, la poche est chauffée avec un préchauffeur et/ou en attente pour son prochain remplissage. Ce cycle est divisé en trois parties : 1) le temps de résidence ; 2) le temps de coulée ; 3) le temps de rotation. Ces différents moments sont définis comme suit :

Temps de résidence : Période durant laquelle la poche contient une quantité prédéterminée d'acier liquide c'est-à-dire de la fin de son remplissage au four jusqu'à son ouverture à la coulée continue.

Temps de coulée : Période durant laquelle la poche est vidée par un système de coulée c'est-à-dire de son ouverture jusqu'à sa fermeture à la coulée continue.

Temps de rotation : Période durant laquelle la poche est complètement vide c'est-à-dire de sa fermeture à la coulée continue jusqu'au début de son remplissage au four.

Le temps de remplissage au four ou au convertisseur est généralement très court (4 à 10 minutes) et est négligé dans le temps de résidence. Étant donné que la poche n'est pas complètement pleine, ce moment est généralement inclus dans le temps de rotation.

La Figure 2.8 montre le cycle total type pour chaque aciérie. Pour les poches de 50-75 t, le cycle semble identique. Toutefois, pour les deux autres catégories, le temps total du cycle, plus particulièrement le temps de rotation, varie considérablement. Il est intéressant de noter que la durée totale du cycle est plus longue pour les poches de 90-140 t.

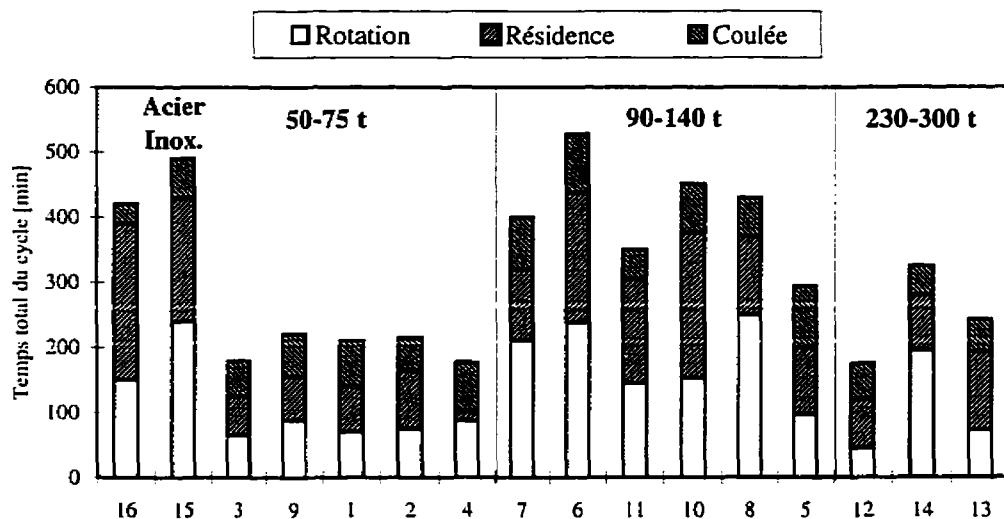


Figure 2.8 : Temps de rotation, de résidence et de coulée pour chaque aciérie

La Figure 2.9 illustre le temps de résidence en fonction du temps de rotation pour chacune des aciéries. Il est intéressant d'observer deux tendances : 1) les aciéries qui ont un temps de barbotage inférieur à 75 minutes et un temps de préchauffe inférieur à 100

minutes durant la rotation de la poche ; 2) les aciéries qui ont des temps supérieurs à ceux mentionnés.

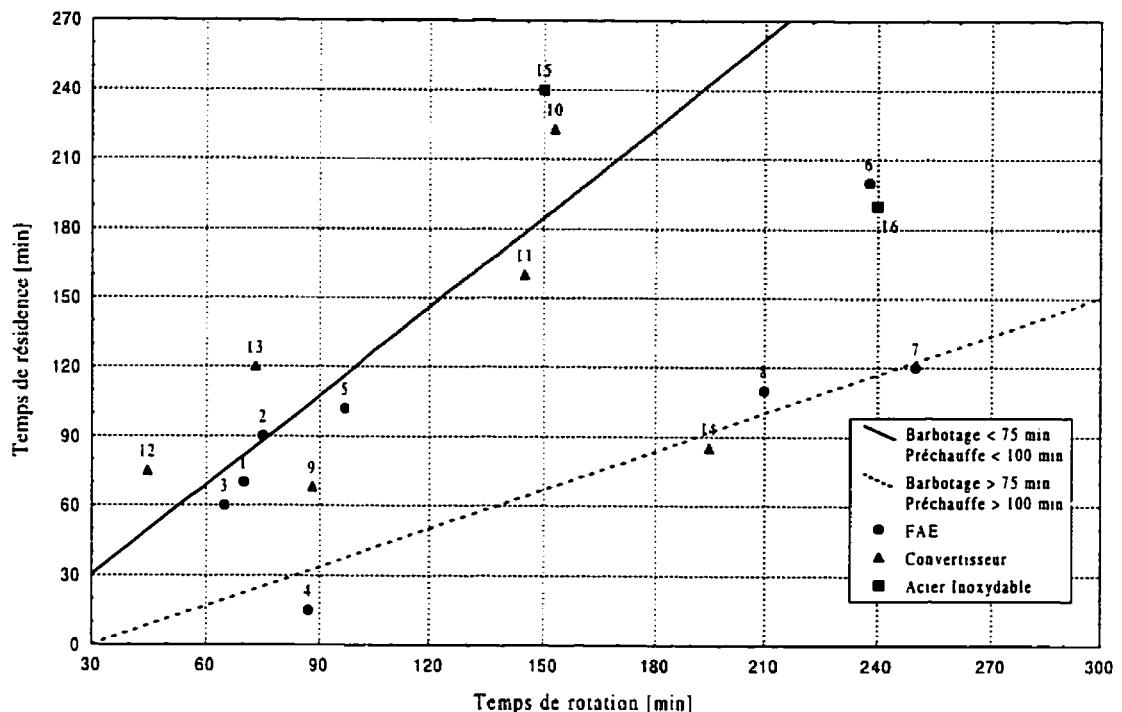


Figure 2.9 : Temps de résidence en fonction du temps de rotation

Tableau 2.10 : Conditions opératoires des poches durant le cycle opérationnel en minute

Filière	FAE								Convertisseur					
	50-75 t				90-140 t				75-140 t			230-300 t		
Catégorie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Remplissage														
Durée	2	5	5	7	4	3	5	5	8	8	-	5	8	8
Traitements														
<i>Barbotage</i>														
bouchon poreux	30	45	45	-	30	200	90	100	45	50	24	-	35	80
lance	-	-	-	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10
<i>Chauffe de l'acier</i>														
arc électrique	20	45	45	-	-	50	30	10	45	-	7	-	-	15
exothermique	-	-	-	-	-	-	-	4	-	20	-	5	-	-
Vide	-	-	-	-	-	40	-	-	-	-	-	25	-	50
Rotation														
Attente avant	4	15	10	10	10	20	40	40	20	90	-	25	25	45
Durée de la chauffe	55	50	40	60	75	210	120	160	40	35	-	10	30	132
Attente après	9	5	10	10	8	5	45	45	20	20	-	1	10	10
Couvercle	-	60	50	-	105	60	40	40	60	153	130	-	-	30

Le Tableau 2.10 montre les durées des traitements en poche effectués durant le temps de résidence et la distribution du temps d'attente et de préchauffe durant le temps de rotation. La chauffe par l'ajout d'additifs exothermiques n'est pas pratique courante. Seulement trois aciéries effectuent un traitement sous vide ou sous atmosphère contrôlée. Le temps de barbotage est plus élevé pour les poches de grande capacité que ceux de plus faible capacité. À l'exception du cas n° 9, la durée de la chauffe de l'acier pour les aciéries de conversion n'excède pas 20 minutes. Le temps de couvercle demandé dans le questionnaire est celui qui se produit lorsque le garnissage de la poche n'est pas chauffé durant la rotation. Cette durée varie énormément. Par contre, pour les aciéries électriques, la durée de préchauffe se situe entre 30 et 60 minutes pour les poches de faible capacité, mais plus de 70 minutes pour les poches de grande capacité. Pour les aciéries de conversion, une seule usine chauffe le garnissage de la poche pendant plus de 120 minutes.

D'après le Tableau 2.11, certaines aciéries n'utilisent pas encore de couvercle pendant la coulée. En général, le pont roulant utilisé pour transférer la poche d'un poste à l'autre sert aussi au dépôt et au retrait du couvercle sur la poche. Un faible nombre d'usines possède un système de couvercle permanent sur la poche. Pour les poches de grande capacité des aciéries électriques, la pose d'un couvercle au four par un système mécanique lorsque la poche attend pour son remplissage commence à prendre de l'ampleur. Bien que le nombre indiqué représente la même usine dans le tableau ci-

dessous, cette technique sera aussi installée dans une autre usine de la même catégorie au cours de l'année 1995.

Tableau 2.11 : Nombre d'usines utilisant un couvercle

Filière Catégorie	FAE		Convertisseur	
	50-75 t	90-140 t	50-140 t	230-300 t
Utilisation durant la coulée	2	3	1	3
Utilisation durant la rotation	2	4	2	3
Déplacement par pont roulant	2	3	1	2
Couvercle permanent	1	0	1	0
Pose mécanique au Four	0	2	0	0

2.5 Pratique du laitier pour un acier bas carbone

2.5.1 Techniques de séparation du laitier transporté

Lors du remplissage de la poche, une certaine quantité du laitier, qui a servi à l'élaboration primaire dans le four ou dans le convertisseur, est aussi transvidée avec le métal liquide. Le Tableau 2.12 montre les techniques utilisées pour minimiser cette quantité. Les fours à arc électrique possèdent un trou de coulée excentrique, plus particulièrement pour les poches de 90 à 140 t. La plupart des convertisseurs ne possèdent pas de technique particulière, surtout pour les poches de faible capacité.

Tableau 2.12 : Techniques utilisées pour séparer le laitier primaire transporté

FAE							
Catégorie Aciérie n°	50-75 t				90-140 t		
	1	2	3	4	5	6	7
Technique utilisée	EBT	Aucune	Buse	Aucune	EBT	EBT	EBT
			Immergeée				
Convertisseur							
Catégorie Aciérie n°	50-140 t			230-300 t			
	9	10	11	12	13	14	
Technique utilisée	Aucun	Aucun	Aucun	Bouchon	Aucun	Bloqueur	

D'après le Tableau 2.13, la proportion du laitier primaire des aciéries qui ne possèdent pas de technique particulière représente entre 40 % et 75 % de la quantité totale du laitier dans la poche. Un four à arc électrique avec un trou de coulée excentrique permet de réduire cette quantité à moins de 30 %.

Tableau 2.13 : Quantité du laitier primaire et totale dans la poche en kg

FAE								
Catégorie Aciérie n°	50-75 t				90-140 t			
	1	2	3	4	5	6	7	8
Transporté	180	910	985	1 360	545	45	340	340
Total	680	1 825	1 970	2 270	2 175	955	2 050	1 370
Proportion	27%	50%	50%	60%	25%	5%	17%	25%
Convertisseur								
Catégorie Aciérie n°	75-140 t			230-300 t				
	9	10	11	12	13	14		
Transporté	305	-	545	700	2 050	2 735		
Total	610	-	1 365	2 000	2 735	3 700		
Proportion	50%	-	39%	35%	75%	67%		

2.5.2 Composition du laitier après traitement

Le Tableau 2.14 montre la composition du laitier en pourcentage poids après le traitement secondaire pour un acier bas carbone. La basicité est calculée selon la formule suivante :

$$\text{Basicité} = \frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3} \quad (2.1)$$

Bien que les laitiers soient riches en chaux, ceux des fours à arc électrique sont plus riches en silice alors que ceux des convertisseurs sont plutôt riches en alumine, d'où une plus grande variation du rapport CaO/SiO₂.

Tableau 2.14 : Composition type du laitier après traitement secondaire pour un acier bas carbone

FAE								
Catégorie Aciérie n°	50-75 t				90-140 t			
	1	2	3	4	5	6	7	8
% CaO	49	45	39	40	45	60	50	48
% MgO	14	8	12	12	18	9	12	14
% SiO ₂	14	10	32	26	25	24	25	10
% Al ₂ O ₃	19	12	13	6	10	-	5	25
% FeO	4	10	2	3	1	-	2	1
% MnO	-	-	2	4	1	-	2	2
Autres Oxydes	-	15	-	9	-	7	4	-
%FeO+%MnO	4	10	4	7	4	-	4	13
CaO/SiO ₂	3,33	4,80	1,22	1,54	1,72	2,40	2,00	4,80
Basicité	1,86	2,55	1,20	1,63	2,35	2,88	2,07	1,77
Convertisseur								
Catégorie Aciérie n°	50-140 t			230-300 t				
	9	10	11	12	13	14		
% CaO	60	-	41	51,6	48	50		
% MgO	5	-	12	10,9	7,4	9		
% SiO ₂	25	-	5,5	7,2	6	13		
% Al ₂ O ₃	5	-	28	23	22,5	25		
% FeO	0,3	-	6,5	4,5	5,2	3		
% MnO	-	-	4	2,8	-	-		
Autres Oxydes	4,7	-	3	-	10,9	-		
%FeO+%MnO	0,3	N/D	10,5	7,3	5,2	3		
CaO/SiO ₂	2,40	N/D	7,45	7,17	8,00	3,85		
Basicité	2,17	N/D	1,58	2,06	1,94	1,55		

2.5.3 Fondants

Pour augmenter la fluidité du laitier, d'après le Tableau 2.15, la chaux et la chaux dolomitique sont les additifs les plus utilisés. Le fluospar est beaucoup moins utilisé qu'autrefois. Les aciéries électriques utilisent une plus grande variété de produits que les aciéries de conversion.

Tableau 2.15 : Fondants ajoutés au laitier synthétique en kg

Catégorie Aciérie n°	FAE				90-140 t			
	1	2	3	4	5	6	7	8
Chaux	225	180	225		225	550	450	225
Fluospar			225		45	90		
Chaux dolomitique	15	45			60	90		
Aluminate de chaux	90							
CaSi							180	
Grains de riz	30			115				
<i>Kwik Melt</i>			450					
85 %CaO-15 %MgO						590	360	
33 %Al ₂ O ₃ -33 %CaO-33 %SiO ₂							135	
CaO-SiO ₂ -MgO	135							
Convertisseur								
Catégorie Aciérie n°	50-140 t			230-300 t				
	9	10	11	12	13	14		
Chaux	500	800	360	1 000	340	1 000		
Fluospar	50							
Chaux dolomitique			135	400				
Aluminate de chaux							1 000	
Grains de riz					25			

2.5.4 Désoxydants

Les valeurs marquées par le symbole (†) indiquent que le désoxydant est ajouté seulement pour les grades calmés au silicium seulement. Le Tableau 2.16 montre que les aciers bas carbone qui proviennent des aciéries électriques sont calmés au silicium alors que ceux des aciéries de conversions sont plutôt calmés à l'aluminium.

Tableau 2.16 : Désoxydants ajoutés pour le laitier synthétique en kg

FAE								
Catégorie Aciérie n°	50-75 t				90-140 t			
	1	2	3	4	5	6	7	8
Aluminium			45		25			115
CaC ₂	45		35	70	25			
75 % FeSi	90	90	175				455	
50 % FeSi						545		
FeAl			45					
17 % SiMn			280					

Convertisseur						
Catégorie Aciérie n°	50-140 t			230-300 t		
	9	10	11	12	13	14
Aluminium		225	320	450	250	550
27 % FeSi		500				1 500†
50 % FeSi						
75 % FeSi	500				285	

2.6 Construction et entretien réfractaire

2.6.1 Formats des briques

D'après le Tableau 2.17, en utilisant les abréviations mentionnées au premier chapitre, le format des briques varie énormément pour le garnissage de sécurité alors que, pour le revêtement de travail, le standard des briques semi-universelles montées en spiral semble assez bien établi. Pour les poches des aciéries électriques, le plancher est construit avec des briques rectangulaires alors que, pour les poches des aciéries de conversion, le plancher est fait avec des pièces en béton réfractaire précoulées et précuites. L'utilisation de revêtements monolithiques commence à faire son apparition pour le revêtement de sécurité sous forme de béton et de matériel vibrant.

Tableau 2.17 : Formats des produits réfractaires installés dans les poches de coulée

		FAE							
Catégorie Aciérie n°		50-75 t				90-140 t			
		1	2	3	4	5	6	7	8
Sécurité	Laitier	V	BVL	STR	MKR	S	C	AWB	AWB
	Mur	V	BVL	STR	MKR	S	C	AWB	AWB
	Plancher	V	BVL	STR	STR	STR	S	STR	STR
Travail	Espace Libre	SUS	SUS	SUS	SUS	SUS	SUS	-	-
	Laitier	SUS	SUS	SUS	SUS	SUS	SUS	SUS	SUS
	Mur	SUS	SUS	SUS	SUS	SUS	SUS	SUS	SUS
	Plancher	STR	S	SUS	S	STR	S	SU	SU
Convertisseur									
Catégorie Aciérie n°		50-140 t			230-300 t				
		9	10	11	12	13	14		
Sécurité	Laitier	AW	BVL	AW	SUS	BVL	BVL		
	Mur	AW	BVL	AW	SUS	BVL	BVL		
	Plancher	STR	PC	PC	PC	PC	PC		
Travail	Espace Libre	SUS	SUS	AW	SUS	SUS	PC		
	Laitier	SUS	SUS	AW	SUS	SUS	AW		
	Mur	SUS	SUS	AW	SUS	SUS	AW		
	Plancher	STR	PC	PC	PC	PC	PC		

2.6.2 Designs réfractaires

Pour les deux prochains tableaux, les deux premières lettres signifient la famille réfractaire et les numéros indiquent des qualités différentes. L'épaisseur des briques est indiquée en système métrique et impérial.

D'après le Tableau 2.18 qui résume le design réfractaire pour les aciéries électriques, les briques d'argiles cuites à haute température ayant une épaisseur de 2 à 2,5 pouces pour la paroi et une épaisseur de 3 à 4,5 pouces pour le plancher sont installées comme garnissage de sécurité. Par contre, des briques à haute teneur en alumine sont

plutôt installées derrière la ligne de laitier et le plancher pour les poches de plus grande capacité. Pour le garnissage de travail, le plancher et la paroi en contact avec le bain sont composés de briques en dolomie qui ont une épaisseur de 6 à 9 pouces et de 4 à 6 pouces respectivement. L'ajout de carbone dans les briques est plus omniprésent dans les poches de plus grande capacité. La ligne de laitier diffère énormément : dolomie enrichie de magnésie, magnésie-carbone, dolomie et magnésie-chrome. Le design de la poche pour les brames diffère. La paroi est composée de briques à haute teneur en alumine et la ligne de laitier, de briques magnésie-chrome. En général, l'espace libre possède la même qualité que la ligne de laitier. C'est pourquoi il n'a pas été distingué de la ligne de laitier.

Tableau 2.18 : Designs réfractaires des poches de coulée pour les aciéries électriques

Catégorie	Aciérie n°	50-75 t				90-140 t					
		1	2	3	4	5	6	7	8		
Sécurité	Laitier	HA4	HF1	HM1	HF1	HM2	HA4	HA5	HA5		
	Mur	HA4	HF1	HF1	HF1	HF1	HA4	HF9	HF9		
	Plancher	HA4	HF4	HF1	HF1	HF1	HA9	HF9	HF5		
Travail	Esp. Libre	DM	-	-	-	-	-	DC1	-		
	Laitier	DM	MCa1	D2	D1	DMC	MCa2	DC1	MCr1		
	Mur	D2	D3	D1	D1	DC2	D5	DC1	HA1		
	Plancher	DC3	DC1	D1	D1	DC2	D5	HA1	HA1		
Épaisseur		mm	po	mm	po	mm	po	mm	po	mm	po
Sécurité	Laitier	76,2	3	63,5	2,5	50,8	2	63,5	2,5	63,5	2,5
	Mur	76,2	3	63,5	2,5	50,8	2	63,5	2,5	76,2	3
	Plancher	152	6	102	4	114	4,5	76,2	3	152	6
Travail	Esp. Libre	127	5	-	-	-	-	127	5	-	-
	Laitier	152	6	152	6	152	6	127	5	152	6
	Mur	127	5	127	5	102	4	127	5	127	5
	Plancher	152	6	152	6	152	6	229	9	152	6

Tableau 2.19 : Designs réfractaires des poches de coulée pour les aciéries de conversion

Catégorie Aciérie n°		75-140 t				230-300 t			
		9	10	11	12	13	14		
Sécurité	Laitier	HF2	MCr2	HM3	HA	MCr2	HM3		
	Mur	HF2	HA8	HF3	HA	HA8	HA9		
	Plancher	HF1	HA	HA6	BF	HA	HA6		
Travail	Esp. Libre	D2	MCr2	-	-	MCr2	HA		
	Laitier	MCa3	MCr2	MCa4	MCr	MCr2	MCa5		
	Mur	D2	AC	HA2	HA	AC	HA1		
	Plancher	DC3	HA3	HA3	HA	HA3	HA3		
Épaisseur		mm	po	mm	po	mm	po	mm	po
Isolant		-	-	25	1	31,8	1,25	-	-
Sécurité	Laitier	90	3,5	63,5	2,5	75	3	75	3
	Mur	90	3,5	63,5	2,5	75	3	63,5	2,5
	Plancher	160	6,3	152	6	102	4	75	3
Travail	Esp. Libre	200	7,9	305	12	-	-	305	12
	Laitier	200	7,9	152	6	178	7	152	6
	Mur	125	4,9	152	6	127	5	152	6
	Plancher	150	5,9	229	9	203	8	178	7
						229	9	229	9
						254	10	152	6
						229	9	171	6,75
						229	9	229	9
						254	10	229	9

Au Tableau 2.19, le design réfractaire des poches des aciéries de conversion varie beaucoup plus que celui des aciéries électriques. Le garnissage de sécurité est composé de briques à haute teneur en alumine ou de briques d'argiles cuites à haute température d'une épaisseur de 2,5 à 3,5 pouces pour la paroi et de 3 à 9 pouces pour le plancher. La paroi et le plancher du garnissage de travail sont surtout composés de briques à haute teneur en alumine de 5 à 7 pouces et de 6 à 10 pouces respectivement. Des briques magnésie-carbone ou magnésie-chrome de 6 à 8 pouces sont installées pour la ligne de laitier. Les poches n° 11 et 14 contiennent des briques isolantes et les poches n° 10 et 13, des panneaux isolants. Comparativement aux aciéries électriques, il n'est pas possible de distinguer le design des petites poches et des grandes poches.

2.6.3 Comportements thermiques

Les propriétés ont été prises directement à partir des fiches techniques et peuvent être consultées à l'annexe B. Les propriétés thermiques manquantes ont été prises à partir des propriétés générales dans les références [25,56,57,58,59,60,61]. L'aciérie n° 12 n'a pas fourni les informations nécessaires pour calculer le comportement thermique de la poche. La résistance équivalente, calculée à partir de l'équation (2.2), sert à évaluer le comportement thermique des différentes couches réfractaires en régime permanent [62]. La diffusivité thermique, définie à l'équation (2.3), caractérise la vitesse de réponse en température du matériau en régime transitoire [58]. Seule, la diffusivité du garnissage de travail est montrée aux Tableaux 2.20 et 2.21 car les variations du gradient thermique ne s'appliquent qu'à cette zone.

$$R_e = \sum_{i=1}^n \frac{\ln \frac{R_i}{r_i}}{k_i} \quad (2.2)$$

$$\lambda = \frac{k}{\rho \cdot c_p} \quad (2.3)$$

D'après le Tableau 2.20, le critère de design thermique associé à la résistance équivalente d'un garnissage neuf varie considérablement pour la paroi et le plancher. La résistance équivalente de la ligne de laitier varie beaucoup moins et se situe entre 0,050 et 0,066 W/m•°K sauf pour une aciéries (0,072). Il est surprenant de constater que la résistance au niveau du laitier diffère énormément de celle calculée au niveau du baril, surtout pour la poche n° 5. En régime transitoire, les poches n° 2, 5 et 6 sont sujettes aux

chocs thermiques à cause de leur plus grande diffusivité, ce qui justifie la présence du carbone dans le réfractaire. À l'opposé, la faible diffusivité de la poche n° 8 justifie l'utilisation de la magnésie-chrome. Il est intéressant de noter que la diffusivité d'une brique en dolomie diffère peu de celle d'une brique à haute teneur en alumine.

Tableau 2.20 : Caractéristiques thermiques pour les poches de coulée des aciéries électriques

FAE								
Catégorie Aciérie n°	50-75 t				90-140 t			
	1	2	3	4	5	6	7	8
R_e	Espace Libre	0,066	-	-	-	-	0,043	-
	Laitier	0,072	0,052	0,047	0,064	0,066	0,050	0,052
	Mur	0,080	0,067	0,050	0,077	0,092	0,064	0,070
	Plancher	0,120	0,139	0,135	0,139	0,190	0,171	0,149
λ	Espace Libre	1,03	-	-	-	-	1,07	-
	Laitier	1,03	1,52	0,91	0,85	1,24	1,29	1,07
	Mur	0,91	0,88	0,85	0,85	1,14	0,78	1,07
	Plancher	1,14	1,07	0,85	0,85	1,14	0,78	0,81
0,167								

Tableau 2.21 : Caractéristiques thermiques pour les poches de coulée des aciéries de conversion

Convertisseur						
Catégorie Aciérie n°	75-140 t			230-300 t		
	9	10	11	12	13	14
R_e	Espace Libre	0,114	0,144	-	-	0,131
	Laitier	0,076	0,124	0,071	-	0,112
	Mur	0,097	0,126	0,125	-	0,111
	Plancher	0,158	0,185	0,123	-	0,161
λ	Espace Libre	0,91	0,90	-	-	0,202
	Laitier	1,29	0,90	2,19	-	0,171
	Mur	0,91	0,73	0,73	-	0,90
	Plancher	1,14	0,92	0,92	-	0,92

D'après le Tableau 2.21, la résistance équivalente au niveau de la paroi et de la ligne de laitier des poches des aciéries de conversion est mieux balancée et se situe principalement entre 0,071 et 0,124 W/m•°K. La diffusivité thermique des briques de la ligne de laitier est très élevée pour la poche n° 11.

2.6.4 Taux d'usure moyen

D'après le Tableau 2.22, le taux d'usure de la ligne de laitier est deux à trois fois plus élevé que la paroi en contact avec le bain. Le taux d'usure du plancher des poches n° 7 et 8 est relativement élevé car ce dernier est changé au milieu de la campagne.

Tableau 2.22 : Taux d'usure moyen des poches de coulée en mm/coulée

FAE								
Catégorie Aciérie n°	50-75 t				90-140 t			
	1	2	3	4	5	6	7	8
Zones	Laitier	2,5	2,7	2,5	0,9	2,9	3,4	2,6
	Mur	1,1	0,8	1,3	0,9	0,5	0,6	0,8
	Plancher	1,3	2,0	1,3	0,9	1,1	1,3	5,1
Convertisseur								
Catégorie Aciérie n°	75-140 t			230-300 t				
	9	10	11	12	13	14		
Zones	Laitier	2,8	-	-	-	-	2,4	
	Mur	0,9	-	-	1,0	-	0,6	
	Plancher	0,9	-	-	2,0	-	1,3	

2.6.5 Méthodes et planifications de la construction

En général, toutes les aciéries accordent une importance au garnissage de la poche, main-d'œuvre spécialisée ou non. Dans la plupart des aciéries, ce sont des briqueteurs formés qui assurent la construction du garnissage et supervisés par un contremaître. L'évaluation de l'usure et le patron des fissures à la fin d'une campagne sont suivis dans toutes les aciéries sauf trois. Quelques aciéries fonctionnent avec une

durée de vie fixe. Pour plusieurs, cette durée est aléatoire et donc, la date de construction n'est pas planifiée.

Tableau 2.23 : Méthodes de planification et d'évaluation de l'usure des poches de coulée

Filière Catégorie	FAE		Convertisseur	
	50-75 t	90-140 t	50-140 t	230-300 t
Briqueteurs	4	4	3	3
Main d'oeuvre spécialisée	0	1	0	1
Planification du regarnissage	1	3	3	3
Évaluation et patron d'usure	3	3	3	2

2.6.6 Réparations des zones réfractaires

D'après le Tableau 2.24, la réparation s'effectue plutôt à froid qu'à chaud. Ceci nécessite l'interruption d'une campagne. Pour la plupart, il s'agit d'une pratique régulière. Il est étonnant de remarquer le faible nombre d'usines qui effectue une réparation à chaud.

Tableau 2.24 : Méthodes de réparation pour les revêtements des poches de coulée

Filière Catégorie	FAE		Convertisseur	
	50-75 t	90-140 t	50-140 t	230-300 t
Réparation à chaud	1	2	2	1
Réparation à froid	4	4	2	3
Réparation régulière	2	4	2	2
Réparation de la paroi de sécurité	3	3	2	3

Au Tableau 2.25, les principales zones réparées à froid sont la ligne de laitier et le fond de la poche. Les blocs sont surtout changés dans les aciéries électriques. Peu importe la filière, les poches de plus faible capacité ont beaucoup moins de problèmes reliés au plancher de la poche. L'espace libre est souvent réparé avec la ligne de laitier. Le baril est réparé seulement pour les grosses poches des aciéries de conversion.

Tableau 2.25 : Nombre d'usines procédant à des réparations dans les poches de coulée selon les différentes zones

FAE						
Catégorie Aciérie n°	50-75 t			90-140 t		
	Chaud	Froid	Régulière	Chaud	Froid	Régulière
Espace Libre		2	1		2	1
Ligne de laitier		2	2		3	3
Fond/Plancher	1				2	2
Blocs	1	3	1	2	2	
Convertisseur						
Catégorie Aciérie n°	50-140 t			230-300 t		
	Chaud	Froid	Régulière	Chaud	Froid	Régulière
Espace Libre	1		1			2
Ligne de laitier	1	2	2	1	2	2
Baril					2	
Fond/Plancher		1	1		2	2
Blocs					1	1

2.7 Satisfaction et nouvelles tendances

D'après le Tableau 2.26, 7 des 14 des aciéries sont satisfaites de leur performance réfractaire. L'abréviation O est utilisée pour oui et N pour Non. Pour les méthodes de compilation, la lettre M est utilisée pour manuel, I pour informatique et 2 pour l'utilisation simultanée des deux méthodes. Encore aujourd'hui, malgré l'ère grandissante de l'informatique, plus de la moitié des aciéries compile encore l'information manuellement. Les problèmes associés à la compilation informatique seront abordés au prochain chapitre. Le Tableau 2.27 montre les différentes zones réfractaires que certaines aciéries essaient d'améliorer. Ces zones concernent surtout le fond de la poche.

Tableau 2.26 : Degré de satisfaction et méthodes de compilation pour les performances réfractaires des poches de coulée

Filière	FAE								Convertisseur					
	50-75 t				90-140 t				50-140 t			230-300 t		
Catégorie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Aciérie n°														
Méthode de compilation	M	M	2	M	M	O	2	2	M	2	2	2	2	M
Performance satisfaisante et établie	N	N	O	O	O	O	N	N	O	N	N	O	N	O
Essais en cours	O	O	N	N	O	O	O	O	N	O	O	O	O	O

Tableau 2.27 : Zones réfractaires en essai

FAE		
Capacité	50-75 t	90-140 t
Ligne de laitier	2	1
Fond/Plancher		2
Blocs de coulée/B.P.	2	2
Forme des briques		2
Bouchon Poreux	1	1
Convertisseur		
Capacité	50-140 t	230-300 t
Ligne de laitier	1	2
Fond/Plancher	1	2
Zone d'impact	1	2
Blocs de coulée/B.P.	1	1
Forme des briques		1
Bouchon Poreux	1	

2.8 Interprétation du questionnaire

D'après les sections précédentes, il est difficile de déterminer les principales variables qui influencent la durée de vie d'une poche de coulée. D'après le Tableau 2.6, le temps de contact ne suffit plus pour décrire la durée de vie des poches avec l'arrivée des traitements en poche, ce que Hubble avait déjà mentionné dans ses travaux [43]. Parmi les 14 configurations, il faut rejeter l'aciérie n° 10 car la composition du laitier est manquante ainsi que l'aciérie n° 11 car les temps du cycle opérationnel de la poche sont

incomplets. Étant donné que le nombre de degré de liberté des résidus doit être au minimum de trois pour effectuer une régression linéaire, le modèle est donc limité à huit variables ($n - e - 1$) où n représente le nombre d'échantillons observés, e , le nombre de degré de liberté des résidus et le nombre 1, l'ordonnée à l'origine. Or, le nombre de variables considérées dans ce questionnaire s'élève à plus de quarante alors que le nombre de répondants n'est que de quatorze. Au Canada, il n'y a qu'une vingtaine d'aciéries seulement. En plus, la performance d'une poche se divise en trois catégories bien distinctes : 1) les poches d'une capacité entre 50 t et 140 t qui ont une vie moyenne de 65 coulées ; 2) les poches d'une capacité entre 230 t et 300 t qui ont une vie moyenne de 100 coulées ; 3) les poches utilisées pour les aciers inoxydables qui ont une vie moyenne de 17 coulées. Cette division limite encore plus le nombre d'aciéries considérées pour chacune de ces catégories, d'où l'impossibilité de construire un modèle de prédiction.

Malgré cet inconvénient, il est possible de suivre la situation de la métallurgie en poche au Canada. Les poches de grande capacité viennent des aciéries de conversion, qui produisent des brames et des blooms. Le four-poche est surtout présent dans les aciéries électriques alors que le traitement sous vide est utilisé dans les aciéries de conversion. La durée de vie d'une poche dépend énormément de la faiblesse d'une des zones réfractaires (la ligne de laitier, le plancher et le bloc de coulée ou du bouchon poreux) ou d'un nombre fixe de coulées que la poche peut recevoir. La zone réfractaire la plus touchée est

le plancher avec les blocs : 51 % pour les aciéries électriques et 39 % pour les aciéries de conversion.

Au point de vue design réfractaire, la dolomie à liaison résine est surtout utilisée dans les aciéries électriques comme garnissage en contact avec le bain. Pour la ligne de laitier, une plus grande variété est installée : la dolomie enrichie de magnésie, la magnésie-carbone, la dolomie et la magnésie-chrome. Pour les aciéries de conversion, la paroi en contact avec le bain est surtout composée de briques à haute teneur en alumine ou d'alumine-carbone à cause des aciers qui sont calmés à l'aluminium. La ligne de laitier est composée de magnésie-chrome ou de magnésie-carbone. Or, les poches qui ont une moyenne de 65 coulées utilisent principalement des briques basiques. Les poches qui ont une moyenne de 100 coulées utilisent la combinaison des briques en magnésie-chrome ou en magnésie-carbone avec des produits à haute teneur en alumine (avec ou sans carbone). La différence se situe surtout à la production de billettes ou de brames et de blooms. Il est donc possible d'observer l'influence du choix réfractaire sur la durée de vie des poches avec le questionnaire envoyé. Les bétons réfractaires ne sont qu'installés au plancher des poches de grande capacité. La construction réfractaire est assurée par une main-d'œuvre spécialisée car la majorité des aciéries accordent une importance à l'évaluation de l'usure et au patron des fissures. La réparation du garnissage réfractaire s'effectue surtout à froid plutôt qu'à chaud. Les principales zones réparées sont la ligne de laitier et les blocs. Le plancher est souvent réparé pour les poches provenant des aciéries de conversion. Encore une fois, le faible nombre d'échantillons empêche la séparation des données selon les

différents types de garnissage pour la construction d'un modèle, qui exprime le taux d'usure d'une zone réfractaire en fonction des variables opératoires.

Au point de vue opérationnel, le cycle total varie surtout pour les poches de 90-140 t des aciéries électriques, mais n'explique pas les fluctuations observées sur la durée de vie des poches en général. Il est aussi difficile d'expliquer ces fluctuations par la composition type du laitier secondaire ou par le temps des différents traitements en poche. La basicité n'explique pas ces fluctuations pour deux raisons : 1) la composition n'a été demandée que pour les aciers bas carbone ; 2) elle change à chaque coulée. La proportion du laitier primaire transporté dans les aciéries de conversion représente 40 % à 70 % de la quantité totale du laitier dans la poche alors qu'elle ne représente que 25 % pour les aciéries électriques dont le four possède un trou de coulée excentrique. La performance réfractaire ne semble pas affectée par ce dernier paramètre. Le questionnaire était aussi incomplet car aucune information n'a été demandée sur la température de l'acier, que ce soit au niveau du four, du four-poche ou du garnissage ou sur les différentes compositions du laitier utilisé. En général, la composition du laitier varie selon les nuances produites. Cette information n'est pas souvent disponible pour certaines aciéries. Il serait plus adéquat de compiler toutes les compositions utilisées pour les laitiers car la basicité joue un rôle important. Il ne faut pas aussi oublier que les données accumulées sont des moyennes annuelles fournies par les aciéries.

2.9 Conclusion

D'après ce questionnaire, les aciéries canadiennes suivent l'évolution technologique et les nouvelles tendances au niveau du traitement et du réfractaire. Mais, il n'est pas possible de construire un modèle de régression linéaire pour exprimer la durée de vie des poches de coulée entre plusieurs aciéries pour les raisons suivantes : 1) les performances sont les mêmes pour une même catégorie (65 ou 100 coulées) ; 2) les différents paramètres sont des conditions opératoires typiques ou des moyennes alors qu'en réalité, ils fluctuent d'une coulée à l'autre ; 3) le faible nombre d'aciéries impliquées. Contrairement aux anciennes pratiques, le temps de contact de l'acier avec un traitement en poche n'est pas nécessairement proportionnel à la durée de vie des poches. Au niveau réfractaire, le garnissage de travail a été changé pour des réfractaires basiques, principalement la dolomie. Les différences se situent plutôt sur le choix de la ligne de laitier : magnésie-carbone, dolomie-carbone et magnésie. Les constructions monolithiques se retrouvent juste au niveau du plancher. Pour une évaluation du design réfractaire et de l'usure des différentes zone réfractaires, il faut un plus grand nombre d'échantillons et des données supplémentaires sur les conditions opératoires, notamment les températures d'opération et la composition des différents laitiers utilisés.

Pour dériver un modèle, il a été décidé d'effectuer un suivi régulier portant sur la compilation de valeurs réelles des différentes variables opératoires dans une aciérie témoin qui possède un four-poche, dans le but de construire un modèle de prédiction.

CHAPITRE III

Influence des variables opératoires sur la vie des poches

Le but de ce chapitre est d'établir un modèle de régression linéaire entre la durée de vie des poches de coulée et les principales variables opératoires telles que la température de l'acier, la composition du laitier et les pratiques métallurgiques (barbotage, injection, désulfuration) dans une usine bien précise, appelée usine témoin. La compilation des données porte sur la production retraçant l'historique de 45 poches, totalisant plus de 1 970 coulées, entre le 15 septembre 1994 et le 10 mars 1995. La vie des poches observées, appelée y , a varié de 18 à 70 coulées. Cette grandeur a été considérée comme la valeur d'une fonction $f(y)$ qui pourrait être décrite en termes de variables opératoires (X_1, X_2, \dots, X_i) décrivant les données de production. L'annexe C contient l'historique et les statistiques de base des variables opératoires considérées dans ce mémoire.

3.1 Cycle opératoire d'une poche de coulée

La Figure 3.1 illustre le cycle opérationnel type pour les poches de coulée établi par M. Angelo Grandillo. Ce cycle s'effectue avec trois poches en service sur six disponibles sous des opérations normales et une production quotidienne moyenne de 15 coulées, pouvant varier entre 12 et 18. Les données proviennent des quatre postes de travail suivants : 1) stations de préchauffe horizontal ; 2) four EBT ; 3) four-poche ;

4) coulée continue. Un programme, écrit et compilé avec SQL*Forms V3.0 sur VAX/VMS, a été installé aux stations de préchauffe pour le premier pocheur et a permis de retracer l'historique des opérations en associant un numéro de coulée généré au four avec la vie de la poche générée par ce programme. Bien que les données soient enregistrées sur l'ordinateur, le pocheur continuait d'écrire manuellement la vie de la poche et des autres composantes réfractaires dans un cahier séparé, identifié par le numéro de la poche, pour des raisons pratiques. Ainsi, lorsque les vies ne correspondaient pas entre les deux systèmes, le pocheur avait la responsabilité de les corriger.

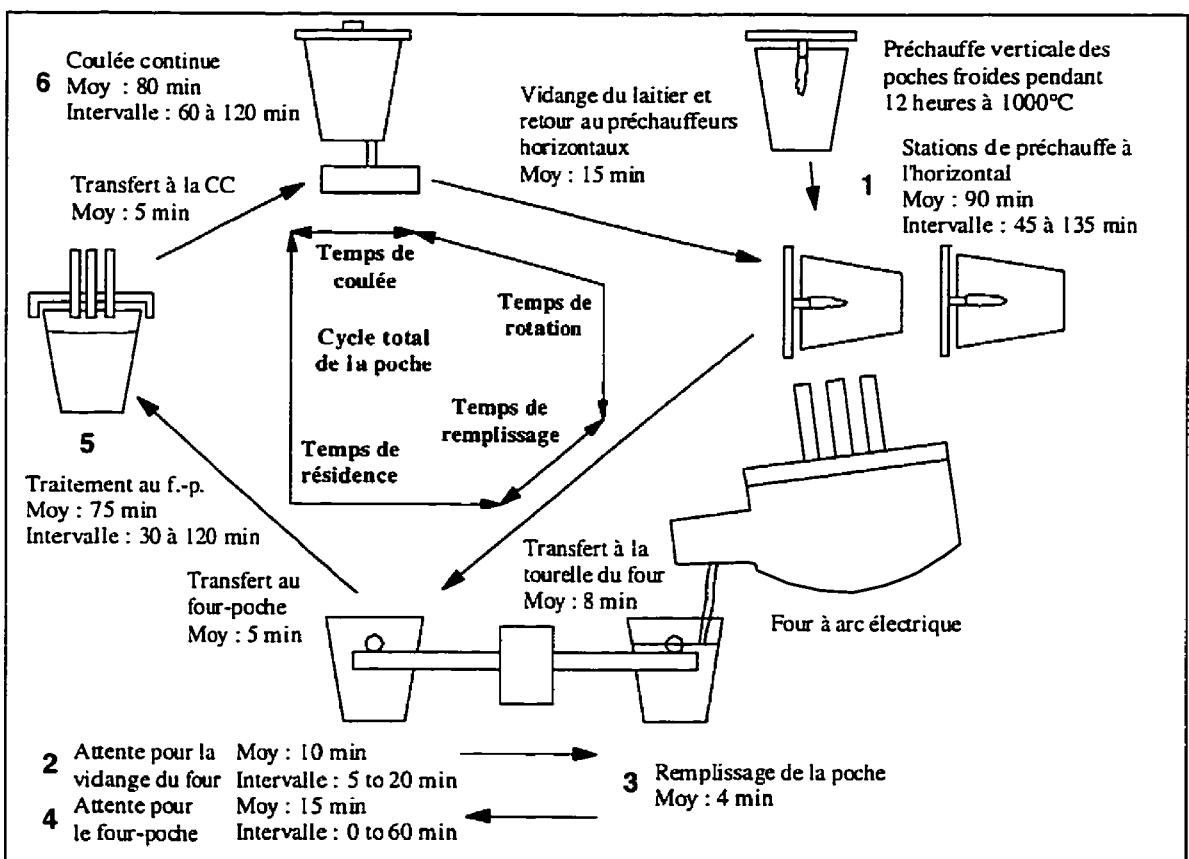


Figure 3.1 : Cycle opérationnel d'une poche de coulée dans l'usine témoin

3.2 Raisons invoquées pour l'arrêt d'une campagne

La campagne d'une poche se divise en deux temps d'une trentaine de coulées chacune, pour un total de 60 coulées en moyenne. Cette interruption est nécessaire pour changer le bloc de coulée et du bouchon poreux car leur durée de vie est deux fois moins élevée que celle de la poche. Le Tableau 3.1 contient les raisons invoquées pour le retrait en service des poches observées qui ont eu une campagne complète avec leur durée de vie respective et le Tableau 3.2, celles qui ont eu une demi-campagne.

Tableau 3.1 : Durée de vie et raison invoquée du retrait en service des poches qui ont eu une campagne complète

Cas	Raison d'arrêt	Vie inscrite		Vie réelle		Vie Totale	
		n° 1	n° 2	n° 1	n° 2	Inscrite	Réelle
1	Briques tombées	28	19	27	19	47	46
2	Pénétration entre bloc et plancher	30	24	34	18	54	52
3	Usure du bloc de coulée	30	27	30	29	57	59
4	Usure du bloc de coulée	30	28	31	29	58	60
5	Usure du bloc de coulée	30	25	34	26	55	60
6	Fissures au plancher	31	27	35	28	58	63
7	Usure du bloc de coulée	30	?	31	29	-	60
8	Usure du bloc de coulée	30	30	30	31	60	61
9	Usure du bloc de coulée	30	29	31	29	59	60
10	Usure du bloc du bouchon poreux	30	27	31	27	57	58
11	Usure du bloc et du plancher	32	23	32	24	55	56
12	Usure du bloc de coulée	30	28	33	28	58	61
13	Usure du bloc de coulée	34	29	37	33	63	70
14	Usure du bloc de coulée	30	31	35	30	61	65
15	Pénétration à la ligne de laitier	31	19	31	19	50	50
16	Fissures au plancher	29	28	30	27	57	57
17	Usure du bloc de coulée	32	16	32	16	48	48
18	Usure du bloc de coulée	29	30	29	29	59	58
19	Usure du bloc de coulée	36	28	36	27	64	63
20	Usure du bloc de coulée	29	33	30	34	62	64
21	Usure du bloc de coulée	32	21	31	23	53	54
22	Briques tombées	31	28	33	27	59	60
23	Usure du plancher	31	21	32	21	52	53
24	Usure du bloc de coulée	31	26	30	26	57	56
25	Usure du bloc de coulée	31	27	31	27	58	58
26	Poche percée	22	34	22	35	56	57
27	Usure de la ligne de laitier/plancher	27	29	26	28	56	54

Tableau 3.2 : Durée de vie et raison invoquée du retrait en service des poches qui ont eu une demi-campagne

Cas	Raison d'arrêt	Vie inscrite	Vie Réelle
A	Briques tombées	30	32
B	Usure du bloc de coulée	29	29
C	Usure du bloc de coulée	30	30
D	Usure prématuée du baril	30	29
E	Usure du bloc de coulée	28	28
F	Usure du bloc de coulée	-	29
G	Usure du bloc de coulée	31	31
H	Usure du bloc de coulée	30	30
I	Usure du bloc de coulée	32	32
J	Usure du bloc de coulée	30	32
K	Usure prématuée du baril	31	32
L	Poche percée	27	27
M	Trous visibles à la ligne de laitier	33	34
N	Usure de la ligne de laitier	27	27
O	Briques tombées	24	25
P	Briques minces à la ligne de laitier	16	18
Q	Usure du bloc de coulée	30	29
R	Usure du bloc de coulée	31	32

La vie d'une poche est exprimée en nombre de coulées que cette dernière a reçues.

Elle est augmentée chaque fois que la poche est remplie et vidée, peu importe le temps de celle-ci. Il faut noter que les cas apparaissent selon l'ordre chronologique d'utilisation.

Après inspection des données, qui retrace l'historique des coulées, il était facile de repérer certaines anomalies qui dépendent de l'habitude que possède le pocheur d'écrire son information. En général, la différence entre la vie réelle et la vie inscrite par ce dernier est de deux coulées. La poche recevait plus ou moins de coulées indiquées dans les rapports manuels par rapport au système informatique. Ceci explique en partie les différentes variations sur la vie de chaque campagne. Cependant, cette différence peut

s'élever jusqu'à cinq (cas 5 et 6) ou sept coulées (cas 13). Le système informatique a permis de trouver deux campagnes complètement manquantes. L'avantage d'un tel système est donc d'obtenir la vie exacte de la poche.

Tableau 3.3 : Statistiques sur la durée de vie des poches de coulée

Vie	Moy	Min	Max	Var.	E.T.
y_1	31,3	22	37	9,7	3,1
y_1^*	30,4	18	37	11,8	3,4
y_2	26,6	16	35	22,5	4,7
y_{total}	57,9	46	70	28,0	5,3

La variable y_1^* représente la vie de la première demi-campagne de toutes les poches alors que y_1 ne contient que les 27 poches énumérées au Tableau 3.1. La variable y_{total} , donnée par la somme de y_1 et de y_2 , représente la vie totale de ces 27 poches. D'après le Tableau 3.3, la variation observée sur la vie totale d'une poche dépendra surtout de la deuxième moitié de la campagne, qui possède une vie moyenne plus petite et une variance plus élevée. La première campagne d'une poche est limitée à un objectif fixe de 30 coulées.

3.3 Variables Opératoires

Le Tableau 3.4 montre les variables opératoires accumulées avec leurs statistiques respectives. Pour certaines variables, les valeurs varient énormément d'une coulée à l'autre. L'annexe C contient l'historique et les statistiques de base des variables opératoires considérées dans ce rapport pour la deuxième demi-campagne des 27 poches.

Tableau 3.4 : Statistiques descriptives des variables opératoires pour la deuxième mi-campagne des poches

Variables	Unité	Min	Max	Moy	Var.	E.T.
Température de l'acier	°C	1 496	1 846	1 695	1 409	37,5
Laitier transporté	kg	0	6 025	1 025	-	739
Basicité		0,91	3,78	1,66	0,18	0,42
Temps barbotage	min	0	237	75	1 426	38
CaSi injecté	kg	0	170,5	43,2	458,7	21,4
Puissance moyenne	MW	0	108	9,15	35,1	5,92
Degré de désulfuration	% poids	0	0,271	0,029	0,001	0,026
Temps attente total	min	0	293	44	1 291	36
Temps de résidence	min	12	485	120	3 017	55
Temps de coulée	min	6	157	90	155	12
Temps de rotation	min	5	2 632	145	-	168

D'après les Tableaux C.1 à C.13, certaines valeurs doivent être considérées avec précaution car les données peuvent être erronées ou manquantes. Par exemple, à la ligne 14 du cas 15 au Tableau C.7, la puissance moyenne a atteint 108 MW alors que la moyenne tourne autour de 9,2 MW. La puissance moyenne est faussée lorsque la durée totale de la chauffe est très courte par rapport à l'énergie fournie car elle est calculée selon ces deux valeurs. Il est facile pour l'opérateur d'effacer ou de modifier certaines d'entre elles par inadvertance. Ou encore, d'après le Tableau 3.4, la température de l'acier au moment du remplissage de la poche a atteint 1 846 °C, ce qui peut accélérer le processus d'usure du réfractaire alors qu'à une température de 1 495 °C, l'acier se serait fort probablement solidifié. Dans ce cas, l'acier a sûrement été chauffé au four EBT avant de vider l'acier dans la poche, mais la nouvelle température n'a pas été mesurée. Pour le calcul de la basicité, celle-ci dépend de l'épaisseur totale du laitier observée par l'opérateur au four.

poche, mesure qui est approximative et subjective. Aussi, les poches transvidées ont été considérées. C'est pourquoi, pour les temps de coulée, certaines valeurs sont absentes pour certaines vies. En effet, une poche, dont une défectuosité au bouchon poreux empêche de barboter l'acier au four-poche par exemple, n'a aucun temps de coulée car son cycle a été interrompu. Pour la poche servant de destination, il n'y aura donc pas de température d'acier car cette mesure vient du four EBT et que la poche n'est pas passée à cette station au cours de son cycle. Finalement, il faut compter les erreurs informatiques qui peuvent survenir lors de certains calculs, notamment la durée des traitements ou lors de la sauvegarde des données, qui sont alors perdues. Ainsi, certaines températures, masse de laitier transporté, basicité ou puissances moyennes sont manquantes pour certaines coulées. Pour les temps, les chiffres sont assez exacts car les erreurs ont été corrigées manuellement en analysant les différents rapports imprimés à ces stations de travail lorsqu'elles pouvaient être détectées. Par exemple, le temps de barbotage pouvait atteindre 1 427 minutes ou 23,8 heures alors que sur le rapport, la poche n'est restée que 48 minutes au four-poche. Dans le cas contraire, les données ont été laissées telles quelles afin de conserver leur intégrité. Malgré ces petits inconvénients informatiques, plus de 95 % des informations ont pu être retracées et la majorité d'entre elles possède des valeurs acceptables.

La première difficulté de construire un modèle de régression linéaire avec ces valeurs est l'expression des variables opératoires. Elles possèdent des unités différentes, et, pour une même poche, fluctuent énormément. Il est clair que la vie d'une poche de

coulée n'a aucune connotation scientifique, mais représente bel et bien une mesure qui indique son degré d'utilisation, exprimée en nombre de coulées qu'elle reçoit. C'est pourquoi il n'est pas possible de relier cette vie directement à une température, à une durée, à une masse, etc. Par contre, en fixant une valeur seuil, il est possible de calculer le nombre de coulées qui sont inférieures ou supérieures à cette limite et de conserver ainsi l'unité de mesure de la variable à prédire. En plus, la variable X devient alors une mesure précise et sans biais. Il est important de poser cette hypothèse pour construire un modèle de régression linéaire simple ou multiple par la méthode des moindres carrés [63]. Un intervalle de confiance de 95 % est désiré pour la validation du modèle.

Pour la quantité de CaSi ajoutée, les temps de barbotage et d'attente, il ne manque aucune donnée. Pour les autres variables, certaines données peuvent manquer pour les raisons déjà mentionnées plus haut. Il y a donc deux façons de construire un modèle : 1) considérer les coulées néfastes à la poche ; 2) considérer les coulées inoffensives. Or, ce dernier cas se rapproche plus de la vie de la poche. La valeur seuil est déterminée en effectuant une régression linéaire simple sur plusieurs seuils différents. Si le coefficient de corrélation ou de détermination change subitement, alors ce seuil est conservé. Les chiffres en caractère italique dans tous les tableaux présentés dans cette partie sont significatifs à une probabilité inférieure à 5 %.

3.3.1 Nuance d'acier

L'aciérie distingue les quatre nuances suivantes : (1) très bas carbone (0 à 0,08 %) ; (2) bas carbone (0,09 à 0,14 %) ; (3) moyen carbone (0,15 à 0,30 %) ; (4) haut carbone (>0,30 %). Les Tableaux 3.5 et 3.6 montrent le nombre de coulées que chaque poche a reçu pour chacune de ces quatre nuances.

Tableau 3.5 : Nombre de très bas, bas, moyen et haut carbone par campagne pour les poches ayant eu une campagne complète

Cas	1					2				
	TBC	BC	MC	HC	Vie	TBC	BC	MC	HC	Vie
1	0	1	1	25	27	1	0	0	18	19
2	1	0	2	31	34	1	1	2	14	18
3	1	1	1	27	30	0	1	2	26	29
4	1	0	1	29	31	1	0	4	24	29
5	1	1	0	32	34	1	4	0	21	26
6	1	0	4	30	35	1	0	1	26	28
7	2	1	4	24	31	2	1	7	19	29
8	4	0	3	23	30	2	3	5	21	31
9	2	1	4	24	31	3	3	5	18	29
10	5	0	6	20	31	3	2	2	20	27
11	2	5	5	20	32	1	1	0	22	24
12	0	1	0	32	33	3	1	4	20	28
13	2	4	2	29	37	1	2	1	29	33
14	3	1	4	27	35	0	2	1	27	30
15	0	3	1	27	31	5	2	1	11	19
16	2	3	1	24	30	1	0	2	24	27
17	6	1	2	23	32	0	0	0	16	16
18	7	1	8	13	29	2	1	3	23	29
19	3	2	4	27	36	5	2	2	18	27
20	3	0	3	24	30	2	2	8	22	34
21	4	2	1	24	31	1	3	0	19	23
22	1	3	10	19	33	4	5	4	14	27
23	3	1	8	20	32	3	5	3	10	21
24	1	2	21	6	30	6	3	5	12	26
25	1	4	3	23	31	6	7	11	3	27
26	3	3	0	16	22	8	6	19	2	35
27	2	3	3	21	26	6	8	15	0	28

Durant la période d'échantillonnage, la production a été en grande partie des aciers à moyen et haut carbone. Il est très difficile d'évaluer l'influence des aciers bas et très bas carbone sur la vie de la poche, même pour les poches n'ayant eu qu'une demi-campagne.

Tableau 3.6 : Nombre de très bas, bas, moyen et haut carbone par campagne pour les poches qui ont eu une demi-campagne

Cas	TBC	BC	MC	HC	Vie
A	1	1	2	28	32
B	3	2	5	19	29
C	1	5	4	20	30
D	1	1	0	27	29
E	1	0	1	26	28
F	1	0	1	27	29
G	4	6	3	18	31
H	2	5	3	20	30
I	2	2	4	24	32
J	6	3	6	17	32
K	2	5	4	21	32
L	2	2	10	13	27
M	4	1	18	11	34
N	3	1	14	9	27
O	1	0	21	3	25
P	0	0	18	0	18
Q	7	2	3	17	29
R	9	2	4	17	32

D'après la matrice de corrélation présentée au Tableau 3.7, la corrélation entre le nombre reçu pour chacune des nuances et la vie semble faible ($r = 0,323$ pour $n = 27$ et $r = 0,248$ pour $n = 45$ sauf pour le nombre de haut carbone sur y_1 et y_1^* et le nombre de moyen carbone sur y_2 .

Tableau 3.7 : Matrice de corrélation entre le nombre reçu pour chaque grade et la vie des deux campagnes de la poche

Variable Campagne	TBC		BC		MC		HC	
	1	2	1	2	1	2	1	2
y_1^*	0,12	-	0,13	-	-0,28	-	0,61	-
y_1	-0,11	-	-0,08	-	0,09	-	0,52	-
y_2	-	0,20	-	0,22	-	0,51	-	0,20

L'expression de la variable pour modéliser la vie d'une poche portera donc sur y_2 car, d'une part, elle fluctue beaucoup plus que y_1 et, d'autre part, le grade d'acier reçu n'explique pas les variations observées sur y_1^* , même pour les 18 poches n'ayant eu qu'une demi-campagne.

3.3.2 Température de l'acier au remplissage de la poche

Au Tableau 3.8, le coefficient de corrélation change légèrement lorsque la valeur seuil pour la température est établie à 1 710 °C. Cette différence se reflète un peu plus sur le coefficient de détermination lorsqu'une régression linéaire simple est effectuée sur cette variable.

Tableau 3.8 : Coefficient de corrélation et de détermination pour différents seuils de la température d'acier au four à arc électrique

Coefficient	1 680°C	1 690°C	1 700°C	1 710°C	1 720°C	1 730°C	1 740°C	1 750°C
r	0,520	0,589	0,637	0,734	0,808	0,842	0,881	0,889
R ²	0,271	0,347	0,406	0,538	0,653	0,710	0,776	0,790

Tableau 3.9 : Résumé de la régression linéaire de $N_{T < 1710^\circ\text{C}}$ sur y_2 et sur y_{total}

y ₂						
Régression Simple		$R = 0,73352872$ $F(1,25) = 29,120$			$R^2 = 0,53806438$ $p < 0,00001$	R^2 Ajusté = 0,51958695 E.T. Estimé : 3,2914
n=27	Coeff. Corr.	E.T.	β	E.T.	t(25)	p
Ord. à l'origine $N_{T < 1710^\circ\text{C}}$	0,734	0,136	12,870	2,627	4,898	0,0000
y_{total}						
Régression Simple		$R = 0,73964718$ $F(1,25) = 30,197$			$R^2 = 0,54707795$ $p < 0,00001$	R^2 Ajusté = 0,52896107 E.T. Estimé : 3,6333
n=27	Coeff. Corr.	E.T.	β	E.T.	t(25)	p
Ord. à l'origine $N_{T < 1710^\circ\text{C}}$	0,740	0,135	42,421	2,900	14,626	0,0000

Au Tableau 3.9, la variable qui représente le nombre de coulées ayant eu une température inférieure à 1 710 °C explique 53,8 % de la variabilité sur y_2 . Le test de Fisher, où $F(1,25) = 4,24$ pour un intervalle de confiance de 95 %, favorise ce modèle par rapport au modèle de comparaison, qui ne comporte que l'ordonnée à l'origine. Le test de Student montre que la valeur de l'estimé est non nulle car $t(25) = 2,06$ pour un intervalle

de confiance de 95 %. La Figure 3.2 illustre cette variable en fonction de la vie de la deuxième demi-campagne de chaque poche. Sur le total, cette variable explique 54,7 % de la variabilité sur y_{total} .

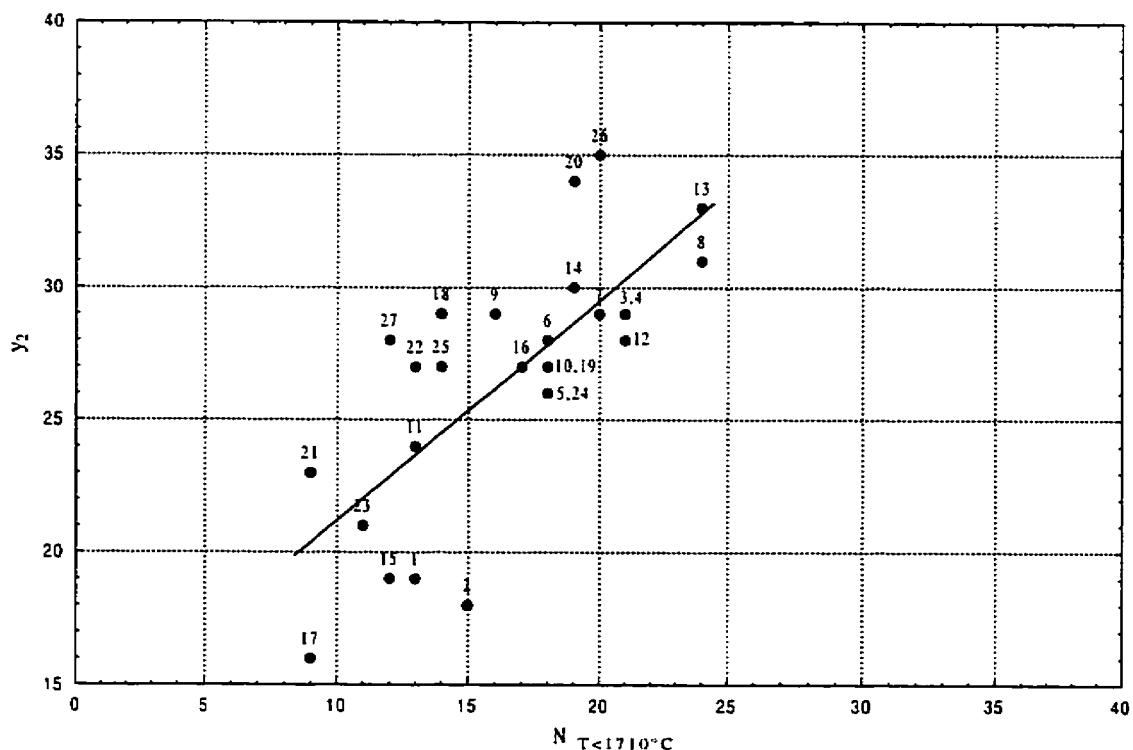


Figure 3.2 : Vie de la deuxième moitié d'une campagne de la poche en fonction du nombre de coulées dont la température est inférieure à 1 710 °C

3.3.3 Laitier primaire transporté

Au Tableau 3.10, le coefficient de corrélation devient plus élevé lorsque la valeur seuil pour la masse de laitier primaire est établie à 1 500 kg. Cette différence se reflète très bien sur le coefficient de détermination lorsqu'une régression linéaire simple est effectuée sur cette variable.

Tableau 3.10 : Coefficient de corrélation et de détermination pour différents seuils de la masse de laitier primaire transporté

Coefficient	1 100 kg	1 200 kg	1 300 kg	1 400 kg	1 500 kg	1 600 kg	1 700 kg	1 800 kg
r	0,611	0,653	0,662	0,688	0,790	0,851	0,841	0,841
R^2	0,373	0,426	0,439	0,473	0,623	0,724	0,708	0,707

Tableau 3.11 : Résumé de la régression linéaire de $N_{m < 1500 \text{ kg}}$ sur y_2 et sur y_{total}

y_2					
Régression Simple		$R = 0,78950654$		$R^2 = 0,62332058$	
		$F(1,25) = 41,369$		$p < 0,00000$	
n=27	Coeff. Corr.	E.T.	β	E.T.	t(25)
Ord. à l'origine			11,153	2,473	4,510
$N_{m < 1500 \text{ kg}}$	0,789	0,123	0,702	0,109	6,432
y_{total}					
Régression Simple		$R = 0,76227467$		$R^2 = 0,58106267$	
		$F(1,25) = 34,675$		$p < 0,00000$	
n=27	Coeff. Corr.	E.T.	β	E.T.	t(25)
Ord. à l'origine			41,231	2,908	14,179
$N_{m < 1500 \text{ kg}}$	0,762	0,129	0,756	0,128	5,889
					p

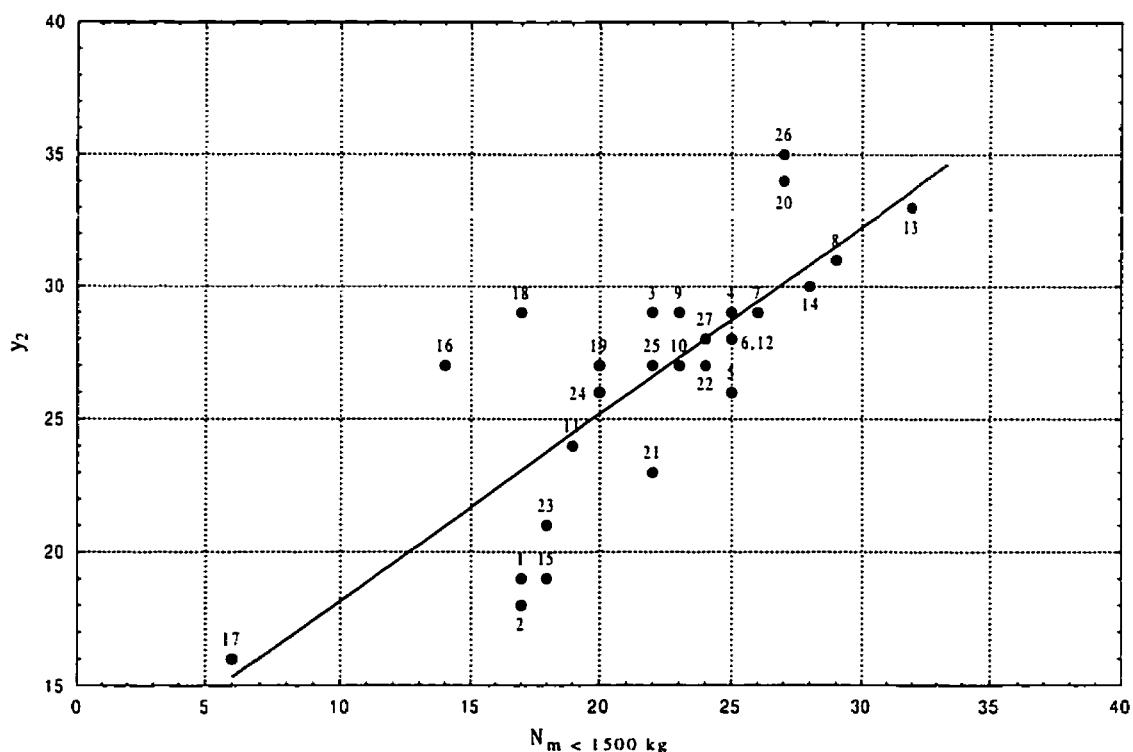


Figure 3.3 : Vie de la deuxième moitié d'une campagne de la poche en fonction du nombre de coulées avec une masse du laitier primaire inférieure à 1 500 kg

D'après le Tableau 3.11, la variable qui exprime le nombre de coulées ayant une masse de laitier primaire inférieure à 1 500 kg (ou 3,3 po) explique 62,3 % de la variabilité sur y_2 . La Figure 3.3 illustre y_2 en fonction de cette variable. Sur le total, cette variable explique 58,1 % de la variabilité sur y_{total} .

3.3.4 Basicité du laitier

La composition du laitier (CaO, MgO, Al₂O₃ et SiO₂) est calculée à partir du bilan massique des additifs (chaux, chaux dolomitique, aluminium, carbure de calcium, aluminates de chaux ou autres additifs servant à protéger le bain ou à augmenter la fluidité) ajoutés lors du remplissage de la poche, au four-poche et de la quantité de laitier primaire transporté au four EBT. La basicité du laitier est définie par l'équation (3.1) telle que définie par Prendergast dans ses travaux [42].

$$B = \frac{\% CaO + \% MgO}{\% Al_2O_3 + \% SiO_2} \quad (3.1)$$

Au Tableau 3.12, le coefficient de corrélation devient beaucoup plus élevé lorsque la valeur seuil pour la basicité est supérieure à 1,2. Le coefficient de détermination est trop élevé si le seuil de la basicité est supérieur à 1,2 lorsqu'une régression linéaire simple est effectuée.

Tableau 3.12 : Coefficient de corrélation et de détermination pour différents seuils de la basicité

Coefficient	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
r	0,991	0,985	0,928	0,777	0,659	0,521	0,488
R ²	0,982	0,970	0,862	0,603	0,434	0,272	0,238

D'après la régression présentée au Tableau 3.13, 60,3 % de la variabilité sur y_2 est expliquée par le nombre de coulées supérieures à une basicité de 1,2. La relation entre ces deux variables est illustrée à la Figure 3.4. Sur le total, cette variable explique 50,8 % de la variabilité sur y_{total} .

Tableau 3.13 : Résumé de la régression linéaire de $N_{B > 1,2}$ sur y_2 et sur y_{total}

y_2						
Régression Simple		$R = 0,77679306$	$R^2 = 0,60340745$		$R^2 \text{ Ajusté} = 0,58754375$	
		$F(1,25) = 38,037$	$p < 0,00000$		$E.T. \text{ Estimé} = 3,0497$	
$n=27$	Coeff. Corr.	E.T.	β	E.T.	$t(25)$	p
Ord. à l'origine $N_{B > 1,2}$	0,777	0,126	11,269	2,559	4,404	0,0002
			0,654	0,106	6,167	0,0000
y_{total}						
Régression Simple		$R = 0,71305809$	$R^2 = 0,50845184$		$R^2 \text{ Ajusté} = 0,48878991$	
		$F(1,25) = 25,860$	$p < 0,00003$		$E.T. \text{ Estimé} : 3,7851$	
$n=27$	Coeff. Corr.	E.T.	β	E.T.	$t(25)$	p
Ord. à l'origine $N_{B > 1,2}$	0,713	0,140	42,170	3,176	13,278	0,0000
			0,669	0,132	5,085	0,0000

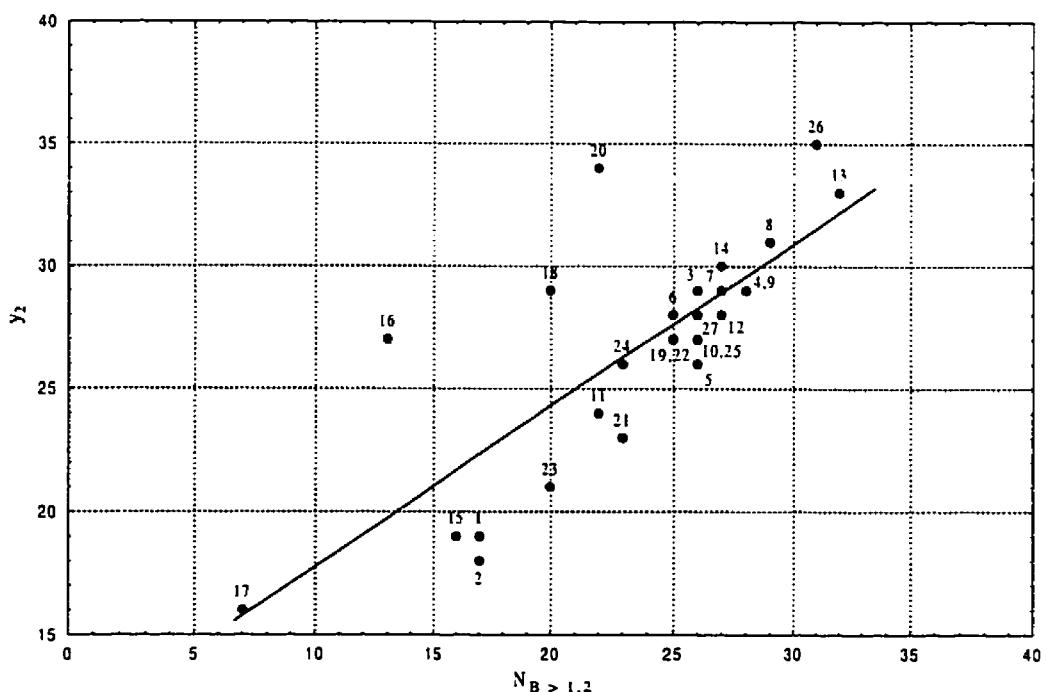


Figure 3.4 : Vie de la deuxième demi-campagne de la poche en fonction du nombre de coulées ayant une basicité supérieure à 1,2

3.3.5 Temps de barbotage

Le barbotage permet d'homogénéiser le bain des additifs ajoutés au remplissage de la poche et au four-poche. Pour la grande majorité des cas, la poche barbote durant toute la durée au four-poche et constitue le plus long traitement effectué. Au Tableau 3.14, le coefficient de corrélation change brusquement lorsque la valeur seuil pour le temps de barbotage est établie à 90 min. Le coefficient de détermination est d'autant plus important lorsqu'une régression linéaire simple est effectuée.

Tableau 3.14 : Coefficient de corrélation et de détermination pour différents seuils du temps de barbotage

Coefficient	45 min	60 min	75 min	90 min	105 min	120 min
r	0,203	0,531	0,534	0,844	0,871	0,956
R^2	0,041	0,282	0,285	0,713	0,758	0,913

Tableau 3.15 : Résumé de la régression linéaire de $N_{\text{barb} < 90 \text{ min}}$ sur y_2 et sur y_{total}

y_2						
Régression Simple		$R = 0,84420482$ $F(1,25) = 62,012$			$R^2 = 0,71268178$ $p < 0,00000$	
$n=27$	Coeff. Corr.	E.T.	β	E.T.	$t(25)$	p
Ord. à l'origine			6,433	2,613	2,462	0,0211
$N_{\text{barb} < 90 \text{ min}}$	0,844	0,107	1,023	0,130	7,875	0,0000
y_{total}						
Régression Simple		$R = 0,67347387$ $F(1,25) = 20,751$			$R^2 = 0,45356706$ $p < 0,00012$	
$n=27$	Coeff. Corr.	E.T.	β	E.T.	$t(25)$	p
Ord. à l'origine			49,927	4,017	9,939	0,0000
$N_{\text{barb} < 90 \text{ min}}$	0,673	0,148	0,910	0,200	4,56	0,0001

D'après le Tableau 3.15, 71,3 % de la variabilité sur y_2 est expliquée lorsque le seuil est établi à 90 minutes. La Figure 3.5 montre y_2 en fonction du nombre de coulées qui ont eu un temps de barbotage inférieur à 90 minutes. Sur le total, cette variable explique 45,4 % de la variabilité sur y_{total} .

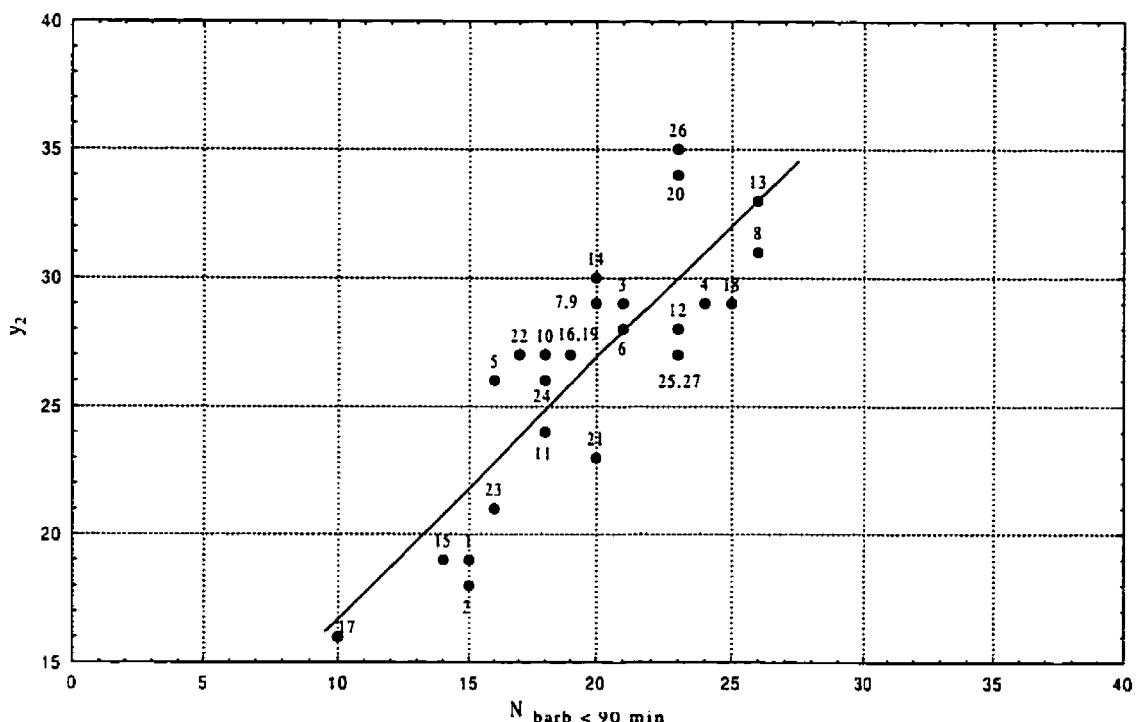


Figure 3.5 : Vie de la deuxième demi-campagne en fonction du nombre de coulées ayant un temps de barbotage inférieur à 90 min

3.3.6 Injection de CaSi

Au Tableau 3.16, le coefficient de corrélation se démarque lorsque la valeur seuil pour la quantité de silico-calcium est établie à 60 kg. Le coefficient de détermination devient trop élevé lorsqu'une régression linéaire simple est effectuée avec une quantité de 70 kg.

Tableau 3.16 : Coefficient de corrélation et de détermination pour différents seuils de la quantité de CaSi

Coefficient	30 kg	40 kg	50 kg	60 kg	70 kg
r	0,246	0,095	0,133	0,765	0,964
R^2	0,060	0,009	0,018	0,585	0,930

D'après le Tableau 3.17, le nombre de coulées avec une quantité de silico-calcium injectée inférieure à 60 kg permet d'expliquer 58,5 % de la variabilité sur y_2 et 68 % sur y_{total} . La Figure 3.6 montre la relation entre ces deux variables.

Tableau 3.17 : Résumé de la régression linéaire de $N_{CaSi < 60 kg}$ sur y_2 et sur y_{total}

y_2						
Régression Simple			$R = 0,76474059$		$R^2 = 0,58482818$	R^2 Ajusté = 0,56822130
			$F(1,25) = 35,216$		$p < 0,00000$	
n=27	Coeff. Corr.	E.T.	β	E.T.	t(25)	p
Ord. à l'origine			6,458	2,452	1,871	0,0730
$N_{CaSi < 60 kg}$	0,765	0,129	0,835	0,141	5,934	0,0000
y_{total}						
Régression Simple			$R = 0,82461829$		$R^2 = 0,67999532$	R^2 Ajusté = 0,66719514
			$F(1,25) = 53,124$		$p < 0,00000$	
n=27	Coeff. Corr.	E.T.	β	E.T.	t(25)	p
Ord. à l'origine			33,64	3,378	9,958	0,0000
$N_{CaSi < 60 kg}$	0,825	0,113	1,004	0,138	7,289	0,0000

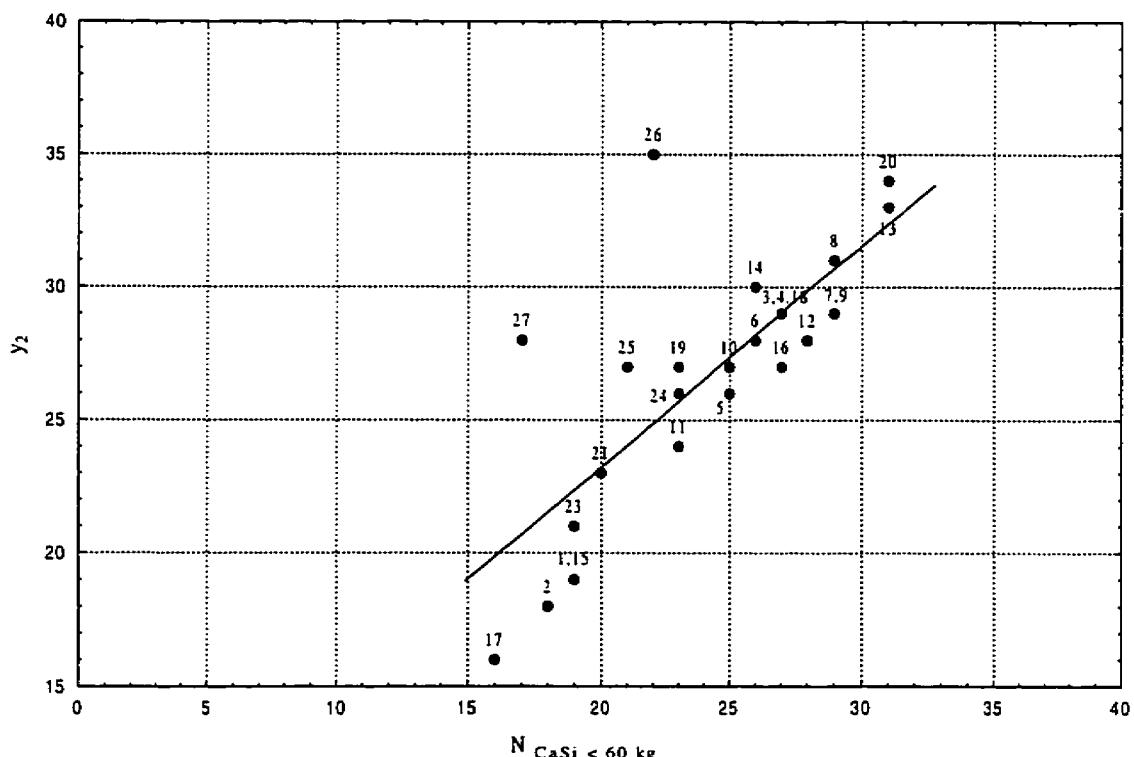


Figure 3.6 : Vie de la deuxième demi-campagne en fonction du nombre de coulées avec une quantité de CaSi inférieure à 60 kg

3.3.7 Puissance moyenne

Au Tableau 3.18, le coefficient de corrélation change brusquement lorsque la valeur seuil pour la puissance moyenne est établie à 10 MW.

Tableau 3.18 : Coefficient de corrélation et de détermination pour différents seuils de la puissance moyenne au four-poche

Coefficient	8 MW	9 MW	10 MW	11 MW	12 MW	13 MW	14 MW
r	0,316	0,467	0,760	0,794	0,849	0,870	0,898
R^2	0,100	0,218	0,578	0,630	0,721	0,757	0,806

D'après le Tableau 3.19, la variable $N_{P < 10 \text{ MW}}$ explique 57,8 % de la variabilité sur y_2 et 49,7 % sur y_{total} lorsque le seuil est établi à 10 MW. La Figure 3.7 illustre la vie de la deuxième demi-campagne en fonction de cette variable.

Tableau 3.19 : Résumé de la régression linéaire de $N_{P < 10 \text{ MW}}$ sur y_2 et sur y_{total}

y_2						
Régression Simple	$R = 0,76028609$ $F(1,25) = 34,247$			$R^2 = 0,57803494$ $p < 0,00000$		R^2 Ajusté = 0,56115633 E.T. Estimé = 3,1458
n=27	Coeff. Corr.	E.T.	β	E.T.	t(25)	p
Ord. à l'origine			12,074	2,560	4,716	0,0001
$N_{P < 10 \text{ MW}}$	0,760	0,130	0,703	0,120	5,852	0,0000
y_{total}						
Régression Simple	$R = 0,70472064$ $F(1,25) = 24,665$			$R^2 = 0,49663118$ $p < 0,00004$		R^2 Ajusté = 0,47649642 E.T. Estimé : 3,8303
n=27	Coeff. Corr.	E.T.	β	E.T.	t(25)	p
Ord. à l'origine			42,848	3,117	13,746	0,0000
$N_{P < 10 \text{ MW}}$	0,705	0,142	0,727	0,146	4,966	0,0000

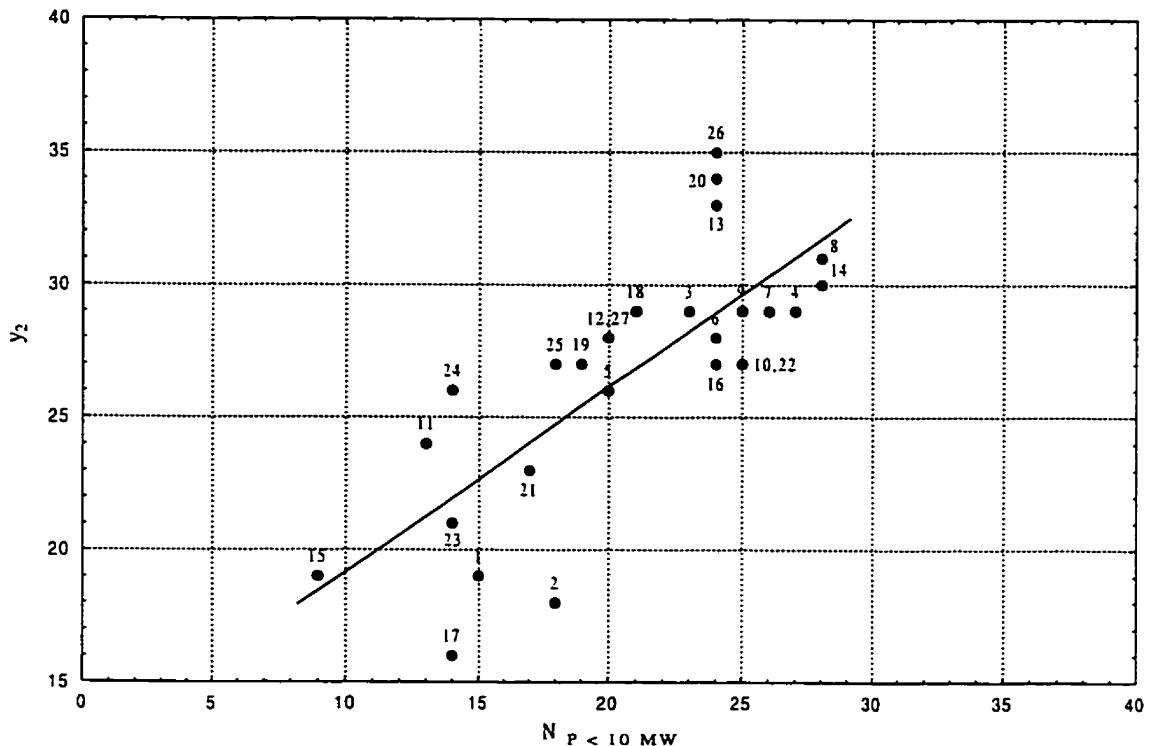


Figure 3.7 : Vie de la deuxième demi-campagne en fonction du nombre de coulées dont la puissance moyenne ne dépasse pas 10 MW

3.3.8 Temps d'attente total

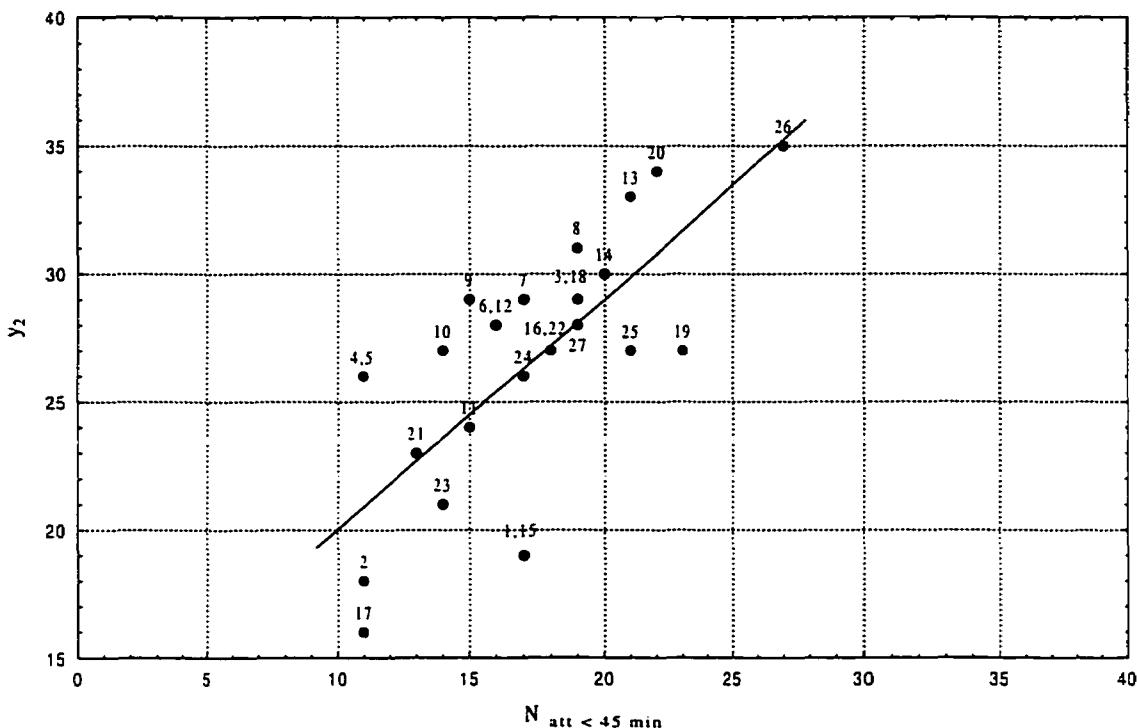
Le temps d'attente total représente la somme du temps d'attente de la poche entre le four EBT et le four-poche avec le temps d'attente entre le four-poche et la coulée continue. Au Tableau 3.20, le coefficient de corrélation et de détermination changent brusquement lorsque la valeur seuil pour le temps total est établie à 45 min.

Tableau 3.20 : Coefficient de corrélation et de détermination pour différents seuils du temps d'attente total

Coefficient	15 min	30 min	45 min	60 min	75 min	90 min
r	0,150	0,437	0,714	0,800	0,905	0,939
R ²	0,022	0,191	0,510	0,640	0,820	0,882

Tableau 3.21 : Résumé de la régression linéaire de $N_{att < 45 \text{ min}}$ sur y_2 et sur y_{total}

		y_2			
Régression Simple		$R = 0,71426290$ $F(1,25) = 26,038$		$R^2 = 0,51017149$ $p < 0,00003$	
$n=27$		Coeff. Corr.	E.T.	β	E.T.
Ord. à l'origine				11,060	3,120
$N_{att < 45 \text{ min}}$		0,714	0,140	0,896	0,176
		y_{total}			
Régression Simple		$R = 0,44564303$ $F(1,25) = 6,1953$		$R^2 = 0,19859771$ $p < 0,01982$	
$n=27$		Coeff. Corr.	E.T.	β	E.T.
Ord. à l'origine				47,059	4,449
$N_{att < 45 \text{ min}}$		0,445	0,179	0,623	0,250

**Figure 3.8 :** Vie de la deuxième demi-campagne en fonction du nombre de coulées ayant un temps d'attente total inférieur à 45 min

D'après le Tableau 3.21, le nombre de coulées qui ont eu un temps d'attente total inférieur à 45 minutes explique 51 % de la variabilité sur y_2 et 19,9 % sur y_{total} . La Figure 3.8 illustre la vie de la deuxième mi-campagne en fonction de cette variable.

3.3.9 Degré de désulfuration

Le degré de désulfuration est calculé en soustrayant la composition finale de l'acier à la coulée continue en pourcentage poids de la composition initiale au four EBT. Au Tableau 3.22, le coefficient augmente graduellement avec la valeur seuil. Le changement se produit plutôt sur le coefficient de détermination de la régression simple effectuée avec la valeur seuil fixée à 0,055 %.

Tableau 3.22 : Coefficient de corrélation et de détermination pour différents seuils du degré de désulfuration

Coefficient	0,030%	0,035%	0,040%	0,045%	0,050%	0,055%	0,060%	0,065%	0,070%
r	0,511	0,555	0,558	0,634	0,686	0,790	0,823	0,855	0,888
R ²	0,261	0,307	0,311	0,402	0,471	0,624	0,677	0,731	0,788

Tableau 3.23 : Résumé de la régression linéaire de $N_{Si-Sf < 0,055\%}$ sur y_2 et sur y_{total}

y_2					
Régression Simple		R = 0,78984691 F(1,25) = 41,464		$R^2 = 0,62385814$ p < 0,00000	
n=27		Coeff. Corr.	E.T.	β	E.T.
Ord. à l'origine		0,790	0,123	10,004	2,644
$N_{Si-Sf < 0,055\%}$				0,723	0,112
y_{total}					
Régression Simple		R = 0,73229862 F(1,25) = 28,910		$R^2 = 0,53626127$ p < 0,00001	
n=27		Coeff. Corr.	E.T.	β	E.T.
Ord. à l'origine		0,732	0,136	40,705	3,273
$N_{Si-Sf < 0,055\%}$				0,747	0,139
					t(25)
					p
					3,783
					0,0009
					6,439
					0,0000

D'après la Tableau 3.23, 62,4 % de la variabilité sur y_2 et 53,6 % sur y_{total} sont expliquées lorsque la valeur seuil est établie à 0,055 %. La Figure 3.9 montre la relation entre la vie de la deuxième mi-campagne et cette variable.

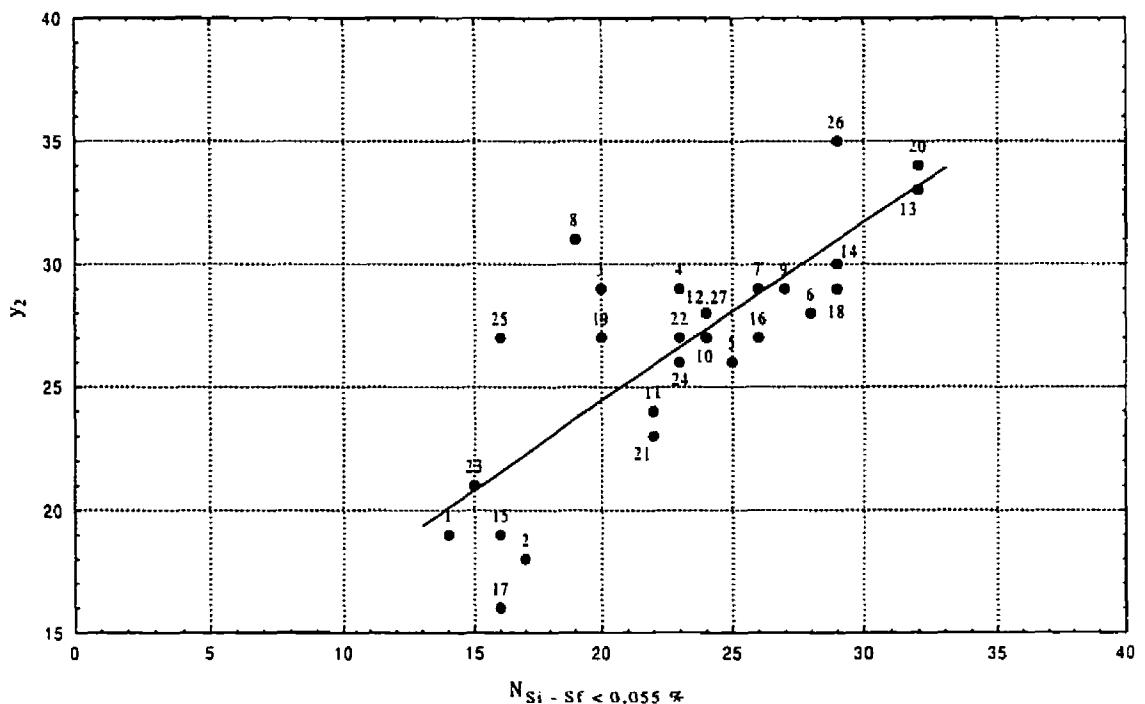


Figure 3.9 : Vie de la deuxième demi-campagne en fonction du nombre de coulées avec une désulfuration inférieure à 0,055 %

3.3.10 Corrélations entre les variables opératoires

Le Tableau 3.24 résume les résultats obtenus. Le coefficient de corrélation entre les différentes variables opératoires varie entre 0,714 et 0,844 montrant que la valeur seuil choisie n'est ni trop faible ni trop forte. La Figure 3.10 montre les mêmes résultats sous une forme graphique.

Tableau 3.24 : Matrice des corrélations entre les variables opératoires

Variables	y_2	$N_{T<1710^{\circ}C}$	$N_{m<1500 \text{ kg}}$	$N_{B>1,2}$	$N_{\text{barb}<90 \text{ min}}$	$N_{\text{CaSi}<60 \text{ kg}}$	$N_{P<10 \text{ MW}}$	$N_{\text{att}<45 \text{ min}}$	$N_{\text{Si-Sf}<0,055\%}$
y_2	1	0,734	0,790	0,777	0,844	0,765	0,760	0,714	0,790
$N_{T<1710^{\circ}C}$	0,734	1	0,697	0,657	0,620	0,776	0,682	0,457	0,499
$N_{m<1500 \text{ kg}}$	0,790	0,697	1	0,915	0,712	0,625	0,642	0,464	0,580
$N_{B>1,2}$	0,777	0,657	0,915	1	0,721	0,545	0,598	0,473	0,486
$N_{\text{barb}<90 \text{ min}}$	0,844	0,620	0,712	0,721	1	0,63	0,608	0,632	0,573
$N_{\text{CaSi}<60 \text{ kg}}$	0,765	0,776	0,625	0,545	0,632	1	0,726	0,326	0,699
$N_{P<10 \text{ MW}}$	0,760	0,682	0,642	0,598	0,608	0,726	1	0,374	0,628
$N_{\text{att}<45 \text{ min}}$	0,714	0,457	0,464	0,473	0,632	0,326	0,374	1	0,382
$N_{\text{Si-Sf}<0,055\%}$	0,790	0,499	0,580	0,486	0,573	0,699	0,628	0,382	1

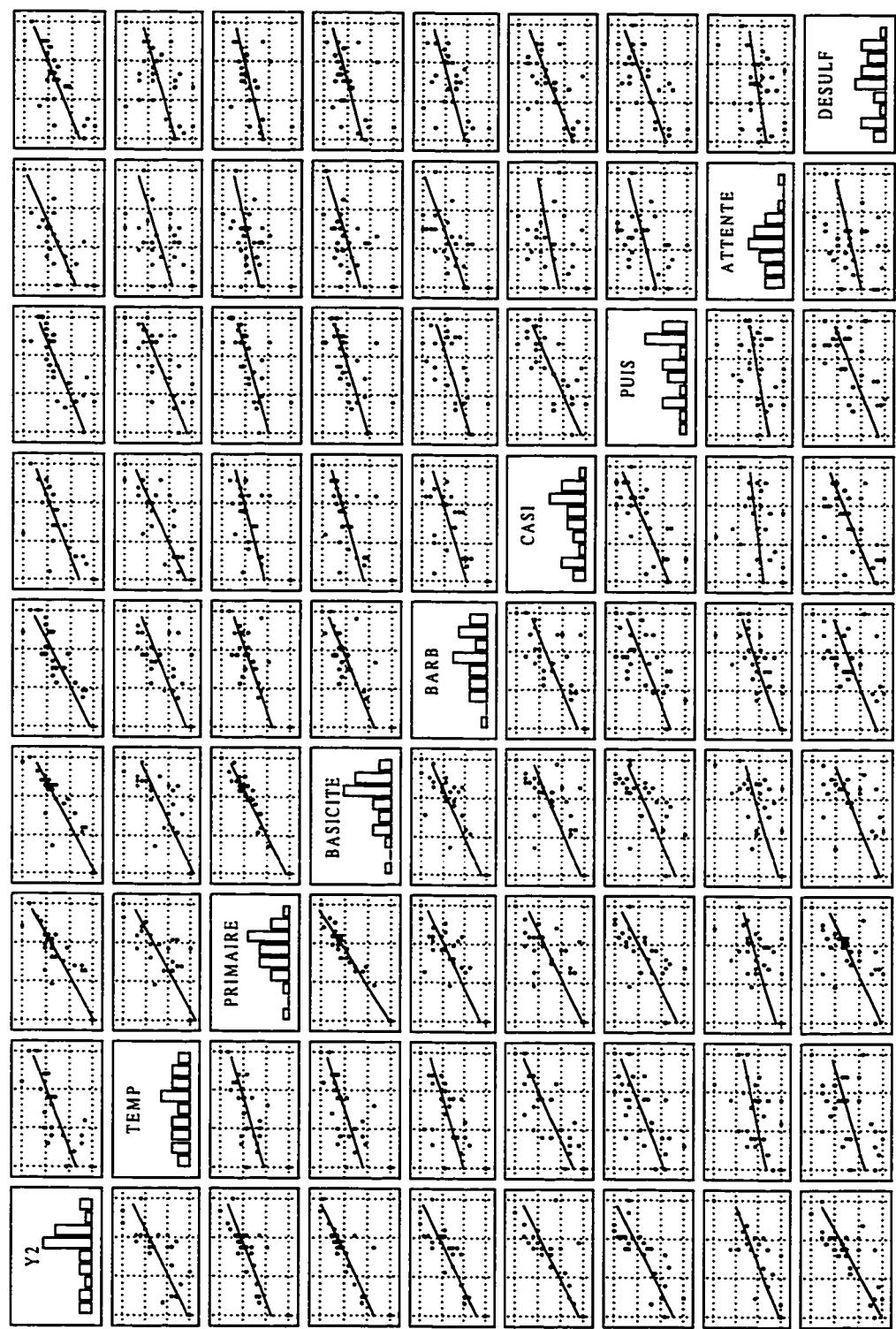


Figure 3.10 : Graphique de la matrice des corrélations des variables opératoires

3.4 Analyse du cycle de la poche

Les différents moments du cycle d'une poche ont été définis comme suit :

$$t_{\text{résidence}} = \text{heure du début de la coulée} - \text{heure de la fin de la vidange du four} \quad (3.2)$$

$$t_{\text{coulée}} = \text{heure de la fin de la coulée} - \text{heure du début de la coulée} \quad (3.3)$$

$$t_{\text{rotation}} = \text{heure du début de la vidange du four} - \text{heure de la fin de la coulée} \quad (3.4)$$

$$t_{\text{cycle}} = t_{\text{résidence}} + t_{\text{coulée}} + t_{\text{rotation}} + t_{\text{remplissage}} \quad (3.5)$$

Le temps de remplissage de la poche n'a aucune influence sur la durée de vie de celle-ci et a donc été retiré de l'analyse. Le Tableau 3.25 contient le nombre de coulées que possède chaque poche pour un cycle opérationnel type et les anomalies survenues. Il faut noter que les temps diffèrent de ceux présentés à la Figure 3.1. Le temps de barbotage et le temps d'attente total ont été inclus car les deux sont compris dans le temps de résidence. D'après les valeurs indiquées, il ne semble pas avoir de corrélation directe entre le nombre de coulées anormales, dont les temps sont hors de ceux du cycle opérationnel type, et la deuxième demi-vie de la poche. Le problème est que plus la poche reçoit des coulées, plus les chances d'avoir des anomalies durant son cycle augmentent.

Tableau 3.25 : Nombre de coulées pour un cycle opérationnel type et anomalies survenues lors de la deuxième mi-campagne

	Vie	Temps de résidence			Temps de barbouge			Temps d'attente			Temps de coulée			Temps de rotation			Temps du cycle		
		< 70	70-120	> 120	< 60	60-90	> 90	< 30	> 30	< 70	70-100	> 100	< 60	60-250	> 250	< 260	260-450	> 450	
Cas 1	19	7	11	1	8	7	4	19	0	0	18	0	0	3	13	2	3	14	2
Cas 2	18	2	9	7	4	11	3	15	3	0	16	2	1	16	0	1	16	1	
Cas 3	29	5	12	12	11	10	8	26	3	1	23	4	3	17	8	3	18	8	
Cas 4	29	3	14	12	7	18	5	24	5	1	25	3	0	25	3	0	24	5	
Cas 5	26	1	7	18	5	13	10	14	12	3	22	1	10	14	0	1	24	1	
Cas 6	28	2	10	16	5	17	7	22	6	2	27	0	10	17	0	3	23	2	
Cas 7	29	2	13	14	9	11	9	23	6	0	24	3	6	19	3	2	24	3	
Cas 8	31	3	18	10	9	18	5	23	7	2	29	1	2	26	2	2	26	3	
Cas 9	29	2	12	15	9	11	9	23	6	1	23	4	1	23	4	2	22	5	
Cas 10	27	3	10	14	10	8	9	15	12	0	16	6	1	20	5	3	19	5	
Cas 11	24	6	6	12	13	7	6	16	8	0	13	4	7	13	3	7	11	6	
Cas 12	28	3	11	14	8	15	5	19	9	0	23	4	7	20	0	2	26	0	
Cas 13	33	4	14	15	7	20	7	22	11	0	20	8	7	25	0	3	25	5	
Cas 14	30	3	14	13	7	13	10	24	6	0	24	4	3	24	2	1	26	3	
Cas 15	19	3	11	5	4	10	5	18	1	0	18	1	1	14	3	1	15	3	
Cas 16	27	3	13	11	8	11	8	22	5	0	23	3	1	18	7	0	21	6	
Cas 17	16	2	6	8	4	6	6	12	4	0	14	1	4	10	1	1	14	1	
Cas 18	29	7	13	9	14	11	4	21	8	0	27	0	7	20	1	4	24	1	
Cas 19	27	3	11	13	10	10	8	22	4	0	20	3	8	15	3	3	21	3	
Cas 20	34	7	13	14	10	11	29	5	0	24	7	10	21	2	4	26	4		
Cas 21	23	2	12	9	6	13	3	16	7	1	18	3	5	16	1	4	26	4	
Cas 22	27	3	11	13	7	11	10	22	5	0	23	1	3	22	1	3	20	4	
Cas 23	21	1	11	9	4	13	5	15	6	1	19	0	5	14	1	3	16	2	
Cas 24	26	3	11	12	7	11	8	23	3	0	19	5	2	21	2	2	22	2	
Cas 25	27	11	8	8	14	9	4	24	3	0	24	1	3	18	5	1	19	7	
Cas 26	35	7	12	16	13	10	12	30	5	2	27	2	4	25	5	2	25	8	
Cas 27	28	9	11	9	14	10	5	17	12	2	24	1	1	22	5	3	20	6	

3.5 Construction du modèle

L'annexe D contient l'analyse des résidus des différents modèles.

3.5.1 Variables exprimant le nombre de coulées néfastes

Un premier modèle est de considérer la vie observée de la deuxième demi-campagne en fonction des variables opératoires dont les coulées ont été néfastes pour la poche. Ce modèle est défini à l'équation 3.6. D'après le Tableau 3.26, ces variables expliquent 76,9 % de la variabilité sur y_2 . D'après le test de Fisher, où $F(8,18) = 2,51$ pour un intervalle de confiance de 95 %, ce modèle est avantagé par rapport au modèle de comparaison, qui ne comporte que l'ordonnée à l'origine. D'après cette régression, les variables influentes sont $N_{att>45\ min}$ et $N_{Si-Si>0,055\%}$. Au Tableau 3.27, où la régression a été effectuée sur y_{total} , 52,5 % de la variabilité est expliquée. Cependant, ce modèle est faiblement avantagé selon le test de Fisher car 2,48 est inférieur à la valeur mentionnée plus haut. La seule variable suggérée par ce modèle est $N_{att>45\ min}$ à cause de sa probabilité inférieure à 5 %.

Tableau 3.26 : Résumé de la régression multiple des variables opératoires néfastes sur y_2

Régression	$R = 0,87696754$		$R^2 = 0,76907207$		R^2 Ajusté = 0,66643743	
Multiple	$F(8,18) = 7,4933$		$p < 0,00020$		E.T. Estimé = 2,7426	
n=27	Coeff. Corr.	E.T.	β	E.T.	t(18)	p
Ord. à l'origine			10,907	2,667	4,090	0,0007
$N_{T > 1710^\circ C}$	0,024	0,144	0,046	0,279	0,164	0,8717
$N_{m > 1500\ kg}$	-0,081	0,186	-0,113	0,259	-0,435	0,6686
$N_{B < 1,2}$	0,246	0,195	0,347	0,274	1,266	0,2218
$N_{barb > 90\ min}$	0,273	0,139	0,509	0,259	1,968	0,0647
$N_{CaSi > 60\ kg}$	0,260	0,164	0,393	0,248	1,587	0,1300
$N_{att > 45\ min}$	0,595	0,134	0,844	0,190	4,436	0,0003
$N_{P > 10\ MW}$	0,128	0,136	0,196	0,209	0,937	0,3611
$N_{Si-Si > 0,055\%}$	0,345	0,134	0,519	0,201	2,581	0,0188

$$y_2 = \beta_0 + \beta_1 \cdot N_{T>1710^{\circ}C} + \beta_2 \cdot N_{B<1,2} + \beta_3 \cdot N_{\text{barb}>90 \text{ min}} + \beta_4 \cdot N_{\text{CaSi}>60 \text{ kg}} + \beta_5 \cdot N_{\text{att}>45 \text{ min}} + \beta_6 \cdot N_{P>10 \text{ MW}} + \beta_7 \cdot N_{m>1500 \text{ kg}} + \beta_8 \cdot N_{\text{Si-Sf}>0,055\%} \quad (3.6)$$

Tableau 3.27 : Résumé de la régression multiple des variables opératoires néfastes sur y_{total}

Régression Multiple		$R = 0,72441520$ $F(8,18) = 2,4846$		$R^2 = 0,52477738$ $p < 0,05187$		$R^2 \text{ Ajusté} = 0,31356733$ $E.T. \text{ Estimé} = 4,3861$	
n=27		Coeff. Corr.	E.T..	β	E.T.	t(18)	p
Ord. à l'origine				44,441	4,265	10,421	0,0000
$N_{T>1710^{\circ}C}$	-0,017	0,206	-0,036	0,446	-0,081	0,9365	
$N_{m>1500 \text{ kg}}$	-0,133	0,266	-0,206	0,414	-0,499	0,6241	
$N_{B<1,2}$	0,080	0,279	0,126	0,438	0,288	0,7767	
$N_{\text{barb}>90 \text{ min}}$	0,302	0,199	0,627	0,413	1,516	0,1470	
$N_{\text{CaSi}>60 \text{ kg}}$	-0,019	0,235	-0,032	0,396	-0,079	0,9377	
$N_{\text{att}>45 \text{ min}}$	0,562	0,196	0,887	0,304	2,919	0,0092	
$N_{P>10 \text{ MW}}$	0,086	0,192	0,147	0,334	0,439	0,6659	
$N_{\text{Si-Sf}>0,055\%}$	0,202	0,192	0,339	0,321	1,053	0,3062	

En ne considérant que les deux variables opératoires mentionnées, le modèle défini à l'équation 3.7 explique 47,1 % de la variabilité sur y_2 . Au Tableau 3.29, le modèle obtenu avec la variable $N_{\text{att}>45 \text{ min}}$ n'explique que 42,4 % de la variabilité sur y_{total} .

$$y_2 = \beta_0 + \beta_1 \cdot N_{\text{att}>45 \text{ min}} + \beta_2 \cdot N_{\text{Si-Sf}>0,055\%} \quad (3.7)$$

Tableau 3.28 : Résumé de la régression multiple des variables $N_{\text{att}>45 \text{ min}}$ et $N_{\text{Si-Sf}>0,055\%}$ sur y_2

Régression Multiple		$R = 0,68656407$ $F(2,24) = 10,700$		$R^2 = 0,47137023$ $p < 0,00048$		$R^2 \text{ Ajusté} = 0,42731774$ $E.T. \text{ Estimé} : 3,5936$	
n=27		Coeff. Corr.	E.T.	β	E.T.	t(24)	p
Ord. à l'origine				16,462	2,304	7,144	0,0000
$N_{\text{att}>45 \text{ min}}$	0,663	0,150	0,940	0,213	4,406	0,0002	
$N_{\text{Si-Sf}>0,055\%}$	0,317	0,150	0,476	0,226	2,105	0,0459	

Tableau 3.29 : Résumé de la régression simple de la variable $N_{\text{att}>45 \text{ min}}$ sur y_{total}

Régression Simple		$R = 0,65080420$ $F(1,25) = 18,369$		$R^2 = 0,42354611$ $p < 0,00024$		$R^2 \text{ Ajusté} = 0,40048795$ $E.T. \text{ Estimé} : 4,0990$	
n=27		Coeff. Corr.	E.T.	β	E.T.	t(25)	p
Ord. à l'origine				48,356	2,360	20,491	0,0000
$N_{\text{att}>45 \text{ min}}$	0,651	0,152	1,030	0,240	4,286	0,0024	

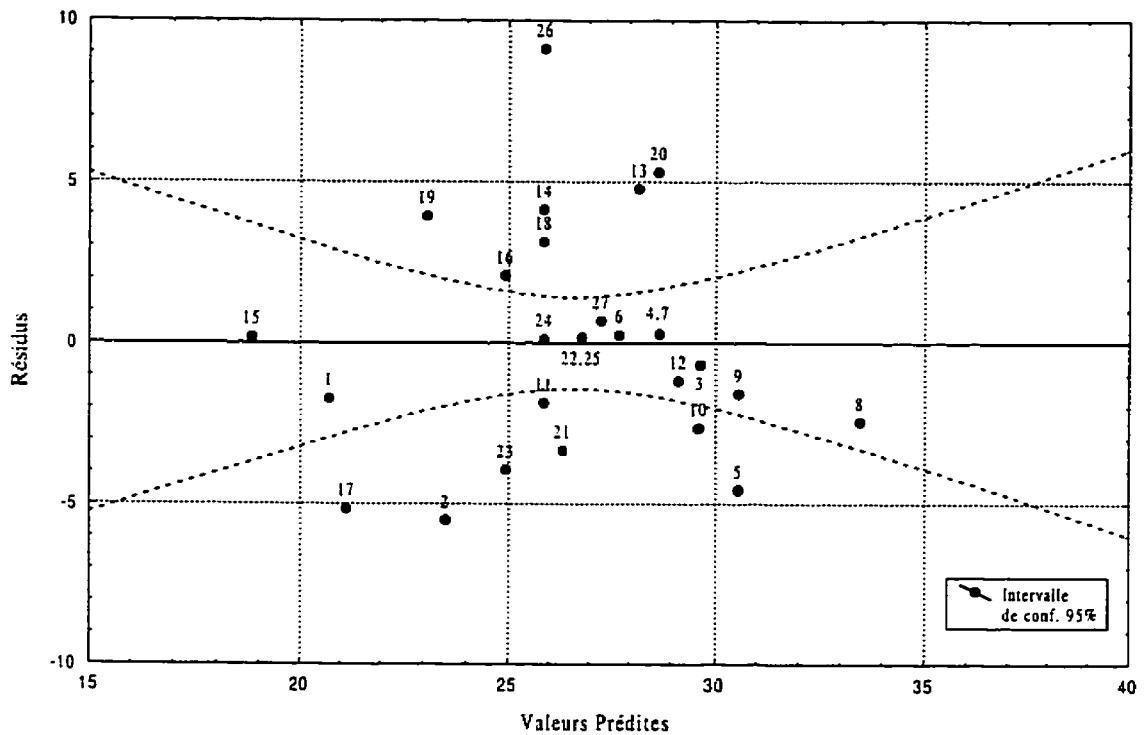


Figure 3.11 : Graphique des résidus pour le modèle défini à l'équation (3.7)

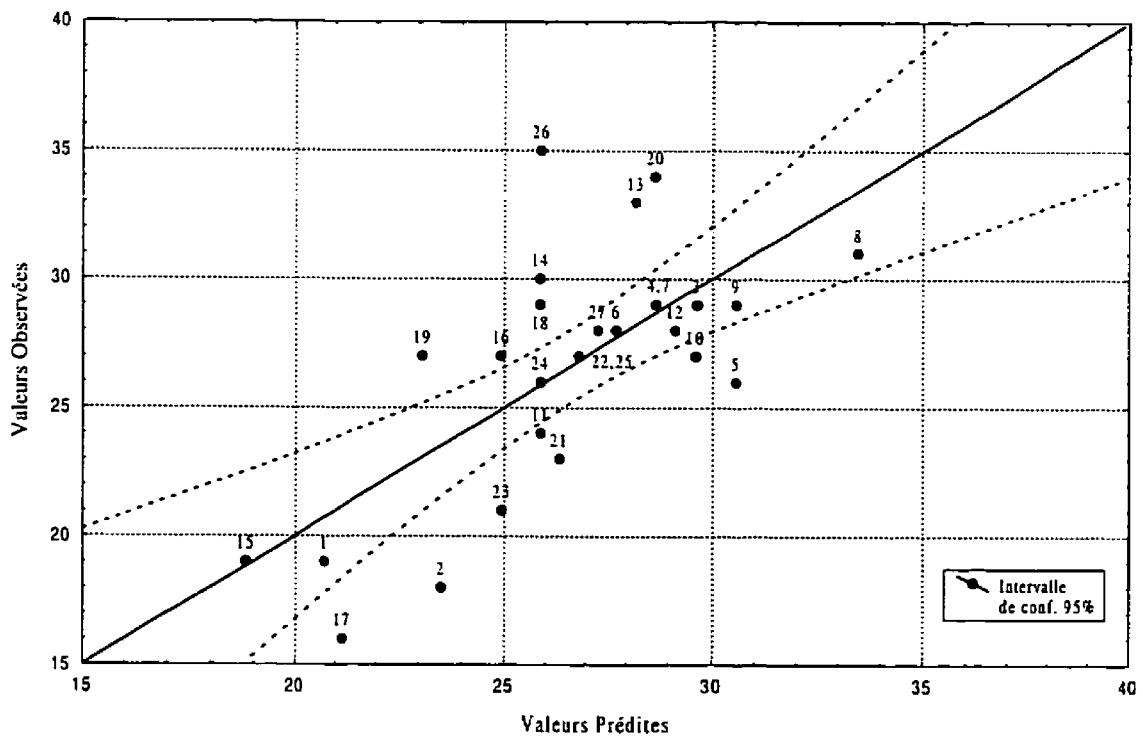


Figure 3.12 : Valeurs observées de la vie de la deuxième mi-campagne en fonction des valeurs prédites calculées avec le modèle de l'équation (3.7)

D'après le graphique des résidus pour l'équation (3.7) montré à la Figure 3.11, la moyenne des résidus est nulle et les points possèdent une bonne répartition. D'après le Tableau D.1, les résidus varient entre -5,5 et 9,1. La Figure 3.14 illustre le graphique de la vie de la deuxième mi-campagne en fonction des valeurs prédictes par le modèle

3.5.2 Variables exprimant le nombre de coulées inoffensives

Une autre méthode est de considérer les coulées qui ont été inoffensives à la poche. Le modèle de l'équation (3.8) a été défini à partir des variables opératoires avec une valeur seuil telle que trouvée à la section 3.3. D'après le Tableau 3.30, sachant que $F(8,18) = 2,51$ et $t(18) = 2,10$ avec un intervalle de confiance de 95 %, plus de 96,3 % de la variabilité sur y_2 est expliquée. Trois variables sont significatives : $N_{B>1,2}$, $N_{att<45\text{ min}}$ et $N_{Si-Sf<0,055\%}$. D'après le Tableau 3.31, montrant les résultats de la régression des mêmes variables sur y_{total} , elles expliquent 81,3 % de la variabilité observée. Seule, la variable $N_{CaSi<60\text{ kg}}$ est significative. Selon le test de Student, ce dernier modèle a une ordonnée à l'origine alors que celui défini à l'équation (3.8) n'en a pas.

Tableau 3.30 : Résumé de la régression multiple des variables opératoires inoffensives sur y_2

Régression Multiple		$R = 0,98121999$		$R^2 = 0,96279267$		$R^2 \text{ Ajusté} = 0,94625608$	
		$F(8,18) = 58,222$		$p < 0,00000$		$E.T. \text{ Estimé} = 1,1009$	
$n=27$	Coeff. Corr.	E.T.	β	E.T.	$t(18)$	p	
Ord. à l'origine			-0,647	1,448	-0,447	0,6604	
$N_{T < 1710^\circ\text{C}}$	0,020	0,088	0,023	0,099	0,232	0,8191	
$N_{m < 1500\text{ kg}}$	-0,077	0,126	-0,069	0,112	-0,610	0,5494	
$N_{B > 1,2}$	0,279	0,121	0,235	0,102	2,306	0,0332	
$N_{barb < 90\text{ min}}$	0,149	0,083	0,180	0,101	1,789	0,0905	
$N_{CaSi < 60\text{ kg}}$	0,146	0,096	0,160	0,105	1,519	0,1462	
$N_{P < 10\text{ MW}}$	0,128	0,073	0,118	0,068	1,736	0,0996	
$N_{att < 45\text{ min}}$	0,303	0,062	0,380	0,078	4,896	0,0001	
$N_{Si-Sf < 0,055\%}$	0,305	0,072	0,280	0,065	4,271	0,0005	

$$y_2 = \beta_0 + \beta_1 \cdot N_{T<1710^{\circ}C} + \beta_2 \cdot N_{B>1,2} + \beta_3 \cdot N_{\text{barb}<90 \text{ min}} + \beta_4 \cdot N_{\text{CaSi}<60 \text{ kg}} + \beta_5 \cdot N_{\text{att}<45 \text{ min}} + \beta_6 \cdot N_{P<10 \text{ MW}} + \beta_7 \cdot N_{m<1500 \text{ kg}} + \beta_8 \cdot N_{\text{Si-Sf}<0,055\%} \quad (3.8)$$

Tableau 3.31 : Résumé de la régression multiple des variables opératoires inoffensives sur y_{total}

Régression Multiple		$R = 0,90186075$	$R^2 = 0,81335282$		$R^2 \text{ Ajusté} = 0,73039851$	
		$F(8,18) = 9,8048$	$p < 0,00003$		E.T. Estimé : 2,7488	
n=27	Coeff. Corr.	E.T.	β	E.T.	t(18)	p
Ord. à l'origine			30,887	3,615	8,544	0,0000
$N_{T<1710^{\circ}C}$	0,063	0,196	0,079	0,248	0,320	0,7527
$N_{m<1500 \text{ kg}}$	0,117	0,283	0,116	0,280	0,414	0,6838
$N_{B>1,2}$	0,229	0,271	0,215	0,255	0,845	0,4092
$N_{\text{barb}<90 \text{ min}}$	-0,062	0,186	-0,084	0,252	-0,333	0,7431
$N_{\text{CaSi}<60 \text{ kg}}$	0,433	0,215	0,528	0,262	2,011	0,0595
$N_{P<10 \text{ MW}}$	0,008	0,165	0,009	0,170	0,050	0,9604
$N_{\text{att}<45 \text{ min}}$	-0,063	0,138	0,088	0,194	0,456	0,6537
$N_{\text{Si-Sf}<0,055\%}$	0,225	0,160	0,229	0,163	1,403	0,1776

À partir de ces résultats, le deuxième modèle est construit à partir des trois variables significatives, telles que défini à l'équation (3.9). D'après le Tableau 3.32, sachant que $F(3,24) = 3,01$ et que $t(24) = 2,06$ avec un intervalle de confiance de 95 %, 99,8% de la variabilité sur y_2 est expliquée.

$$y_2 = \beta_1 \cdot N_{B>1,2} + \beta_2 \cdot N_{\text{att}<45 \text{ min}} + \beta_3 \cdot N_{\text{Si-Sf}<0,055\%} \quad (3.9)$$

Tableau 3.32 : Résumé de la régression multiple des variables $N_{B>1,2}$, $N_{\text{att}<45 \text{ min}}$ et $N_{\text{Si-Sf}<0,055\%}$ sur y_2

Régression Multiple		$R = 0,99876421$	$R^2 = 0,99752994$		$R^2 \text{ Ajusté} = 0,99722118$	
		$F(3,24) = 3230,8$	$p < 0,00000$		E.T. Estimé = 1,4251	
n=27	Coeff. Corr.	E.T.	β	E.T.	t(24)	p
$N_{B>1,2}$	0,298	0,053	0,334	0,059	5,639	0,0000
$N_{\text{att}<45 \text{ min}}$	0,316	0,050	0,481	0,077	6,257	0,0000
$N_{\text{Si-Sf}<0,055\%}$	0,394	0,050	0,452	0,058	7,812	0,0000

Le Tableau 3.33 montre que 68 % de la variabilité de y_{total} est expliquée par la variable $N_{\text{CaSi}<60 \text{ kg}}$. En remplaçant y_2 par y_{total} et en ajoutant une ordonnée à l'origine à

l'équation (3.9), le Tableau 3.34 montre que ces variables expliquent la même variabilité sur y_{total} . La variable $N_{att < 45 \text{ min}}$ peut être retirée du modèle.

Tableau 3.33 : Résumé de la régression simple de la variable $N_{CaSi < 60 \text{ kg}}$ sur y_{total}

Régression Simple		$R = 0,82461829$	$R^2 = 0,67999532$	R^2 Ajusté = 0,66719514	
		$F(1,25) = 53,124$	$p < 0,00000$	E.T. Estimé = 3,0540	
n=27	Coeff. Corr.	E.T.	β	E.T.	t(25)
Ord. à l'origine			33,641	3,378	9,958
$N_{CaSi < 60 \text{ kg}}$	0,825	0,113	1,004	0,138	7,289

Tableau 3.34 : Résumé de la régression multiple des variables $N_{B > 1,2}$, $N_{att < 45 \text{ min}}$ et $N_{Si-Sf < 0,055\%}$ sur y_{total}

Régression Multiple		$R = 0,83931894$	$R^2 = 0,70445627$	R^2 Ajusté = 0,66590709	
		$F(3,23) = 18,274$	$p < 0,00000$	E.T. Estimé = 3,0599	
n=27	Coeff. Corr.	E.T.	β	E.T.	t(23)
Ord. à l'origine			35,251	3,397	10,377
$N_{B > 1,2}$	0,451	0,139	0,424	0,130	3,253
$N_{att < 45 \text{ min}}$	0,043	0,131	0,060	0,184	0,325
$N_{Si-Sf < 0,055\%}$	0,496	0,132	0,506	0,135	3,751

D'après la Figure 3.13, le graphique des résidus du modèle de l'équation (3.9) montre que la moyenne de ces derniers n'est pas nulle, mais les points possèdent une bonne répartition. La pente observée est causée par l'absence d'une ordonnée à l'origine, d'où la validation du modèle de la régression linéaire. D'après le Tableau D.2, les résidus varient entre -2,2 et +3,6. La Figure 3.14 illustre le graphique de la vie de la deuxième mi-campagne en fonction des valeurs prédictes par le modèle.

Les variables opératoires devront être exprimées en nombre de coulées inoffensives plutôt qu'en nombre de coulées néfastes car elles expliquent beaucoup mieux la variabilité observée sur y_2 .

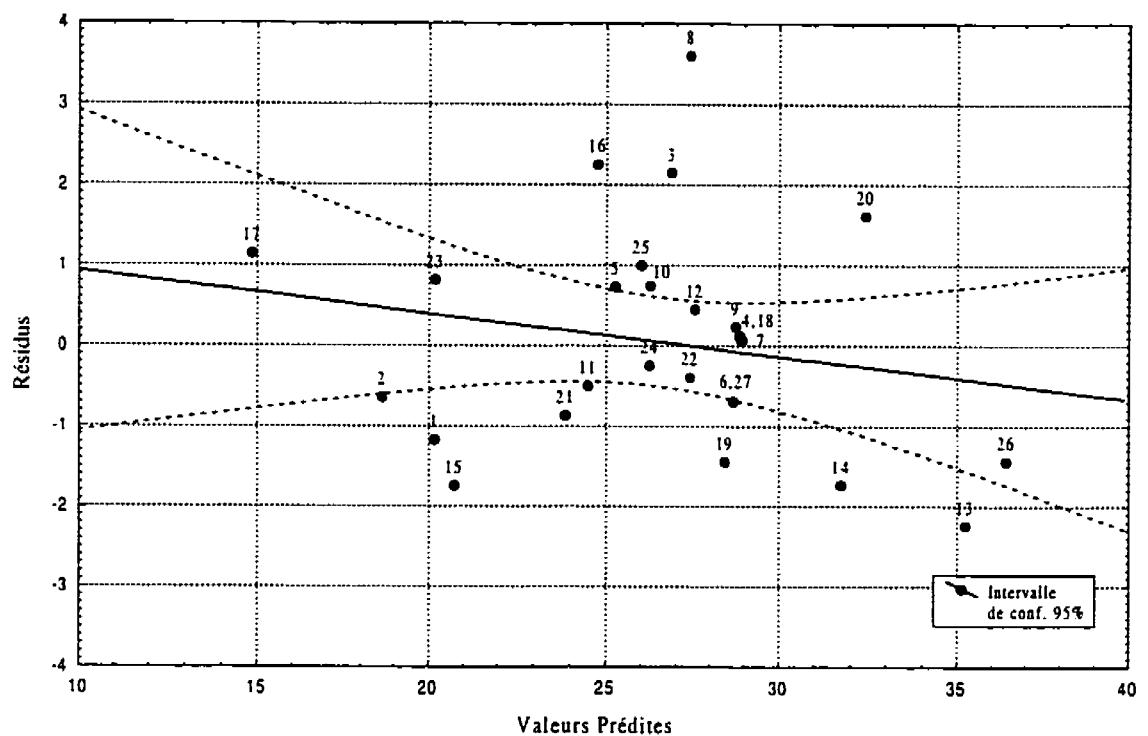


Figure 3.13 : Graphique des résidus pour le modèle défini à l'équation (3.9)

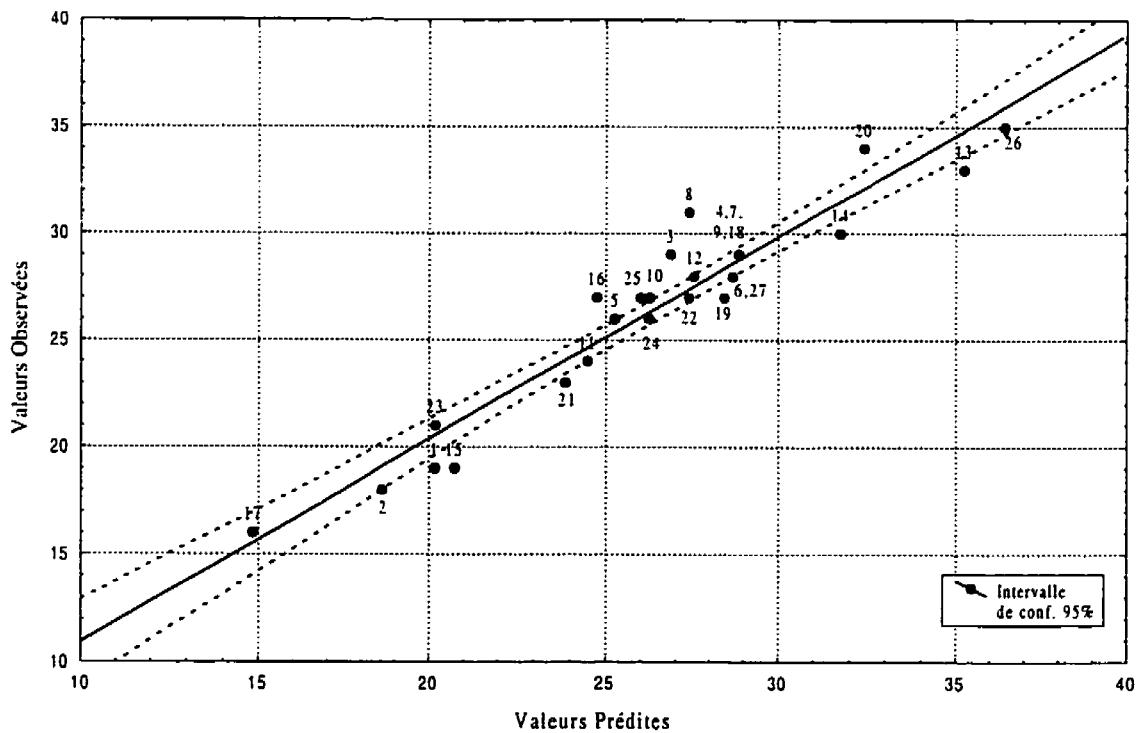


Figure 3.14 : Valeurs observées de la vie de la deuxième mi-campagne en fonction des valeurs prédictes calculées avec le modèle de l'équation (3.9)

3.5.3 Optimisation du modèle

Le meilleur modèle jusqu'à présent a été obtenu en effectuant une régression multiple des variables $N_{B>1,2}$, $N_{att < 45 \text{ min}}$ et $N_{Si-Sf < 0.055\%}$ sur la variable y_2 . La précision du modèle est de 3,6 coulées. Il faut cependant s'assurer que ce modèle est optimal et que toutes les poches ou les variables opératoires soient pertinentes au modèle suggéré.

Cas aberrants et influents

Un cas aberrant ou influent peut changer complètement les résultats de la régression pour la valeur des estimés. La différence entre les deux est que le cas aberrant ne suit pas la tendance générale des autres observations. Pour le détecter, le résidu externe de Student est calculé sur le modèle complet (équation 3.8) et le cas influent est détecté à l'aide de la distance de Cook ou de la statistique de DFFITS [64]. Au Tableau 3.35, sachant que la valeur critique pour le test du cas aberrant vaut 3,68 pour 9 paramètres, 27 observations et une probabilité de 5 %, le résidu de Student du cas 20 vaut 2,44. Ce dernier n'est pas aberrant. Mais, il influence grandement le modèle à cause de ses valeurs plus élevées pour la distance de Cook et la statistique de DFFITS.

Tableau 3.35 : Analyse des cas aberrants et influents

Cas n°	Distance Cook	Student Externe	Dffits	Cas n°	Distance Cook	Student Externe	Dffits	Cas n°	Distance Cook	Student Externe	Dffits
1	0,062	-1,44	-0,77	10	0,006	0,48	0,23	19	0,058	-1,04	-0,72
2	0,107	-1,35	-1,00	11	0,001	0,18	0,10	20	0,545	2,44	2,50
3	0,027	0,96	0,49	12	0,002	-0,24	-0,13	21	0,010	-0,39	-0,30
4	0,034	-1,19	-0,56	13	0,153	-1,90	-1,26	22	0,003	-0,19	-0,17
5	0,138	1,66	1,17	14	0,046	-1,05	-0,65	23	0,017	0,84	0,39
6	0,005	0,58	-0,21	15	0,060	-0,84	-0,73	24	0,028	0,79	0,50
7	0,003	-0,39	-0,16	16	0,030	0,58	0,51	25	0,028	0,71	0,49
8	0,260	1,52	1,59	17	0,044	0,67	0,62	26	0,222	1,26	1,44
9	0,002	-0,18	-0,14	18	0,132	-1,08	-1,10	27	0,091	0,95	0,90

Tableau 3.36 : Résumé de la régression multiple du modèle complet sans le cas 20

Régression	$R = 0,98462266$	$R^2 = 0,96948177$	R^2 Ajusté = 0,95512026			
Multiple	$F(8,17) = 67,506$	$p < 0,00000$	E.T. Estimé = 0,97532			
n=26	Coeff. Corr.	E.T.	β	E.T.	t(17)	p
Ord. à l'origine			0,597	1,381	0,433	0,6708
$N_{T < 1710^\circ C}$	0,064	0,083	0,070	0,090	0,776	0,4482
$N_{m < 1500 \text{ kg}}$	-0,255	0,136	-0,219	0,117	-1,871	0,0787
$N_{B > 1,2}$	0,483	0,137	0,387	0,110	3,526	0,0026
$N_{\text{barb} < 90 \text{ min}}$	0,158	0,076	0,184	0,089	2,062	0,0549
$N_{\text{CaSi} < 60 \text{ kg}}$	0,082	0,089	0,090	0,097	0,921	0,3698
$N_{P < 10 \text{ MW}}$	0,159	0,069	0,141	0,061	2,307	0,0339
$N_{\text{att} < 45 \text{ min}}$	0,263	0,059	0,324	0,072	4,469	0,0003
$N_{\text{Si-Si} < 0,055}$	0,288	0,063	0,267	0,058	4,591	0,0003

Ces deux méthodes ne possèdent pas de test statistique. Il faut effectuer la régression du modèle complet sans ce cas, dont les résultats sont montrés au Tableau 3.36. Sachant que $F(8,17) = 2,55$ et que $t(17) = 2,11$ pour une probabilité de 5 %, les variables opératoires significatives sont : $N_{B>1,2}$, $N_{\text{barb}<90 \text{ min}}$, $N_{P<10 \text{ MW}}$, $N_{\text{att}<45 \text{ min}}$ et $N_{\text{Si-Si}<0,055}$. Elles expliquent 96,9 % de la variabilité sur y_2 . La variable $N_{m<1500 \text{ kg}}$ a une plus faible influence. Les deux autres variables et l'ordonnée à l'origine peuvent être retirées du modèle.

Colinéarité

La dernière régression effectuée montre que même si le cas 20 est conservé ou retiré, le modèle ne possède pas d'ordonnée à l'origine. Elle peut donc être retirée définitivement du modèle. Il s'agit maintenant de vérifier s'il existe des prédicteurs qui sont colinéaires c'est-à-dire s'il existe des valeurs pour des constantes c_0, c_1, \dots, c_p pour lesquelles l'équation suivante s'applique :

$$c_1 \cdot X_1 + c_2 \cdot X_2 + \dots + c_p \cdot X_p = c_0 \quad (3.10)$$

En d'autres mots, il faut vérifier si un des prédicteurs peut être approximativement déterminé par les autres. La colinéarité est mesurée à l'aide de la valeur de condition définie par l'équation (3.11) [65]. Les variables sont colinéaires si cette valeur est plus grande que 30.

$$\kappa = \left[\frac{\text{Valeur propre maximale}}{\text{Valeur propre minimale}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.11)$$

Au Tableau 3.37, les variables $N_{B<1,2}$ et $N_{m<1500 \text{ kg}}$ sont fortement reliées, mais ne sont pas colinéaires d'après le test. Mais, il ne faut pas oublier que la variable $N_{m<1500 \text{ kg}}$ est incluse dans le calcul de la basicité. Au Tableau 3.24, le coefficient de corrélation entre ces deux variables est très élevé ($r = 0,915$). Cette variable peut donc être retirée définitivement du modèle.

Tableau 3.37 : Colinéarité entre les variables opératoires

Valeur Propre	Valeur de Condition	Variables							
		$N_{T<1710^\circ\text{C}}$	$N_{B>1,2}$	$N_{\text{parb}<90\text{min}}$	$N_{\text{CaSi}<60\text{kg}}$	$N_{\text{att}<45\text{min}}$	$N_{P<10\text{MW}}$	$N_{m<1500\text{kg}}$	$N_{\text{Si-Sf}<0,055\%}$
5,228	1,00	0,007	0,004	0,008	0,006	0,008	0,009	0,004	0,008
0,867	2,46	0,005	0,010	0,026	0,049	0,274	0,043	0,003	0,048
0,643	2,85	0,006	0,059	0,006	0,007	0,248	0,002	0,039	0,121
0,477	3,31	0,225	0,013	0,006	0,023	0,043	0,013	0,016	0,327
0,311	4,10	0,064	0,000	0,009	0,089	0,011	0,929	0,001	0,040
0,273	4,37	0,059	0,004	0,735	0,025	0,193	0,003	0,023	0,121
0,128	6,40	0,633	0,009	0,171	0,781	0,223	0,000	0,029	0,293
0,074	8,42	0,000	0,901	0,040	0,021	0,001	0,002	0,886	0,043

La prochaine étape consiste à étudier la pertinence des variables dans le modèle.

Les trois méthodes proposées sont : 1) la méthode ascendante ; 2) la méthode descendante ; 3) le coefficient de détermination maximal. Le critère utilisé est celui de Mallow (C_p) qui doit être minimal ou avoir une valeur proche du nombre de paramètres à insérer [66].

Dans les Tableaux 3.38 à 3.40, le nombre indiqué sur la première ligne représente

l'estimé de la variable en question et celui sur la deuxième ligne, le test de Student pour cet estimé.

Méthode ascendante

La méthode ascendante suggère une approche séquentielle en ajoutant les variables l'une après l'autre. Les trois critères d'insertion sont : 1) la variable ajoutée possède la plus haute corrélation partielle en valeur absolue ; 2) R^2 augmente significativement ; 3) la statistique de Fisher soit la plus élevée possible. Au Tableau 3.38, C_p est minimal lorsque le modèle possède six paramètres.

Tableau 3.38 : Résultats de la méthode ascendante

Étape	$N_{\text{barb}<90\text{min}}$	$N_{\text{Si-Si}<0,055\%}$	$N_{\text{att}<45\text{min}}$	$N_{\text{B}>1,2}$	$N_{\text{Ca-Si}<60\text{kg}}$	$N_{\text{P}<10\text{MW}}$	R^2	aug. R^2	C_p
1	1,337 (49,25)						0,9894	0,9894	161,4
2	0,805 (8,14)	0,463 (5,48)					0,9952	0,0058	61,65
3	0,515 (4,69)	0,425 (6,20)	0,382 (3,82)				0,9970	0,0018	31,64
4	0,289 (2,67)	0,392 (6,95)	0,365 (4,50)	0,236 (3,67)			0,9981	0,0011	14,17
5	0,185 (1,84)	0,287 (4,70)	0,371 (5,28)	0,212 (3,77)	0,206 (2,95)		0,9986	0,0005	6,76
6	0,177 (1,88)	0,267 (4,63)	0,372 (5,63)	0,187 (3,45)	0,149 (1,52)	0,122 (1,96)	0,9989	0,0003	5,08

Méthode descendante

La méthode ascendante utilise aussi une approche séquentielle, mais en retirant les variables l'une après l'autre. Les deux critères pour retirer une variable sont : 1) celle qui cause la plus petite variation sur R^2 ; 2) celle qui possède la plus petite statistique de Fisher. D'après le Tableau 3.39, le modèle optimal est aussi obtenu avec six paramètres et en retirant la variable $N_{T<1710^\circ\text{C}}$.

Tableau 3.39 : Résultats de la méthode descendante

Étape	$N_{\text{barb}<90\text{min}}$	$N_{\text{Si-Si}<0,055\%}$	$N_{\text{att}<45\text{min}}$	$N_{B>1,2}$	$N_{P<10\text{MW}}$	$N_{\text{CaSi}<60\text{kg}}$	$N_{T<1710^\circ\text{C}}$	R^2	dim. R^2	C_p
	0,180 (1,85)	0,272 (4,43)	0,369 (5,37)	0,182 (3,10)	0,119 (1,82)	0,136 (1,56)	0,025 (0,28)	0,9989		7,00
1	0,177 (1,88)	0,267 (4,63)	0,372 (5,63)	0,187 (3,45)	0,122 (1,96)	0,149 (2,08)		0,9989	0,0000	5,08

Coefficient de détermination maximal

La dernière méthode consiste d'ajouter une à une les variables opératoires de sorte à ce que le coefficient de détermination soit le plus élevé possible. Ainsi, chaque modèle suggéré pour le nombre de variables insérées possède un R^2 maximal. D'après le Tableau 3.40, le coefficient de détermination est maximal lorsque que la variable $N_{T<1710^\circ\text{C}}$ est retirée.

Tableau 3.40 : Résultats de la méthode du coefficient de détermination maximal

Étape	$N_{\text{barb}<90\text{min}}$	$N_{\text{Si-Si}<0,055\%}$	$N_{\text{att}<45\text{min}}$	$N_{B>1,2}$	$N_{P<10\text{MW}}$	$N_{\text{CaSi}<60\text{kg}}$	$N_{T<1710^\circ\text{C}}$	R^2	aug. R^2	C_p
1	1,337 (49,25)							0,9894	0,9894	161,4
2	0,805 (8,14)	0,463 (5,48)						0,9952	0,0058	61,65
3		0,452 (7,81)	0,481 (6,26)	0,334 (5,64)				0,9975	0,0023	22,42
4		0,298 (4,72)	0,437 (6,872)	0,261 (5,03)		0,252 (3,66)		0,9984	0,0009	8,43
5		0,276 (4,55)	0,435 (7,25)	0,234 (4,57)	0,127 (1,93)	0,191 (2,64)		0,9987	0,0003	6,44
6	0,177 (1,88)	0,267 (4,63)	0,372 (5,63)	0,187 (3,45)	0,122 (1,96)	0,149 (1,52)		0,9989	0,0002	5,08
7	0,180 (1,85)	0,272 (4,43)	0,369 (5,37)	0,182 (3,10)	0,119 (1,82)	0,136 (1,56)	0,025 (0,28)	0,9989	0,0000	7,00

Nombre de paramètres ou de variables

Les différents méthodes proposent l'utilisation de 6 paramètres pour le modèle. Pour déterminer le nombre de paramètres, il s'agit de calculer la valeur de différents critères de sélection, calculée à partir du terme résiduel de la régression, du nombre

d'observations et de paramètres, avec la méthode du coefficient de détermination maximal [66, 67].

Tableau 3.41 : Critères de sélection pour déterminer le nombre de paramètres dans le modèle optimal

Paramètre	SSE	MSE	RMSE	C _p	J _p	S _p	AIC	BIC	SBC	P _C
1	209	8,05	2,84	161,4	8,35	0,322	57,29	56,12	58,59	0,0114
2	95	3,80	1,95	61,65	4,08	0,158	37,97	36,32	40,57	0,0056
3	49	2,03	1,43	22,42	2,26	0,088	21,95	21,39	25,84	0,0031
4	31	1,34	1,16	8,43	1,54	0,061	11,55	13,42	16,74	0,0021
5	26	1,20	1,09	6,45	1,42	0,057	9,31	12,78	15,79	0,0019
6	23	1,07	1,04	5,08	1,31	0,054	7,12	13,02	14,90	0,0018
7	22	1,12	1,06	7	1,41	0,059	9,02	15,67	18,09	0,0019

D'après le Tableau 3.41, tous les critères suggèrent l'utilisation de six paramètres dans le modèle car leur valeur est minimale. Le modèle optimal est donc obtenu avec les six variables suivantes : $N_{B>1,2}$, $N_{\text{barb}<90 \text{ min}}$, $N_{\text{CaSi}<60 \text{ kg}}$, $N_{P<10 \text{ MW}}$, $N_{\text{att}<45 \text{ min}}$ et $N_{\text{Si-Sf}<0,055\%}$.

3.5.4 Choix du modèle

Le modèle optimal est celui présenté à l'équation (3.12) ci-dessous selon les résultats de la régression présentés au Tableau 3.42. D'après le Tableau 3.43, le cas 26 est le plus influent, mais n'est pas aberrant. Le résidu de Student du cas 1 possède la valeur la plus élevée en absolue, mais n'est pas aberrant car selon le test, la valeur critique vaut 3,58 pour une probabilité de 5 % avec 6 paramètres et 27 observations.

$$y_2 = 0,372 \cdot N_{\text{att}<45 \text{ min}} + 0,267 \cdot N_{\text{Si-Sf}<0,055\%} + 0,187 \cdot N_{B>1,2} + 0,149 \cdot N_{\text{CaSi}<60 \text{ kg}} + 0,177 \cdot N_{\text{barb}<90 \text{ min}} + 0,122 \cdot N_{P<10 \text{ MW}} \quad (3.12)$$

Tableau 3.42 : Résultats de la régression multiple du modèle optimal

Régression Multiple	$R = 0,99942878$ $F(6,21) = 3061,0$	$R^2 = 0,99885789$ $p < 0,00000$	R^2 Ajusté = 0,99853157 E.T. Estimé = 1,0360			
n=27	Coeff. Corr.	E.T.	β	E.T.	t(21)	p
$N_{B > 1,2}$	0,167	0,048	0,187	0,054	3,450	0,0024
$N_{\text{barb} < 90 \text{ min}}$	0,132	0,070	0,177	0,094	1,877	0,0745
$N_{\text{CaSi} < 60 \text{ kg}}$	0,136	0,065	0,149	0,072	2,081	0,0499
$N_{P < 10 \text{ MW}}$	0,096	0,049	0,122	0,062	1,962	0,0631
$N_{\text{att} < 45 \text{ min}}$	0,245	0,043	0,372	0,066	5,630	0,0000
$N_{\text{Si-Si} < 0,055\%}$	0,233	0,050	0,267	0,058	4,626	0,0001

D'après la Figure 3.15, le graphique des résidus du modèle optimal montre que la moyenne de ces derniers n'est pas nulle et que les points possèdent une bonne répartition. La pente observée est causée par l'absence d'une ordonnée à l'origine. La valeur de cette pente est très faible (0,013) et peut être considérée comme nulle. Les hypothèses émises pour la construction du modèle par la méthode des moindres carrés sont donc respectées. D'après le Tableau D.4, les résidus varient entre -1,6 et +1,5. La Figure 3.14 illustre le graphique de la vie de la deuxième mi-campagne en fonction des valeurs prédites par le modèle.

Tableau 3.43 : Analyse des cas aberrants et influents pour le modèle optimal

Cas n°	Distance Cook	Student Externe	Dffits	Cas n°	Distance Cook	Student Externe	Dffits	Cas n°	Distance Cook	Student Externe	Dffits
1	0,078	-1,730	-0,717	10	0,009	0,544	0,234	19	0,033	-0,781	-0,438
2	0,021	-1,394	-0,361	11	0,002	0,216	0,108	20	0,129	1,720	0,920
3	0,040	1,211	0,495	12	0,001	-0,132	-0,061	21	0,016	-0,664	-0,307
4	0,036	-1,105	-0,470	13	0,069	-1,658	-0,670	22	0,005	-0,349	-0,173
5	0,151	1,580	0,985	14	0,069	-1,217	-0,650	23	0,006	0,644	0,185
6	0,009	-0,662	-0,231	15	0,089	-1,171	-0,737	24	0,033	0,940	0,441
7	0,004	-0,390	-0,147	16	0,067	0,736	0,627	25	0,032	0,703	0,436
8	0,216	1,366	1,161	17	0,008	0,467	0,218	26	0,349	1,531	1,493
9	0,000	0,028	0,012	18	0,044	-0,700	-0,508	27	0,069	0,740	0,636

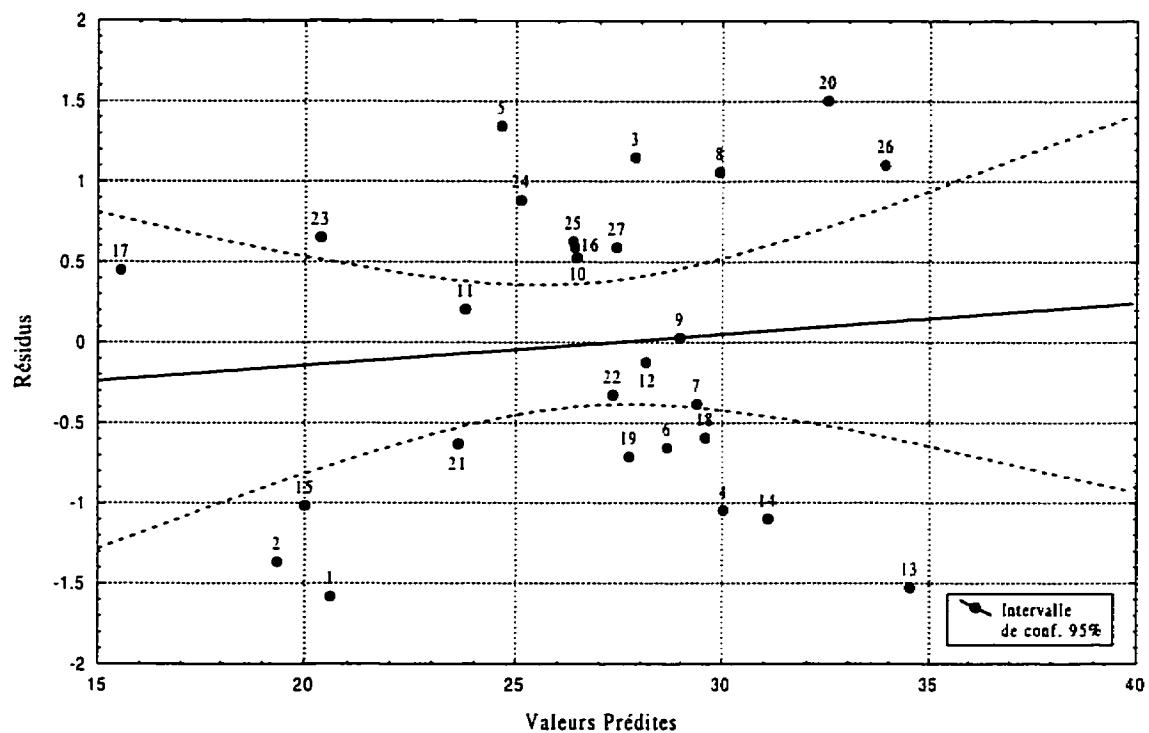


Figure 3.15 : Graphique des résidus pour le modèle optimal

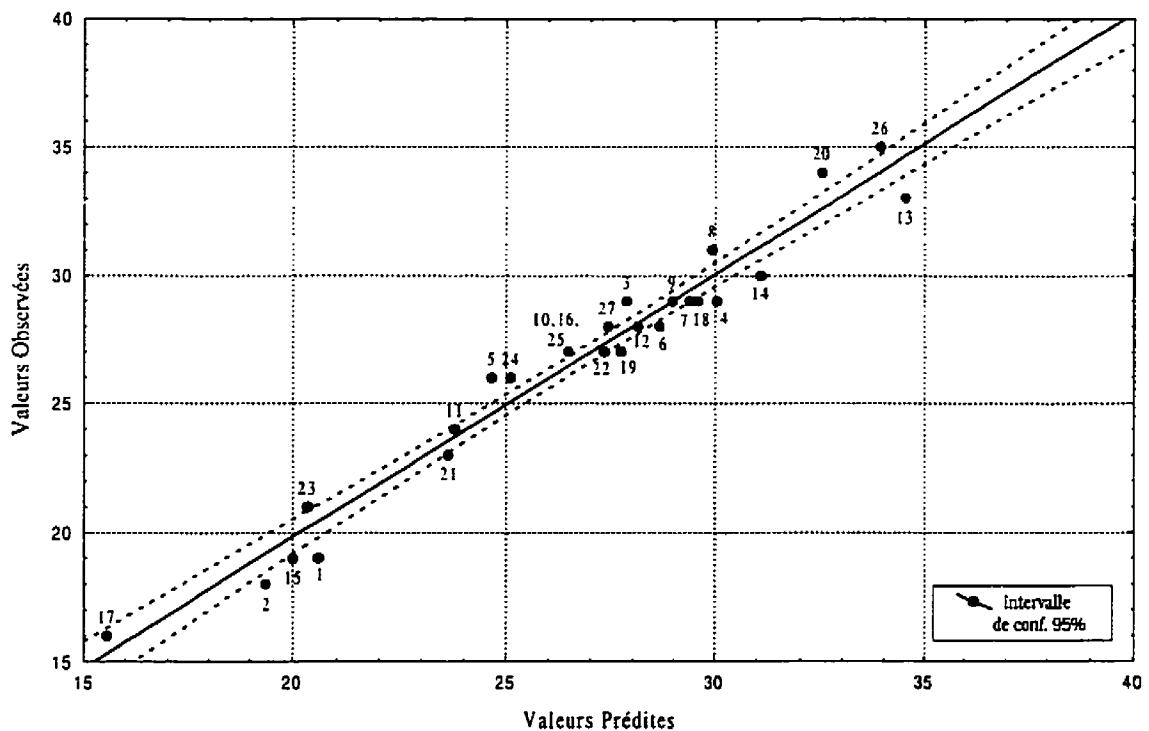


Figure 3.16 : Valeurs observées de la vie de la deuxième mi-campagne en fonction des valeurs prédites calculées avec le modèle optimal

Il semble évident que la méthode utilisée pour établir le seuil avec le coefficient de détermination R^2 possède une limite : plus la valeur seuil est élevée, plus le nombre de coulées inoffensives est élevé, se rapprochant de la demi-vie de la poche. Par conséquent, le coefficient de détermination devient élevé montrant ainsi une plus forte corrélation. Quand même, avec cette méthode, la valeur de ce coefficient varie entre 50 % et 74 % pour les huit variables opératoires considérées. Cette variation est raisonnable pour montrer l'influence de ces variables sur la durée de vie de la poche.

Le problème de données manquantes a été contourné en ne comptant que les coulées dont les valeurs étaient supérieures ou inférieures à un seuil prédéterminé pour une variable donnée. Idéalement, la méthode la plus simple consiste à retirer le cas, la variable ou les deux afin de ne considérer que les données complètes. Selon Rubin [68], il existe deux types de données manquantes. Les données incomplètes sont dites *données manquantes aléatoires (missing at random ou MAR)* lorsque la cause de l'échec d'observer cette valeur ne dépend pas de la valeur qui aurait été observée. Dans ce cas, il est possible d'émettre l'hypothèse du *MAR* et d'utiliser certaines techniques pour recalculer ou trouver la valeur manquante à partir des données complètes. Pour cette étude, cette méthode n'est pas applicable car d'une part, le nombre de cas complets aurait été faible et peu significatif et d'autre part, la valeur manquante qui a été perdue par une erreur humaine ou informatique est impossible à retracer l'historique complet. Par exemple, certaines températures manquent parce qu'il y a eu une erreur lors de la sauvegarde ou parce qu'elle n'a pas été mesurée. Ou encore, lorsqu'une poche est

transvidée, il est actuellement impossible de calculer la basicité du laitier sur la poche initiale car seulement les données après traitement sont enregistrées. Les données manquantes ne peuvent donc pas être retracées avec les autres variables accumulées. C'est pourquoi il a été possible de construire le modèle qu'en ne considérant que les coulées dites *inoffensives* et que les méthodes actuellement disponibles pour le traitement de données manquantes n'ont pas été appliquées. D'ailleurs, ces méthodes exigent des hypothèses rigoureuses et ne donnent pas toujours des résultats satisfaisants [69].

3.6 Interprétation du modèle

Parmi les huit variables opératoires accumulées, en considérant les coulées inoffensives de la poche, les variables influentes sont par ordre d'importance :

- 1) le temps d'attente total par coulée ;
- 2) le degré de désulfuration de l'acier ;
- 3) la basicité du laitier après le traitement au four-poche ;
- 4) la quantité de silico-calcium ;
- 5) la puissance moyenne fournie par coulée ;
- 6) le temps de barbotage.

Le temps d'attente fait partie du temps de résidence, variable que Hubble a déjà considéré dans ses travaux comme étant un des principaux facteurs qui diminuent la durée de vie des poches de coulée [43]. Effectivement, le temps de résidence est divisé en deux

parties : 1) le temps d'attente de la poche entre le four EBT et le four-poche et entre ce dernier et la coulée continue ; 2) le temps du traitement au four-poche. D'une part, la poche est généralement barbotée tout au long du traitement au four-poche et, d'autre part, bien que le temps d'attente total ait été considéré, cette attente est généralement plus longue entre le four EBT et le four-poche. Il est donc plus néfaste de laisser la poche au repos après son remplissage qu'après le traitement secondaire. Ceci s'explique par le fait que le laitier primaire transporté n'est peut-être pas toujours neutralisé par le laitier synthétique. L'important n'est pas la quantité qui a été transportée, mais le temps de contact total du laitier avec la ligne de laitier avant le traitement en poche. Ce fait a déjà été constaté par J.K. Cotchen [10]. La deuxième variable influente est le degré de désulfuration de l'acier. Cette opération a une conséquence directe sur la vie de la poche. La troisième variable est la basicité, que Prendergast a déjà considérée comme étant le principal facteur car il reflète la composition du laitier [42]. Le calcul de la basicité montre que cette dernière varie énormément d'une coulée à l'autre. Elle peut être acide ou basique c'est-à-dire inférieure ou supérieure à 2 respectivement. D'ailleurs, Van Wijngaarden a déjà montré que la durée de vie de la ligne de laitier diminue avec le nombre de coulées dont la basicité est inférieur à 1,8 [1]. Cette variation affecte l'usure du réfractaire pour la ligne de laitier, constituée de dolomie enrichie de magnésie à liaison résine avec une teneur de 6 % en carbone. Ensuite, il y a la quantité de CaSi injectée. Ce dernier joue un rôle important sur la désoxydation et la désulfuration. Dans ses travaux, Fruehan a mentionné que la quantité de CaSi dépend de : 1) la teneur initiale et visée en soufre ; 2) la quantité de laitier primaire transporté ; 3) la quantité d'oxygène dissous dans

le bain [70]. Les deux premiers font partie du modèle alors que le troisième n'a pu être compilé adéquatement. La puissance moyenne fournie au four-poche, qui correspond au taux de la chauffe du bain, a aussi une certaine influence sur la durée de vie de la poche. La plupart des auteurs expriment cette variable en consommation énergétique ou la quantité totale d'énergie ajoutée au bain (en MW·h ou en kW·h) [1,3,53] et d'autres, la durée totale de cette chauffe [3,43] ou la fréquence des arcs [51]. Ici, l'importance a été accordée au taux car ce dernier est généralement variable et n'est pas nécessairement contrôlé. L'énergie est ajoutée selon la température du bain jusqu'à ce qu'elle atteigne la température désirée. Finalement, la dernière variable influente est la durée du barbotage au four-poche. Les buts du barbotage sont d'homogénéiser le bain, de décanter les inclusions et de promouvoir les réactions métal-laitier [52]. Une durée prolongée favoriserait l'usure du réfractaire par érosion provoquée par le mouvement du bain. Les différents temps du cycle de la poche ont été séparés des variables opératoires car ils ne représentent pas une opération directe, mais plutôt une gestion de la production. Effectivement, le fait de mettre trois ou quatre poches en service change la durée de la rotation de la poche entre deux coulées. Le temps de résidence dépend de la durée du traitement pour ajuster l'acier à la nuance désirée. La durée du traitement est aussi ajustée pour qu'il y ait une séquence à la coulée continue ou un arrêt temporaire pour le changement de la dimension des moules ou du panier répartiteur. C'est pourquoi cette variable ne semble pas affecter directement la durée de vie des poches observées. Et, finalement, la durée de la coulée est généralement fixée à 90 minutes par le design même de l'équipement de la coulée continue.

3.7 Conclusion

La vie totale de la poche dépend surtout de la deuxième partie de la campagne que la poche subit car près de 80 % de la variance de la vie totale se reflète plutôt sur cette deuxième mi-campagne (28 vs 22,5). Bien que le nombre de chacune des quatre nuances (très bas, bas, moyen et haut carbone) ne semble pas influencer directement la vie des poches de coulée, il est possible de définir des valeurs seuils pour chacune des variables opérationnelles et d'obtenir une corrélation entre le nombre de coulées inoffensives et la vie de la deuxième mi-campagne. Le modèle suggéré est donc le suivant :

$$y_2 = 0,372 \cdot N_{att<45\ min} + 0,267 \cdot N_{Si-Si<0,055\ \%} + 0,187 \cdot N_{B>1,2} \\ + 0,149 \cdot N_{CaSi<60\ kg} + 0,177 \cdot N_{barb<90\ min} + 0,122 \cdot N_{P<10\ MW} \quad (3.13)$$

La vie de la poche est prédite à 1,5 coulée près. Les principales variables qui affectent la durée de vie des poches sont par ordre d'importance : le temps d'attente total de la poche, le degré de désulfuration, la basicité du laitier, la quantité de silico-calcium, la puissance moyenne de la chauffe et le temps de barbotage au four-poche. Ces six variables expliquent plus de 99 % de la variabilité observée sur y_2 . La vie de la poche est limitée par les blocs de coulée et du bouchon poreux. Ils constituent le maillon faible du garnissage réfractaire. Il serait donc important de travailler davantage sur ces deux composantes afin d'augmenter la durée de vie de la demi-campagne d'au moins 5 coulées. Ainsi, la raison invoquée pour interrompre une campagne porterait plutôt sur une usure uniforme du garnissage. Il sera plus facile d'observer une meilleure influence des variables opératoires sur la durée de vie des poches de coulée.

CHAPITRE IV

Synthèse

Dans la bibliographie présentée dans le premier chapitre, plusieurs auteurs ont montré que les variations sur les conditions opératoires affectent la durée de vie des poches de coulée, et de façon plus précise, celle de la ligne de laitier. Dans le second chapitre, la différence entre constructions réfractaires et traitements en poche conduit à la même performance pour une même catégorie de poche. Et, finalement, dans le chapitre précédent, un modèle de régression linéaire a pu être construit pour exprimer la durée de vie de la seconde demi-campagne en fonction de six variables opératoires dans une aciérie électrique témoin. Le but de ce chapitre est donc de comparer et de discuter des différences et des similitudes entre les facteurs ou variables opératoires qui affectent la durée de vie de la poche.

Tout d'abord, il est plus facile de relier l'influence des facteurs intrinsèques sur la durée de vie des poches de coulée que les facteurs extrinsèques. Le changement de valeur d'un paramètre extrinsèque exige ou nécessite une modification importante de la poche, de l'équipement installé ou des stations de travail dans l'usine. Par exemple, l'organisation et l'emplacement d'un préchauffeur vertical diffèrent de ceux d'un préchauffeur horizontal. Ces modifications peuvent prendre beaucoup de temps avant d'être réalisées. Malheureusement, ces modifications sont seulement faites lorsqu'une

défaillance survient ou si les problèmes de performance sont vraiment reliés à un de ces paramètres. Cette relation n'est pas toujours évidente à prouver car d'autres changements peuvent avoir été effectués au niveau des facteurs intrinsèques pour augmenter les performances réfractaires. Souvent, le design réfractaire sera changé bien avant l'équipement ou la coquille même de la poche. Ces raisons expliquent le faible nombre de relations quantitatives entre les facteurs extrinsèques et la durée de vie des poches. Deux faits peuvent être constatés. Premièrement, le questionnaire permet de diviser la performance des poches selon leur capacité. Deuxièmement, Prendergast [41] a remarqué qu'une poche à section circulaire avec un fond plat renforcé améliore la durée de vie du réfractaire installé au plancher. Il est difficile d'observer cette tendance dans le questionnaire.

Les facteurs intrinsèques peuvent être reliés plus facilement avec la durée de vie des poches en choisissant bien les variables. Au point de vue réfractaire, d'après le Tableau 4.1, qui résume les caractéristiques des poches de différentes références, les poches des aciéries électriques se classent dans la catégorie 50 - 75 t du questionnaire avec les mêmes performances. Une de ces deux poches est construite entièrement de briques en magnésie-carbone. La construction de l'autre suit la même tendance que le questionnaire. La situation diffère pour la performance des poches qui viennent des aciéries de conversion. La durée de vie varie entre 35 et 70 coulées comparativement à 100 coulées dans le questionnaire. Il est difficile d'expliquer cette situation car peu d'informations sont données dans ces articles à propos des conditions d'opération des

traitements secondaires, excepté la référence [3]. Dans ce dernier cas, la faiblesse se situe au niveau de la ligne de laitier. Les laitiers de certaines nuances peuvent être très néfastes. Des essais sont toujours en cours pour optimiser la performance de la ligne de laitier avec les différentes compositions du laitier.

Tableau 4.1 : Designs et performances réfractaires entre plusieurs aciéries

Filière	FAE		Convertisseur			
Référence	[1]	[31]	[31]	[51]	[3]	[71]
Équipement	Four-Poche VOD	Four-Poche	Injection Vide	Four-Poche Vide	Four-Poche RH-OB Injection	Désulf.
Capacité (t)	55	80	250	180	250	130
Vie	70	75	50	45	70	35
Revêtement de travail						
Ligne de laitier	MC	MC (5 %)	MC (13 % C)	MCr	MC (10 % C)	MD
Mur	D	MC	D	HA (80 %)	MC (5 % C)	D
Plancher	D	MC	D	MCr	D	D
Épaisseur (mm)						
Ligne de laitier	-	-	-	152,4	250	190
Mur	-	-	-	152,4	180	190
Plancher	-	-	-	228,6	300	190
Monolithique	N	N	N	N	O	N
Réparations						
à chaud	-	N	N	N	N	O
à froid	-	N	O	N	O	N
Raisons invoquées	Ligne de laitier	Usure uniforme	Blocs	-	Ligne de laitier Fond/Blocs	Blocs

Pour les aciéries de conversion, la dolomie est plus omniprésente dans le choix réfractaire que dans le questionnaire. Les aciéries de conversion canadiennes sont un peu en retard sur le choix réfractaire car les anciennes constructions de ces aciéries étaient principalement composées de briques à haute teneur en alumine ou de magnésie-chrome.

Le dernier point qu'il faut noter dans le Tableau 4.1 concerne les raisons invoquées pour arrêter la campagne d'une poche. La moitié de ces aciéries a comme principale cause d'arrêt les blocs et ensuite, la ligne de laitier. Cette tendance est la même que celle du questionnaire. Dans le troisième chapitre, l'aciérie témoin fait partie de ce questionnaire. Il faut interrompre la campagne pour remplacer les blocs et atteindre une vie totale de 70 coulées. Dans la bibliographie, la plupart des auteurs n'ont considéré que les poches dont la cause d'arrêt était l'usure de la ligne de laitier. Le modèle de l'équation 3.12 montre qu'une relation linéaire peut être observée même si la campagne de la poche a été interrompue pour une autre raison que l'usure de la ligne de laitier. Ainsi, il est possible d'évaluer la performance générale des zones réfractaires de la poche indépendamment de la cause d'interruption d'une campagne. Effectivement, les variables considérées affectent surtout l'usure générale du garnissage de travail, aussi bien la ligne de laitier que la paroi en contact avec le bain.

Le Tableau 4.2 résume les différentes variables opératoires considérées dans la bibliographie et dans le chapitre précédent. Il faut souligner que la référence [51] fait suite à la référence [43], du même auteur. L'indication d'un X en minuscule signifie que les auteurs discutent de l'influence qualitative, en caractère gras majuscule, de l'influence quantitative et en caractère italique, du rejet de la variable qui n'a pas une influence directe sur l'expression de la durée de vie de la poche de coulée.

Tableau 4.2 : Liste des variables opératoires considérées pour la détermination de la durée de vie des poches de coulée

Variables \ Référence	(3.12)	[1]	[43] [51]	[3]	[54]	[2]	[55]
Choix réfractaires							
Ligne de laitier	x	x	x	X	x		x
Mur	x		x	X			x
Plancher	x		x	X			x
Bloc d'impact			x				
Blocs de coulée							x
Route métallurgique	x	x	x	x			
Grades (BC/MC/HC)	X						
Nuances		x		X			
Température de l'acier au four	X		x	x	x	X	
Basicité du laitier	X	X	X	X			x
Composition du laitier		x	x	X	x		x
Quantité totale de laitier			X		x		
Laitier primaire transporté	X			x	x		
Temps de contact			X	X	x		
Temps de résidence	X		X	X	X	x	
Temps de coulée	X						x
Temps de rotation	X		x		x		x
Temps du cycle opérationnel	X		x		x		
Temps total d'attente	X				X		
Temps de barbotage	X		x	X	X	X	x
Temps de chauffe par arc			X	X	X		x
Fréquence des chauffes par arc						X	
Fréquence des arcs			X	x	X		
Puissance fournie			x		X		
Taux de chauffe	X	X					
Fréquence du trait. Sous vide		X					
Quantité de CaSi	X						
Désulfuration	X			x			
Fréquence de désulfuration						X	
Préchauffe		x	x		x		x
Temps du préchauffe			x		x		x
Température du garnissage			x		x		
Couvercle	x		x			X	x

La plupart des auteurs s'accordent que les variables opératoires suivantes influencent grandement la performance de la poche :

- 1) le choix réfractaire de la ligne de laitier ;
- 2) la basicité ou la composition du laitier ;
- 3) le temps de résidence ;
- 4) le temps de barbotage ;
- 5) le temps de chauffe par arc électrique ;
- 6) la puissance fournie au four-poche ;
- 7) le temps de la préchauffe du garnissage.

En ce qui concerne de leur influence quantitative, il n'y a que trois modèles qui permettent d'évaluer la durée de vie : 1) celui de l'équation 3.12 présenté au troisième chapitre ; 2) celui de Van Wijngaarden [1] ; 3) celui de Erny et Sistilli [2]. Les autres auteurs ne montrent que la relation ou l'influence d'une seule variable, exprimée par une valeur moyenne par coulée, sur la durée de vie. Bien qu'une relation linéaire puisse être observée, cette méthode ne permet pas d'établir une valeur d'opération. De plus, ils n'ont pas élaboré une relation générale qui permet de prédire la vie totale de la poche. La méthode utilisée pour le premier modèle (équation 3.12) combine celle de Erny et Sistilli [2] pour la distribution en fréquence des variables et celle de Van Wijngaarden [1] pour le nombre de coulées inférieures ou supérieures à une valeur seuil préétablie. Cette dernière est définie de façon statistique. L'avantage de cette valeur seuil est qu'elle possède une limite opérationnelle. Si cette limite atteint la valeur zéro, alors l'opération effectuée disparaît complètement. Par exemple, la valeur seuil du temps de barbotage ne sera jamais nulle car le barbotage sera toujours effectué pour homogénéiser le bain. Le seul

point commun de ces modèles est l'influence de la chauffe par arc électrique au four-poche, quoique l'expression de cette variable diffère pour chacun de ces modèles (taux de la chauffe, la puissance fournie par tonne, la fréquence des coulées qui sont chauffées). Le modèle de l'équation 3.12 combine la basicité, retrouvée dans le deuxième modèle (Van Wijngaarden) avec le temps de barbotage et la désulfuration, que l'on retrouve dans le troisième modèle (Erny et Sistilli). Le modèle proposé inclut deux nouvelles influences : la quantité de silico-calcium et le temps total d'attente. L'influence de ce dernier a aussi été notée par Coates, Jacobs et Miglani [54]. Le temps de chauffe par arc augmente avec le temps d'attente. La plupart des auteurs ont remarqué que le temps de résidence influence la durée de vie du garnissage. Cette variable n'a pas été considérée dans le modèle de l'équation 3.12. En fait, elle a été divisée en deux parties : le temps d'attente et le temps de raffinage. Dans l'aciérie témoin, la poche est barbotée durant toute la durée du traitement au four-poche. Le temps de résidence devenait donc redondant s'il était inclus dans le modèle. Il manque encore quelques informations, notamment la durée de la préchauffe pendant la rotation de la poche ou la température du garnissage de travail avant le remplissage.

D'après les Tableaux 3.1 et 3.2, la durée de vie de la poche est limitée par la performance des blocs. Une procédure de sécurité préétablie fixe le nombre de coulées maximal à 30 coulées. Si, pendant ces 30 coulées, toutes les valeurs opératoires sont inférieures aux valeurs seuils, la poche peut atteindre 38 coulées d'après le modèle. Or, il arrive que la vie d'une demi-campagne dépasse 30 coulées par inadvertance. Elle se rend

facilement à 33 coulées et peut atteindre 35 coulées sans difficulté. La vie maximale atteinte est de 37 coulées, ce qui est proche de la vie maximale prédicta par le modèle. Les poches qui ont eu moins de 25 coulées sont des accidents. À l'exception de trois cas (1,26 et 27), la variation des vies des 27 poches observées est plutôt causée par des erreurs humaines. Du moins, ceci montre que la poche dans l'aciérie témoin n'est pas utilisée à sa vie maximale.

Pour l'instant, cette historique des opérations effectuées dans la poche ne sert que d'outil de travail c'est-à-dire de s'assurer que les données ne dépassent pas les valeurs limites imposées. Il faudra encore accumuler les données de plusieurs poches et noter davantage les raisons d'interruption d'une campagne avec un patron d'usure du garnissage réfractaire, afin de construire un modèle plus complet qui permettra de prédire la durée de vie. Comme mentionné par Coates, Jacobs et Miglani [54], la compilation des raisons invoquées pour l'arrêt d'une campagne permet de trouver le maillon faible qui limite la vie de la poche.

CONCLUSION

Jusqu'à ce jour, il n'existe que deux auteurs qui ont réussi à établir une influence quantitative des variables opératoires sur la durée de vie des poches de coulée, mais ils n'ont considéré que les poches dont la cause d'interruption de campagne était reliée à l'usure de la ligne de laitier. La performance relative de la poche est trouvée à partir de plusieurs relations. Aucun modèle général qui inclut toutes les variables opératoires n'a été élaboré.

Le questionnaire envoyé n'a pas eu les résultats escomptés c'est-à-dire de construire un modèle qui prédirait la durée de vie des poches de coulée entre plusieurs aciéries selon leur traitement métallurgique secondaire et leurs conditions opératoires. Il y a trop peu de répondants (14) par rapport aux nombres de variables répertoriées (plus de 40). Avec des opérations différentes, la performance des poches de coulée est de 65 coulées en moyenne pour toutes les poches des aciéries électriques et pour les poches de 50-140 t des aciéries de conversion. Les poches de 230-300 t de ces aciéries ont une vie de 100 coulées. Les blocs et le fond de la poche limitent la durée de vie des poches. Comme garnissage de travail, la dolomie est très présente dans les poches des aciéries électriques. Ce n'est pas le cas dans les aciéries de conversion, qui utilisent toujours des briques à haute teneur en alumine. Il n'y a pas encore un choix précis pour la ligne de

laitier. Plusieurs qualités sont installées : dolomie enrichie de magnésie, magnésie-carbone, dolomie-carbone ou magnésie-chrome.

Le principal défaut de ce questionnaire est que les variables ont été abordées de façon trop générale à partir de conditions opératoires types. Certains aspects n'ont pas été abordés, comme la température du garnissage après la préchauffe ou les différentes compositions de laitiers pour élaborer les différentes nuances. Dans un futur proche, il serait intéressant d'envoyer un questionnaire plus complet sur toutes les pratiques métallurgiques avec les statistiques réelles des conditions opératoires à travers le continent américain. Avec ce plus grand nombre d'échantillons, il serait possible de comparer le design réfractaire des différentes qualités réfractaires entre les poches d'une même catégorie et de construire un modèle à partir de statistiques réelles des variables opératoires.

Dans une même aciérie, la durée de vie d'une poche de coulée peut être exprimée en fonction des variables opératoires. Le modèle proposé est le suivant :

$$y_2 = 0,372 \cdot N_{att<45\ min} + 0,267 \cdot N_{Si-Sr<0,055\%} + 0,187 \cdot N_{B>1,2} \\ + 0,149 \cdot N_{CaSi<60\ kg} + 0,177 \cdot N_{barb<90\ min} + 0,122 \cdot N_{P<10\ MW}$$

où $N_{att<45\ min}$ représente le nombre de coulées ayant un temps d'attente total inférieur à 45 minutes, $N_{Si-Sr<0,055\%}$, le nombre de coulées ayant un degré de désulfuration inférieur à 0,055% poids, $N_{B>1,2}$, le nombre de coulées ayant une basicité supérieure à

1,2, $N_{\text{CaSi}<60 \text{ kg}}$, le nombre de coulées ayant une quantité de CaSi inférieure à 60 kg, $N_{\text{barb}<90 \text{ min}}$, le nombre de coulées ayant un temps de barbotage inférieur à 90 minutes et $N_{P<10 \text{ MW}}$, le nombre de coulées ayant une puissance inférieure à 10 MW.

Ce modèle est le seul modèle général qui prédit la demi-vie d'une poche sous la forme d'une équation mathématique. Il tient compte des nombreux facteurs mentionnés par la plupart des auteurs : 1) le temps de résidence (exprimé par le temps d'attente et de barbotage au four-poche) ; 2) la basicité du laitier ; 3) la puissance au four-poche. Avec la méthode proposée, l'optimisation de la variable opératoire consiste à diminuer ou à augmenter la valeur seuil pour augmenter la durée de vie de la poche. Les variables à optimiser seront celles retrouvées dans le modèle de prédiction. Si une seule des valeurs seuils est changée, il faut reconstruire le modèle avec toutes les variables, même celles qui ont été retirées lors de la construction du modèle précédent. Si, un jour, la variable optimisée est retirée du modèle, ceci signifie que cette dernière n'est pas la plus influente en présence des autres variables. Il faut aussi reconstruire le modèle s'il y a un changement de pratique métallurgique. Il est important de noter que la vie de la poche peut être prédite indépendamment de la raison invoquée pour interrompre la campagne de cette poche.

Le principal défaut de ce modèle est qu'il ne prédit que la vie de la deuxième partie de la campagne de la poche. Ce défaut est principalement causé par un arrêt systématique à 30 coulées pour changer les blocs de coulée et du bouchon poreux. En ce

moment, ils constituent le maillon faible du garnissage réfractaire de la poche. Malgré cet arrêt à 30 coulées, le modèle montre que la poche peut atteindre 38 coulées si, pendant ces coulées, les valeurs opératoires restent inférieures aux valeurs seuils. En utilisant le modèle tel quel, il n'est pas possible de déterminer le moment où la campagne de la poche doit être interrompue pendant son cycle opérationnel. Mais, il peut facilement être trouvé en imposant une valeur de 30 coulées à toutes les variables et en diminuant d'une coulée chaque fois que la variable concernée dépasse la valeur seuil. À ce moment, le modèle devient un outil indispensable pour une meilleure gestion opérationnelle des poches de coulée.

Ce modèle n'est qu'un début car il ne représente que la durée de vie des poches d'une seule acierie. Il est sujet à changement car il est fonction de valeurs seuils, qui peuvent être changées pour augmenter la durée de vie de la poche. Le seuil d'une variable opératoire doit être déterminé de façon statistique. Avec cette méthode, il y aura toujours une amélioration continue du modèle car la vie dépendra toujours d'une de ces variables opératoires.

RÉFÉRENCE

- [1] VAN WIJNGAARDEN, M.J.U.T. « Interaction Between Metallurgical Practice and Refractory Performance in Ladle Furnace », *I&SM*, **19** [4] 29-43 (1992).
- [2] ERNY, E.L. et SISTILLI, E.R. « Computerized Steel Ladle Tracking », *I&SM*, **20** [10] 63-66 (1993).
- [3] BAILEY, J.H., BELL, P.M. et WALKER, B.L. « The Development of the Ladle Metallurgy Facility Ladle Lining at British Steel PLC, Teesside Works », *Stahl und Eisen*, Octobre 1994, 190-197.
- [4] AMBLARD, M. et LEGRAND, H. « L'évolution du Four-Poche », *La Revue de Métallurgie - CIT*, Avril, 317-324 (1988)
- [5] FRUEHAN, R. J. « Ladle Metallurgy - Principles and Practices », BookCrafters, Cehlsea (MI), É.-U., p.35-44.
- [6] COTCHEN, J. K. « Slag Separation Methods for Arc Furnaces And Ladle Metallurgy », *I&SM*, **12** [11] 16-28 (1985).
- [7] « Refractories for Steelmaking », *IISI*, Brussels, p. 2.86-2.187 (1992).
- [8] CARRINGTON, K.F. et TOMAZIN, C.E. « Implementation and Development of Ladle Metallurgy for the Production of Clean Steel », *I&SM*, **9** [7] 29-32 (1982).
- [9] RÜB, F. « Les Réfractaires de Poches Acier - Les Systèmes de Brassage Utilisés dans la Métallurgie en Poche », *CESSID*, 92-276.

- [10] COTCHEN, J. K. « Analyzing Ladle Furnace Performance », *I&SM*, 15 [11] 52-58 (1988).
- [11] CARLSSON, G. HELLE,L. et SZEKELY, J. « Ladle Metallurgy ». New York (NY), É.-U., p.27-71 (1989).
- [12] FRUEHAN, R. J. *op. cit*, p.35-44.
- [13] HEASLIP, L. J. et SOMMERSVILLE, I. D. « Principles Of Ladle Injection and Other Ladle Refining Processes - Part I », *I&SM*, 12 [10] 37-39 (1985).
- [14] HEASLIP, L. J. et SOMMERSVILLE, I. D. « Principles Of Ladle Injection and Other Ladle Refining Processes - Part II », *I&SM*, 12 [11] 58-60 (1985).
- [15] ASSOCIATION OF IRON AND STEEL ENGINEERS. « Specifications for Design and Use of Ladles », *AISI Technical Report No 9*, 1-55 (1991).
- [16] LÜHRSEN, E., OBERBACH, M., PARBEL, W. et STALLMAN, H.G. « Refractories for the Continuous Casting of Steel », *Fachberichte Hüttenpraxis Metallweiterverarbeitung*, 20 [4] 212-221 (1982).
- [17] SEEGER, M., OBERBACH, M. et WLACH, G. « High-Grade Refractories for Slag-Free Tapping and Ladle Metallurgy - Important Factors of Clean Steel Technology », *World Steel & Metalworking*, 9 74-82 (1988).
- [18] RÜB, F. « Les Réfractaires de Poches Aciéries - Différence de Gestion entre Poches pour Aciérie de Conversion et Aciérie Électrique », *CESSID*, 92-278.

- [19] BARNA, G.L. et CARNIGLIA, S.C. « Handbook of Industrial Refractories Technology - Principles, Types, Properties and Applications », Noyes Publication, Park Ridge (NJ), É.-U., p. 52-119 (1992).
- [20] SNECTI. « Traité Pratique sur l'Utilisation des Produits Réfractaires », Éditions H. Vial, France, p.24-32 (1986).
- [21] SNECTI, *id*, p.171-192
- [22] PROVOST, G. « Les Réfractaires de Poches Acières - Sollicitations et Critères de Choix », *CESSID*, 92-270.
- [23] « Modern Refractory Practice », 5^e Ed., *Harbison-Walker Refractories*, É.-U., p. CR2-CR10 (1992).
- [24] LOEFFELHOLZ, M. et MARR, R. « Slag Control for Dolomite Ladle Linings », *I&SM*, 16 [6] 30-32 (1989).
- [25] BROWN, J.J. et TINDYALA, M.A. « Dolomite Ladle Refractories at Inland Steel's No. 1 Electric Furnace Shop », *I&SM*, 12 [11] 44-54 (1985).
- [26] RIEDL, J.R. et STENDERA, J.W. « Recent Experience with Dolomite in Large Steel Ladles », *I&SM*, 13 [3] 18-23 (1986).
- [27] BEURROTTE, M. PROVOST, G. et TASSOT, P. « Evolution of the Steel Ladle Linings at Usinor Aciers Dunkerque Technical Interest - Service Performance of Dolomite Bricks », *Proc. of 2nd Inter. Conf. on Refactories*, Tokyo, 1 337-348 (1987).

- [28] ALCOCK, S. et SPENCER D.R.F. « The Application and Performance of Basic Refractories in Secondary Steelmaking Ladles », *Trans. J. of British Cer. Soc.*, 77 45-57 (1978).
- [29] AIBA, Y., KURIHARA, K., MEADA, T., OKI, K. et SUGIE, M. « Study of Corrosion and Penetration of Zirconia Refractories by Molten Steel and Slag », *Taikabutsu Overseas*, 3 [3] 3-11 (1985).
- [30] MASSE, F. « Les Réfractaires de Poches Aciéries - Produits Façonnés », *CESSID*, 92-272.
- [31] DAWSON, P., LYTHE, T.W. et WILLIAMS, P. « Further Developments in the Introduction of Basic Refractories into Teeming and Secondary Steelmaking Ladles », *Proc. of 2nd Inter. Conf. on Refactories*, Tokyo, 1 307-321 (1987).
- [32] GLASSGOLD, L.I. « Repairing Monolithic Refractory Failures », *ACI Publication SP-74.*, 141-152 (1982).
- [33] YOSHINO, S. « Recent Trends in Steel Ladle Linings in Japan », *Taikabutsu Overseas*, 1 [1] 49-55 (1983).
- [34] HOSLER, M., MOERTL, G. et SIEGL, W. « Vibratable Castables for Ladles and Tundish Linings - Properties and Industrial Behaviour », *Proc. of the 69th Steelmaking Conf.*, Wasington, 69 215-221 (1986).
- [35] EBISAWA, I., ICHIKAWA, K., MORISHITA, N., NISHI, M., OKUDA, S.S., SHIMADA, N. et TAGUSHI, K. « Construction and Repairing of Steel Ladle

- Lining with Castable Refractories », *65th Steelmaking Conf. Proc.*, Pittsburgh, **65** 77-83 (1982).
- [36] JACQUEMIER, M. « Les Réfractaires de Poches Aciéries - Les Matériaux Réfractaires Non-Façonnés pour Poche à Acier », *CESSID*, 92-283
- [37] BEETZ, J.G., FISHER, R.E. et KRIETZ, L.P. « Evolution and Status of Refractory Castable Technology Entering the 1990s », *Cer. Bull.*, **69** [10] 1690-1693 (1990).
- [38] CURLETT, L. et MARTINO, M. « Basic Monolithic for Wear Lining of Steel Ladles : Laboratory Study and First Industrial Experiences », *Unitecr '91*, Aachen, 144-148 (1991).
- [39] ISOBE, T., MATSUMOTO, O. et NAGAI, B. « Development of Monolithic Refractory Linings for B.O.F. Ladle in Japan Mainly for the Last Decade », *Unitecr '91*, Aachen, 116-122 (1991).
- [40] ISOBE, T., NAKAGAWA, H., SUEKAWA, Y., TAKEUCHI, K. et YAOI, H. « Development of Monolithic Refractory Lining for Steel Ladle Slag Line », *Stahl un Eisen*, Aachen, Oktober, 110-117 (1992).
- [41] PRENDERGAST, I.D. « Practical Aspects of Refractory Selection and Performance in Steel Ladles - Part I », *I&SM*, **15** [1] 19-22 (1988).
- [42] PRENDERGAST, I.D. « Practical Aspects of Refractory Selection and Performance in Steel Ladles - Part II », *I&SM*, **15** [2] 18-22 (1988).

- [43] HUBBLE, D.H. « Factors Affecting Life of Steel Ladles », *Unitecr'89 Proceedings*, 416-429 (1989).
- [44] BELL, D.A. et PALIN, F.T. « Design of Refractory Linings Using Computer-based Thermomechanical Analysis », *Materials & Design*, 9 [1] 40-44 (1988).
- [45] ALDER, W.R. et MASARYK, J.S. « Elevated Temperature Stress-Strain Measurements on Refractories », *Proc. of 2nd Inter. Conf. On Refractories*, Tokyo, 1 702-711 (1987).
- [46] SHIDEMANTLE, D.R. « High Ladle Stresses from Clean-Steel Ladle Linings », *Iron and Steel Engineer*, 62 [7] 43-45 (1985).
- [47] SINGH, K.N. et WEI, M. L. « Design of Refractory Lining and Steel Shell for Caster Ladles », *Iron and Steel Engineer*, 63 [4] 58-69 (1986).
- [48] SCHACHT, C. A. « Lining Life of Ladles as Related to Shell Flexing and Linings Properties », *Iron and Steel Engineer*, 64 [7] 48-52 (1987).
- [49] SCHACHT, C.A. « Improved Mechanical Material Property Definition of Predicting the Thermomechanical Behavior of Refractory Linings of Teeming Ladles », *J. Am. Ceram. Soc.*, 76 [1] 202-206 (1993).
- [50] SAUNDERS, L. M. « Preheating and Controlled Thermal Cycling of Steel Handling Ladles », *Proc. of 66th Steelmaking Conf.*, AIME, Atlanta (1983).

- [51] HUBBLE, D.H. et WITTER, J.W. « Improvements in Ladle Life and Cost at USS Fairfield Works », *74th Steelmaking Conf. Proc.*, AIME, Washington, 315-321 (1991).
- [52] LE COQ, X. et ZBACZUNIAK, Y. « Les Poches à Acier - Présentation Générale », *CESSID*, 92-269.
- [53] PRANGE, R., STRADTMANN, J. et WENCLAWIAK, G. « Recent Development of Dolomitic Refractories for Application in the Steelmaking Process », *Proc. of 2nd Inter. Conf. On Refractories*, Tokyo, 1 349-362 (1987).
- [54] COATES, W.R., JACOBS, C.M. et MIGLANI, S. « Computer Study of Shop Practices Affecting the Performance of Ladle Furnace Slaglines », *Steelmaking Conf. Proc.*, Washington, 74 323-327 (1991).
- [55] NORRIS, E.T. « Refractory Performance at Stelco's Hilton Works », *77th Steelmaking Conf. Proc.*, Chicago, 77 483-489 (1991).
- [56] « Modern Refractory Practice », *op. cit*, PR6-PR32 (1992).
- [57] HEASLIP, L.J., McLEAN, A. et OMOTANI, M.A. « Ladle Temperature Control During Continuous Casting », *I&SM*, 10 [10] 29-35 (1983).
- [58] BIRAT, J.P. et PETEGNIEF, J. « Comportement Thermique de l'Acier de la Poche et du Répartiteur de Coulée Continue. Première Partie. », *Revue de Métallurgie - CIT*, Août-Septembre, 625- 645 (1987).
- [59] GRANDILLO, A. et MUCCIARDI, F. « Thermal Cycling of Ladles at Stelco McMaster Works », *Iron & Steel Engineer*, Décembre, 24-30 (1987).

- [60] BELL, D.A. et PALIN, F.T. « Design of Refractory Lining Using Computer-Based Thermomechanical Analysis », *Materials & Design*, 9 [1] 40-44 (1988).
- [61] LIMOGES, J. « Température de la Tôlerie ou du Blindage des Poches de Coulée », *communication interne*.
- [62] SNECTI, *op. cit.*, p. 60-65.
- [63] WEISBERG, S. *Applied Linear Regression*, Seconde Édition, New York, John Wiley and Son, p. 1-55 (1985).
- [64] WEISBERG, S. *op. cit.*, p 114-125.
- [65] WEISBERG, S. *Id.* , p. 196-201.
- [66] WEISBERG, S. *Id.* , p. 211-221.
- [67] SAS INSTITUTE INC. « The RSQUARE Procedure », *SAS Instructions Manual*, p.711-724.
- [68] RUBIN, D.B. « Inference and missing data », *Biometrika*, 63 581-592 (1976).
- [69] WEISBERG, S. *op. cit.*, p 243-250.
- [70] FRUEHAN, R.J. *op. cit.*, p. 27-34.
- [71] GHOSH, B.N., GHOSH, K.S., MUKERJEE, T. et SARKAR, A.S. « Ladle Management at LD Shop of Tata Steel », *Unitecr'93 Congress*, Brazil, 1002-1013 (1993).

ANNEXE A

Compilation brute du questionnaire

Tableau A.1 : Caractéristiques et dimensions des poches de coulée

Plant No	Ladle Characteristics					Ladle Dimensions						
	Tap Weight t	Rebuilt Lately	Age year	Type	Ladle Bottom Shape	Free Board m	Inner Height m	Top Diameter m	Bottom Diameter m	Top Axis Major m	Bottom Axis Major m	Bottom Axis Minor m
Steelmaking Plant 1	50	No	6	Round	Dished	50,8	2,95	2,18	1,85			
Steelmaking Plant 2	63,5	No	10	Round	Dished	61	2,69	2,59	2,44			
Steelmaking Plant 3	65,3	No	9	Round	Dished	40,6	2,44	2,64	2,74			
Steelmaking Plant 4	72,6	No		Round	Flat	20	2,81	2,69	2,06			
Steelmaking Plant 5	95,3	Yes		Round	Dished	45,7	2,92	2,9	2,21			
Steelmaking Plant 6	117,9	No		Round	Flat	91,4	4,27	3,38	3,18			
Steelmaking Plant 7	136,1	Yes	1	Round	Flat	45,7	3,96	3,26	2,13			
Steelmaking Plant 8	136,1	No	12	Round	Dished	45,7	3,96	3,26	2,13			
Steelmaking Plant 9	75	No	8	Round	Flat	40	3	2,1	2			
Steelmaking Plant 10	93,4	No	40	Oblong	Dished	15,2	3,96					
Steelmaking Plant 11	136,1	No	7	Oval	Flat	45,7	3,42					
Steelmaking Plant 12	228	No	15	Round	Flat	10	3,53	3,96	3,29			
Steelmaking Plant 13	240	No	22	Round	Flat	35	4,27	3,56	3,15			
Steelmaking Plant 14	300	No	10	Round	Flat	68,5	3,89	4,28	3,85			
Steelmaking Plant 15	54,4	Yes	15	Round	Dished	152,4	3,7	2,21	1,96			
Steelmaking Plant 16	63,5	Yes	22	Round	Flat	142,2	3,87	2,59	2,13			

Tableau A.2 : Poids des réfractaires et préchauffe initiale

Plant No	Weight of Refractories					Initial Preheat							
	Insulating t	Safety t	Working t	Use Backfill Material	Backfill t	Preheat Orientation	Temperature Control		Total Avg h	Preheat Min h	Time Max h	Hot Face Temp. °C	Power Rating kW
							Maximum	Rise					
Steelmaking Plant 1			4,62	9,51	Yes	4,62	Vertical	Yes	Yes	10	12	1100	1465
Steelmaking Plant 2			7,26	9,53	Yes	1,36	Horizontal	Yes	Yes	12	8	1100	
Steelmaking Plant 3					Yes	0,91	Vertical	Yes	No	24	12	48	1200
Steelmaking Plant 4			4,72	12,02	Yes	0,64	Vertical	Yes	Yes	20	10	25	1370
Steelmaking Plant 5			11,79	15,88	No		Vertical	Yes	No	12		24	1100
Steelmaking Plant 6			9,98	15,42	Yes	9,98	Vertical	Yes	Yes	10	8	12	1100
Steelmaking Plant 7			8,35	24,5	Yes	1,81	Vertical	Yes	No	11	10	18	1100
Steelmaking Plant 8			9,07	25,4	Yes	1,81	Vertical	Yes	No	8	6	12	1100
Steelmaking Plant 9			3,5	10	No		Vertical	No	No	12		16	1300
Steelmaking Plant 10					No		Vertical	Yes	No			1100	3300
Steelmaking Plant 11			1,17	9,18	17,18	No	Vertical	Yes	Yes	32		32	980
Steelmaking Plant 12			0,09	8,17	15,33	Yes	4,08	Vertical	Yes	Yes	34	40	1050
Steelmaking Plant 13					No		Vertical	Yes	No				
Steelmaking Plant 14			5,9	13,61	33,57	No		Vertical	Yes	Yes	40		1100
Steelmaking Plant 15					28,1		Horizontal	No	No	16	12		
Steelmaking Plant 16			10,43	18,6	Yes	1,09	Vertical	Yes	No	8	6	48	1150

Tableau A.3 : Caractéristiques desaciéries et des traitements en poche

Plant No	Plant Characteristics			Ladle Treatments					Ladle Cycle		
	Yearly Capacity t	Number of Ladies Available	Number of Ladies In Service	Stirring		Reheating		Vacuum Degassing	Turnaround Time min	Heat Ladle?	Residence Time min
				Stir Plug	Sub. Lance	Electric Arc	Chemical				
Steelmaking Plant 1	290000	9	3	Yes	No	Yes	No	No	70	Yes	70
Steelmaking Plant 2	363000	7	4	Yes	No	Yes	No	No	55	Yes	90
Steelmaking Plant 3	363000	8	4	Yes	No	Yes	No	No	60	Yes	60
Steelmaking Plant 4	218000	6	3	No	Yes	No	No	No	80	Yes	15
Steelmaking Plant 5	417000	6	3	Yes	No	Yes	No	No	97	Yes	195
Steelmaking Plant 6	245000	7	5	Yes	No	Yes	No	Yes	240	Yes	200
Steelmaking Plant 7	600000	8	4	Yes	No	Yes	No	No	210	Yes	110
Steelmaking Plant 8	600000	8	4	Yes	No	Yes	Yes	No	250	Yes	120
Steelmaking Plant 9	363000	8	4	Yes	No	Yes	No	No	120	Yes	110
Steelmaking Plant 10	1500000	12	6	Yes	No	No	Yes	No	180	Yes	220
Steelmaking Plant 11	2360000	20	11	Yes	No	Yes	No	No	145	No	160
Steelmaking Plant 12	1700000	9	4	No	No	No	Yes	Yes	35	Yes	120
Steelmaking Plant 13	1500000	12	6	Yes	No	No	No	No	240	Yes	120
Steelmaking Plant 14	2360000	12	5	Yes	Yes	Yes	No	Yes	200	Yes	85
Steelmaking Plant 15	109000	10	6	Yes	No	Yes	No	Yes	150	Yes	240
Steelmaking Plant 16	109000	6	3	Yes	No	No	Yes	Yes	240	Yes	190

Tableau A.4 : Cycle opérationnel des poches de coulée

Plant No	End of Cast to Preheat min	Heating Time min	Preheat to Tap min	Tapping Time min	Ladle Cycle		Reheating Time Arc min	Chemical min	Vacuum Time min	Casting Time min	Covering Time min
					Stir Plug min	Lance min					
Steelmaking Plant 1	4	55	9	2	30		20			70	
Steelmaking Plant 2	15	50	5	5	45		45			50	60
Steelmaking Plant 3	10	40	10	5	45		45			55	50
Steelmaking Plant 4	10	60	10	7		12				75	
Steelmaking Plant 5	10	75	8	4	30					95	105
Steelmaking Plant 6	20	210	5	3	200		50		40	90	60
Steelmaking Plant 7	40	120	45	5	90		30			80	40
Steelmaking Plant 8	40	160	45	5	100		10	4		60	40
Steelmaking Plant 9	20	40	20	8	45		45			65	60
Steelmaking Plant 10	90	35	20	8	50			20		75	153
Steelmaking Plant 11					24		7			45	130
Steelmaking Plant 12	25	10	1	5				5	25	55	
Steelmaking Plant 13	25	30	10	8	35					50	
Steelmaking Plant 14	45	132	10	8	80	10	15		50	45	30
Steelmaking Plant 15	45	60	20	6	240		25		30	30	
Steelmaking Plant 16	20	220	10	10	140			25	100	60	

Tableau A.5 : Pratique des couvercles sur les poches de coulée

Plant No	Use Cover to Keep Heat in Ladle during Turnaround	No Lid during Casting	Beginning to End of Casting	Lid Practice			Removing Time before End of Casting	Other
				Permanent Lid System	Moved by Overhead Crane on Ladle	Yes		
Steelmaking Plant 1	No	No	Yes	No	No	Yes	5 min	
Steelmaking Plant 2	Yes	No	Yes	No	No	No	min	
Steelmaking Plant 3	Yes	No	No	No	Yes	No	min	Moved by overhead crane
Steelmaking Plant 4	No	No	No	No	No	No	min	Captive lid on ladle car
Steelmaking Plant 5	Yes	No	Yes	No	No	Yes	10 min	
Steelmaking Plant 6	Yes	No	Yes	No	No	Yes	10 min	
Steelmaking Plant 7	Yes	No	Yes	No	No	Yes	min	Lid placed mechanically at furnace
Steelmaking Plant 8	Yes	Yes	No	No	No	No	min	Lid placed mechanically at furnace
Steelmaking Plant 9	No	No	No	No	No	Yes	min	
Steelmaking Plant 10	Yes	No	Yes	No	No	No	min	
Steelmaking Plant 11	Yes	No	No	Yes	No	No	min	
Steelmaking Plant 12	No	No	Yes	No	No	No	min	From finish RHOB to End of Cast
Steelmaking Plant 13	Yes	No	Yes	No	Yes	No	min	On waiting for going to the CAS-OB
Steelmaking Plant 14	Yes	No	Yes	No	No	No	min	
Steelmaking Plant 15	No	No	No	No	No	Yes	min	
Steelmaking Plant 16	No	Yes	No	No	No	No	min	

Tableau A.6: Grade d'acières et techniques de contrôle du laitier primaire

Plant No	Overall Steel Production						Slag Carryover Practice			Total Amount of Slag Carryover
	Low Carbon Steel %	Medium Carbon Steel %	High Carbon Steel %	Sulfur Content <.010 %	Sulfur Content <.015 %	Slag Carryover Control	Amount of Slag Carryover			
Steelmaking Plant 1	15	65	20	60	40	Eccentric Bottom Tapping	180 kg	680 kg		
Steelmaking Plant 2	50	30	20	60	40	None	5,1 cm	10,2 cm		
Steelmaking Plant 3	20	70		10		Submerged Tap Hole	7,6 cm	12,7 cm		
Steelmaking Plant 4	5	35	60			None	1360 kg	2270 kg		
Steelmaking Plant 5	16	32	52	1	10	Eccentric Bottom Tapping	454 kg	1815 kg		
Steelmaking Plant 6		99		40	30	Eccentric Bottom Tapping	45,4 kg	950 kg		
Steelmaking Plant 7	40	30	30			Eccentric Bottom Tapping	227 kg	1365 kg		
Steelmaking Plant 8	75	23	2	20	30	Eccentric Bottom Tapping	227 kg	907 kg		
Steelmaking Plant 9	30	10	60			None	2,5 cm	5,1 cm		
Steelmaking Plant 10	90	10		50	99	None				
Steelmaking Plant 11	56	23	21	15	33	None				
Steelmaking Plant 12	80	20		75	25	None	544 kg	1360 kg		
Steelmaking Plant 13	55	40	5	35	63	None	10 cm			
Steelmaking Plant 14	90	10		50	90	Slag Stopper	5,1 cm	7,6 cm		
Steelmaking Plant 15	28	72	60	15	31	Ladle Skimming	227 kg	1360 kg		
Steelmaking Plant 16				100		Ladle Skimming				

Tableau A.7 : Fondants ajoutés pour un acier bas carbone

Plant No	Low Carbon Steel Practices								
	Lime kg	Fluospar kg	Do-Lime kg	Ca-Al ₂ O ₃ kg	Flux Additions Rice Hulls kg	Kwik Melt kg	CaSi kg	Al ₂ O ₃ -CaO-SiO ₂ kg	MgO-CaO-SiO ₂ kg
Steelmaking Plant 1	225	15		90	27				135
Steelmaking Plant 2	180	45							
Steelmaking Plant 3	225		225			455			
Steelmaking Plant 4					115				
Steelmaking Plant 5	225	60	45						
Steelmaking Plant 6	545	90	90				180		
Steelmaking Plant 7	455		590					135	
Steelmaking Plant 8	225		360						
Steelmaking Plant 9	500	50							
Steelmaking Plant 10	800								
Steelmaking Plant 11	365		135						
Steelmaking Plant 12	500		400						
Steelmaking Plant 13	340								
Steelmaking Plant 14	1000			1000					
Steelmaking Plant 15	680								
Steelmaking Plant 16									

Tableau A.8 : Désoxydants ajoutés et composition du laitier pour un acier bas carbone

Plant No	Low Carbon Steel Practices						Typical Slag Composition						
	Aluminium kg	CaC2 kg	FeSi kg	Fe-Al %	Si-Mn kg	%	CaO %	SiO2 %	MgO %	FeO %	MnO %	Al2O3 %	R2O3 %
Steelmaking Plant 1		45	90				50	15	15	1		20	
Steelmaking Plant 2			90	75			48	10	8	10		12	
Steelmaking Plant 3	45	35	175	75	45	280	17	39	32	15	2	2	13
Steelmaking Plant 4			70				40	26	12	3	4	6	
Steelmaking Plant 5	25	25	545	50			43	25	18	2		1	
Steelmaking Plant 6				0,5			60	25	9				8
Steelmaking Plant 7			455	75			50	25	12	2	2	5	
Steelmaking Plant 8	115						48	10	14	10	3	25	
Steelmaking Plant 9			500	75			60	25	5	0,3		5	
Steelmaking Plant 10	225		500	27									
Steelmaking Plant 11	320						41	5,5	12	6,5	4	28	
Steelmaking Plant 12	450												
Steelmaking Plant 13	255		285	75			48	6	7,4	5,2		22,5	
Steelmaking Plant 14	550		1500				50	13	9	3		25	
Steelmaking Plant 15	90		45	50									
Steelmaking Plant 16													

Tableau A.9 : Méthodes utilisées pour la construction des poches de coulée

Plant No	Refractory Construction Methods						Workmanship and Appearance		Ladle Tear-out or Wear Evaluation
	Construction done by			Planning Method			Very Important	Not Important	
	Bricklayers	General labor	Contractor	Anybody	Drawing	Supervisor			
Steelmaking Plant 1	Yes	No	No	No	Yes	Yes	Yes	No	Yes
Steelmaking Plant 2	Yes	No	No	No	No	Yes	Yes	No	Yes
Steelmaking Plant 3	Yes	No	No	No	No	Yes	Yes	No	No
Steelmaking Plant 4	Yes	No	No	No	No	Yes	Yes	No	Yes
Steelmaking Plant 5	Yes	No	No	Yes	No	No	Yes	No	Yes
Steelmaking Plant 6	Yes	Yes	No	No	Yes	Yes	Yes	No	Yes
Steelmaking Plant 7	Yes	No	No	No	Yes	Yes	Yes	No	Yes
Steelmaking Plant 8	Yes	No	No	No	Yes	Yes	Yes	No	No
Steelmaking Plant 9	Yes	No	No	No	Yes	Yes	Yes	No	Yes
Steelmaking Plant 10	Yes	No	No	No	Yes	Yes	Yes	No	Yes
Steelmaking Plant 11	Yes	No	No	No	Yes	Yes	Yes	No	Yes
Steelmaking Plant 12	No	Yes	No	No	No	Yes	Yes	No	Yes
Steelmaking Plant 13	Yes	No	No	No	Yes	Yes	Yes	No	Yes
Steelmaking Plant 14	Yes	No	No	No	Yes	Yes	Yes	No	No
Steelmaking Plant 15	Yes	No	No	No	Yes	Yes	Yes	No	Yes
Steelmaking Plant 16	Yes	No	No	No	No	Yes	Yes	No	Yes

Tableau A.10 : Performance réfractaire des poches de coulée

Plant No	Refractory Performance				Ladle Lining's Life			
	Compile and Analyse Data	Compiling Method	Satisfied and Performance Established	On-Going Trials	Average Life	Contact Time hours	Heats Life	
					# heats		Minimum	Maximum
Steelmaking Plant 1	Yes	Manually		Yes	60	70	41	84
Steelmaking Plant 2	Yes	Manually		Yes	65	114	21	73
Steelmaking Plant 3	Yes	Both	Yes		40	80	30	47
Steelmaking Plant 4	Yes	Manually	Yes		68	85	40	82
Steelmaking Plant 5	Yes	Manually	Yes	Yes	70	105	38	80
Steelmaking Plant 6	Yes	Computer	Yes	Yes	60	250	35	65
Steelmaking Plant 7	Yes	Both		Yes	60	190	9	89
Steelmaking Plant 8	Yes	Both		Yes	68	200	61	73
Steelmaking Plant 9	Yes	Manually	Yes		55	37	38	62
Steelmaking Plant 10	Yes	Both		Yes	65	238	60	76
Steelmaking Plant 11	Yes	Both		Yes	60	175	47	74
Steelmaking Plant 12	Yes	Manually		Yes	100	200	80	105
Steelmaking Plant 13	Yes	Both		Yes	140		41	172
Steelmaking Plant 14	Yes	Manually	Yes	Yes	100	142	60	100
Steelmaking Plant 15	Yes	Manually		Yes	18	69		
Steelmaking Plant 16	Yes	Manually		Yes	17	68	12	19

Tableau A.11 : Principales raisons invoquées pour interrompre une campagne

Plant No	Campaign's End Main Reasons in Percentage									
	Cracking or Local Degradation	Penetration/	Have to be Changed		Refractory Damaged by Equipment	Ladle Rotation				
	Side Wall	Slag Line	Bottom	Free Board	Opened Joints	Porous Plug System	Bottom/ Well Blocks	Thickening of Lining	Uniformly Too Thin	
Steelmaking Plant 1	20					60	20			
Steelmaking Plant 2	30					30	30	10		
Steelmaking Plant 3							20		80	
Steelmaking Plant 4			5				90		5	
Steelmaking Plant 5					20	40	40			
Steelmaking Plant 6					90	5	5			
Steelmaking Plant 7	2	30			25	2	27		5	9
Steelmaking Plant 8	56	6			12				25	
Steelmaking Plant 9	10	20				40		10	20	
Steelmaking Plant 10	5		50			40	5			
Steelmaking Plant 11		80				10	10			
Steelmaking Plant 12			15						80	
Steelmaking Plant 13			10			20	50			20
Steelmaking Plant 14	90	10								
Steelmaking Plant 15	30					30	30		10	
Steelmaking Plant 16						40	40	20		

Tableau A.12 : Critères d'arrêts de campagne et réparations du garnissage

Plant No	Out of Service Criteria			Ladle's Refractory Repairs					
	Fixed Number of Heats	Ladleman's Decision	Foreman's Decision	Repair Ladle's Lining	Kind of Repairs	Regular Practice	Working Area Repaired	Patch Safety Lining	
Steelmaking Plant 1	No	No	Yes	Yes	No	Yes	Yes	Slag Line	No
Steelmaking Plant 2	No	No	Yes	Yes	No	Yes	Yes	Freeboard/Slag Line	Yes
Steelmaking Plant 3	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No		Yes
Steelmaking Plant 4	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes	No		Yes
Steelmaking Plant 5	Yes	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Slag Line	Yes
Steelmaking Plant 6	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Slag Line	No
Steelmaking Plant 7	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes	Yes	Bottom/Slag Line	Yes
Steelmaking Plant 8	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes	Yes	Bottom	Yes
Steelmaking Plant 9	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes	Yes	Slag Line	No
Steelmaking Plant 10	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Freeboard/Slag Line	Yes
Steelmaking Plant 11	No	No	Yes	Yes	Yes	No	No		Yes
Steelmaking Plant 12	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes	No		Yes
Steelmaking Plant 13	No	Yes	No	Yes	No	Yes	Yes	Bottom/Slag Line	Yes
Steelmaking Plant 14	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Freeboard	No
Steelmaking Plant 15	No	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Yes	Slag Line	Yes
Steelmaking Plant 16	Yes	No	Yes	Yes	No	Yes	No		Yes

Tableau A.13 : Type d'essais effectués

Plant No	Trials' Practice						
	Different Quality Bricks		Different Shape Bricks		Different Slag Compositions	Different Ramming Materials	Gunning Materials on Bricks
	Same Supplier	Different Suppliers	Same Supplier	Different Suppliers			
Steelmaking Plant 1	Yes	Yes			Yes		
Steelmaking Plant 2	Yes	Yes					
Steelmaking Plant 3							
Steelmaking Plant 4							
Steelmaking Plant 5					Yes		
Steelmaking Plant 6			Yes				
Steelmaking Plant 7			Yes				
Steelmaking Plant 8							
Steelmaking Plant 9							
Steelmaking Plant 10			Yes				
Steelmaking Plant 11							
Steelmaking Plant 12		Yes					
Steelmaking Plant 13	Yes		No				
Steelmaking Plant 14	Yes						
Steelmaking Plant 15	Yes	Yes			Yes		
Steelmaking Plant 16		Yes			Yes		

ANNEXE B

Propriétés des réfractaires installés

Tableau B.1 : Propriétés des produits argileux et haute teneur en alumine

Famille	Unité	Haute alumine									Argiles cuites à haute température			
		HA1	HA2	HA3	HA4	HA5	HA6	HA7	HA8	HA9	HF1	HF2	HF3	HF4
Composition														
MgO	%	0,9	0,1	0,2	-	-	0,1	-	0,3	0,2	0,6	-	0,4	0,2
CaO	%	0,7	0,1	1,5	-	0,1	1,4	0,1	0,1	0,1	0,6	0,1	0,2	0,3
SiO ₂	%	15,8	12,8	0,1	5,5	8,6	44	0,9	32,6	24	53	51,0	44,8	52,5
Al ₂ O ₃	%	78,7	82,4	97,8	86,5	83,6	52	90,7	61,3	70,2	43	45,7	51,5	42,5
Fe ₂ O ₃	%	1,5	1,1	-	1,7	1,5	0,8	0,1	2	1,8	2	0,9	1,4	1,1
TiO ₂	%	3	2,8	-	3,5	3,3	1,6	-	2,7	3	2	1,7	1,9	2,5
Alcalins	%	0,5	0,3	0,4	-	0,2	0,1	0,1	0,5	0,5	0,8	0,4	0,3	1,0
Lien		Phosphate Faible en ciment												
Propriétés physiques														
Densité apparente	kg/m ³	2,71	2,8	3,14	2,72	2,9	2,38	2,94	2,47	2,64	2,31	2,34	2,38	2,32
Porosité ouverte	%	19,8	19	-	-	17,8	-	15,6	20	19	15	15	19	11
Variations permanentes	%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Résistance à la compression	MPa	56	53	-	-	90	-	107	24	-	34	58	48	30
Résistance à froid	MPa	9	14	13,1	5,5	17	17,2	18	6,9	6,9	10	15	10	11
Propriétés thermomécaniques														
Coefficient de dilatation	x10 ⁻⁶ /°C	1,9	3,4	0,5	-	1	-1,2	0,5	-	-	-1	-0,3	-0,5	-0,3
Résistance à chaud	MPa	-	2,3	24,8	12,4	-	-	10	-	-	-	10,7	-	-
Propriétés thermiques														
Conductivité à 500 °C	W/m °K	2,5	-	-	-	2,8	-	3,1	1,43	1,59	1,4	1,2	1,4	1,4
Conductivité à 1000 °C	W/m °K	2,4	2,25	2,9	2	2,6	1,66	2,9	1,46	1,59	1,5	1,4	1,56	1,5
Chaleur spécifique	J/kg °K	1100	1100	1000	1100	1100	1000	1100	1100	1100	1060	1060	1060	1060
Propriétés physico-thermiques														
Diffusivité	m ² /s	0,81	0,73	0,92	0,67	0,82	0,70	0,90	0,54	0,55	0,61	0,56	0,62	0,61
Admittivité	J/m ² °K√s	2675	2630	3020	2445	2880	1990	3060	1990	2150	1915	1865	1985	1920

Tableau B.2 : Propriétés des produits basiques

Famille	Unité	Magnésie			Magnésie-Chrome			Dolomie					
		HM1	HM2	HM3	MCr1	MCr2	MCr3	DM	D1	D2	D3	D4	D5
Composition													
MgO	%	95	94,5	92	60	62,5	60,8	59,4	41	48,5	38	50	41
CaO	%	1,6	1,5	2	1,1	0,7	0,7	37,1	57	56,2	59	45	57
SiO ₂	%	2	2,3	0,8	2,2	2	1,6	1,4	0,6	0,9	1	1	0,4
Al ₂ O ₃	%	0,8	0,8	5	7,4	11,3	8,1	0,4	0,4	0,5	1	1	0,8
Fe ₂ O ₃	%	1	0,7	0,3	13,1	8	10,4	0,6	1	0,8	1	1	-
Cr ₂ O ₃	%	-	-	-	19,4	15,5	18,2	-	-	-	-	-	-
Carbone	%	-	-	-	-	-	-	-	2,1	-	-	-	3,3
Lien													
		Direct	Direct	Direct	Partiel	Direct	Direct	Direct	Résine	Directe	Résine	Direct	Résine
Propriétés physiques													
Densité apparente	kg/m ³	2,85	2,85	2,9	3,16	3,06	3,11	2,97	2,92	2,86	2,88	2,83	2,95
Porosité ouverte	%	17,8	17,8	18	17,5	18	17,5	17,5	45	17,5	9	17	16
Variations permanentes	%	-0,3	-0,5	-	+0,2	+0,1	+0,2	-0,4	-	-0,5	-	-	-
Résistance à la compression	MPa	95	61	45	50	49	31	-	-	-	24	30	-
Résistance à froid	MPa	13	14	6,5	8	7,6	5	9,7	-	8,3	-	-	5,2
Propriétés thermomécaniques													
Coefficient de dilatation	x10 ⁻⁶ /°C	-	-	-	-	-	-	13,3	3,56	13,3	-	-	-
Résistance à chaud	MPa	-	-	-	2	3,5	3	-	3,4	3,1	-	-	-
Propriétés thermiques													
Conductivité à 500 °C	W/m °K	8	8	3,6	2,3	-	2,3	-	-	-	3,25	4	-
Conductivité à 1000 °C	W/m °K	4,5	4,5	3	2	3,1	2	3,2	2,6	2,74	2,67	3,2	2,4
Chaleur spécifique	J/kg °K	1175	1175	1390	1130	1130	1130	1050	1050	1050	1050	1050	1050
Propriétés physico-thermiques													
Diffusivité	m ² /s	1,31	1,34	0,74	0,56	0,90	0,57	1,03	0,85	0,91	0,88	1,08	0,78
Admittivité	J/m ² °K ^{1/2}	3935	3880	3475	2670	3275	2650	3160	2825	2870	2840	3085	2725

Tableau B.3 : Propriétés des produits carbonés

Famille	Unité	Alumine-Carbone AC	Magnésie-Carbone					Dolomie-Carbone			
			MCa1	MCa2	MCa3	MCa4	MCa5	MDC	DC1	DC2	DC3
Composition											
MgO	%	-	94	97	97,3	79,2	90,0	60	36	41	41
CaO	%	-	2,5	2,3	2	-	-	38	56	57	57
SiO ₂	%	14	1,5	0,2	0,3	-	-	0,8	1	0,7	0,6
Al ₂ O ₃	%	80	0,3	0,1	0,1	-	-	0,4	1	0,5	0,4
Fe ₂ O ₃	%	1,2	0,5	0,2	0,2	-	-	0,6	1	0,8	1
TiO ₂	%	3,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alcalins	%	0,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Carbone	%	5	9,5	10	9,5	16,8	5	6	5	5	6
Lien		Résine	Chimique	Carbone	Carbone	Carbone	Carbone	Résine	Résine	Résine	
Propriétés physiques											
Densité apparente	kg/m ³	2,82	3	2,98	2,88	2,87	3	2,89	2,85	2,88	2,85
Porosité ouverte	%	9	6	10	-	3	10	11	9	12	10
Variations permanentes	%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Résistance à la compression	MPa	60	25	-	39,3	43	-	-	24	-	-
Résistance à froid	MPa	-	-	6,9	-	-	19	3,4	-	3,4	3
Propriétés thermomécaniques											
Coeficient de dilatation	x10 ⁻⁶ /°C	-	-	-	-	-	-	-	-	11,5	3,46
Résistance à chaud	MPa	-	-	-	-	-	19	-	-	2	-
Propriétés thermiques											
Conductivité à 500 °C	W/m °K	-	6,85	8	13,5	14,4	-	-	4,05	-	-
Conductivité à 1000 °C	W/m °K	2,25	4,8	4,5	6,8	7,4	3,1	3,75	3,2	3,46	3,46
Chaleur spécifique	J/kg °K	1100	1050	1175	1175	1175	1130	1050	1050	1050	1050
Propriétés physico-thermiques											
Diffusivité	m ² /s	0,73	1,52	1,26	2,01	2,19	0,91	1,24	1,07	1,14	1,14
Admittivité	J/m ² °K ^{1/2}	2640	3890	3970	4800	4995	3240	3375	3095	3235	3240

ANNEXE C

Historique des variables opératoires

Tableau C.1 : Historique de la nuance d'acier (très bas, bas, moyen et haut carbone)

VieCust	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	H	H	M	H	H	H	TB	H	H	H	B	H	H	TB	H	H	H	H	H	H	H	H	B	M	B		
2	H	H	H	H	H	H	M	H	H	H	B	H	M	H	H	H	H	H	H	H	H	H	M	B			
3	H	H	M	H	H	H	TB	M	H	H	M	H	H	TB	H	H	H	H	H	H	H	H	B	B			
4	H	H	H	H	H	H	B	TB	H	H	H	H	TB	H	H	H	H	H	H	H	H	H	TB	N			
5	H	H	H	H	H	B	H	M	H	H	H	H	TB	H	H	H	H	H	H	H	H	H	TB	B	M		
6	H	H	H	M	M	B	H	M	H	H	M	H	TB	H	H	M	H	H	B	M	TB	B	H	M			
7	H	M	H	TB	B	TB	H	M	H	M	H	H	TB	H	H	M	H	H	M	TB	H	B	B	TB			
8	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	TB	H	H	B	B	TB		
9	H	H	B	H	H	H	H	H	H	H	M	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	M	N	B		
10	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	B	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	M	B	TB		
11	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	M	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	TB	B	TB		
12	H	H	H	H	H	H	H	H	M	M	B	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	TB	B	TB		
13	H	H	H	H	H	H	H	H	TB	H	H	B	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	B	H	TB		
14	TB	H	H	B	H	H	H	H	H	H	H	M	H	H	TB	H	H	H	H	H	H	H	H	H	TB		
15	H	H	H	TB	H	H	H	H	H	H	B	H	H	TB	H	H	H	H	H	H	H	H	B	H	TB		
16	H	TB	H	H	H	H	H	B	H	H	TB	H	H	H	B	H	H	H	H	H	H	H	TB	H	M		
17	H	B	H	H	H	H	H	H	TB	H	H	B	H	H	M	H	H	H	H	H	H	H	TB	M	M		
18	H	M	H	H	H	H	H	H	H	H	M	H	H	TB	H	H	TB	H	H	B	H	M	B	TB			
19	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	M	H	H	TB	H	H	H	H	H	H	H	H	TB	M	B		
20	M	H	H	H	H	H	H	H	H	H	M	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	TB	B	M		
21	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	B	H	H	H	H	H	H	H	H	TB	M	TB		
22	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	TB	H	H	TB	H	H	B	H	M	M	M			
23	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	TB	H	H	B	H	M	M			
24	H	M	M	M	M	H	H	H	TB	H	H	H	H	H	H	M	H	H	H	B	H	M	M	M			
25	H	H	H	H	H	H	H	H	TB	H	H	H	H	H	N	H	H	H	H	H	H	H	H	B	M		
26	H	H	H	H	H	H	H	H	B	H	H	H	H	H	M	H	H	TB	H	H	H	H	H	M	B		
27	H	H	H	H	H	H	H	M	H	H	H	H	H	H	H	H	H	TB	H	H	H	H	H	M	B		
28	H	H	H	H	H	H	H	M	H	H	H	H	H	H	H	H	H	TB	H	H	H	H	H	M	B		
29	H	H	H	H	H	H	H	M	H	H	H	H	H	H	H	H	H	TB	H	H	H	H	H	M	B		
30	31	32	33	34	35																						
TBC	1	0	1	1	1	2	2	3	1	0	5	1	0	2	5	2	1	4	3	6	6	8	6				
BC	0	1	0	4	0	1	3	3	2	1	2	2	1	0	0	1	2	3	5	5	3	7	6	8			
MC	0	2	2	3	0	1	7	5	5	2	0	4	1	1	2	2	0	3	2	8	0	4	3	5			
HC	18	14	26	25	21	26	19	21	18	20	22	20	29	27	11	24	16	23	18	22	19	14	10	12	3	2	
Vie	19	18	29	29	26	28	29	31	29	27	24	26	33	30	19	27	16	29	27	34	33	23	27	21	26	27	29

Tableau C.2: Historique de la température de l'acier en °C

VieCsa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
1	1788	1724	1704	1703	1691	1734	1740	1752	1608	1683	1697	1698	1679	1777	1671	1697	1686	1704	1736	1657	1740	1708	1673	1703	1710	1687	1728	
2	1695	1686	1701	1697	1674	1629	1713	1714	1714	1681	1719	1683	1677	1678	1688	1675	1720	1708	1725	1722	1730	1643	1750	1721	1692			
3	1714	1672	1697	1697	1731	1723	1692	1722	1678	1580	1658	1717	1683	1729	1695	1693	1703	1692	1709	1685	1655	1673	1666	1645	1678	1643	1682	1676
4	1593	1699	1682	1693	1700	1686	1706	1662	1745	1686	1596	1653	1721	1744	1692	1680	1686	1655	1716	1676	1726	1734	1734	1734	1734	1734	1731	
5	1713	1691	1677	1568	1724	1708	1664	1727	1721	1728	1726	1678	1636	1721	1713	1694	1707	1680	1669	1715	1734	1734	1734	1734	1734	1734	1734	
6	1612	1765	1737	1720	1701	1688	1684	1708	1656	1685	1726	1698	1710	1761	1724	1703	1656	1689	1686	1712	1666	1677	1702	1682	1691			
7	1672	1692	1680	1731	1698	1717	1648	1690	1684	1710	1641	1684	1640	1634	1700	1670	1708	1686	1739	1678	1691	1767	1716	1687	1663			
8	1702	1732	1728	1702	1716	1669	1690	1706	1696	1739	1694	1652	1689	1729	1748	1670	1672	1779	1762	1728	1685	1764	1690					
9	1727	1745	1717	1554	1677	1670	1695	1695	1739	1626	1714	1661	1710	1638	1554	1690	1708	1694	1679	1645	1688	1737	1687	1682	1708	1703	1664	
10	1705	1684	1710	1657	1718	1683	1675	1686	1702	1711	1678	1656	1706	1701	1761	1719	1719	1719	1719	1673	1645	1702	1711	1679	1701	1690	1694	
11	1686	1664	1659	1641	1713	1665	1683	1674	1684	1589	1793	1659	1690	1714	1706	1707	1752	1724	1697	1703	1696	1715	1665	1721	1727			
12	1648	1678	1670	1673	1672	1692	1617	1692	1687	1721	1638	1691	1705	1687	1706	1700	1696	1768	1697	1680	1728	1715	1715					
13	1719	1604	1725	1719	1695	1606	1744	1611	1554	1693	1674	1675	1723	1681	1705	1675	1662	1727	1716	1717	1713	1690	1680	1714	1701	1724		
14	1584	1659	1754	1720	1730	1669	1715	1654	1657	1388	1750	1706	1743	1711	1727	1695	1846	1669	1637	1712	1706	1638	1682	1689	1719			
15	1677	1703	1638	1696	1682	1654	1721	1687	1756	1719	1671	1721	1713	1695	1675	1673	1698	1754	1747	1760	1699	1748	1702	1716	1675	1736		
16	1626	1668	1713	1725	1701	1629	1599	1614	1640	1733	1707	1662	1691	1687	1734	1683	1719	1735	1683	1713	1707	1725	1739	1686	1723	1703	1719	
17	1694	1689	1688	1677	1615	1728	1739	1714	1771	1737	1684	1726	1703	1700	1716	1697	1694	1727	1716	1717	1713	1682	1705	1679				
18	1684	1694	1657	1626	1666	1722	1714	1636	1731	1701	1700	1688	1732	1679	1697	1706	1710	1687	1688	1699	1674	1706	1723					
19	1528	1714	1721	1720	1701	1688	1619	1687	1702	1691	1720	1700	1703	1777	1811	1703	1672	1706	1667	1681	1688	1678						
20	1690	1661	1676	1681	1706	1690	1720	1656	1758	1691	1715	1685	1678	1698	1734	1724	1717	1718	1746	1645	1695							
21	1653	1668	1703	1697	1648	1679	1721	1675	1715	1687	1713	1655	1701	1710	1725	1697	1746	1698	1721	1679	1690							
22	1704	1655	1684	1691	1634	1596	1792	1704	1696	1682	1686	1709	1696	1724	1728	1716	1688	1709	1734	1701	1800							
23	1682	1706	1693	1732	1598	1687	1693	1761	1672	1665	1738	1693	1723	1738	1738	1666	1736	1740	1728	1689	1673							
24	1708	1688	1704	1723	1701	1701	1708	1734	1681	1717	1711	1777	1711	1687	1704	1699	1742	1692	1672	1618								
25	1684	1717	1762	1762	1704	1680	1728	1727	1496	1645	1654	1645	1654	1667	1704	1682	1672	1702	1716									
26	1745	1601	1639	1723	1661	1668	1716	1723	1674	1668	1713	1710	1681	1715	1708	1702	1771											
27	1667	1667	1664	1664	1684	1686	1680	1687	1649	1608	1715	1672	1666	1743	1743	1694	1718	1683	1711									
28	1706	1693	1696	1724	1724	1707	1709	1681	1667	1678	1681	1678	1748	1748	1748	1748	1748	1748	1748	1748								
29	1688	1687	1621	1669	1659	1661	1673	1687	1683	1506	1683	1506	1683	1683	1683	1683	1683	1683	1683	1683	1683	1683	1683	1683				
30																												
31																												
32																												
33																												
34																												
35																												
36																												
37																												

Mooy	1670	1690	1695	1680	1698	1692	1685	1678	1699	1684	1702	1683	1681	1688	1697	1702	1719	1706	1702	1700	1719	1710	1704	1694	1707	1696
Min	1528	1604	1638	1554	1615	1606	1599	1596	1554	1496	1580	1638	1596	1506	1554	1635	1673	1666	1656	1645	1678	1643	1643	1681	1645	1618
Max	1788	1765	1754	1727	1762	1734	1744	1752	1792	1738	1726	1743	1777	1734	1761	1846	1777	1811	1747	1779	1762	1767	1750	1746	1736	
Var.	3845	189	753	2135	769	1138	1360	1621	2288	3148	2052	603	1087	2378	1453	792	1696	659	1058	777	858	1000	529	356	1330	740
E.I.	62.0	34.5	27.4	46.2	27.7	31.7	36.9	40.3	47.8	56.1	45.3	24.6	33.0	48.8	38.1	41.2	25.7	32.5	27.9	29.3	24.1	31.6	27.2	18.9	36.5	

Tableau C.3 : Historique de la masse de laitier transporté en kg

Vie\Cas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	569	552	2243	3602	791	958	417	409	476	860	1234	2305	893	878
2	565		1110	905	793	1140	433	1342	444	1660	1102	1487	833	905
3		421	1123	535	1081	458	1329	888	458	965	734	1500	1336	1442
4	445	421	855	909	1289	367	4850	1251	388	440	294	1051	778	1636
5	1171	1268	861	2234	1318	909	1393	945	2229	234	678	1038	926	1052
6	1318	674	855	303	1002	458	1345	911	885	221	737	1299	1336	1010
7	1318	713	1409	412	898	416	1694	953	864	262	958	1308	1215	1424
8	900	1177	907	535	399	619	1195	1273	1217	297	1042	1331	738	1323
9	447	954	445	837	904	1290	823	1409	958	1171	425	1035	893	433
10	1302	1021	900	1312	0	748	812	1355	861	2041	638	1038	865	549
11	1021	751	2233	1220	367		495	1820	2182	720	682	1047	672	362
12	6025	760	2208	1409	367	416	377		2115	1236	887	929	472	445
13	1357	1002	1045	2275	353	2149	455	388	989	1842	1000	933	518	535
14	892	1025	561	826	479	1266	458	626	965	760	727	535	458	549
15	1330	1212	2212	1409	433	1283	912	444	444	776	2172	433	444	514
16	1056	1314	2178	1409	469	1341	458	524	388	1089	1621	916	472	514
17	1273	416	171	545	748	458	2184	512	388	690	1193		491	501
18	448	501	340	80	2156	912	923	444	717	735	738	262	549	526
19	920		2251	535	1328	458	444	444	751	502	790	457	562	549
20			2130	500	1274		444	439	1909	737		457	510	699
21			535	402	1238	416	1365	484			1647	868	333	342
22			489	1382	1268	458	899	1426	1155	958	1639	862	1048	
23			1160	1170	1265	458	1273	422	1203	792	898	989	1424	1386
24			1296	3048	1295	465	1409	458	773	638	912	444	1636	992
25			1409	794	1318	462	947	860	1151	1064		1387	1006	994
26			1362	1030	458	458	912	860	1206	887		913	1089	1411
27			886	778		458	1273	955	2011	1000		1355	1308	1424
28			1155	783		458	1409	762	731			1336	1288	1130
29			1273	1227			955	856	750				479	1123
30								1310					559	1120
31								1206					559	
32													400	
33													486	
34														
35														
Moy	1242	834	1228	1117	896	741	1099	866	1022	868	989	1019	805	889
Min	445	416	171	80	0	367	377	388	388	221	294	262	333	342
Max	6025	1314	2251	3602	2156	2149	4850	1820	2229	2041	2172	2305	1636	1636
Var.	1538428	96945	414959	640787	229418	192950	727451	158975	328068	212034	191437	189026	128547	158219
B.T.	1240,3	311,4	644,2	800,5	479,0	439,3	852,9	398,7	572,8	460,5	437,5	434,8	358,5	397,8

Tableau C.3 : Historique de la masse de laitier transporté en kg (suite)

VieCas	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	354	1066	2353	1541	2289	2298	476	1499	500	769	609	1700	2077
2	422	1345	2295	1094	2617	1370	969	1478	575	915	2264	1460	2054
3	1264	1343	1409	2420	33	2455	1015	978	434	429	2267	4775	2193
4	1080	2295	1365	2398	399	2302	1385	966	467	419	924	1209	4921
5	388	2329	3355	591	552	1439	1249	445	500	2220	2260	870	337
6	479	636	1306	591	1430	1258	931	332	46	681	2012	2262	359
7	965	80	1636	136	1408	1452	833	102	1756	470	2079	1384	744
8	940	2295	1473	659	1430	2358	759	556	2074	925	1222	649	1256
9	917	2364	1464	2206	1208	1082	1478	479	1445	2290	1203	2026	1200
10	935	1453	1548	2273	1047	1451	1402	465	1274	2286	353	2026	328
11	1333	2385	1591	2364	1423	1496	1449	500	1274	464	714	1222	1210
12	1447	994	1591	528	1220	1496	1490	500	884	398	310	1261	1201
13	4265	1388	1545	468	1811	784	1499	575	2117	390	1237	1218	804
14	1045	1084	2002	476	1005	67	978	578	1451	390	1191	350	788
15	410	1464	1092	1001	1006	511	889	535	1429	600	1235	318	1138
16	353	1591	2420	1012	1006	522	1343	535	591	1253	1185	1170	1490
17	353	1591	1545	2335	1472	494	80	563	4880	785	1242	527	
18	899	1364	1574	2339	1007	808	1756	1041	1349	853	1180	474	
19	958		5247	433	1465	1465	2300	567	174	438	316	229	
20	1364		1818	569	1204	535	1166	365	3981	457	4819	826	
21	1345		1193	2277	1104	556	1183	511	1211	58	1182	347	
22	2553		1333	972	780	465	1136		879	510	754	685	
23	2433		965	565	1456	535	1790		1174	446	745	414	
24	591		931	444	2093		1166	658	325	834	418		
25	1000		2327	444	1046		1407	2282	435	494	800		
26	2364		1354	1499	1429		1429	1226	469	52	642		
27	433		2381	1619		552		399			2101		
28			511		1433					473	1188		
29			920		1392					340	1222		
30					969						685		
31						434					429		
32						353					394		
33						556					676		
34						536					787		
35											3996		
Moy	990	1513	1778	1443	1236	979	907	946	1258	972	1274	1102	
Min	353	80	1092	136	33	67	465	80	46	174	58	52	229
Max	4265	2433	3355	5247	2617	2455	1499	2300	2117	4880	2267	4819	4921
Var.	758942	460455	329179	1036166	495642	375537	142220	317026	352330	1298132	457561	1352591	873634
E.T.	871,2	678,6	573,7	1017,9	714,0	612,8	377,1	563,1	593,6	1139,4	676,4	1163,0	934,7

Tableau C.4 : Historique de la basicité du laitier

Vie\Cas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	1,87	1,93	1,25	1,09	1,76	1,51	1,87	2,09	1,94	1,95	1,57	1,32	1,56	1,49	1,86	1,58	1,22	1,19	1,26	1,15	2,01	1,63	1,76	2,23	1,74	1,22	1,27
2	1,96		1,72	1,79	1,78	1,19	1,95	1,30	2,02	1,40	1,56	1,34	1,88	1,79	1,65	1,19	1,23	1,31	1,20	1,37	1,39	1,31	1,62	1,53	1,47	1,14	1,34
3		1,73	1,74	2,36	1,78	2,07	1,48	1,16	3,10	1,31	1,96	1,35	1,42	1,25	1,11	1,31	1,40	1,26	2,69	0,97	1,80	1,37	1,96	1,95	1,20	1,00	1,10
4	2,67	2,05	1,78	1,63	2,03	2,16	1,03	1,39	2,02	2,92	2,09	1,49	2,38	1,17	1,06	1,08	1,49	1,10	2,01	1,02	1,69	1,43	1,49	1,87	2,45	1,33	1,11
5	1,40	1,60	1,79	1,27	1,69	1,05	1,49	1,78	1,28	1,88	1,82	1,31	1,62	1,50	1,82	1,17	0,93	1,94	1,89	1,11	1,60	2,06	1,88	1,22	1,12	1,98	2,10
6	1,60	1,78	1,80	2,07	1,61	2,03	1,46	1,70	1,92	1,90	2,27	1,47	1,44	1,55	1,65	1,77	1,32	1,94	1,62	1,46	1,71	1,40	2,03	1,90	1,28	1,13	2,05
7	1,55	1,79	1,46	2,27	1,78	1,80	1,36	1,77	1,94	2,06	1,43	1,45	1,49	1,27	1,56	2,95	1,17	3,78	1,27	1,10	1,74	2,84	1,43	1,86	1,25	1,45	1,89
8	1,85	1,50	1,84	2,26	2,47	1,73	1,55	1,53	1,58	2,30	1,38	1,41	1,83	1,48	1,50	1,23	1,40	1,70	1,33	1,02	1,97	1,66	1,52	1,56	1,52	1,66	1,35
9	2,55	1,73	2,75	1,75	1,78	1,49	1,77	1,53	1,75	1,57	2,12	1,48	1,49	1,86	1,74	1,13	1,13	1,20	1,22	1,15	1,25	1,89	1,23	1,25	1,56	1,23	1,84
10	1,48	1,62	1,86	1,45	2,78	1,98	1,84	1,75	1,83	1,21	2,13	1,31	1,80	1,61	1,57	1,37	1,18	1,26	1,42	1,13	1,41	1,76	1,33	1,39	2,16	1,29	2,56
11	1,70	1,65	1,39	1,53	2,03	1,52	2,41	1,38	1,32	1,64	1,76	1,95	1,49	1,82	1,49	1,02	1,05	1,08	1,34	1,31	1,45	1,62	1,42	1,85	1,91	1,52	1,39
12	1,02	1,69	1,25	1,48	2,17	1,46	2,01		1,29	1,60	1,91	1,67	1,95	1,55	1,25	1,47	1,20	1,88	1,49	1,33	1,32	2,18	1,51	2,09	2,30	1,92	1,66
13	1,50	1,75	1,57	1,24	2,11	1,34	1,92	2,25	1,48	1,32	1,86	1,67	1,50	2,01	0,91	1,38	1,14	1,70	1,25	1,36	1,63	1,60	1,23	2,14	1,39	1,40	1,61
14	2,04	1,59	1,94	1,74	1,70	1,55	2,56	1,65	1,28	1,84	2,64	1,86	2,36	2,01	1,53	1,14	1,11	1,79	1,42	3,12	1,37	1,79	1,20	3,42	1,40	2,22	1,72
15	1,55	1,56	1,26	1,48	1,85	1,45	1,89	2,40	2,42	1,94	1,45	2,13	2,01	2,07	1,45	1,36	1,31	1,26	1,20	1,87	1,36	1,92	1,19	1,60	1,35	2,05	1,81
16	1,75	1,67	1,20	1,48	2,02	1,51	2,07	2,04	1,68	1,75	1,28	2,03	1,92	1,99	1,87	1,05	1,06	1,18	1,21	1,90	1,30	2,22	1,79	1,40	1,39	1,53	1,06
17	1,64	2,41	2,91	2,23	1,98	2,07	1,15	1,86	2,02	1,94	1,22		1,82	1,48	1,78	1,19		1,25	1,34	1,23	1,66	2,69	2,32	1,16	1,62	1,28	1,45
18	2,04	2,33	1,79	3,32	1,26	1,86	1,54	2,12	1,31	1,80	2,71	2,89	2,02	1,73	1,26	1,36		1,26	1,22	1,73	1,43	1,43	1,51	1,49	1,63	1,69	
19	1,81		1,25	1,86	1,49	1,97	2,02	2,02	1,64	1,66	1,56	2,08	1,96	1,76	1,64		0,92	1,67	1,22	3,46	1,09	1,67	3,32	1,53	2,30	3,00	
20		0,96	2,33	1,45		2,02	2,04	1,26	2,27		2,44	2,06	1,51		0,99		1,69	1,61	1,72	1,40	1,42	1,18	1,54	1,18	1,34		
21		1,86	1,85	1,50	1,87	1,49	1,31			1,13	1,95	2,09	1,90		1,23		1,48	1,34	1,32	1,64	1,44	1,94	1,32	3,69	1,40	1,61	
22		2,31	1,51	1,81	2,08	1,73	1,32	1,39	1,43	1,30	1,91	1,35			1,13		1,30	1,33	1,68	1,72	1,91		1,63	1,42	1,73	1,97	
23		1,12	1,54	1,58	2,07	1,59	2,26	1,50	1,69	1,49	1,47	1,23	1,26		1,12		1,45	1,91	1,51	1,80	1,27		1,13	2,20	1,93	1,51	
24		1,50	1,24	1,47	2,08	1,48	2,07	1,88	1,85	1,59	2,02	1,09	1,88		1,94		1,14	2,08	1,08		1,42		1,96	2,13	1,59	1,49	
25		1,48	1,82	1,46	1,80	1,80	1,59	1,63	1,58		1,56	1,26	2,03		1,05		1,35	2,27	1,46		1,24		1,20	1,71	1,28	1,60	
26		1,49	1,70	2,38	2,38	1,72	2,10	1,52	1,91		1,85	1,38	1,25		1,08		1,53	1,34		1,19		1,78	1,51	2,46	1,80		
27		1,79	1,76		2,88	1,59	1,83	1,29	1,86		1,44	1,31	1,27		2,16		1,18	1,10		2,04			1,51	2,55	1,32		
28		1,72	1,80		2,05	1,53	1,92	1,81			1,42	1,43	1,38				2,42		1,37					2,25	1,34		
29		1,59	1,55			2,06	1,96	1,53			2,07	1,43				1,64		1,15						1,81	1,38		
30							1,61				2,04	1,19						1,52							1,97		
31							1,55					1,84							1,82							2,23	
32												2,33							1,49							1,53	
33														1,73					1,72							1,60	
34																			1,62							1,88	
35																										1,22	
Moy	1,78	1,79	1,67	1,77	1,84	1,81	1,74	1,78	1,70	1,79	1,75	1,71	1,73	1,60	1,51	1,36	1,21	1,52	1,52	1,43	1,67	1,70	1,59	1,75	1,70	1,66	1,63
Min	1,02	1,50	0,96	1,09	1,26	1,05	1,03	1,16	1,26	1,21	1,13	1,31	1,09	1,17	0,91	0,99	0,93	0,92	1,10	0,97	1,25	1,09	1,19	1,13	1,12	1,00	1,06
Max	2,67	2,41	2,91	3,32	2,78	2,88	2,56	2,40	3,10	2,92	2,71	2,89	2,38	2,07	1,87	2,95	1,49	3,78	2,69	3,12	3,46	2,84	2,32	3,42	3,69	2,55	3,00
Var.	0,15	0,07	0,19	0,20	0,12	0,15	0,11	0,11	0,16	0,13	0,19	0,15	0,12	0,08	0,08	0,19	0,02	0,31	0,15	0,16	0,20	0,19	0,09	0,34	0,28	0,18	0,18
E.T.	0,39	0,26	0,44	0,45	0,35	0,39	0,34	0,33	0,41	0,36	0,43	0,39	0,35	0,29	0,28	0,43	0,15	0,56	0,39	0,41	0,44	0,44	0,31	0,58	0,53	0,42	0,43

Tableau C.5 : Historique du temps de barbottage en min

VieCas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
1	27	68	29	65	85	60	106	65	55	80	80	59	30	60	85	60	121	72	128	75	0	229	71	113	86	82	63	
2	87	44	70	67	193	75	85	101	46	63	46	62	60	75	79	71	66	30	71	65	74	72	53	80	77	76	20	
3	20	41	55	83	58	81	136	66	115	100	71	78	111	101	40	66	81	75	165	35	135	107	73	107	80	96	108	
4	110	35	20	32	68	72	30	96	162	117	120	35	89	80	65	235	56	39	80	60	64	45	55	34	36	117	195	
5	69	59	60	22	109	73	80	85	45	50	50	85	190	70	94	90	91	33	92	71	53	75	64	99	27	42	59	
6	92	60	23	51	62	55	70	75	16	35	36	46	90	90	102	56	67	0	39	70	34	135	133	71	19	59	35	
7	35	115	20	99	93	83	125	72	70	79	118	75	67	103	137	67	58	54	100	48	64	108	40	68	23	95	62	
8	30	126	50	76	117	72	106	87	77	36	0	86	76	108	180	94	237	30	63	103	75	68	60	53	51	99	70	
9	75	88	85	85	155	165	125	65	105	159	11	55	0	100	60	62	99	88	30	35	67	63	78	23	104	39	86	
10	36	65	133	80	70	0	80	81	80	107	43	65	85	30	97	100	18	50	70	70	125	73	0	47	15	174		
11	5	75	64	77	105	59	136	59	52	90	137	94	62	85	70	78	74	63	62	79	125	53	131	72	0	8	40	
12	64	80	47	114	84	71	50	33	56	81	165	67	52	85	27	105	101	57	122	40	69	92	60	58	80	81	64	
13	35	61	0	55	78	92	62	128	139	66	130	52	13	77	65	109	0	57	75	36	59	179	123	72	58	77	12	
14	90	216	138	60	52	65	24	62	78	75	39	85	63	33	79	63	69	28	0	16	25	45	104	105	0	35	52	
15	105	78	58	85	81	61	13	39	0	65	43	127	143	167	61	93	33	105	0	9	50	94	83	65	28	34	52	
16	75	165	53	68	133	61	72	120	56	55	102	70	31	84	67	78	217	52	9	65	88	73	79	87	54	189		
17	29	86	72	85	88	98	76	69	64	40	65	75	98	86	70	30	77	135	102	1	56	63	154	16	121	55		
18	60	83	64	104	93	67	84	36	77	165	103	64	94	45	39	60	71	48	48	87	64	29	63	86	118	36		
19	82	136	75	62	55	119	60	77	94	13	69	77	52	91	32	85	53	105	67	45	68	81	34	34	52	60	73	
20	141	59	54	105	38	23	15	6	70	76	79	49	53	49	118	54	135	82	85	108	67	167	40					
21	107	48	9	59	105	72	110	93	60	50	85	80	126	101	48	47	77	111	89	18	122	85	46					
22	160	74	81	170	55	98	111	81	72	22	80	76	36	54	68	24	85	59	121	50	46	46	33					
23	65	166	125	63	42	37	80	26	0	24	70	143	37	105	62	126	65	115	146	78	106	31						
24	75	78	172	70	78	74	120	128	89	87	65	85	65	58	75	169	75	127	94	52	128							
25	30	80	86	125	100	55	80	54	22	98	26	90	53	53	88	115	78	70	65	52	71							
26	45	77	94	86	50	235	68	41	40	90	80	82	48	72	70	230	60	82	146	70	51							
27	60	98	65	68	51	64	81	11	61	82	111	83	87	36	72	26												
28	109	70	53	82	78	59	95	81	77	55	199	45	54	81	73	50	78											
29	73	75	89	80	55	30																						
30	72																											
31																												
32																												
33																												
34																												
35																												
May	59	81	74	76	88	81	77	73	77	74	65	70	77	82	75	75	83	66	73	73	67	87	79	77	60	77	72	
Min	5	35	0	22	9	0	13	23	0	6	0	22	0	22	0	27	30	0	0	9	0	26	29	0	0	8	12	
Max	110	216	165	166	193	170	136	235	162	165	127	199	167	180	235	237	217	165	217	135	229	133	154	146	167	195		
Somme	1126	1450	2154	2265	2460	2354	2245	2347	2224	1998	1678	1970	2624	2447	1458	2036	1331	1928	2033	2558	1546	2427	1729	1998	1610	2707	2085	
Var.	978	1675	1977	679	1468	1137	1124	1335	1308	1573	1893	548	1659	870	1327	1604	2512	1512	1572	2036	1174	1832	803	1363	1306	1425	2176	
B.T.	31,3	40,9	44,5	26,1	38,3	33,7	33,5	36,5	37,4	43,5	40,7	29,5	36,4	40,1	50,1	38,9	39,6	45,1	34,3	42,8	28,3	36,9	36,1	37,8	46,7			

Tableau C.6 : Historique de la quantité de CaSi injectée en kg

WetCas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27		
1	34	45	0	91	41	34	57	0	34	70	0	27	39	0	34	0	36	36	34	0	150	34	50	34	39	0			
2	50	36	32	57	41	36	34	45	57	34	34	36	35	39	34	34	34	34	34	34	136	34	57	45	0	45	0		
3	41	54	23	50	36	36	27	59	55	48	34	36	27	41	57	34	32	0	39	45	57	57	114	45	39	45	45	0	
4	27	39	34	0	36	36	32	34	27	57	52	23	39	27	45	0	32	0	39	45	68	57	57	0	57	34	50		
5	34	32	34	9	36	34	23	34	45	54	27	34	39	36	0	57	57	73	68	30	34	0	0	45	37	45	57		
6	32	23	34	45	0	45	27	23	34	45	57	32	41	39	45	57	57	57	57	57	36	57	41	45	52	0	0	57	
7	32	34	27	59	36	39	45	23	34	45	57	32	50	45	45	57	57	57	57	57	36	57	34	35	34	0	0	50	
8	27	45	34	0	35	45	32	34	45	57	32	36	45	36	0	57	57	57	45	45	45	57	34	0	55	57	50	50	
9	27	45	23	27	36	39	34	32	34	38	34	27	41	34	36	32	57	0	32	57	34	45	36	0	50	0	95	0	
10	27	34	0	27	41	36	36	34	36	45	27	34	64	36	32	57	0	64	57	57	57	57	36	141	57	0	50	50	
11	32	36	82	27	36	82	34	34	23	34	57	57	52	64	45	57	57	52	0	57	57	57	34	45	68	50	55	50	
12	27	36	0	27	34	50	0	34	23	34	57	57	52	64	36	57	57	32	41	57	102	57	57	45	57	50	50	50	50
13	27	41	34	25	34	36	57	57	64	48	23	57	45	0	0	27	57	34	57	57	57	150	55	23	57	50	68	68	
14	34	45	0	27	39	36	45	39	48	39	36	57	80	114	57	57	34	57	57	57	57	57	55	45	57	50	68	68	
15	32	36	0	27	34	41	45	57	57	57	36	36	39	57	57	59	57	57	57	57	57	57	57	57	57	50	68	50	
16	27	36	45	27	36	41	45	0	45	34	34	45	59	59	36	57	0	45	0	57	57	57	45	34	36	50	43	50	
17	34	36	57	32	73	45	55	57	32	39	57	45	52	59	32	32	45	0	45	0	57	45	39	45	39	68	50	45	
18	41	36	45	39	0	45	45	57	57	55	34	36	45	45	45	59	57	32	34	114	57	32	35	45	36	82	95	75	
19	39	0	45	45	36	34	57	57	64	41	45	57	57	57	34	34	34	34	34	34	34	34	57	41	45	52	50	84	
20	45	34	41	34	57	57	34	57	23	57	45	50	50	50	34	57	57	57	57	57	57	57	34	57	34	50	50	68	
21	80	39	36	50	27	52	36	11	34	45	39	36	0	0	0	0	0	57	0	57	57	57	36	84	39	136	50	41	
22	27	27	36	55	27	52	34	57	34	45	39	55	0	0	0	0	0	57	57	45	50	0	57	45	68	68	68		
23	23	27	34	45	39	64	23	57	57	45	45	34	36	45	34	0	0	57	64	34	57	34	57	34	45	50	68	170	
24	32	27	41	36	32	57	34	34	57	57	27	36	36	57	57	57	57	34	57	57	57	57	23	0	45	50	68	68	
25	66	45	36	27	36	68	27	36	68	45	39	39	0	0	0	0	0	55	32	57	57	57	45	0	50	50	68	68	
26	27	45	50	27	59	34	57	55	50	41	0	0	55	50	41	0	0	55	34	57	57	57	62	57	68	68	68	68	
27	27	36	102	32	23	41	57	45	41	57	45	41	0	0	57	27	57	57	27	57	57	57	68	34	84	55	68	55	
28	43	36	45	32	34	34	32	45	36	34	34	32	45	36	64	64	57	57	57	57	57	57	57	57	57	55	55		
29	29	41	55	34	59	34	55	34	59	34	59	34	36	64	64	64	57	57	57	57	57	57	57	50	50	105	50	50	
30	30	23	23	23	23	55	23	23	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	68	68	68	
31	31	32	32	32	32	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	
32	33	33	33	33	33	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	
33	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	
Moy	33	37	30	35	37	45	36	41	38	43	46	41	45	47	40	30	36	43	49	52	53	48	45	43	49	53	60	60	
Min	27	23	0	0	34	0	0	0	0	11	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Max	50	45	82	91	73	102	57	84	59	63	70	57	80	114	57	57	57	64	136	102	150	150	84	141	136	170	170	170	
Somme	625	673	864	1023	950	1250	1045	1284	1100	1151	1110	1136	1473	1407	755	809	570	1241	1314	1782	1209	1285	947	107	1323	1866	1736	1736	
Var.	38	33	444	342	173	220	148	313	173	201	150	170	193	344	179	564	438	473	850	191	770	654	221	109	783	1015	921	921	
B.T.	6,2	5,7	21,1	18,5	13,2	14,8	12,2	17,7	13,2	14,2	12,2	13,0	13,9	18,5	13,4	23,8	20,9	21,7	29,2	13,8	27,8	25,6	14,8	33,3	28,0	31,9	30,4	30,4	

Tableau C.7 : Historique de la puissance moyenne par coulée en MW

VieCas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	9,0	6,8	9,4	14,6	7,8	30,0	7,4	7,0	3,5	8,6	13,5	2,7	8,6	7,2	2,1	8,9	5,1	9,6	6,2	8,5	9,5	3,3	12,7	15,3	22,0		
2	6,4	5,4	6,6	7,8	12,2	7,8	8,0	8,8	7,6	8,6	7,2	7,6	8,7	8,0	8,8	7,5	3,9	17,8	8,3	10,2	8,0	4,8	11,6	11,0	8,1	10,1	
3	6,0	7,2	7,4	7,9	7,3	5,4	9,6	8,5	9,3	5,1	6,4	8,4	8,3	7,0	16,2	8,8	9,4	8,3	9,4	6,9	6,8	9,3	9,1	10,0	9,1	10,0	
4	9,0	5,8	36,0	4,1	6,3	15,4	7,3	7,7	6,8	7,2	4,5	10,0	9,6	5,6	24,0	5,1	7,9	7,7	14,0	9,6	7,9	8,6	25,2	4,0	3,6	8,5	9,3
5	8,7	8,3	9,0	9,0	10,5	6,8	8,4	9,2	7,1	8,3	7,0	8,4	5,9	7,1	8,1	6,2	9,2	7,8	6,5	9,9	21,6	39,5	22,5	6,0			
6	7,2	9,0	5,8	9,9	8,0	7,0	10,0	8,4	8,1	9,4	8,8	7,4	16,5	12,0	8,4	11,3	8,4	10,0	7,0	4,9	10,1	9,1	7,4	10,0	10,0		
7	7,9	8,3	6,0	11,3	13,7	9,8	8,8	8,3	4,2	4,4	9,2	9,8	7,4	13,6	7,9	6,4	14,3	8,5	10,3	13,0	7,7	5,5	11,3	5,9	9,6	8,8	
8	7,1	8,6	9,9	8,9	8,6	8,3	7,5	8,0	9,9	13,1	6,6	7,0	7,9	5,7	8,4	6,3	9,2	6,0	49,5	9,5	8,6	13,5	9,7	9,4	8,5		
9	7,1	9,0	9,0	10,8	7,8	7,5	7,0	8,6	7,8	11,3	10,2	7,1	8,5	7,0	11,1	8,4	2,5	21,5	10,4	8,9	9,8	21,8	9,5	7,0	8,5		
10	6,8	8,3	13,2	9,6	6,0	7,1	9,1	8,0	6,0	5,0	16,9	8,6	9,4	1,1	7,3	8,8	8,2	7,8	18,0	8,3	9,2	10,9	9,0	11,0	9,5		
11	8,0	8,5	6,1	7,6	5,6	6,0	5,8	5,7	8,8	9,0	15,3	7,5	4,0	4,9	10,5	6,9	12,0	10,3	8,3	10,3	10,1	6,5	14,0	9,0	8,9		
12	8,3	8,6	4,8	8,2	12,2	8,3	7,7	7,6	4,9	15,1	5,3	6,4	7,9	8,1	8,1	6,3	9,6	8,5	9,5	9,2	7,2	7,7	9,7	9,9	7,9		
13	7,5	7,6	9,0	9,0	6,3	8,9	6,3	9,5	9,5	12,3	7,3	25,1	8,8	6,7	6,7	13,0	9,9	6,4	8,7	4,6	21,4	8,7	9,5	9,8	13,7		
14	9,6	7,3	9,4	7,7	8,6	9,6	6,0	9,6	5,0	9,4	7,8	8,3	7,0	9,0	108,0	7,1	7,4	8,4	7,8	7,8	4,1	8,7	8,4	8,8	13,5		
15	7,0	5,7	11,3	7,0	8,9	8,7	8,4	4,3	5,6	7,6	10,3	12,8	8,6	8,6	7,5	8,7	8,3	22,7	1,5	8,4	8,4	10,8	9,6	9,8	8,4	8,5	
16	8,5	8,9	11,7	6,3	6,8	7,9	16,3	8,9	7,3	8,3	9,8	16,9	3,0	6,1	8,5	13,6	9,9	18,7	11,3	9,5	9,2	9,2	9,1	9,7	7,8	6,0	
17	8,6	5,3	6,7	5,9	8,6	6,5	4,1	7,6	10,0	7,8	8,3	44,0	4,6	4,4	5,9	8,6	8,5	8,3	15,0	0,3	7,4	5,4	9,9	9,5	6,4		
18	10,1	9,6	8,1	7,4	10,9	7,2	7,5	3,8	6,2	29,3	12,0	18,0	9,5	8,8	9,6	7,7	9,3	4,9	13,5	11,6	10,7	8,1	15,8				
19	12,0	5,6	7,3	4,1	4,8	9,1	5,4	4,1	9,8	11,7	10,3	7,2	14,8	8,6	8,6	7,9	11,7	8,3	9,3	7,9	5,2	8,4	8,7	9,8			
20		6,5	7,8	9,0	8,4	5,2	7,5	3,5	17,3	8,7	6,2	6,2	6,2	8,1	7,9	10,6	7,3	9,7	9,4	4,4	10,9	4,5	9,4	2,2			
21		7,6	7,2	7,1	6,8	6,9	9,7	11,5	15,4	7,2	8,4	7,7	7,7	7,9	8,1	8,0	8,5	9,0	5,4	8,5	9,5	7,1					
22		9,1	7,3	8,8	7,5	7,2	7,9	8,3	6,1	7,9	7,2	16,5	5,3	5,8	9,9	9,0	12,1	5,3	12,1	5,3	6,3	6,3	13,0	10,2			
23		7,5	7,5	10,0	7,8	8,7	7,5	10,5	4,0	13,0	7,4	8,1	7,8	9,0	9,4	8,2	9,1	13,3	6,9	20,0	5,4	12,0	9,4				
24		8,7	7,3	7,2	8,6	8,2	8,0	8,3	8,0	3,0	9,8	6,8	8,2	7,5	4,2	9,0	4,2	8,9	4,5	5,5	17,7	8,2					
25		8,0	8,3	7,3	11,1	8,6	15,1	8,6	17,4	6,7	6,5	5,3	18,5	9,8	5,6	7,4	8,7	13,5	12,5	9,0	9,6						
26		8,0	5,9	5,6	7,6	8,6	0,0	8,6	3,0	8,4	7,6	9,7	6,0	16,1	8,6	8,4	8,4	12,5	6,2	11,1	12,2						
27		9,0	9,0	7,4	7,3	8,8	7,8	7,0	4,0	7,7	7,9	8,0	5,7	9,4	10,0	8,9	9,9	10,3	8,9	9,4							
28		6,8	8,0	12,8	8,1	7,5	6,6	5,9	7,8	5,9	7,8	7,5	9,4	7,8	9,6	5,3	5,3	8,2	5,1	7,9	9,5	9,5	9,5				
29		8,0	7,1	7,8	6,5	13,0	6,7	14,7	10,2	14,7	10,2	9,6	5,4	4,0	4,0	4,0	12,0	14,4	10,3	10,3	12,8						
30		8,8	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9				
31		8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8				
32		33	33	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34			
35																											
Moy	8,3	7,5	9,2	8,0	8,4	8,9	8,3	7,8	7,7	7,5	10,6	9,5	7,2	16,0	8,3	9,4	10,1	10,4	8,1	9,5	10,5	9,7	10,2	9,6			
Min	6,0	5,3	4,8	4,1	4,0	4,1	0,0	3,5	3,0	2,7	3,9	1,1	2,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	1,5	5,6	4,4	3,3	5,1	2,2			
Max	12,0	9,6	16,0	14,6	13,7	30,0	16,3	15,1	11,5	17,4	29,3	44,0	26,4	10,2	108,0	18,5	13,6	22,7	21,5	50,0	49,5	10,1	25,2	21,8	39,5	22,0	
Var.	2,2	1,7	32,4	3,7	5,2	21,7	4,1	6,8	3,6	10,7	35,2	51,5	29,8	3,6	591,0	6,5	4,0	15,5	62,3	83,3	2,6	28,8	24,6	45,9	10,9		
H.T.	1,5	1,3	5,7	1,9	2,3	4,7	2,0	2,6	1,9	3,3	5,9	7,2	5,5	1,9	24,3	2,6	20	3,9	3,9	7,9	9,1	1,6	5,4	5,0	6,8	3,3	

Tableau C.8 : Historique du temps d'attente total en min

VieCas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	15	33	46	89	47	161	54	30	29	73	231	28	44	102	35	57	43	63	40	34	84	184	28	8	29	97	22
2	27	30	3	59	17	70	84	24	31	36	21	32	154	59	24	29	98	37	84	30	47	44	90	20	59	47	23
3	22	22	111	28	44	107	61	9	11	14	31	26	53	25	36	35	67	62	13	15	18	35	69	12	48	16	27
4	7	20	51	20	68	42	18	36	15	23	272	6	79	37	56	0	12	50	16	52	45	38	26	45	26	16	43
5	42	50	111	28	20	11	31	71	55	87	10	41	67	166	18	63	20	14	44	33	29	20	40	45	96	19	54
6	12	122	41	98	36	8	39	52	200	8	21	28	96	84	16	36	60	13	7	20	31	30	28	81	29	132	24
7	26	48	9	22	93	17	33	25	29	37	141	110	38	24	5	29	44	27	17	70	36	82	61	85	15	30	10
8	16	29	24	54	68	35	28	14	43	37	33	33	43	28	15	61	29	20	34	12	13	54	12	28	26	60	20
9	31	30	25	6	79	39	36	46	48	11	13	116	29	17	26	103	31	23	3	37	83	21	75	30	72	21	31
10	56	38	16	36	80	40	82	51	52	42	22	95	30	26	31	15	23	130	44	27	24	46	31	12	21	29	15
11	32	46	78	16	68	293	130	50	33	89	65	99	67	21	19	47	14	70	39	26	31	13	14	47	43	30	13
12	18	72	23	28	24	9	33	72	21	104	50	164	227	49	16	25	8	21	8	37	212	19	19	79	25	21	76
13	16	53	23	24	15	56	66	33	26	86	24	24	81	31	85	33	73	12	102	54	75	10	15	57	29	89	68
14	8	6	54	53	16	129	51	66	35	64	7	42	12	13	25	85	44	17	34	34	78	28	14	14	13	29	4
15	45	29	37	26	21	55	50	9	46	90	41	16	9	7	20	19	12	69	27	96	67	17	25	53	26	35	15
16	40	42	50	24	56	51	62	6	21	49	38	51	7	37	28	53	48	36	34	73	38	52	57	35	39	47	26
17	22	32	54	10	75	52	41	36	26	43	92	31	66	31	25	7	42	14	35	47	90	13	27	19	17	25	
18	18	120	30	8	131	45	55	34	45	85	42	48	26	24	15	21	87	34	31	57	3	12	24	12	10	16	
19	10	43	12	66	35	28	29	19	129	116	77	18	23	40	32	62	109	17	97	66	29	53	19	35	47		
20		18	12	41	29	52	16	9	105	96	74	9	59		33		48	38	30	24	9	115	36	39	14	15	
21		33	9	29	20	16	78	274	25	63	43	44	61		31		14	32	32	20	26	79	14	19	28	81	
22		16	47	21	18	55	15	151	20	39	41	64	24		42		63	65	18	35	48		34	18	15	22	
23		45	24	84	95	29	10	62	18	31	20	35	62		18		34	20	20	24	60		23	26	25	79	
24		42	72	68	44	45	32	51	18	22	58	26	83		14		43	32	16	29		5	48	18	116		
25		22	200	66	57	15	62	90	145		72	90	29		58		32	14	15		37		35	20	36	52	
26		30	9	46	30	29	167	53	66		25	78	45		88		32	31	96		5		53	17	27	11	
27		53	40		39	37	41	10	32		65	18	7		7		18	22	60		16		76	16	19		
28		15	56		47	38	54	66			34	39	30				32		62				29	58			
29		21	138			37	70	55			45	7				24		49					37	30			
30																											
31																											
32																											
33																											
34																											
35																											
Moy	24	46	39	43	53	58	46	42	55	57	63	54	52	41	28	39	39	41	35	39	53	40	41	37	34	37	36
Min	7	6	3	6	15	8	15	6	9	8	7	6	7	7	5	0	8	12	3	6	13	3	12	5	12	10	4
Max	56	122	111	200	131	293	130	167	274	145	272	164	227	166	85	103	98	130	109	96	212	184	115	85	96	132	116
Somme	463	822	1124	1248	1379	1634	1335	1306	1606	1536	1521	1499	1703	1218	535	1041	626	1195	957	1313	1215	1082	852	955	909	1262	1042
Var.	186	964	676	1859	842	3377	565	970	3421	1453	4558	1313	1972	1146	319	660	656	708	714	498	1789	1332	903	499	442	839	726
B.T.	13,6	31,0	26,0	43,1	29,0	58,1	23,8	31,1	58,5	38,1	67,5	36,2	44,4	33,9	17,9	25,7	25,6	26,6	26,7	22,3	42,3	36,5	30,1	22,3	21,0	29,0	26,9

Tableau C.9 : Historique du temps de résidence en min

Vie\Cas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27		
1	42	101	75	154	132	221	160	95	84	153	357	87	74	162	120	117	164	135	168	109	84	485	99	121	115	179	85		
2	114	74	73	126	210	145	169	125	77	99	92	94	325	134	103	100	164	67	155	95	121	151	143	100	136	123	43		
3	42	63	166	111	102	188	197	75	126	114	151	104	142	126	76	101	148	137	178	50	153	80	142	119	128	112	135		
4	117	55	71	52	136	114	48	132	177	140	358	41	269	117	121	231	68	89	96	112	109	113	81	79	62	133	238		
5	111	109	171	50	129	84	111	156	100	137	128	126	157	236	112	153	111	47	136	174	82	155	104	144	123	61	113		
6	104	182	64	149	98	63	109	127	216	43	21	74	163	174	118	92	127	13	46	68	65	138	161	152	48	191	59		
7	61	163	29	121	303	100	158	97	99	116	152	185	114	127	142	96	102	81	117	173	100	150	117	153	38	125	72		
8	46	155	74	130	223	107	134	101	120	73	76	119	43	136	195	155	266	50	97	47	88	117	72	81	77	159	90		
9	106	118	110	91	149	204	161	111	153	170	150	171	114	117	86	165	130	66	213	107	150	146	153	53	176	60	117		
10	92	103	149	116	185	40	162	132	132	133	187	160	92	111	61	112	123	148	94	106	94	99	104	12	68	44	189		
11	37	121	142	93	152	423	266	109	85	179	195	193	119	106	89	125	88	133	101	66	156	105	145	119	43	38	53		
12	82	152	70	142	102	101	83	105	77	185	89	231	240	134	43	130	109	78	130	73	281	198	79	137	105	102	140		
13	51	114	23	79	67	121	128	161	165	152	67	76	144	108	150	142	104	69	177	70	134	55	138	129	87	166	80		
14	98	222	192	113	97	190	75	128	113	119	62	127	155	46	104	148	113	45	34	43	103	122	118	119	13	64	56		
15	150	107	95	111	89	188	63	48	46	155	106	143	79	174	81	112	45	174	27	105	117	105	108	118	54	69	67		
16	115	112	215	77	144	149	123	78	141	105	141	153	105	82	112	120	126	253	86	175	103	108	130	114	126	101	215		
17	51	118	126	95	168	119	117	105	90	83	105	106	160	117	95	37	119	169	83	48	154	76	181	35	138	80			
18	78	203	94	112	247	100	139	70	122	250	112	103	69	54	81	158	82	136	144	32	41	87	98	128	52				
19	92	179	87	75	140	147	89	96	223	176	146	97	75	131	64	147	162	71	164	148	97	134	53	95	120				
20	159	71	122	88	90	39	24	111	168	150	94	108	86	97	156	77	159	120	289	144	106	181	55						
21	140	57	154	190	121	150	384	118	63	93	124	141	157	115	155	56	97	85	200	32	141	113	127						
22	176	121	193	81	110	113	262	101	128	63	134	100	78	117	133	144	120	163	84	64	61	55							
23	110	190	170	165	71	47	142	44	53	44	100	205	55	139	82	189	89	135	169	104	131	110							
24	117	150	162	169	123	106	171	146	47	145	52	168	79	101	107	131	107	132	142	70	244								
25	52	357	131	143	115	117	170	199	170	170	119	111	100	112	245	97	105	85	88	123									
26	75	107	99	98	79	466	121	78	115	160	127	136	104	101	168	31	135	163	97	62									
27	113	110	121	88	100	91	43	126	95	118	90	105	131	110	94	69	130	102											
28	124	131	136	116	109	161	115	238	85	113	153		124																
29	94	210		117	157	85		110	52		78																		
30					113			65	105											62									
31					92			109													148								
32								53													178								
33								128													141								
34																						149							
35																						144							
Moy	84	126	113	121	148	142	123	118	132	129	133	124	131	123	105	114	124	106	120	114	120	129	124	114	91	113	108		
Min	37	55	23	50	67	40	48	39	24	43	21	41	43	46	43	37	45	13	27	43	48	31	41	12	13	38	43		
Max	150	222	215	357	303	423	266	466	384	250	358	231	325	236	195	231	266	253	213	245	281	485	289	181	176	233	244		
Somme	1589	2272	3278	3513	3839	3988	3580	3653	3830	3489	3184	3469	4327	3679	1993	3073	1988	3078	3245	3871	2761	3493	2597	2953	2459	3833	3127		
Var.	1065	2069	2443	3430	3067	5054	1977	5111	4802	2732	7008	2017	3926	1731	1302	1625	2404	2233	2094	2403	2213	6547	2742	1576	1777	2017	3063		
E.T.	32,6	45,5	49,4	58,6	55,4	71,1	44,5	71,5	69,3	52,3	83,7	44,9	62,7	41,6	36,1	40,3	49,0	47,3	45,8	49,0	47,0	80,9	52,4	39,7	42,2	44,9	55,3		

Tableau C.10 : Historique du temps de coulée en min

Vie\Cas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	83	85	75	92	88	87	98	90	93	91	98	80	91	91	86	77	94	93	95	82	93	81	102	99	67	88	
2	88	98	99	87	96	86	90	82	86	89	94	88	92	107	91	87	90	74	94	88	91	89	78	82	90	88	95
3	87	99	91	80	103	88	85	82	78	94	96	95	110	104	97	101	87	85	86	101	89	87	90	88	91	86	93
4	86	92	94	79	90	86	86	116	85	82	95	84	97	88	86	81	93	97	92	89	100	94	88	99	124	87	89
5	95	81	106	80	90	85	93	86	97	91	84	94	88	91	88	89	89	85	80	99	88	101	93	100	84	94	86
6	97	89	86	66	93	89	94	87		86			102	93	88	81	105			92	91	96	81	91	85	82	117
7	94	98	88	84	96	88	89	89	97	83		94	99	92	79	87	97	88	90	82	98	96		90	78	90	93
8	84	89	101	83	86	96	96	88	104	87	90	79		119	82		91	81	94	89	81	85	96	92	96	84	89
9	94	91	89	122	91	96	93	84	93	95	83	89	95	93	95	88	93		157	98	70	85	90	111	88	77	21
10	90	94	92	94	88	86	102	94	92		83	97	112	93	89	90	88	87	97	96	98	86	90		89	81	77
11	98	92	91	91	28	105	83	82	100	94	114		94	93	92	87	96	99	103	100	91	91	93			90	
12	86	91	37	94	90	86	89	87	87	104	88	90		86	90	103	85	92	83	89	94	85	89	97	88	94	91
13	94	92		100	83	90	79	9	92	97	93	86	89	90	83	90		89	97		94	98	87	87	95		
14	96	97	80	88	98	91		81	94	104	101	94	84	90	89	90	82	88			82	83	87	98	99		
15	83	100	85	96	45	91		84		111	111	90	94	95	76	88	83	95		97	89	6	78	87	86	87	
16	92	86	78	86	93	96	92	89	85	87	106	90	105		88	92	93	93	90	83	93	92	79	91	86	90	80
17	86	103	84	86	6	92	79	85	95	89		82	92	91	82	96		95	86	99	125	87	89	98	84	81	90
18	86	94	77	83	8	85	90	87	87	101	92	85	89	87	91	80		92	80	92	95	86	82		88	68	85
19	86		86	95	93	91	87	82	83	91	95	95	91	91	106	89		92	86	89	96	93	81	85	81	88	81
20			79	96	90	89	85	84	80		101	100		93		89		98	93	96	81	85	81	86	82	87	86
21			87	91	99	84	95	85	19			89	111	88		94		99		92	87	97	93	84	84	87	93
22			113	101	96	97	97	80	74	73	94	97	98	94		107		92	95	92	92		87	92	87	88	
23			120	98	96	91	75	80	116	110		85	95			95		94	101	85	83	85		90	76	83	
24			95	93	99	87	102	85	106	112		91	96	85		88		90	87	88		90		82	91	89	69
25			76	96	95	96	92	85	96	84		105	101	105		89		97	84	106		87		101	91	101	94
26			92	85	87	87	94	30	97			114	99	85		93		93	102	100		77		104	84	87	94
27			96	92		90	91	75	98			96	129	95		83		88	97	100		83			82	93	85
28			92	95		9	73	90	96			85	104	94				86		86					79	97	
29			87	91		89	91	97	106				99	88				90		99					101	77	
30								96	93					95					113								
31								92					99						100								94
32								92					96						87								
33													88						97								
34																		95								83	
35																										84	
Moy	89	93	88	90	84	85	90	83	90	94	95	92	98	93	89	90	90	91	94	94	93	89	83	92	88	87	86
Min	83	81	37	66	6	9	73	9	19	73	83	79	84	85	76	77	82	74	80	82	70	77	6	78	76	67	21
Max	97	103	120	122	103	97	105	116	116	112	111	114	129	119	106	107	105	99	157	113	125	101	98	111	124	101	117
Somme	1607	1677	2477	2624	2190	2456	2442	2656	2511	2061	1616	2478	2751	2614	1682	2338	1357	2449	2165	2907	2036	2128	1659	2205	2207	2607	2334
Var.	22	34	215	93	625	356	61	335	277	105	50	79	84	55	46	48	34	31	228	55	105	30	363	66	82	64	247
E.T.	4,7	5,8	14,7	9,7	25,0	18,9	7,8	18,3	16,6	10,3	7,0	8,9	9,2	7,4	6,8	6,9	5,8	5,5	15,1	7,4	10,2	5,5	19,0	8,1	9,1	8,0	15,7

Tableau C.11 : Historique du temps de rotation en min

WECs	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1																											
2	64	241	105	115	62	45	42	183	273	185	263	201	51	75	100	174	7	106	6	34	114	74	131	83	245	157	123
3	366	132	419	60	180	44	45	193	70	628	338	239	68	77	140	284	41	166	34	128	112	60	33	106	118	131	136
4	151	129	716	106	115	60	136	88	125	38	167	158	111	150	971	195	114	83	207	118	87	94	96	41	176	111	
5	321	184	278	270	102	90	208	538	76	111	256	164	67	279	116	111	450	120	37	20	22	307	123	305	344	114	89
6	173	248	5	135	75	22	75	51	211	142	93	82	68	40	192	85	114	85	120	76	24	62	91	30	121	413	129
7	33	92	265	88	77	119	70	88	160	172	65	26	94	73	100	360	121	64	59	27	184	78	40	83	140	217	196
8	40	68	182	79	26	131	406	229	107	101	97	75	195	177	347	271	23	34	85	114	129	194	60	79	211	549	91
9	111	76	93	250	39	46	60	144	93	411	146	77	74	237	94	85	77	57	43	149	198	238	265	170	188	116	175
10	87	170	91	105	47	25	43	125	154	76	249	50	113	129	29	75	90	6	200	18	163	196	179	152	113	140	539
11	218	73	30	99	22	207	11	73	101	63	90	26	128	91	81	611	94	100	551	117	203	104	94	81	250	172	120
12	72	63	95	85	68	87	69	147	121	8	80	13	125	245	96	90	101	67	55	147	83	148	22	57	68	222	
13	137	229	97	117	20	145	116	151	996	102	29	57	55	161	196	96	27	175	169	109	14	71	88	63	93	188	63
14	179	36	538	255	33	81	63	92	76	121	58	115	132	2632	339	133	44	63	49	47	180	103	144	1684	114	150	
15	75	73	86	118	81	26	16	123	150	144	71	21	137	141	99	118	106	173	66	48	116	102	167	86	47	182	
16	183	106	174	102	142	46	67	190	64	266	87	39	86	40	150	91	177	54	94	55	94	86	79	101	240	143	141
17	134	76	54	1392	97	64	75	298	93	214	54	69	177	35	73	142	70	128	97	66	85	197	107	146	162	108	
18	120	71	73	186	69	203	106	163	238	195	106	77	103	113	110	79	16	97	86	55	53	79	252	120	318		
19	54	137	216	158	208	292	162	77	68	245	93	113	189	505	55	45	52	194	63	187	87	87	336	124	506	85	
20	220	127	53	105	100	46	153	273	73	49	108	81	93	330	44	407	72	248	142	128	164	185	101				
21	238	136	103	166	99	99	477	21	45	240	250	124	123	169	147	84	95	38	146	152	65	260					
22	104	164	72	20	68	160	76	103	73	109	77	74	105	84	170	184	165	84	170	184	152	139	22	26	210		
23	135	224	11	87	109	130	109	122	47	116	102	471	110	110	113	106	154	211	117	134	273	38	67				
24	77	82	60	43	176	88	42	323	43	95	167	89	191	191	29	119	100	135	87	217	112	5					
25	136	81	49	72	184	145	64	64	65	239	63	569	93	69	158	121	171	113	350	137							
26	272	169	69	73	110	121	339	75	125	48	71	105	66	292	103	29	99	146	161	217							
27	258	90	79	365	192	201	129	108	98	162	79	78	111	218	80	129	160	482									
28	100	159	103	45	132	225	144	149	110	151	129	92	113	113	113	113	113	83	1118								
29	98	61	209	87	103	169	27	121	121	121	121	129	129	129	207	207	207	207	207	207	207	207	207	207	207	207	207
30																											
31																											
32																											
33																											
34																											
35																											
Min	140	122	181	182	73	64	129	149	175	208	122	101	105	129	300	215	117	100	125	126	120	124	103	130	194	163	204
Max	33	36	5	60	11	20	11	46	42	21	8	20	13	35	29	55	7	8	6	18	14	24	33	22	22	5	
Somme	366	248	716	1392	180	208	406	538	996	1638	338	239	256	471	2632	971	456	330	551	407	365	365	365	365	365	365	1118
Var.	2518	2067	5066	5091	1753	2263	3600	4481	4893	5402	2799	2715	3375	3724	5404	5600	1757	2788	4143	3238	3238	2057	1227	3238	5049	5391	5710
ET.	8357	4648	24108	59869	1932	2662	10013	8186	34773	93145	8410	3357	1398	7564	331061	44931	11375	39888	13731	8493	6538	4714	2925	5321	5321	45549	15629
	91,4	68,2	155,3	344,7	44,0	51,6	100,1	90,5	186,5	36,5,2	91,7	57,9	58,3	67,0	592,5	21,240	106,7	63,2	117,2	92,2	80,9	68,7	54,1	74,3	193,4	125,0	213,4

Tableau C.12 : Historique du temps du cycle en min

VarC _{min}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
1	131	194	154	250	226	314	262	189	182	249	474	172	171	258	212	201	264	234	268	186	182	390	185	229	219	253	181	
2	272	419	283	332	372	281	306	384	442	378	455	390	474	321	303	365	261	253	261	222	332	321	361	270	475	373	267	
3	501	301	681	255	393	325	331	354	278	1853	591	443	325	312	319	39	306	281	245	359	227	378	341	354	371			
4	360	282	885	241	347	268	276	383	355	362	496	101	527	321	363	1289	362	306	277	412	333	308	268	279	234	401	447	
5	534	362	559	404	527	265	417	766	240	345	390	379	324	607	325	358	656	255	258	297	192	568	324	554	276	295		
6	379	528	155	372	271	179	283	271	432	277	114	161	339	314	404	264	352	103	172	241	186	301	338	280	260	691	312	
7	193	358	246	297	277	451	321	220	365	577	310	314	296	327	548	325	258	272	272	268	146	331	263	436		361		
8	177	319	362	206	334	337	633	426	320	267	168	278	243	437	632	432	389	170	282	256	304	402	234	257	384	799	276	
9	315	293	296	468	283	354	322	346	346	682	387	342	288	452	280	344	305	173	419	360	425	476	513	341	458	260	318	
10	274	374	336	319	325	151	312	357	383	210	524	311	322	338	184	283	306	248	396	225	360	387	378	169	275	271	812	
11	259	297	269	287	270	70	272	389	270	364	384	384	331	252	255	268	835	276	756	354	286	459	306	335	208	300	216	
12	246	311	208	325	264	283	307	316	417	185	406	258	350	383	290	335	290	276	286	217	530	371	121	261	256	271	460	
13	287	440	124	301	175	346	330	377	1259	327	189	219	295	364	436	333	140	339	449	140	333	140	339	140	333	140	339	140
14	380	361	784	461	233	366	167	367	290	320	289	284	359	273	283	582	334	183	102	97	153	389	309	350	1083	280		
15	313	285	270	330	220	115	85	260	188	421	366	309	194	411	303	304	252	380	205	175	267	314	221	368	234	208	341	
16	395	369	471	270	385	292	288	362	317	464	319	287	301	112	355	309	405	405	275	320	296	201	294	310	458	340	445	
17	276	363	268	1575	283	273	278	493	284	392	164	263	434	247	255	280	289	589	283	244	331	277	390	265	386	283		
18	290	375	248	367	417	268	378	459	268	379	595	404	307	276	263	265	276	534	276	528	451	189	181	443	316	460		
19	237	406	405	238	442	532	338	262	387	521	334	387	306	355	747	208	291	306	354	328	432	269	559	264	694	291		
20	462	300	269	282	280	175	267	386	347	303	208	287	273	273	534	299	580	317	466	517	362	358	459	250				
21	489	290	364	464	457	420	341	460	139	113	490	353	379	379	233	282	273	282	376	333	266	333	272	445				
22	397	392	366	194	281	359	454	277	390	274	314	273	296	295	403	426	569	307	403	426	403	185	180	353				
23	369	518	282	344	260	263	363	261	105	245	303	687	266	355	294	355	294	348	348	344	403	458	259	182				
24	292	331	326	312	406	284	315	585	110	336	321	339	339	339	358	226	320	324	337	301	456	275	323					
25	268	519	280	308	395	552	336	572	347	515	267	73	277	277	277	277	277	277	277	277	277	277	277	277	277	277		
26	443	366	261	266	288	697	564	312	291	341	386	177	341	341	341	341	341	341	341	341	341	341	341	341	341	341		
27	473	297	204	204	549	386	393	177	354	328	382	428	348	496	295	392	280	300	300	300	300	300	300	300	300	300		
28	321	390	332	239	343	497	343	477	348	496	496	496	496	496	496	496	496	496	496	496	496	496	496	496	496	496		
29	263	367	423	145	286	365	276	193	364	240	240	267	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270		
30																												
31																												
32																												
33																												
34																												
35																												
Moy	106	341	377	392	308	316	337	353	393	413	322	314	322	339	484	413	325	294	323	326	329	333	305	328	365	356	390	
Min	131	194	124	241	175	151	85	175	182	139	105	161	171	112	184	201	140	103	102	97	153	132	146	169	179	149		
Max	534	528	885	1575	485	749	643	786	1150	1150	1150	1150	1150	1150	1150	1150	1150	1150	1150	1150	1150	1150	1150	1150	1150	1150		
Somme	58119	61311	10942	11365	7996	8843	9787	10957	11240	11119	7716	9793	10624	10167	9191	11148	5198	5523	3724	11082	7559	9000	6408	8348	9458	12111	11320	
Var.	10338	5493	31586	51593	4960	10350	12853	14972	47972	98343	21794	4345	8712	11193	34128	53874	11729	7520	18038	11759	10193	86312	8342	30085	22036	53624		
E.T.	101,7	74,1	177,7	240,0	70,4	108,8	113,5	122,4	219,0	313,6	147,6	65,9	91,3	105,8	594,1	232,1	108,3	86,7	134,2	109,7	101,0	91,9	92,4	173,5	148,4	231,6		

Tableau C.13 : Historique de la désulfuration (%Si-%S) en % poids

WicCas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
1	.038	.027	.051	.041	.028	.013	.027	.008	.054	.025	.016	.048	.001	.019	.034	.011	.015	.007	.060	.007	.034	.015	.073	.020	.040	.013	.047	
2	.052	.036	.042	.044	.012	.018	.043	.020	.063	.029	.017	.022	.011	.037	.019	.002	.013	.025	.021	.030	.005	.051	.023	.063	.018	.063		
3	.024	.063	.019	.110	.021	.026	.004	.072	.055	.026	.019	.000	.011	.007	.028	.042	.014	.015	.014	.025	.045	.006	.067	.030	.044	.033	.053	
4	.111	.027	.006	.072	.022	.027	.005	.061	.022	.048	.008	.014	.035	.006	.015	.027	.017	.016	.031	.049	.044	.014	.046	.011	.216	.036		
5	.032	.026	.010	.048	.005	.019	.004	.058	.007	.050	.028	.021	.014	.019	.009	.025	.007	.015	.041	.034	.025	.006	.076	.038	.060	.020	.035	
6	.023	.011	.-003	.052	.-002	.024	.011	.019	.0010	.034	.000	.010	.009	.023	.004	.006	.024	.004	.010	.040	.025	.055	.043	.038	.077	.051	.018	
7	.020	.028	.005	.067	.018	.027	.036	.022	.012	.035	.004	.012	.021	.019	.044	.000	.018	.023	.027	.035	.047	.006	.032	.042	.034	.014		
8	.024	.039	.010	.124	.027	.017	.019	.013	.042	.009	.004	.020	.015	.014	.015	.024	.010	.024	.026	.025	.029	.029	.066	.041	.010			
9	.050	.035	.007	.095	.024	.029	.023	.003	.016	.047	.021	.003	.029	.029	.010	.017	.045	.019	.018	.001	.045	.056	.056	.031	.055	.018		
10	.013	.013	.011	.054	.021	.014	.019	.012	.028	.023	.013	.059	.010	.022	.023	.011	.002	.007	.017	.125	.013	.025	.045	.028	.010	.013	.003	
11	.070	.025	.040	.030	.028	.038	.043	.009	.025	.037	.061	.001	.019	.050	.023	.021	.004	.019	.014	.012	.017	.025	.025	.001	.015	.004		
12	.045	.016	.033	.010	.028	.026	.010	.058	.007	.016	.008	.033	.028	.044	.005	.015	.004	.028	.037	.010	.008	.027	.003	.029	.029	.021	.019	
13	.013	.017	.012	.001	.035	.024	.012	.023	.040	.-003	.007	.005	.030	.040	.010	.027	.016	.010	.036	.023	.008	.007	.010	.036	.023	.009	.023	
14	.006	.021	.013	.034	.024	.013	.012	.024	.033	.019	.029	.044	.019	.016	.016	.004	.030	.011	.021	.000	.074	.029	.013	.022	.038			
15	.031	.026	.088	.016	.014	.009	.038	.009	.032	.022	.037	.053	.027	.035	.022	.026	.007	.017	.006	.023	.027	.074	.019	.039	.013	.024	.036	
16	.058	.003	.059	.014	.009	.007	.027	.068	.055	.032	.030	.040	.055	.026	.030	.006	.024	.010	.011	.060	.023	.045	.018	.015	.011	.039		
17	.048	.015	.082	.010	.030	.008	.023	.068	.009	.012	.027	.069	.049	.030	.025	.001	.009	.039	.015	.013	.025	.031	.021	.020	.020	.021		
18	.120	.012	.122	.038	.034	.026	.020	.099	.035	.014	.047	.056	.012	.020	.006	.019	.002	.033	.011	.041	.024	.014	.003	.055	.007	.037		
19	.140	.149	.052	.006	.040	.079	.127	.041	.027	.039	.028	.040	.006	.013	.005	.003	.011	.016	.012	.050	.033	.040	.063	.014	.066			
20	.102	.041	.012	.040	.073	.034	.019	.019	.020	.004	.019	.020	.004	.013	.006	.009	.037	.028	.060	.030	.019	.026	.083	.008	.048			
21	.091	.088	.020	.022	.039	.085	.040	.021	.015	.053	.013	.040	.002	.030	.019	.002	.019	.022	.012	.019	.019	.004	.073	.011	.067			
22	.098	.016	.020	.024	.092	.022	.007	.025	.048	.014	.025	.014	.025	.013	.024	.013	.006	.049	.035	.011	.041	.024	.014	.033	.057			
23	.039	.015	.008	.018	.047	.078	.025	.028	.010	.009	.020	.002	.017	.002	.024	.017	.005	.046	.005	.026	.062	.054						
24	.039	.024	.004	.026	.002	.028	.028	.059	.014	.107	.004	.007	.001	.001	.031	.074	.023	.018	.009	.072	.050	.044						
25	.003	.017	.013	.019	.022	.015	.047	.055	.036	.014	.006	.014	.046	.072	.006	.028	.006	.028	.026	.041	.066	.054						
26	.002	.030	.014	.022	.019	.042	.014	.020	.030	.028	.014	.020	.030	.011	.020	.034	.000	.033	.016	.026	.031	.014	.050					
27	.042	.029	.017	.020	.001	.021	.014	.002	.051	.011	.029	.014	.004	.001	.001	.014	.007	.067	.006	.073	.021							
28	.028	.014	.029	.004	.007	.015	.011	.011	.012	.003	.044	.008	.006	.025	.025	.029	.008	.033	.007	.067	.013							
29	.016	.011	.017	.009	.014	.019	.019	.014	.014	.005	.014	.014	.014	.014	.005	.020	.020	.025	.029	.029	.008	.053	.002					
30																												
31																												
32																												
33																												
34																												
35																												
Moy	.048	.024	.042	.042	.019	.023	.025	.043	.027	.028	.023	.028	.023	.019	.031	.016	.011	.021	.032	.030	.027	.032	.033	.026	.039	.032		
Min	.006	.003	.003	.001	.-002	.007	.-064	.001	.001	.000	.-003	.001	.001	.001	.001	.002	.001	.002	.013	.001	.007	.001	.006	.001	.002			
Max	.140	.063	.149	.124	.035	.040	.127	.063	.159	.061	.107	.069	.050	.271	.044	.046	.125	.206	.060	.074	.076	.066	.083	.226	.075			
Var.	.001	.060	.062	.001	.000	.000	.001	.000	.000	.001	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.001	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000		
B.T.	.038	.014	.041	.032	.010	.009	.019	.034	.017	.015	.016	.025	.016	.013	.015	.029	.008	.013	.015	.015	.021	.022	.016	.026	.038	.021		

ANNEXE D

Analyse des résidus

Tableau D.1 : Analyse des résidus pour le modèle de l'équation (3.7)

Cas	Valeurs Observées	Valeurs Prédites	Résidus Ecart	Val. Préd. Ecart	Résidus Ecart	Val. Préd. Ecart Type	Distance Mahalns	Résidus Enlevés	Distance Cook	Résidus Stud. Int.	Résidus Stud. Ext.	DFFITS	Diagonale Matrice H
1	19	20,72	-1,72	-1,81	-0,48	1,688	4,77	-2,21	0,028	-0,542	-0,534	-0,284	0,221
2	18	23,52	-5,52	-0,95	-1,54	1,002	1,06	-5,98	0,072	-1,599	-1,656	-0,481	0,078
3	29	29,67	-0,67	0,93	-0,19	1,341	2,66	-0,78	0,002	-0,201	-0,197	-0,079	0,139
4	29	28,72	0,28	0,64	0,08	0,987	1,00	0,31	0,000	0,082	0,080	0,023	0,075
5	26	30,56	-4,56	1,21	-1,27	1,479	3,44	-5,50	0,132	-1,394	-1,423	-0,642	0,169
6	28	27,74	0,26	0,34	0,07	1,082	1,40	0,28	0,000	0,075	0,073	0,023	0,091
7	29	28,70	0,30	0,63	0,08	0,913	0,71	0,33	0,000	0,088	0,086	0,023	0,065
8	31	33,45	-2,45	2,09	-0,68	2,295	9,64	-4,14	0,181	-0,887	-0,883	-0,733	0,408
9	29	30,58	-1,58	1,21	-0,44	1,217	2,02	-1,78	0,009	-0,466	-0,458	-0,165	0,115
10	27	29,64	-2,64	0,92	-0,73	1,054	1,28	-2,88	0,018	-0,767	-0,761	-0,233	0,086
11	24	25,88	-1,88	-0,23	-0,52	0,738	0,13	-1,96	0,004	-0,533	-0,525	-0,110	0,042
12	28	29,17	-1,17	0,78	-0,33	0,904	0,68	-1,25	0,003	-0,337	-0,330	-0,086	0,063
13	33	28,22	4,78	0,49	1,33	0,975	0,95	5,16	0,051	1,382	1,410	0,398	0,074
14	30	25,86	4,14	-0,23	1,15	0,975	0,95	4,46	0,038	1,196	1,207	0,340	0,074
15	19	18,82	0,18	-2,40	0,05	1,826	5,75	0,25	0,000	0,059	0,058	0,034	0,258
16	27	24,92	2,08	-0,52	0,58	0,988	1,00	2,25	0,010	0,601	0,593	0,170	0,076
17	16	21,16	-5,16	-1,68	-1,44	1,411	3,05	-6,10	0,148	-1,562	-1,614	-0,689	0,154
18	29	25,86	3,14	-0,23	0,87	0,975	0,95	3,39	0,022	0,907	0,903	0,255	0,074
19	27	23,08	3,92	-1,09	1,09	1,391	2,93	4,61	0,082	1,184	1,195	0,502	0,150
20	34	28,70	5,30	0,63	1,48	0,913	0,71	5,67	0,054	1,526	1,572	0,413	0,065
21	23	26,34	-3,34	-0,09	-0,93	0,836	0,44	-3,53	0,017	-0,956	-0,954	-0,228	0,054
22	27	26,83	0,17	0,06	0,05	0,722	0,09	0,18	0,000	0,049	0,048	0,010	0,040
23	21	24,95	-3,95	-0,52	-1,10	0,850	0,49	-4,18	0,025	-1,130	-1,137	-0,277	0,056
24	26	25,88	0,12	-0,23	0,03	0,738	0,13	0,13	0,000	0,036	0,035	0,007	0,042
25	27	26,86	0,14	0,07	0,04	1,749	5,19	0,18	0,000	0,045	0,044	0,024	0,237
26	35	25,89	9,11	-0,23	2,54	0,759	0,20	9,54	0,105	2,595	2,995	0,647	0,045
27	28	27,30	0,70	0,21	0,19	0,814	0,37	0,74	0,001	0,199	0,195	0,046	0,051
Min	16	18,82	-5,52	-2,40	-1,54	0,722	0,09	-6,10	0,000	-1,599	-1,656	-0,733	0,040
Max	35	33,45	9,11	2,09	2,54	2,295	9,64	9,54	0,181	2,595	2,995	0,647	0,408
Moy	26,63	26,63	0,00	0,00	0,00	1,134	1,93	-0,10	0,037	-0,013	0,001	-0,041	0,111
Médiane	27	26,83	0,14	0,06	0,04	0,987	1,00	0,18	0,017	0,045	0,044	0,010	0,075

Tableau D.2 : Analyse des résidus pour le modèle de l'équation (3.9)

Cas	Valeurs Observées	Valeurs Prédites	Résidus Ecart	Val. Préd. Ecart	Résidus Ecart	Val. Préd. Ecart Type	Distance Mahalns	Résidus Enlevés	Distance Cook	Résidus Stud. Int.	Résidus Stud. Ext.	DFFITS	Diagonale Matrice H
1	19	20,18	-1,18	-1,33	-0,82	0,480	3,07	-1,33	0,033	-0,876	-0,872	-0,312	0,114
2	18	18,65	-0,65	-1,65	-0,45	0,228	0,69	-0,66	0,002	-0,460	-0,452	-0,073	0,026
3	29	26,85	2,15	0,06	1,51	0,412	2,26	2,34	0,075	1,575	1,628	0,492	0,084
4	29	28,88	0,12	0,48	0,09	0,370	1,82	0,13	0,000	0,090	0,089	0,024	0,068
5	26	25,27	0,73	-0,27	0,51	0,665	5,87	0,94	0,031	0,582	0,574	0,303	0,217
6	28	28,69	-0,69	0,44	-0,49	0,441	2,59	-0,77	0,009	-0,512	-0,504	-0,164	0,096
7	29	28,94	0,06	0,49	0,04	0,362	1,74	0,07	0,000	0,046	0,045	0,012	0,064
8	31	27,40	3,60	0,17	2,53	0,560	4,17	4,26	0,460	2,747	3,248	1,389	0,155
9	29	28,76	0,24	0,45	0,17	0,512	3,48	0,27	0,002	0,180	0,176	0,068	0,129
10	27	26,26	0,74	-0,07	0,52	0,451	2,71	0,83	0,011	0,550	0,542	0,181	0,100
11	24	24,50	-0,50	-0,43	-0,35	0,271	0,97	-0,52	0,002	-0,357	-0,350	-0,068	0,036
12	28	27,55	0,45	0,20	0,31	0,385	1,97	0,48	0,003	0,327	0,321	0,090	0,073
13	33	35,24	-2,24	1,80	-1,57	0,419	2,33	-2,45	0,085	-1,645	-1,710	-0,525	0,086
14	30	31,74	-1,74	1,07	-1,22	0,354	1,66	-1,85	0,035	-1,258	-1,274	-0,326	0,062
15	19	20,75	-1,75	-1,21	-1,23	0,445	2,63	-1,93	0,060	-1,290	-1,309	-0,430	0,098
16	27	24,75	2,25	-0,38	1,58	0,787	8,24	3,24	0,526	1,895	2,012	1,334	0,305
17	16	14,86	1,14	-2,44	0,80	0,537	3,83	1,33	0,041	0,864	0,859	0,350	0,142
18	29	28,92	0,08	0,49	0,06	0,573	4,37	0,09	0,000	0,061	0,059	0,026	0,162
19	27	28,44	-1,44	0,39	-1,01	0,597	4,74	-1,75	0,088	-1,114	-1,120	-0,517	0,175
20	34	32,39	1,61	1,21	1,13	0,655	5,70	2,04	0,145	1,274	1,292	0,668	0,211
21	23	23,87	-0,87	-0,56	-0,61	0,377	1,89	-0,94	0,010	-0,634	-0,626	-0,172	0,070
22	27	27,39	-0,39	0,17	-0,28	0,288	1,10	-0,41	0,001	-0,282	-0,277	-0,057	0,041
23	21	20,19	0,81	-1,33	0,57	0,318	1,35	0,86	0,006	0,586	0,578	0,133	0,050
24	26	26,25	-0,25	-0,07	-0,17	0,268	0,95	-0,26	0,000	-0,176	-0,172	-0,033	0,035
25	27	26,00	1,00	-0,12	0,70	0,676	6,08	1,28	0,061	0,793	0,787	0,424	0,225
26	35	36,44	-1,44	2,05	-1,01	0,518	3,56	-1,65	0,059	-1,082	-1,086	-0,423	0,132
27	28	28,66	-0,66	0,43	-0,46	0,302	1,21	-0,69	0,004	-0,474	-0,467	-0,101	0,045
Min	16	14,86	-2,24	-2,44	-1,57	0,228	0,69	-2,45	0,000	-1,645	-1,710	-0,525	0,026
Max	35	36,44	3,60	2,05	2,53	0,787	8,24	4,26	0,526	2,747	3,248	1,389	0,305
Moy	26,63	26,58	0,04	0,00	0,03	0,454	3,00	0,11	0,065	0,052	0,074	0,085	0,111
Médiane	27	27,39	0,06	0,17	0,04	0,441	2,59	0,07	0,011	0,046	0,045	0,012	0,096

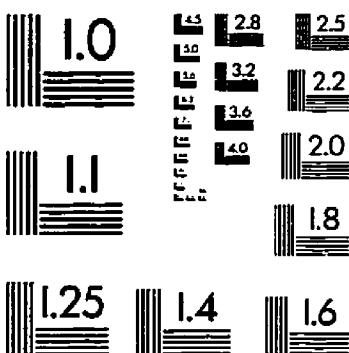
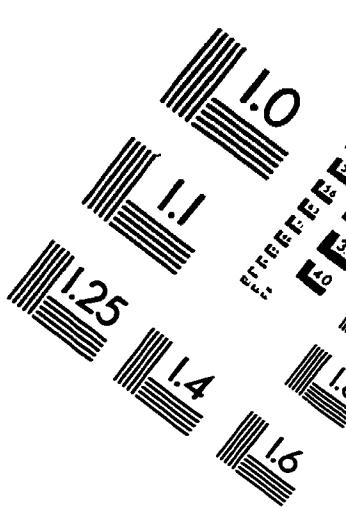
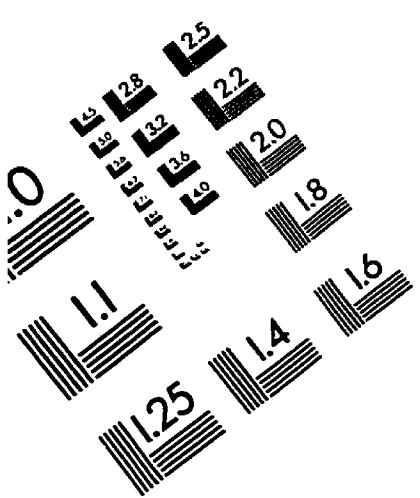
Tableau D.3 : Analyse des résidus pour le modèle complet

Cas	Valeurs Observées	Valeurs Prédites	Résidus	Val. Préd.	Résidus	Val. Préd.	Distance Mahalns	Résidus Enlevés	Distance Cook	Résidus Stud. Int.	Résidus Stud. Ext.	DFFITS	Diagonale Matrice H
1	19	20,36	-1,36	-1,34	-1,24	0,517	4,78	-1,75	0,062	-1,402	-1,444	-0,768	0,221
2	18	19,16	-1,16	-1,60	-1,06	0,658	8,32	-1,81	0,107	-1,317	-1,347	-1,003	0,357
3	29	28,06	0,94	0,31	0,85	0,503	4,46	1,19	0,027	0,960	0,957	0,492	0,209
4	29	30,18	-1,18	0,76	-1,07	0,466	3,69	-1,43	0,034	-1,179	-1,193	-0,557	0,179
5	26	24,57	1,43	-0,44	1,30	0,632	7,61	2,13	0,138	1,586	1,662	1,166	0,330
6	28	28,61	-0,61	0,42	-0,55	0,384	2,20	-0,69	0,005	-0,587	-0,576	-0,214	0,122
7	29	29,41	-0,41	0,60	-0,37	0,408	2,60	-0,47	0,003	-0,400	-0,390	-0,156	0,137
8	31	29,89	1,11	0,70	1,01	0,796	12,61	2,33	0,260	1,464	1,516	1,585	0,522
9	29	29,16	-0,16	0,54	-0,14	0,682	9,02	-0,26	0,002	-0,184	-0,179	-0,142	0,384
10	27	26,52	0,48	-0,02	0,44	0,478	3,94	0,59	0,006	0,487	0,476	0,229	0,189
11	24	23,82	0,18	-0,60	0,16	0,536	5,20	0,23	0,001	0,185	0,180	0,100	0,237
12	28	28,23	-0,23	0,34	-0,21	0,519	4,81	-0,30	0,002	-0,242	-0,235	-0,126	0,222
13	33	34,63	-1,63	1,72	-1,48	0,608	6,96	-2,34	0,153	-1,773	-1,896	-1,256	0,305
14	30	30,98	-0,98	0,93	-0,89	0,576	6,15	-1,35	0,046	-1,049	-1,052	-0,646	0,274
15	19	19,71	-0,71	-1,49	-0,64	0,719	10,13	-1,23	0,060	-0,848	-0,842	-0,726	0,427
16	27	26,51	0,49	-0,02	0,44	0,729	10,45	0,87	0,030	0,589	0,579	0,512	0,439
17	16	15,45	0,55	-2,40	0,50	0,751	11,13	1,02	0,044	0,677	0,667	0,622	0,465
18	29	29,83	-0,83	0,69	-0,76	0,784	12,22	-1,69	0,132	-1,076	-1,081	-1,096	0,507
19	27	27,94	-0,94	0,28	-0,86	0,627	7,48	-1,39	0,058	-1,041	-1,043	-0,724	0,325
20	34	32,34	1,66	1,23	1,51	0,788	12,37	3,40	0,545	2,158	2,436	2,499	0,513
21	23	23,35	-0,35	-0,70	-0,32	0,665	8,52	-0,56	0,010	-0,402	-0,393	-0,298	0,365
22	27	27,16	-0,16	0,11	-0,14	0,733	10,55	-0,28	0,003	-0,192	-0,187	-0,167	0,443
23	21	20,16	0,84	-1,39	0,77	0,460	3,58	1,02	0,017	0,844	0,837	0,385	0,175
24	26	25,26	0,74	-0,29	0,67	0,588	6,44	1,03	0,028	0,794	0,786	0,496	0,285
25	27	26,35	0,65	-0,06	0,59	0,630	7,56	0,96	0,028	0,716	0,706	0,493	0,328
26	35	34,11	0,89	1,60	0,81	0,829	13,79	2,07	0,222	1,235	1,255	1,437	0,567
27	28	27,24	0,76	0,13	0,69	0,760	11,43	1,44	0,091	0,948	0,946	0,902	0,477
Min	16	15,45	-1,63	-2,40	-1,48	0,384	2,20	-2,34	0,001	-1,773	-1,896	-1,256	0,122
Max	35	34,63	1,66	1,72	1,51	0,829	13,79	3,40	0,545	2,158	2,436	2,499	0,567
Moy	26,63	26,63	0,00	0,00	0,00	0,623	7,70	0,10	0,078	0,035	0,042	0,113	0,333
Médiane	27	27,24	-0,16	0,13	-0,14	0,630	7,56	-0,26	0,034	-0,184	-0,179	-0,126	0,328

Tableau D.4 : Analyse des résidus pour le modèle optimal

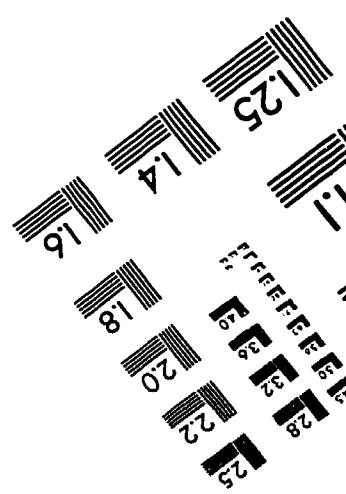
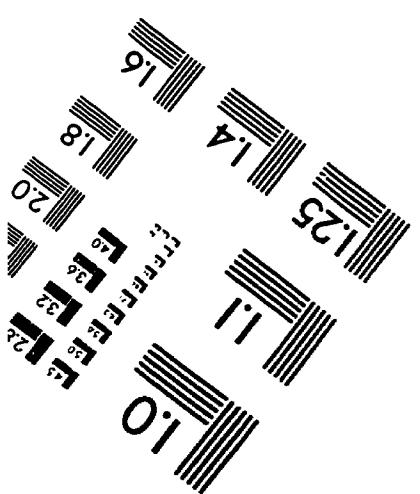
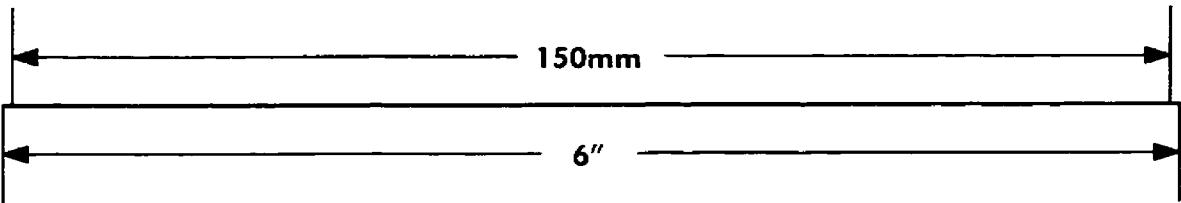
Cas	Valeurs Observées	Valeurs Prédictes		Résidus		Val. Prédict.		Préd.	Résidus	Distance Mahalan	Résidus Enlevés	Cook	Distance Stud. Int.	Résidus Stud. Ext.	DFFITS	Diagonale	Matrice H
		Ecart	Ecart	Ecart	Ecart	Type											
1	19	20,58	-1,58	-1,33	-1,53	0,397	3,96	-1,85	0,078	-1,653	-1,730	-0,717	0,147				
2	18	19,37	-1,37	-1,59	-1,32	0,260	1,70	-1,46	0,021	-1,363	-1,394	-0,361	0,063				
3	29	27,85	1,15	0,26	1,11	0,392	3,86	1,34	0,040	1,197	1,211	0,495	0,143				
4	29	30,05	-1,05	0,74	-1,01	0,405	4,13	-1,24	0,036	-1,099	-1,105	-0,470	0,153				
5	26	24,66	1,34	-0,43	1,30	0,548	7,55	1,86	0,151	1,527	1,580	0,985	0,280				
6	28	28,66	-0,66	0,44	-0,63	0,341	2,93	-0,74	0,009	-0,671	-0,662	-0,231	0,108				
7	29	29,39	-0,39	0,60	-0,37	0,366	3,36	-0,44	0,004	-0,040	-0,390	-0,147	0,125				
8	31	29,94	1,06	0,72	1,02	0,671	11,32	1,82	0,216	1,339	1,366	1,161	0,419				
9	29	28,97	0,03	0,51	0,03	0,414	4,31	0,03	0,000	0,000	0,028	0,012	0,160				
10	27	26,47	0,53	-0,04	0,51	0,410	4,22	0,62	0,009	0,554	0,544	0,234	0,156				
11	24	23,79	0,21	-0,62	0,20	0,463	5,38	0,26	0,002	0,221	0,216	0,108	0,199				
12	28	28,13	-0,13	0,32	-0,12	0,433	4,72	-0,15	0,001	-0,135	-0,132	-0,061	0,175				
13	33	34,53	-1,53	1,73	-1,48	0,388	3,79	-1,78	0,069	-1,593	-1,658	-0,670	0,140				
14	30	31,10	-1,10	0,98	-1,06	0,488	5,99	-1,41	0,069	-1,203	-1,217	-0,650	0,222				
15	19	20,02	-1,02	-1,45	-0,98	0,552	7,66	-1,42	0,089	-1,161	-1,171	-0,737	0,284				
16	27	26,41	0,59	-0,05	0,57	0,672	11,36	1,01	0,067	0,744	0,736	0,627	0,421				
17	16	15,55	0,45	-2,43	0,43	0,437	4,81	0,54	0,008	0,476	0,467	0,218	0,178				
18	29	29,59	-0,59	0,65	-0,57	0,609	9,32	-0,91	0,044	-0,709	-0,700	-0,508	0,345				
19	27	27,71	-0,71	0,23	-0,69	0,507	6,46	-0,94	0,033	-0,788	-0,781	-0,438	0,239				
20	34	32,50	1,50	1,28	1,45	0,488	6,00	1,93	0,129	1,645	1,720	0,920	0,222				
21	23	23,63	-0,63	-0,66	-0,61	0,435	4,75	-0,77	0,016	-0,673	-0,664	-0,307	0,176				
22	27	27,33	-0,33	0,15	-0,32	0,460	5,33	-0,41	0,005	-0,356	-0,349	-0,173	0,198				
23	21	20,35	0,65	-1,38	0,63	0,285	2,05	0,70	0,006	0,653	0,644	0,185	0,076				
24	26	25,12	0,88	-0,33	0,85	0,440	4,87	1,08	0,033	0,942	0,940	0,441	0,180				
25	27	26,37	0,63	-0,06	0,60	0,546	7,51	0,87	0,032	0,711	0,703	0,436	0,278				
26	35	33,90	1,10	1,59	1,06	0,723	13,16	2,15	0,349	1,484	1,531	1,493	0,487				
27	28	27,41	0,59	0,17	0,57	0,675	11,47	1,02	0,069	0,748	0,740	0,636	0,425				
Min	16	15,55	-1,58	-2,43	-1,53	0,260	1,70	-1,85	0,000	-1,519	-1,568	-0,742	0,059				
Max	35	34,53	1,50	1,73	1,45	0,723	13,16	2,15	0,349	1,738	1,828	1,266	0,411				
Moy	26,63	26,64	-0,01	0,00	-0,01	0,474	6,00	0,06	0,059	0,036	0,040	0,071	0,185				
Médiane	27	27,41	0,03	0,17	0,03	0,440	4,87	0,03	0,033	0,115	0,112	0,069	0,159				

IMAGE EVALUATION
TEST TARGET (QA-3)



150mm

65



© 1993, Applied Image, Inc., All Rights Reserved