

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAITRISE EN SCIENCES DES PÂTES ET PAPIERS

PAR
ROBERT LANOUILLE

RAFFINAGE DE COPEAUX PROVENANT DE CUISSONS AU BISULFITE
(PROCÉDÉ À TRÈS HAUT RENDEMENT): OPTIMISATION ET
MODÉLISATION

AVRIL 1993

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	ii
LISTE DES TABLEAUX	v
LISTE DES FIGURES	vii
RÉSUMÉ	ix
REMERCIEMENTS	xi
NOMENCLATURE	xii
1. INTRODUCTION	1
2. REVUE DE LA LITTÉRATURE.	5
3. TRAVAUX PRÉLIMINAIRES.	10
3.1 Première étape: Le design Plackett-Burman:	11
3.2 Deuxième étape: Le plan central composite.	12
4. EXPÉRIMENTATION	16
4.1 Approvisionnement en bois.	16
4.2 Caractérisation des copeaux.	16
4.3 Cuisson des copeaux.	16

4.4 Raffinage des copeaux.	18
4.4.1 Plan expérimental	18
4.4.2 Description du raffineur.	22
4.4.2 Raffinage des échantillons.	23
4.5 Méthodes utilisées.	25
4.5.1 Évaluation des propriétés des pâtes et papiers.	25
4.5.2 Calcul d'intensité de raffinage.	26
4.6 Revue de la statistique et du vocabulaire utilisé	26
5. RÉSULTATS ET DISCUSSION	30
5.1 Propriétés des pâtes et papiers du premier stade de raffinage.	31
5.1.1 Propriétés des pâtes du stade 1.	37
5.1.2 Propriétés des papiers du stade 1.	42
5.2 Propriétés des pâtes et papiers du 2 ^e stade de raffinage.	48
6. APPLICATION À L'INDUSTRIE	68
6.1 Modélisation des propriétés de la pâte finale.	71
6.2 Optimisation des propriétés papetières du stade 2.	72
6.2.1 Optimisation avec le logiciel GAMS.	76
6.2.2 Optimisation par réponse de surface.	77
7. CONSIDÉRATIONS ÉCONOMIQUE	89
CONCLUSION	94
BIBLIOGRAPHIE	95
ANNEXE 1. EXPÉRIMENTATION PLACKETT-BURMAN	97

ANNEXE 2. EXPÉRIMENTATION CCD	110
ANNEXE 3. CONDITIONS D'OPÉRATION DU RAFFINEUR POUR LES STADES 1 ET 2	120
ANNEXE 4. CALCUL DE L'INTENSITÉ DE RAFFINAGE ET DE LA PUISSANCE SPÉCIFIQUE	130
ANNEXE 5. PROPRIÉTÉS DES PÂTES ET PAPIERS DU STADE 1 ...	137
ANNEXE 6. PROPRIÉTÉS DES PÂTES ET PAPIERS DU STADE 2 ...	142
ANNEXE 7. OPTIMISATION AVEC LE LOGICIEL GAMS	147

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1	Propriétés des pâtes de l'usine James MacLaren de Masson.	2
Tableau 3.1	Variables étudiées avec le design Plackett-Burman.	12
Tableau 3.2	Variables pour le plan central composite.	13
Tableau 3.3	Paramètres optimaux pour les cuissons CCD.	15
Tableau 4.1	Caractérisation des copeaux.	17
Tableau 4.2	Points expérimentaux utilisés.	21
Tableau 4.3	Normes standard utilisées.	25
Tableau 5.1	Comparaison des deux cuissons.	30
Tableau 5.2	Régression sur les propriétés des pâtes du 1 ^{er} stade.	39
Tableau 5.3	Régression sur les propriétés des papiers à l'état sec du 1 ^{er} stade.	43
Tableau 5.4	Résultats obtenus avec GAMS pour 4 niveaux d'indice d'égouttage au stade 1.	45
Tableau 5.5	Régression sur les propriétés optiques des pâtes du stade 2.	51
Tableau 5.6	Régression sur les propriétés à l'état sec des papiers du stade 2.	53
Tableau 5.7	Régression sur les propriétés des pâtes du stade 2.	54
Tableau 6.1	Éléments de la matrice $(X'X)^{-1}$	70
Tableau 6.2	Matrice des corrélations entre les variables principales et certaines interactions.	71
Tableau 6.3	Régression sur les propriétés des pâtes du stade 2 en fonction de l'intensité et de l'énergie spécifique.	73

Tableau 6.4	Régression sur les propriétés optiques des pâtes du stade 2 en fonction de l'intensité et de l'énergie spécifique.	74
Tableau 6.5	Régression sur les propriétés à l'état sec des papiers du stade 2 en fonction de l'intensité et de l'énergie spécifique. .	75
Tableau 6.6	Distribution d'énergie spécifique pour un indice d'égouttage final de 500 ml.	79
Tableau 6.7	Comparaison entre les 2 optima trouvés.	85
Tableau 6.8	Valeurs prédites et intervalle de confiance à 95%.	87
Tableau 7.1	Conditions optimales.. . . .	89
Tableau 7.2	Comparaison des propriétés du mélange prédit et de la pâte actuellement utilisée.. . . .	91
Tableau 7.3	Propriétés prédites du nouveau mélange.	92

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Étapes suivies pour l'optimisation de la pâte au bisulfite à très haut rendement.	4
Figure 4.1	Autoclave de 700 litres utilisé pour les cuissons.	18
Figure 4.2	Étapes de la cuisson.	19
Figure 4.3	Unité pilote Sunds Defibrator CD-300.	23
Figure 4.4	Agencement des disques du raffineur CD-300	24
Figure 5.1	Résultats de la procédure RSREG.	32
Figure 5.2	Résultats de la procédure REG avec l'option SELECTION=AJSRSQ.	34
Figure 5.3	Résultats de la procédure REG.	36
Figure 5.4	Distribution des points expérimentaux.	37
Figure 5.5	Analyse des résidus de la procédure REG.	38
Figure 5.6	Réponse de surface pour l'énergie spécifique et l'indice d'égouttage.	41
Figure 5.7	Réponses de surface pour les propriétés physiques du stade 1.	44
Figure 5.8	Variations des propriétés relativement à l'énergie spécifique pour le stade 1.	47
Figure 5.9	Variation de l'indice d'égouttage et de l'intensité de raffinage pour le stade 1.	49
Figure 5.10	Niveaux d'indice d'égouttage de stade 1 utilisés pour l'analyse du stade 2.	56
Figure 5.11	Iso-réponses pour l'indice de déchirure du stade 2.	57
Figure 5.12	Iso-réponses pour l'indice d'égouttage du stade 2.	59

Figure 5.13	Superposition de l'indice de déchirure et de l'indice d'égouttage pour un CSF de 600 ml au stade 1.	60
Figure 5.14	Superposition de la longueur de rupture et de l'indice d'égouttage pour un CSF de 600 ml au stade 1.	61
Figure 5.15	Superposition de l'énergie spécifique de raffinage et de l'indice d'égouttage pour un CSF de 600 ml au stade 1. . . .	63
Figure 5.16	Variation de l'indice de déchirure pour les points 5 et 6.	64
Figure 5.17	Variation de la longueur de rupture pour les points 5 et 6. . . .	65
Figure 5.18	Variation de l'énergie spécifique de raffinage pour les points 5 et 6.	66
Figure 6.1	Variations de l'indice d'égouttage de la pâte final en fonction de l'énergie spécifique des stade 1 et 2.	78
Figure 6.2	Variations de l'indice de déchirure et de la longueur de rupture en fonction de l'intensité des stades 1 et 2 pour le point 1.	80
Figure 6.3	Variations de l'indice de déchirure et de la longueur de rupture en fonction de l'intensité des stades 1 et 2 pour le point 2.	81
Figure 6.4	Variations de l'indice de déchirure et de la longueur de rupture en fonction de l'intensité des stades 1 et 2 pour le point 3.	82
Figure 6.5	Variations de l'indice de déchirure et de la longueur de rupture en fonction de l'intensité des stades 1 et 2 pour le point 4.	83

RÉSUMÉ

Depuis quelques années, le Canada subit une crise économique importante. L'industrie des pâtes et papiers n'est pas épargnée par cette récession. La qualité du papier vendu doit augmenter sans cesse même si, ces dernières années, le prix payé pour ce papier est très bas. Pour survivre, les industries se doivent de performer de plus en plus, et ce, à un coût minimal. Dans cette quête de fabriquer un produit de qualité tout en réduisant les coûts, l'optimisation des procédés les plus onéreux, ou moins performants, s'avère indispensable. C'est donc dans cette optique que l'usine James Maclaren de Masson a débuté une étude en 1990 qui se donnait comme but l'optimisation du procédé de mise en pâte au sulfite à très haut rendement.

Les deux premières étapes de cette optimisation consistaient à trouver les conditions de cuisson permettant d'obtenir une pâte de qualité, tout en minimisant la demande biologique en oxygène (DBO_5) et la toxicité de l'effluent. Le but de la présente approche consiste à trouver des conditions de raffinage qui valoriseront au maximum les caractéristiques de cette pâte. Cette étude utilise une approche statistique. Un plan expérimental de type composite centré a été utilisé de façon à permettre d'analyser l'influence des variables étudiées ainsi que des interactions qui existe entre ces variables. Des équations de modélisation sont définies et utilisées pour optimiser les variables indépendantes. De plus,

l'optimisation a été faite en fonction de variables secondaires, comme l'intensité de raffinage et l'énergie spécifique de raffinage, ce qui permet une mise à l'échelle industrielle plus facile.

L'optimisation des conditions de raffinage de la pâte bisulfite à très haut rendement (PTHR) devrait permettre d'obtenir une pâte de qualité supérieure à celle de la pâte présentement utilisée par l'usine de Masson. Le remplacement de la pâte actuelle par cette nouvelle pâte diminuerait de 6% la quantité de pâte au bisulfite à très haut rendement dans le mélange final, d'où, une économie d'environ 450 000\$/an. Ce remplacement offre, de plus, l'opportunité d'augmenter la production de produit fini de l'usine de 15%, puisqu'une quantité moindre de PTHR est nécessaire.

Ce genre d'optimisation représente donc un moyen important pour atteindre un plus haut seuil d'efficacité de l'usine, permettant ainsi d'augmenter la compétitivité de nos industries sur le marché international.

REMERCIEMENTS

Je remercie sincèrement toutes les personnes qui m'ont permis de réaliser ce travail, tant mes confrères et consoeurs de travail qui m'ont aidé de leurs conseils, que les étudiants qui ont mis la main à la pâte.

Des remerciements spéciaux à mon directeur de maîtrise, M. Jacques L. Valade, pour ses conseils judicieux et son support constant, et à Gordon Broderick, du Centre de Technologie Noranda, qui a été pour moi une source de renseignements inépuisable.

Je tiens aussi à remercier ma famille, que j'ai délaissée de nombreuses soirées et fins de semaine pendant la rédaction de ce mémoire.

NOMENCLATURE

ADJRSQ	ADJUSTED R-SQUARE ou r^2 ajusté pour le nombre de paramètres dans le modèle
BLOC	variable BLOC qui permet l'évaluation de la différence entre les deux cuissons
CCD	plan composite avec points centraux (Central Composite Design)
CONS1	variable CONSISTANCE pour le stade 1
CONS2	variable CONSISTANCE pour le stade 2
Cp	critère Cp développé par Mallow pour aider à la sélection des modèles
CSF	indice d'égouttage
DBO ₅	demande biologique en oxygène
DCM	dichlorométhane
DCO	demande chimique en oxygène
ENER1	variable ÉNERGIE SPÉCIFIQUE pour le stade 1
ENER2	variable ÉNERGIE SPÉCIFIQUE pour le stade 2
ESP1	variable ESPACEMENT pour le stade 1
ESP2	variable ESPACEMENT pour le stade 2
ETA	énergie totale absorbée lors de la rupture
GAMS	logiciel d'optimisation (General Algebraic Modeling System)
INT1	variable INTENSITÉ DE RAFFINAGE pour le stade 1

INT2	variable INTENSITÉ DE RAFFINAGE pour le stade 2
Kj	nombre Kj (Indice Kappa modifié)
MINOS	algorithme du logiciel GAMS qui permet de trouver le minimum d'une fonction non-linéaire.
MSE	carré moyen
PBR	plan statistique développé par Plackett et Burman (Plackett-Burman Revisé)
PMM	pâte mécanique de meule
PTHR	pâte bisulfite à très haut rendement
R-SQUARE	r^2 ou coefficient de détermination
REG	routine du logiciel SAS utilisée pour les analyse de régression
RSREG	routine du logiciel SAS permettant de faire une régression avec le modèle complet et d'évaluer l'erreur expérimentale
SAS	logiciel statistique pour le traitement des données (Statistics Analysis System)
SSE	somme des carrés des résidus
SSR	somme des carrés due à la régression
STEPWISE	option de la procédure RÉGRESSION du logiciel SAS qui permet l'introduction et le retrait des paramètres dans le modèle.

CHAPITRE 1.

INTRODUCTION

Depuis quelques années, le Canada subit une crise économique importante. L'industrie des pâtes et papiers n'est pas épargnée par cette récession. La qualité du papier vendu doit augmenter sans cesse même si, ces dernières années, le prix payé pour ce papier est très bas. Pour survivre, les industries se doivent de performer de plus en plus, et ce, à un coût minimal. Dans cette quête de fabriquer un produit de qualité tout en réduisant les coûts, l'optimisation des procédés les plus onéreux, ou moins performants, s'avère indispensable. C'est donc dans cette optique que l'usine James Maclaren de Masson a débuté une étude en 1990 qui se donnait comme but l'optimisation du procédé de mise en pâte au sulfite à très haut rendement (PTHR).

L'usine de Masson fabrique du papier journal à partir de deux pâtes produites à l'usine même, soit: 56% de pâte mécanique de meule (PMM) et 44% de pâte au bisulfite à très haut rendement. Le tableau 1.1 montre les propriétés physiques de ces deux pâtes individuelles en plus de celles du mélange. Les propriétés ont été mesurées sur des formettes standards. En plus de ces deux pâtes, une certaine quantité de pâte Kraft blanchie peut être ajoutée, si nécessaire, pour renforcer les propriétés du mélange.

CODE		PMM	PTHR	Mélange
PROPRIÉTÉS DES PÂTES				
INDICE D'ÉGOUTTAGE (ml)		49	415	115
FRACTIONS BAUER McNETT (%)	R 14	1.00	28.00	
	14/28	10.60	27.00	
	28/48	19.90	16.60	
	48/100	19.70	9.00	
	100/200	11.60	3.00	
	P 200	37.20	16.40	
LONGUEUR DES FIBRES (mm) :	- BAUER McNETT	0.74	1.70	
	- KAJAANI	0.69	1.60	
REJETS PULMAC (%)		0.18	0.10	
PROP. STRUCTURALES DU PAPIER				
VOLUME SPÉCIFIQUE (cm ³ /g)		2.51	3.04	2.80
DENSITÉ (g/cm ³)		0.40	0.33	0.36
LONGUEUR DE RUPTURE (km)		3.87	4.19	3.74
ALLONGEMENT (%)		1.32	1.40	1.32
TEA (g/cm)		18.63	21.61	18.08
IND. D'ÉCLATEMENT (kPa*m ² /g)		1.83	2.12	2.14
IND. DE DÉCHIRURE (mN*m ² /g)		3.51	12.62	8.49
PROP. OPTIQUES DU PAPIER				
BLANCHEUR ISO (%)		57.08	52.48	55.06
OPACITÉ ISO (%)		97.89	91.64	96.81
COEFF. DE DIFFUSION (m ² /kg)		72.30	39.11	59.88
COEFF. D'ABSORPTION (m ² /kg)		4.85	3.37	4.48
L*		86.53	85.05	85.50
a*		0.92	1.78	1.31
b*		11.40	13.48	11.56

Tableau 1.1 Propriétés des pâtes de l'usine James MacLaren de Masson.

La PTHR est une pâte à la fois dispendieuse à produire et hautement polluante. Les normes gouvernementales devenant de plus en plus sévères, les coûts associés à cette pâte ne cesseront de croître au cours des prochaines années. Il devient donc impératif d'optimiser ce procédé en augmentant les propriétés de résistance de cette pâte de façon à pouvoir en incorporer une quantité moindre au mélange, et, en même temps, de minimiser la charge polluante.

La figure 1.1 illustre les diverses étapes suivies lors de cette optimisation. Les deux premières étapes de cette optimisation consistaient à trouver les conditions de cuisson permettant d'obtenir une pâte de qualité, tout en minimisant la DBO et la toxicité de l'effluent. Nous ne ferons que présenter brièvement les conclusions de ces étapes puisqu'elles ne font pas partie intégrante de l'étude actuelle même si les résultats obtenus nous servent de point de départ.

Le but de la présente étape consiste à trouver des conditions de raffinage qui valoriseront au maximum les caractéristiques de cette pâte. De plus, comme cette optimisation est faite à l'échelle pilote sur un raffineur de 300 mm, il est impensable de s'en tenir aux variables primaires comme l'espacement des disques et la consistance. En effet, la faible dimension de l'équipement fait que les conditions trouvées seraient différentes sur un raffineur industriel. Pour palier à ce problème, nous optimiserons le procédé également en fonction de variables secondaires, comme l'intensité de raffinage et l'énergie spécifique de raffinage, ce qui semble donner des résultats similaires sur des raffineurs de différentes

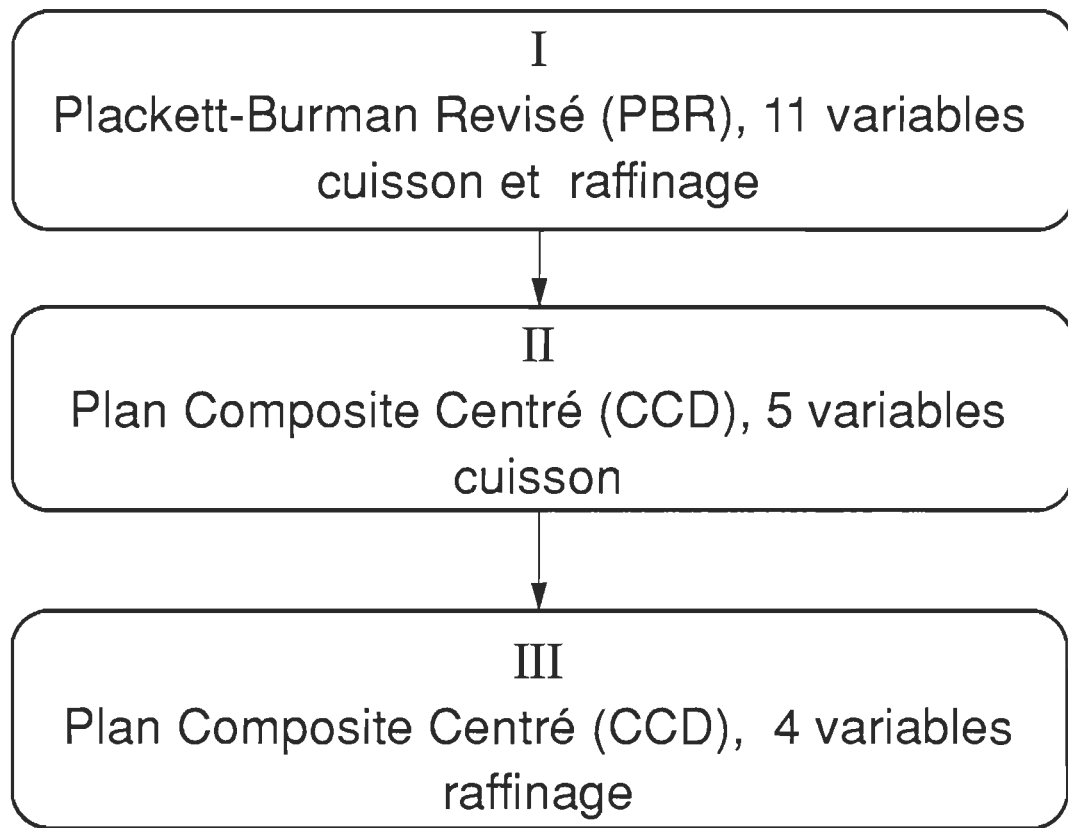


Figure 1.1 Étapes suivies pour l'optimisation de la pâte au bisulfite à très haut rendement.

grosseurs.

Dans une dernière partie nous tenterons de relier le tout aux propriétés morphologiques des fibres de façon à mieux comprendre ce qui se passe lors du raffinage.

CHAPITRE 2.

REVUE DE LA LITTÉRATURE.

Certains chercheurs, comme Lemay (1), ont démontré qu'il est possible d'améliorer de façon appréciable les propriétés mécaniques de la pâte sulfite à haut rendement par un raffinage adéquat. Levlin (2) résume ainsi les effets primaires du raffinage sur des fibres individuelles:

- enlèvement de la paroi primaire ainsi que de la première couche de la paroi secondaire.
- fibrillation interne
- fibrillation externe
- coupe de certaines fibres
- dissolution d'une partie des composants chimiques de la fibre.

L'enlèvement des parois primaire et secondaire S1 permet d'exposer la paroi secondaire S2. Le traitement mécanique, effectué subséquemment sur cette dernière, vise le développement de liens entre les fibres par fibrillation externe qui consiste à un arrachement partiel de microfibrilles à la surface de la fibre. La fibrillation interne, pour sa part, réfère à un relâchement dans la structure interne ce qui rend la fibre plus molle et plus flexible. Les fibres peuvent alors s'imbriquer plus facilement les unes sur les autres lors de la formation de la feuille. Pendant ce relâchement une partie de la lignine et des hémicelluloses se

trouvent libérées dans l'eau et dissoutes. Lors du raffinage une partie des fibres subissent un effort trop grand et se brisent.

Pour tenter d'expliquer les effets du raffinage sur la fibre, plusieurs théories ont vu le jour; elles sont basées sur le fait que le raffinage est fonction de deux facteurs principaux (3):

- la quantité d'énergie appliquée
- la manière dont elle est appliquée

La première théorie d'importance à avoir vu le jour est la théorie de la charge spécifique d'arêtes (4). Cette théorie suppose que l'énergie est transmise à la fibre par l'arête des barres du raffineur plutôt que par la surface de contact et que les amas de fibres reçoivent le traitement et non les fibres individuelles (5). Les calculs sont faits à partir de la longueur moyenne des lames. L'énergie est donc appliquée par rapport à une certaine longueur de lame ou d'arête. Le raffinage s'explique ainsi par une combinaison de compression et de cisaillement périodiques, bien définie et générée par le croisement de deux arêtes, qui permettrait la séparation et le développement des fibres (6,7). Ces compressions axiales sont accompagnées par des frictions fibres à fibres lorsque le raffinage s'effectue à haute consistance (7,8). La principale lacune de cette théorie est qu'elle tient compte de la géométrie du raffineur mais fait abstraction des conditions de la pâte qui circule dans ce raffineur. Elle peut cependant être très utile pour évaluer des plaques différentes sur un même raffineur dans des conditions identiques. Danforth (10) introduit, en 1986, une autre théorie basée

sur le nombre moyen d'impacts subit par une fibre lors de son passage dans le raffineur et sur la notion de sévérité d'impact. Sa théorie tient compte de la consistance de raffinage et de la vitesse de rotation du disque, en plus des paramètres géométriques du raffineur, élargissant la plage d'application possible. Cette théorie permet de plus de comparer des raffineurs très différents en dimension. Plusieurs auteurs (9,10,11,12) ont adopté une certaine terminologie:

- N: nombre d'impacts que les fibres subissent lors de leurs passage dans le raffineur.
- S: la sévérité de ces impacts.
- e: l'énergie spécifique par impact.

Miles et May (13) ont développé des équations qui permettent de calculer la vitesse radiale de la pâte dans le raffineur à partir des consistances d'entrée et de sortie, de la vitesse de rotation et du diamètre du raffineur. Cette vitesse déterminera le temps de résidence des fibres dans le raffineur et, par conséquent, le nombre d'impacts qu'elles auront à subir. Arjas (14) nous montre l'importance du temps de résidence et que le design et les paramètres d'opération du raffineur influencent la distribution du temps de résidence pouvant ainsi conduire à des pâtes plus ou moins homogènes.

Lors du raffinage il est donc possible de diminuer l'indice d'égouttage en variant le nombre et la sévérité des impacts (9,10,15). L'énergie appliquée peut, par exemple, être basse mais appliquée à haute intensité, ce qui risque de produire un taux de coupe plus élevé. Elle peut aussi être appliquée à haute énergie mais

à basse intensité, ce qui produira moins de coupe mais peut-être aussi un travail insuffisant sur la fibre. Stationwala (15) affirme qu'au dessus d'un seuil minimal la combinaison d'une basse énergie appliquée à haute intensité au premier stade suivi d'un second stade à basse intensité serait bénéfique. En effet, les études de Stationwala ont montré qu'une faible intensité produit des pâtes plus résistantes mais de faible opacité tandis qu'à haute intensité la pâte produite aurait une plus faible résistance mais de meilleures propriétés d'impression. La formation de flocs plus ou moins denses affecte aussi la quantité d'énergie transmise à la fibre (3). L'essence de bois utilisée ainsi que la consistance détermine la facilité à former des flocs et la densité de ceux-ci.

La consistance a donc une importance primordiale lors du raffinage. Elle influence fortement le temps de résidence puisque l'eau contenue dans la pâte augmente son poids donc la pâte sera plus affectée par la force centrifuge qui la pousse lvers la périphérie du raffineur (15). Une élévation de consistance entraîne une accumulation plus marquée de la pâte dans la section grossière à mesure que l'effet de la force centrifuge diminue (7). Elle affecte le mécanisme de séparation des fibres en modifiant le coefficient de friction entre les fibres (7,12). Une consistance élevée permet la formation de flocs plus denses pour recevoir l'impact, donc apporte une certaine protection aux fibres. Miles (11) a trouvé que les pâtes au sulfite à bas rendement répondent mieux à des raffinages à moyenne (12%) ou haute (25%) consistance. Dans cette plage de consistance, l'énergie est transmise à la fibre par friction entre les fibres et la plaque. Les

forces de friction sont ensuite retransmises à travers la masse fibreuse par friction fibre-fibre produisant des contraintes en tension et en compression sur les fibres individuelles (12). A basse consistance, les forces de friction ne sont pas transmises de fibres en fibres résultant ainsi en une plus grande interaction barre-fibre-barre responsable des coupures de fibres.

D'un autre côté, Lemay (1) affirme qu'il est possible d'opérer la machine à papier avec un indice d'égouttage bas lorsque la pâte contient une portion de pâte au sulfite, cela étant dû à la rapidité de drainage de cette pâte riche en lignine. Il serait ainsi possible d'utiliser la pâte au sulfite à haut rendement dans une plage d'indice d'égouttage assez grand.

CHAPITRE 3.

TRAVAUX PRÉLIMINAIRES.

Dans le but d'optimiser le procédé, diverses possibilités peuvent être envisagées. L'une d'entre elles consiste à modifier ou à remplacer l'une des pâtes existantes; et celle qui est la plus prometteuse à cet égard est la pâte sulfite car c'est la pâte la plus coûteuse et la plus polluante. Cette pâte ayant comme fonction principale le renforcement du mélange final, l'optimisation de ce procédé devrait conduire à une augmentation de la qualité du produit fini ou à une baisse du pourcentage à incorporer au mélange. L'optimisation avait donc pour but d'augmenter la résistance de la pâte en augmentant le taux de sulfonation tout en choisissant des conditions qui minimiseraient la toxicité et la DBO de la liqueur résiduaire.

Pour ce faire, il s'agissait d'abord de déterminer quelles variables d'opération du lessiveur étaient importantes et lesquelles ne l'étaient pas. En théorie un nombre important de facteurs peuvent jouer un rôle dans le déroulement de chacune des étapes de mise en pâtes. Il devient donc nécessaire d'identifier les plus importants de ces facteurs. Ce tri des facteurs nous force donc à adopter un plan expérimental composé de deux étapes.

- i) identification des facteurs importants par un design expérimental de type Plackett - Burman (figure 1.1-I).

- ii) élaboration d'une surface de réponse par plan factoriel à deux ou trois niveaux; ceci selon le degré de non - linéarité (figure 1.1-II).

3.1 Première étape: Le design Plackett-Burman:

Ce design consiste essentiellement en une fraction très spécifique d'un plan factoriel complet. Il permet d'évaluer les effets principaux sans le bruit introduit par des alias. L'annexe 1 (16) décrit de façon plus complète ce type de design.

Bien que ce design se base sur deux niveaux de chaque facteur, nous pouvons aussi introduire un certain nombre de points centraux. Situés au milieu de l'écart pour chacun des facteurs, ces points servent à évaluer le degré de non-linéarité que possède la surface de réponse en question.

Les facteurs étudiés touchaient quatre aspects, soit: La qualité des copeaux, les caractéristiques de la liqueur de cuisson, l'opération du lessiveur et l'opération du raffineur. Le tableau 3.1 (17) montre les 11 facteurs touchés ainsi que l'écart étudié pour chacun d'eux. Le design Plackett-Burman utilisé compte donc 24 essais dont 4 sont des points centraux.

L'analyse de ces résultats a permis d'isoler les cinq variables les plus importantes pour les conditions d'opération du lessiveur en plus de montrer l'importance du raffinage. Ce type de plan expérimental ne permettant d'évaluer que l'importance des effets principaux, il est nécessaire de poursuivre l'étude à l'aide d'un plan expérimental plus élaboré. Ainsi, il a été décidé de séparer l'optimisation de la

VARIABLE	ÉCART
pH initial de la liqueur	3.5-6.5
température maximale de cuisson	120-150 °C
concentration initiale de SO ₂ totale dans la liqueur de cuisson.	1-7.0%
durée à température maximale	50-80 min.
rapport liquide sur bois sec	3.0-5.0
épaisseur des copeaux	0.4 mm / 4.8 mm
âge des copeaux indiqué par la solubilité dans une solution 1% NaOH	14.5% / 17.9%
distance entre les disques (stade 1 et 2)	0.2-0.6 mm
consistance à l'entrée du raffineur (stade 1 et 2)	8-16%

Tableau 3.1 Variables étudiées avec le design Plackett-Burman.

cuisson de celle du raffinage de façon à éviter un nombre d'essais démesuré. L'optimisation des conditions de cuisson sera donc séparée de celle des conditions de raffinage. L'étape suivante consiste donc à optimiser les variables d'opération du lessiveur jugées importantes lors de la première étape.

3.2 Deuxième étape: Le plan central composite.

Pour pouvoir trouver les conditions d'opérations du lessiveur qui seraient optimales, nous avons utilisé un plan expérimental de type central composite qui

VARIABLE	ÉCART
pH de la liqueur initiale	2.0 - 6.0
SO ₂ total initial	3.5 - 7.5%
Température cuisson	120 - 160°C
Temps à température de cuisson	35 - 75 min.
Ratio liqueur/bois	2.5 - 6.5

Tableau 3.2 Variables pour le plan central composite.

est décrit en détail à l'annexe 2 (16). Les résultats obtenus à partir de ces expériences nous ont permis de corréliser la performance du lessiveur au 5 variables d'opération tel qu'illustré au tableau 3.2 (18).

Les cuissons ont été réalisées avec de l'épinette noire fraîchement coupée. Un autoclave de 20 l à chauffage indirect permet d'effectuer le traitement chimique tandis qu'un raffineur Sunds Defibrator CD 300 permet le raffinage des copeaux en deux stades atmosphériques.

Les essais furent effectués selon un plan expérimental de type central composite (CCD). Cette approche offre plus d'information que des essais conduits un à la fois. En effet, elle permet de connaître l'importance des interactions entre les variables et offre la possibilité d'évaluer l'erreur expérimentale. Comme la DBO et la toxicité présentent une réponse significativement non-linéaire, l'utilisation de 5 niveaux distincts pour chaque variable s'avère indispensable. Le plan

composite avec points centraux utilise un demi-factoriel à cinq variables augmenté avec les points axiaux extrêmes et un nombre de points centraux donnant au plan une précision uniforme sur toute la région de l'étude.

Le rendement et le degré de sulfonation des copeaux lavés ont été évalués, tandis que la toxicité, la DBO et la DCO des liqueurs résiduelles étaient mesurées.

Les régressions effectuées sur ces résultats démontrent que le rendement dépend fortement du pH de la liqueur initiale et de la température maximale de la cuisson, tandis que le taux de sulfonation dépend principalement de la température de cuisson et, à un degré moindre, du pH initial et du temps de cuisson. Les résultats démontrent, de plus, qu'une concentration en SO_2 supérieure à 3.5% n'aide pas de façon significative le taux de sulfonation des copeaux.

Des modèles polynomiaux ont, de la même façon, été développés pour évaluer la réponse de la DBO, de la DCO et de la toxicité, aux variables d'opération du lessiveur.

A partir de ces 3 modèles, le choix des conditions est fait en maximisant le rendement et le taux de sulfonation tout en minimisant la charge en polluants. Pour ce faire, une fonction de désirabilité telle que décrite par Harrington (19) a été utilisée. Cette fonction prend la forme

$$\text{Désirabilité} = (x_1^a + x_2^b + \dots x_n^m)^{1/n}$$

où

x_i = équation de prédiction de chaque propriété à optimiser.

a, b... m = exposant permettant d'attribuer une importance relative à chaque propriété.

L'algorithme MINOS du logiciel GAMS a permis l'optimisation de cette fonction hautement non - linéaire. Le tableau 3.3 nous montre les paramètres d'opération optimaux trouvés.

L'optimisation des paramètres de cuisson étant faite, l'étape suivante consiste à optimiser les paramètres de raffinage, ce qui représente le but de ce projet.

VARIABLE	ÉCART
pH de la liqueur initiale	4.0
SO ₂ total initial	3%
Température cuisson	141°C
Temps à température de cuisson	55 min.
Ratio liqueur/bois	4.0
rendement cible	90%
sulfonation cible	1.4%

Tableau 3.3 Paramètres optimaux pour les cuissons CCD.

CHAPITRE 4.

EXPÉRIMENTATION

4.1 Approvisionnement en bois.

Dans le but d'éliminer une variation possible indésirable dans le mélange des copeaux, de l'épinette noire fraîchement coupée a été utilisée pour les essais. Ces copeaux proviennent de la Compagnie Normick Perron de La Sarre, le fournisseur habituel de l'usine de Masson.

4.2 Caractérisation des copeaux.

Un classificateur de copeaux Rader, qui sépare les copeaux selon l'épaisseur, a permis d'éliminer les poussières ainsi que les copeaux excédant 8 mm d'épaisseur. La caractérisation complète des copeaux est présentée au tableau 4.1.

Les copeaux ont ensuite été entreposés au frais pendant les quelques semaines nécessaires à la réalisation des cuissons.

4.3 Cuisson des copeaux.

De façon à obtenir suffisamment de copeaux pour optimiser les conditions de raffinage, un autoclave de 700 litres à chauffage indirect et circulation forcée, a

Humidité, %		36.31
Classification Rader, %	+8 mm	15.0
	+6-8 mm	11.9
	+2-6 mm	42.5
	copeaux fins	22.8
	poussières	7.8
Solubilité dans 1% NaOH, %		14.01
Densité, g/cm ³		0.432
Contenu en matières extractibles dans le DCM, %		1.10
Lignine Klason, %		28.3
Indice de Pentosane, %		8.33

Tableau 4.1 Caractérisation des copeaux.

été utilisé (figure 4.1). Les copeaux classés sont chargés par le dessus du lessiveur et tassés à la vapeur pendant 30 minutes à pression atmosphérique pour fin de désaération suivi par un tassage de 3 fois 3 minutes à une pression de 138 kPa. L'injection de la vapeur se fait par le fond de l'autoclave. La liqueur est ensuite pompée à l'intérieur et le couvercle est déposé et boulonné en place. La figure 4.2 montre les étapes suivies pour la cuisson. A la fin de la cuisson, la liqueur est évacuée après le prélèvement d'un échantillon pour analyse. De l'eau est ensuite ajoutée pour laver partiellement les copeaux, de façon à faciliter la vidange ultérieure du lessiveur. Une valve fermant le fond du lessiveur est ensuite démontée laissant tomber les copeaux sur le plancher pour leur récupération.

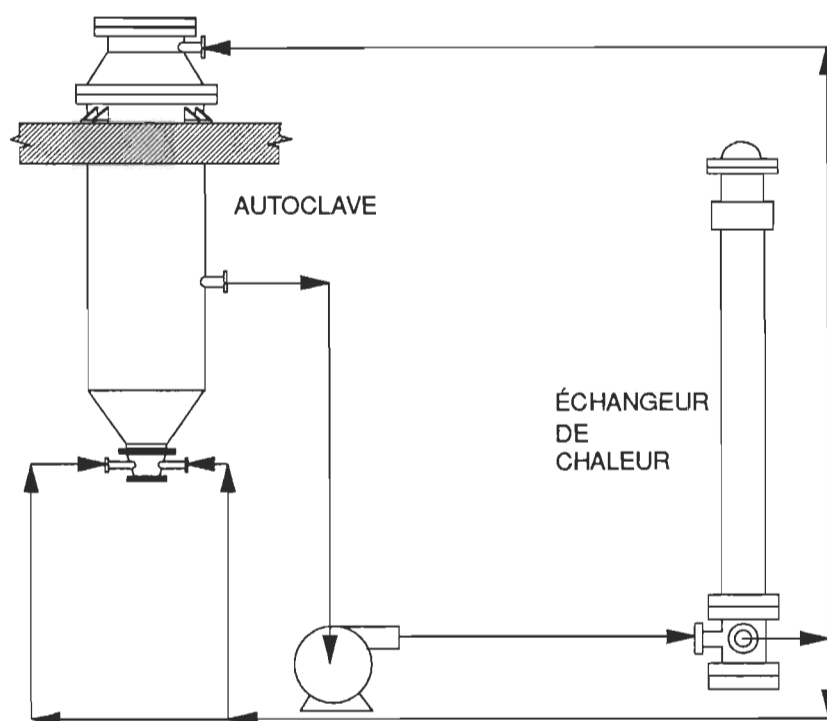


Figure 4.1 Autoclave de 700 litres utilisé pour les cuissons

Pour obtenir suffisamment de copeaux pour compléter le plan expérimental établi, deux cuissons furent nécessaires. Les échantillons de copeaux et de liqueurs résiduaire étaient pris pour s'assurer que les deux cuissons soit identiques.

La détermination de l'humidité des copeaux après cuisson et lavage permet de séparer les copeaux en sacs individuels de 4 kg. sec, nécessaire pour chaque essai de raffinage.

4.4 Raffinage des copeaux.

4.4.1 Plan expérimental

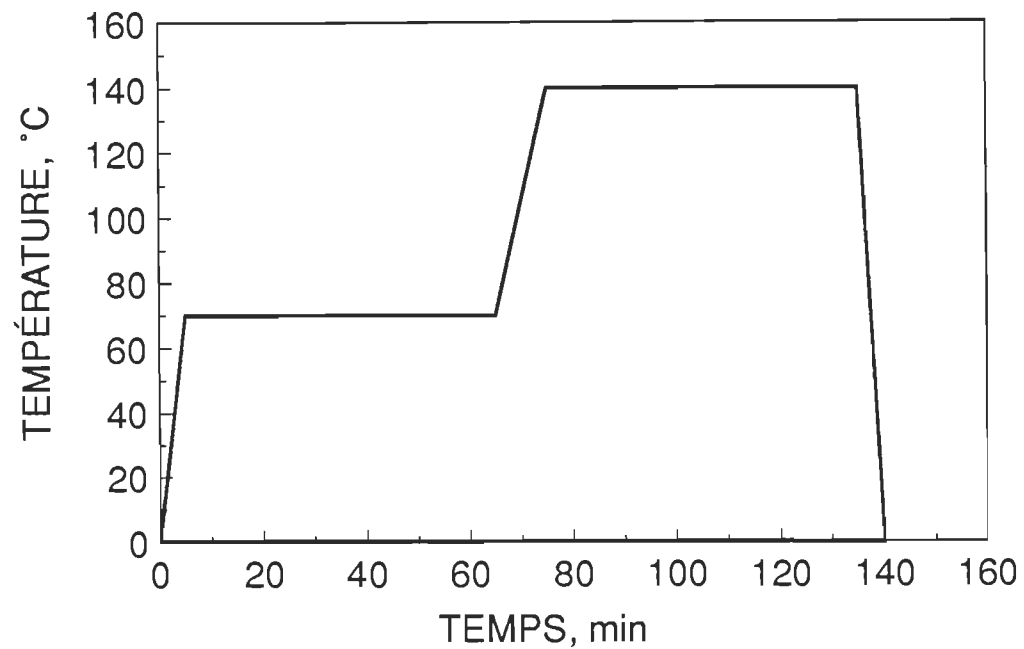


Figure 4.2 Étapes de la cuisson.

Le raffinage des copeaux a été fait suivant un plan expérimental de type composite avec points centraux (CCD). Nous avons déjà vu qu'un plan CCD peut être dessiné de façon à le rendre orthogonal et rotatoire, en choisissant la position des points axiaux et le nombre de points centraux. Nous avons précédemment expliqué que deux cuissons avaient été nécessaire pour obtenir suffisamment de copeaux pour réaliser le plan. Deux possibilités s'offrent alors: la première consiste à mélanger les deux cuissons et à utiliser ce mélange pour le plan complet, la deuxième est d'utiliser un blocage du plan. Cette dernière possibilité consiste en l'ajout d'une variable BLOC, qui permet une évaluation de

la variation entre les cuissons. Elle s'avère donc un choix plus "élégant" statistiquement. La façon d'opérer ce blocage consiste à utiliser une cuisson pour effectuer la partie factorielle, et l'autre cuisson pour la partie axiale, les expériences se situant dans la partie factorielle du plan utilisent donc la première des deux cuissons, tandis que les expériences situées dans la partie axiale sont réalisées avec les copeaux provenant de la deuxième cuisson. Les variables retenues pour l'analyse étant l'espacement des disques et la consistance des copeaux ou de la pâte à l'entrée pour chacun des deux stades, nous avons donc 4 variables à analyser. Un tableau de Khuri et Cornell (20) indique que pour 4 variables nous aurons 16 points (2^4) dans la partie factorielle avec un ajout de 4 points centraux pour ce premier bloc, et 8 points ($2 \cdot 4$) dans la partie axiale en plus de deux autres points centraux pour ce bloc. Cet agencement nous permet d'obtenir un plan qui sera rotatoire et de précision uniforme. De plus, les deux blocs sont orthogonaux car pour obtenir un blocage orthogonal la distance axiale (α) doit être:

$$\alpha = \sqrt{\frac{F(2k + n_{0A})}{2(F + n_{0F})}} = 2$$

où F = nombre de points de la partie factorielle = 16

n_{0A} = nombre de points centraux de la partie factorielle = 4

n_{0F} = nombre de points centraux de la partie axiale = 2

De plus, si l'on veut que le design soit rotatoire, il doit répondre à la condition

$\alpha = F^{1/4}$, donc 2 également.

essal	ESP1	CONS1	ESP2	CONS2	BLOC
1	0.4	12	0.4	12	1
2	0.3	15	0.3	15	1
3	0.5	9	0.5	15	1
4	0.5	9	0.3	15	1
5	0.3	9	0.3	15	1
6	0.5	15	0.5	15	1
7	0.3	15	0.5	9	1
8	0.3	9	0.3	9	1
9	0.3	9	0.5	9	1
10	0.3	15	0.3	9	1
11	0.3	15	0.5	15	1
12	0.5	9	0.3	9	1
13	0.5	15	0.3	15	1
14	0.4	12	0.4	12	1
15	0.5	15	0.5	9	1
16	0.4	12	0.4	12	1
17	0.5	9	0.5	15	1
18	0.4	9	0.5	9	1
19	0.5	12	0.4	12	1
20	0.5	15	0.3	9	1
21	0.4	12	0.4	6	2
22	0.4	12	0.4	12	2
23	0.4	12	0.2	12	2
24	0.4	18	0.4	12	2
25	0.6	12	0.4	12	2
26	0.4	12	0.6	12	2
27	0.4	12	0.4	18	2
28	0.4	6	0.4	12	2
29	0.4	12	0.4	12	2
30	0.2	12	0.4	12	2

Tableau 4.2 Points expérimentaux utilisés.

Le tableau 4.2 montre les points expérimentaux nécessaires pour réaliser ce plan. L'espacement des plaques sera composé des niveaux 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 et 0.6, tandis que la consistance à l'entrée sera fixée à 6, 9, 12, 15 et 18%. Les niveaux sont identiques pour chacun des deux stades et sont choisis de façon à couvrir la plage la plus grande possible en tenant compte des limites du raffineur lui-même. Ainsi une consistance maximum de 18% peut sembler peu élevée pour un raffineur industriel mais représente un maximum pour notre raffineur. Des essais préliminaires ont en effet permis de déterminer qu'aux environs de 20%, une très grande instabilité survient, ce que l'on voulait éviter pour ne pas compromettre les résultats.

4.4.2 Description du raffineur.

La figure 4.3 montre le raffineur utilisé pour l'expérimentation. Il s'agit du modèle CD-300 de la compagnie Sunds Defibrator Ltée. Il se compose de deux disques plats de 300 mm suivit d'une section conique d'environ 50 mm. Une moteur de 200 HP (550 volts, triphasé) entraîne la partie rotative constituée d'un disque plat et de la partie interne de la section conique, et ce, à une vitesse de 3725 rpm.

Cet appareil est conçu pour la production de pâte thermomécanique ou chimico-thermomécanique. Son utilisation en mode atmosphérique requiert l'enlèvement du conduit de retour de vapeur entre la vis d'alimentation du raffineur et le lessiveur, qui est remplacé pour la circonstance par un entonnoir permettant d'introduire la pâte ou les copeaux directement dans la vis du raffineur. Un orifice

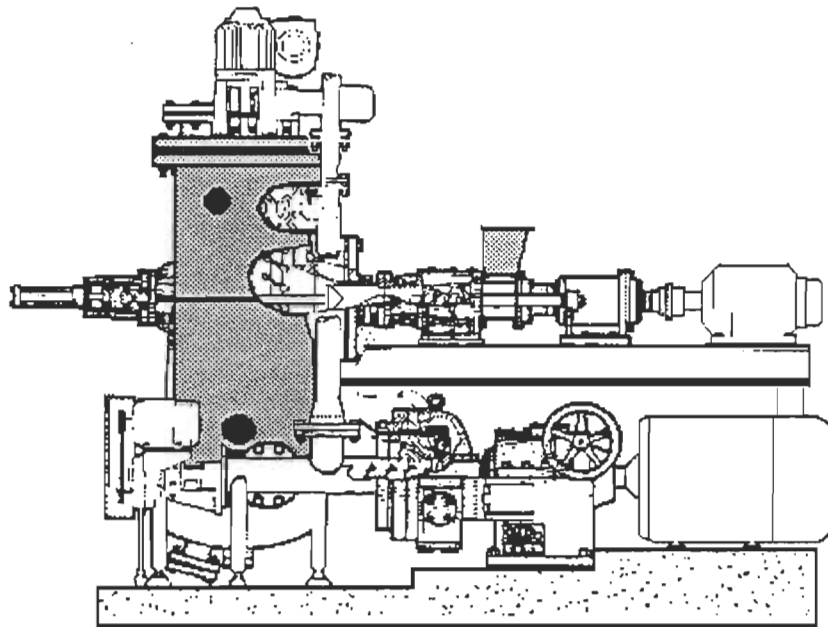


Figure 4.3 Unité pilote Sunds Defibrator CD-300.

sous le bâti du raffineur est également démonté pour permettre à la pâte de tomber par gravité lors de sa sortie de la zone de raffinage.

L'unité possède aussi deux pompes de dilution. La première permet d'injecter de l'eau dans l'oeil du raffineur de façon à ajuster la consistance à l'entrée tel que requis par le plan expérimental. La seconde permet une dilution supplémentaire dans la section conique. Un débit constant et minimum a été ajouté à ce point pour en minimiser l'impact.

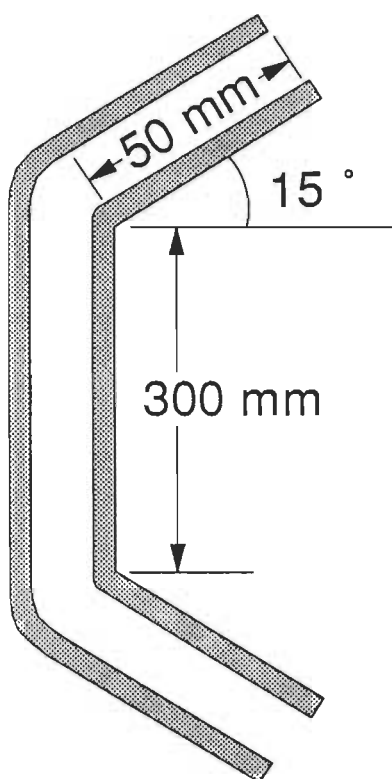


Figure 4.4 Agencement des disques du raffineur CD-300

Un enregistrement graphique de l'énergie consommée par le système est effectué continuellement. L'unité est constituée de disques plats et de disques coniques tel que montré à la figure 4.4.

4.4.2 Raffinage des échantillons.

Les échantillons de copeaux cuits préparés plus tôt sont disposés sur une courroie à vitesse variable permettant d'alimenter à un débit de 0,5 kilogramme sec par minute. La dilution est ajustée de façon à obtenir la consistance désirée à l'entrée du raffineur. La consistance à la sortie ainsi que l'indice d'égouttage sont mesurés sur la pâte recueillie

après le raffinage. Cette pâte est alors épaissie à une consistance d'environ 20% avant d'en extraire une partie pour son évaluation. La consistance est de nouveau mesurée pour déterminer le poids sec restant et le débit d'eau à ajouter lors du second stade. Après celui-ci, les mêmes mesures sont effectuées et la pâte est essorée et mise de côté. Trente pâtes pour chaque stade de raffinage ont ainsi été produites. L'annexe 3 montre les conditions de raffinage utilisées pour chacune de ces pâtes.

ESSAIS	NORMES A.C.P.P.	NORMES Tappi
Enlèvement de la latence par désintégration à chaud (Domtar)	C.8p	-
Concentration de la pâte	D.16	T240
Indice d'égouttage	C.1	T227
Classification Bauer McNett	-	T233 cm-82
Conditions standards et atmosphère contrôlée	A.4	-
Fabrication des feuilles	C.4	T205 om-88
Grammage du papier	D.3	T410 om-88
Essais physiques des formettes de pâte	D.12	T220 om-88
Épaisseur	D.4	T411 om-84
Longueur de rupture	D.6 H	T494 om-88
Indice d'éclatement	D.8	T403 om-85
Indice de déchirure	D.9	T414 om-88
Blancheur ISO (Technibrite)	E-1	T452 om-87
Opacité ISO (Technibrite)	E-2	T425 om-86
Indice de Pentosanes	G.12	T223 cm-84
Lignine Klason	G.8	T222 om-88
Densité des copeaux,	D.18 H	T258 om-85
Solubilité dans 1% de NaOH	G6 et G7	T212 om-88

Tableau 4.3 Normes standard utilisées.

4.5 Méthodes utilisées.

4.5.1 Évaluation des propriétés des pâtes et papiers.

Un échantillon de chaque pâte produite a été prélevé et le temps d'échantillonnage noté, de façon à déterminer le taux de production nécessaire

au calcul de l'énergie spécifique de raffinage. Une désintégration à l'eau chaude (95°C) dans un désintégrateur Domtar afin d'enlever la latence des fibres, précède les étapes de formation de la feuille. Le tableau 4.3 présente les normes standards utilisées lors des essais. La mesure du taux de sulfonation a été faite selon la méthode de Katz et al. (21), tandis que la détermination du nombre K_j suit celle de Jayme et al. (22).

4.5.2 Calcul d'intensité de raffinage.

L'annexe 4 présente les diverses formules nécessaires au calcul de l'intensité de raffinage et de la puissance spécifique. Ces calculs proviennent d'une étude de Miles et Karnis (13). Nous avons apporté quelques modifications aux équations pour tenir compte de la présence d'une section conique qui complique un peu les calculs.

4.6 Revue de la statistique et du vocabulaire utilisé

L'analyse statistique comporte un certain vocabulaire qui lui est propre. De plus, les logiciels utilisés étant de langue anglaise, une traduction des termes s'impose. Cette partie servira donc de lexique et de dictionnaire anglais-français, en plus de donner les formules utilisées dans les diverses procédures.

Voici d'abord une traduction des termes anglais utilisés dans les figures de ce mémoire, ainsi qu'une brève description pour chacun d'eux.

R-SQUARE: r^2 , ou coefficient de détermination: Il représente le pourcentage de variation qui est expliqué par l'équation de régression.

$$r^2 = SSR/SST$$

ADJUSTED R-SQUARE: r^2 ajusté: Il représente le r^2 , mais corrigé en utilisant le nombre de variables utilisées dans le modèle. Ainsi, une équation avec un r^2 de 0.90 qui utilise 3 variables aura un r^2 ajusté plus élevé qu'une équation ayant le même r^2 mais comprenant 4 variables. Il se calcule suivant la formule:

$$r^2_{\text{ajusté}} = 1 - ((n-1)(1-R^2)/n-p)$$

C_p : Le C_p de Mallows est utilisé pour classer les modèles de régression. Il se définit par:

$$C_p = SSE/SIGMA + 2p - n$$

Mallows recommande de prendre un modèle dont la valeur du C_p s'approche du nombre de paramètres dans le modèle. Ce choix permet d'avoir un estimé des paramètres non-biaisé.

Nous ferons aussi mention d'effets principaux (linear) tel que X_1 , X_2 , X_3 ; d'effets d'interaction quadratiques (quadratic) comme X_1^2 , X_2^2 ; ainsi que d'interactions croisées (crossproduct) tel que X_1X_2 , et X_2X_3 . Ces deux types d'interactions combinent deux variables; elles sont appelées "interactions doubles". Il est peu probable que nous devions utiliser des interactions d'ordre supérieur à deux.

Une partie de l'étude touchera l'analyse des résidus (residuals). Les résidus représentent l'erreur qui subsiste lorsque l'on tente d'ajuster une équation aux points expérimentaux. Le résidu est la différence entre la mesure réelle (Y_i) et la valeur prédite par l'équation (\hat{Y}_i). Ils sont exprimés sous forme de carrés de résidus (SUM OF SQUARE) dont voici les plus utilisés:

SSE: Somme des carrés des résidus

$$SSE = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (Y_{ij} - \bar{Y}_i)$$

Cette somme possède $(n-k-1)$ dl (degré de liberté) où k est le nombre de paramètres dans le modèle, n est le nombre d'observations et 1 dl perdu pour le calcul de la moyenne arithmétique.

SSR: Somme des carrés due à la régression

$$SSR = n \sum_{i=1}^k (\bar{Y}_i - \hat{Y}_i)^2 = SST - SSE$$

Cette somme possède k degrés de liberté (degrees of freedom); la perte d'un degré étant nécessaire au calcul de chaque paramètre.

MSE: MEAN SQUARE: carré moyen: C'est la somme des carrés divisée par le nombre de degrés de liberté associés à cette somme.

Nous avons donc une partie de la variation qui est expliquée par l'équation de régression, et l'erreur non-expliquée. Cette dernière peut être séparée en deux parties:

PURE ERROR: erreur pure: C'est l'évaluation de l'erreur expérimentale qui est obtenue grâce à l'utilisation de replicats lors de l'expérimentation. Elle est une mesure directe de la reproductibilité des résultats et dépend de la méthode de mesure ou de la dextérité de celui qui prend la mesure. Elle ne dépend pas du modèle et ne pourrait être modifiée qu'en recommençant l'échantillonnage avec plus de soin.

LACK OF FIT: manque d'ajustement: C'est la partie de l'erreur qui demeure inexpliquée. Cette valeur permet d'évaluer de quelle façon l'équation s'adapte aux points expérimentaux.

Deux tests de signification seront utilisés:

F-Ratio = Test de signification F: test d'hypothèse unilatéral à droite.

T-Test = Test de signification T: test d'hypothèse bilatéral utilisé pour vérifier si les coefficients trouvés sont significatifs pour un niveau donné. Ce test utilise l'hypothèse: H_0 : paramètre = 0

Une description plus détaillée de ces tests peut être facilement trouvée dans tout bon livre de statistique comme par exemple Khuri (20).

L'explication de certains de ces termes sera reprise plus en profondeur lors de leurs utilisations.

CHAPITRE 5

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les 60 pâtes obtenues lors des essais de raffinage furent évaluées de façon complète; les résultats sont présentés aux annexes 5 et 6 pour chacun des deux stades de raffinage. De plus, certaines mesures ont été prises pour évaluer chacune des deux cuissons. Le tableau 5.1 présente les résultats obtenus.

	CUISSON I	CUISSON II
Matières extractibles dans le DCM, %	0.16	0.21
Taux de sulfonation, mmol/kg	139.6	128.9
Lignine Klason, %	26.8	27.2
Indice de Pentosanes, %	7.46	7.64
Nombre Kj	153	165.5

Tableau 5.1 Comparaison des deux cuissons.

A partir de ces résultats, il est déjà raisonnable de supposer que les deux cuissons sont identiques. Nous avons vu plus tôt qu'une variable, que nous avons appelé BLOC nous permettait de vérifier statistiquement la ressemblance ou la différence entre ces deux cuissons. Les diverses régressions effectuées ont toutes démontrées que la variable BLOC, qui représente la variation entre les

deux cuissons, n'est jamais significative. Cette variable n'apparaîtra donc jamais dans les diverses équations, même si elle était toujours conservée comme variable indépendante lors des régressions.

L'analyse statistique des résultats a été divisée en plusieurs parties. Dans la première, nous examinerons de plus près les résultats du premier stade de raffinage.

5.1 Propriétés des pâtes et papiers du premier stade de raffinage.

Diverses analyses de régression ont été conduites sur les résultats du premier stade. La première étape consiste à évaluer l'erreur pure et le manque d'ajustement des modèles, tels que définis plus tôt. La figure 5.1 nous montre un exemple des résultats obtenus avec la procédure RSREG du logiciel SAS. Divers renseignements peuvent être tirés de cette figure. D'abord, il est à noter que cette procédure utilise un modèle complet soit les effets principaux et les interactions quadratiques et croisés. Pour la longueur de rupture, le r^2 est donc de 0.914 pour le modèle complet. Il est aussi possible de voir l'apport, à ce r^2 , des effets principaux (0.801), des interactions quadratiques (0.043) et croisés (0.070). Le test de signification qui apparaît au bout de chacune des rangées vérifie l'hypothèse voulant que le coefficient soit différent de 0. L'acceptation de l'hypothèse signifie donc qu'au moins un des coefficients de ce groupe est différent de 0, tandis que son rejet amène la conclusion que tous les coefficients de ce groupe sont nuls. Le dernier chiffre montre donc la probabilité que ces

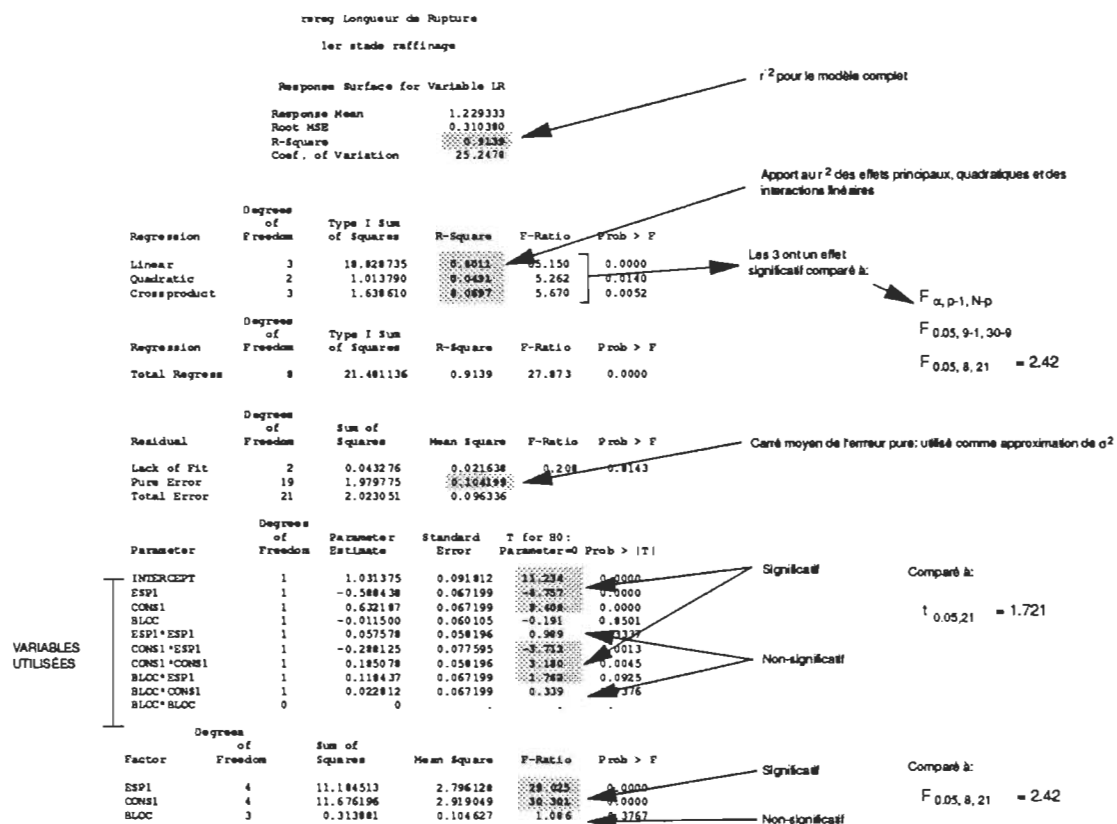


Figure 5.1 Résultats de la procédure RSREG.

coefficients soient nuls. Dans ce cas, on constate qu'au moins un coefficient de chaque groupe existe.

La partie non expliquée par la régression se compose des résidus, qui sont en fait la différence entre la valeur réelle mesurée et la valeur prédite par l'équation de régression. Si, comme dans notre cas, des répétitions ont été effectuées, il est possible de séparer de cette erreur totale, la partie reliée à l'erreur de mesure, causée par les manipulations ou aux appareils utilisés. Cette partie de l'erreur que l'on nomme l'erreur pure, est donc la somme des carrés des résidus calculée sur les points répétitifs. La fraction restante des résidus (somme des carrés de l'erreur totale - somme des carrés de l'erreur pure) représente l'erreur due au manque d'ajustement du modèle choisi. La probabilité apparaissant ici représente la probabilité que le manque d'ajustement soit non-significatif. Une probabilité élevée démontrera un manque d'ajustement faible, donc, une équation de régression s'ajustant bien à la variable réponse. Dans le cas de la longueur de rupture, on peut remarquer un manque d'ajustement significatif, qui peut être dû à un modèle trop simple. L'ajout de termes supplémentaires au modèle, soit des interactions de troisième ordre, par exemple, pourrait diminuer le manque d'ajustement. Cependant, étant donné le r^2 élevé, il n'apparaît pas souhaitable de compliquer le modèle dans ce cas.

La dernière partie nous montre un test de signification F, sur l'importance de chacune des variables. On peut ainsi voir que ESP1 et CONS1 sont tous deux

significatifs à un niveau de 95%, tandis que la variable BLOC ne l'est pas. Si la variable BLOC n'apparaît pas dans le modèle final, la somme des carrés des résidus associée à cette variable se retrouve dans le manque d'ajustement.

Lors des régressions subséquentes, le carré moyen de l'erreur pure sera utilisé comme estimé de l'écart type (σ). Les régressions ont ensuite été effectuées à l'aide de la procédure REG du logiciel SAS. Cette procédure utilise la méthode des moindres carrés pour ajuster un modèle. La figure 5.2 montre une partie des résultats obtenus de cette procédure en utilisant l'option SELECTION=ADJRSQ, ce qui force une itération de la procédure qui passe par toutes les possibilités de

reg Longueur de Rupture
1er stade raffinage

N = 30 Regression Models for Dependent Variable: LR

Adjusted R-square	R-square In	Variables in Model
0.8906898	0.9133057	6 ESP1 CONS1 ESP1_2 CON1_2 ESP1CON1 ESP1BLOC
0.8903964	0.9092936	5 ESP1 CONS1 CON1_2 ESP1CON1 ESP1BLOC
0.8863437	0.9137780	7 ESP1 CONS1 ESP1_2 CON1_2 ESP1CON1 ESP1BLOC CON1BLOC
0.8862266	0.9097660	6 ESP1 CONS1 CON1_2 ESP1CON1 ESP1BLOC CON1BLOC
0.8859189	0.9134557	7 ESP1 CONS1 BLOC ESP1_2 CON1_2 ESP1CON1 ESP1BLOC
0.8858203	0.9094437	6 ESP1 CONS1 BLOC CON1_2 ESP1CON1 ESP1BLOC
0.8812529	0.9099160	7 ESP1 CONS1 BLOC CON1_2 ESP1CON1 ESP1BLOC CON1BLOC
0.8811387	0.9139281	8 ESP1 CONS1 BLOC ESP1_2 CON1_2 ESP1CON1 ESP1BLOC CON1BLOC
0.8800116	0.8965617	4 ESP1 CONS1 CON1_2 ESP1CON1
0.8798600	0.9005738	5 ESP1 CONS1 ESP1_2 CON1_2 ESP1CON1
0.8755829	0.8970341	5 ESP1 CONS1 CON1_2 ESP1CON1 CON1BLOC
0.8752321	0.9010462	6 ESP1 CONS1 ESP1_2 CON1_2 ESP1CON1 CON1BLOC
0.8751934	0.8967118	5 ESP1 CONS1 BLOC CON1_2 ESP1CON1
0.8748257	0.9007239	6 ESP1 CONS1 BLOC ESP1_2 CON1_2 ESP1CON1
0.8703626	0.8971841	6 ESP1 CONS1 BLOC CON1_2 ESP1CON1 CON1BLOC
0.8697586	0.9011962	7 ESP1 CONS1 BLOC ESP1_2 CON1_2 ESP1CON1 CON1BLOC
0.8494011	0.8701733	4 ESP1 CONS1 ESP1CON1 ESP1BLOC
0.8451546	0.8718521	5 ESP1 CONS1 ESP1_2 ESP1CON1 ESP1BLOC
0.8436969	0.8706457	5 ESP1 CONS1 ESP1CON1 ESP1BLOC CON1BLOC
0.8433074	0.8703234	5 ESP1 CONS1 BLOC ESP1CON1 ESP1BLOC

Modèle choisi:
4 variables
ESP1
CONS1
CON1_2
ESP1CON1

Figure 5.2 Résultats de la procédure REG avec l'option SELECTION=AJSRSQ.

modèles à partir des variables et des interactions fournies par l'utilisateur. Dans notre cas, les effets principaux et les effets doubles quadratiques et croisés étaient soumis à cette procédure. Pour chacun des modèles le C_p , le r^2 et le r^2 ajusté sont calculés. La procédure permet de classer les modèles selon leur r^2 ajusté respectif, en commençant par les meilleures, soit ceux ayant le r^2 ajusté le plus élevé.

Un examen des modèles, en tenant compte du nombre de variables dans le modèle, du C_p et du r^2 ajusté, permet de choisir un modèle semblant acceptable. Une régression complète est ensuite réalisée sur ce modèle spécifique. Par exemple, dans le cas de la longueur de rupture, le modèle utilisant ESP1, CONS1, CONS1² et ESP1CON1 sera retenu puisqu'il propose le modèle le plus simple sans perte importante de C_p et de r^2 ajusté.

On peut ainsi voir à la figure 5.3 la régression effectuée sur la longueur de rupture avec le modèle choisi précédemment. Une valeur estimée des coefficients de régression est évaluée à l'aide d'un test de signification T qui utilise l'hypothèse

" H_0 : la valeur du paramètre est nulle".

La figure 5.4 montre l'ajustement de la courbe aux points expérimentaux ainsi que l'intervalle de confiance de 95%. Cette représentation permet de visualiser les résidus de façon globale. Cependant, une analyse plus détaillée de ces

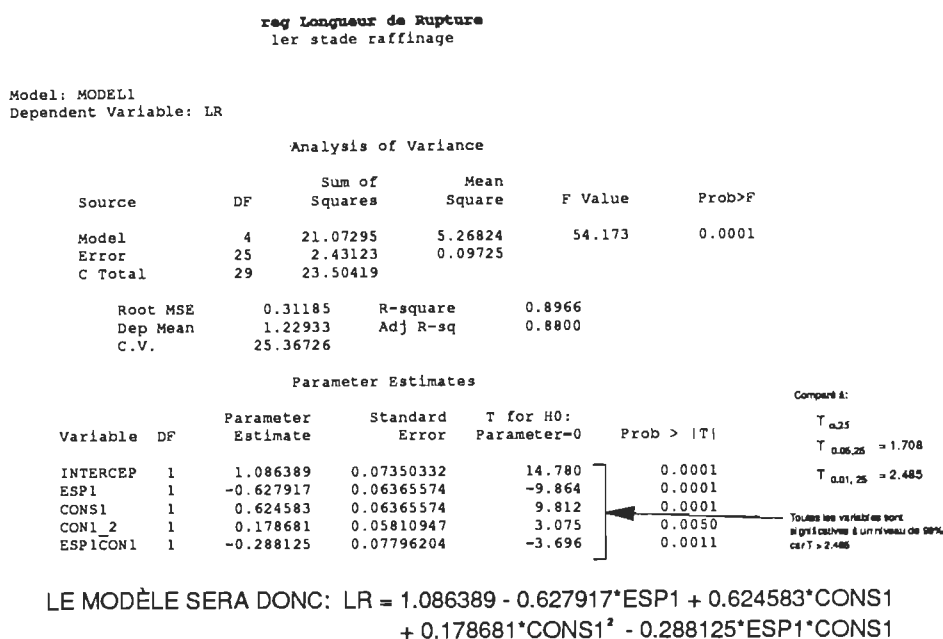


Figure 5.3 Résultats de la procédure REG.

résidus a été faite, comme le montre la figure 5.5, où l'on voit la répartition des résidus pour chacun des 30 points expérimentaux. La valeur montrée dans la colonne "Cook's D" est une mesure d'influence. Elle mesure le changement dans la valeur estimée qui résulterait de l'enlèvement de chacun des points expérimentaux. Par exemple, le point 5 est, dans cette figure, celui dont l'enlèvement aurait le plus d'influence sur la valeur prédite. Lorsque le modèle s'ajuste parfaitement à la courbe, on remarquera au bas de la figure que la somme des carrés des résidus sera égale à la somme des carrés des résidus prédite par le modèle. La différence notée ici est due au manque d'ajustement déjà observée avec la procédure RSREG. Des régressions ont ainsi été effectuées sur les diverses propriétés des pâtes et des papiers produits à partir

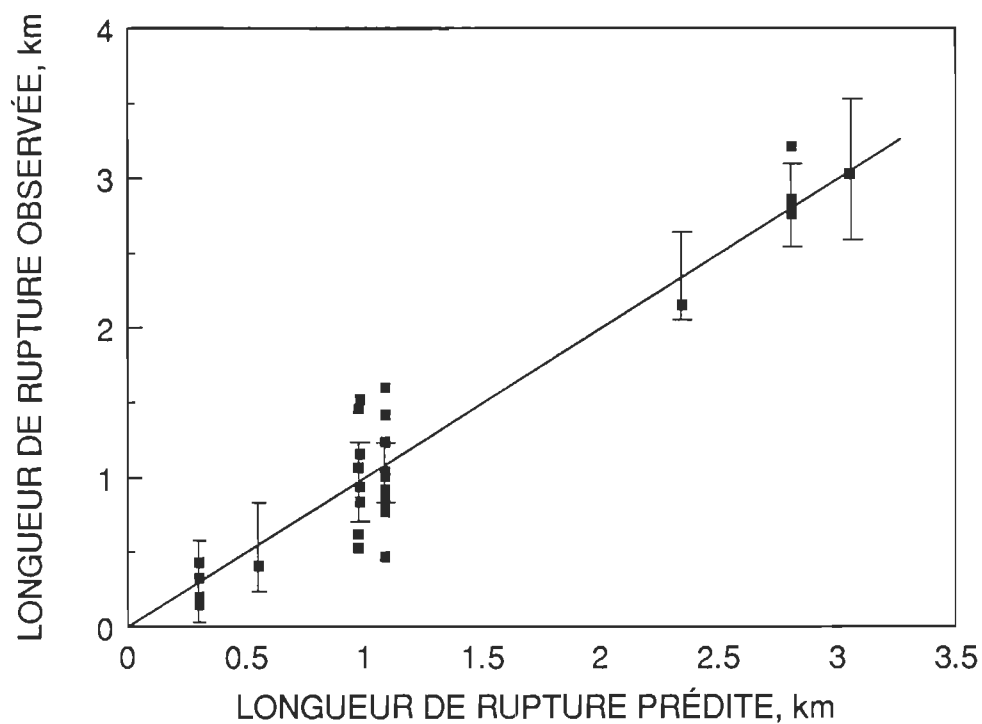


Figure 5.4 Distribution des points expérimentaux.

de ces pâtes.

5.1.1 Propriétés des pâtes du stade 1.

La première série de régressions utilise comme variable réponse les propriétés des pâtes, et comme variables indépendantes, l'espacement des disques pour le stade 1 (ESP1), la consistance à l'entrée de ce stade (CONS1), la variable BLOC ainsi que toutes les interactions doubles (quadratiques et produits croisés). Les coefficients de régression obtenus sont présentés au tableau 5.2.

```

reg Longueur de Rupture

Std Err      Student
Obs  Residual  Residual  Residual  -2-1-0 1 2      Cook's
                                D
1   -0.6164    0.303    -2.034    | **** | | 0.049
2    0.4043    0.282     1.432    |      | ** | 0.090
3   -0.1507    0.282    -0.534    | *    | | 0.013
4   -0.1007    0.282    -0.357    |      | | 0.006
5    0.5397    0.282     1.912    |      | *** | 0.163
6   -0.4436    0.282    -1.571    | ***  | | 0.109
7    0.0543    0.282     0.192    |      | | 0.002
8   -0.1403    0.282    -0.497    |      | | 0.011
9   -0.0403    0.282    -0.143    |      | | 0.001
10  0.00431    0.282     0.015    |      | | 0.000
11  -0.0457    0.282    -0.162    |      | | 0.001
12  0.1293    0.282     0.458    |      | | 0.009
13  0.4864    0.282     1.723    |      | *** | 0.131
14  -0.3164    0.303    -1.044    | **   | | 0.013
15  0.0964    0.282     0.341    |      | | 0.005
16  -0.0764    0.303    -0.252    |      | | 0.001
17  0.1797    0.282     0.637    |      | *  | 0.018
18  0.0293    0.282     0.104    |      | | 0.000
19  0.5136    0.303     1.695    |      | *** | 0.034
20  -0.3536    0.282    -1.253    | **   | | 0.069
21  -0.2164    0.303    -0.714    | *    | | 0.006
22  -0.1664    0.303    -0.549    | *    | | 0.004
23  0.1536    0.303     0.507    |      | *  | 0.003
24  -0.0203    0.208    -0.098    |      | | 0.002
25  0.4394    0.275     1.598    |      | *** | 0.146
26  -0.0464    0.303    -0.153    |      | | 0.000
27  -0.2964    0.303    -0.978    | *    | | 0.011
28  -0.1419    0.208    -0.683    | *    | | 0.117
29  0.3336    0.303     1.101    |      | ** | 0.014
30  -0.1922    0.275    -0.699    | *    | | 0.028

sum of Residuals          0
sum of Squared Residuals 2.4312
predicted Resid SS (Press) 3.3456

```

Figure 5.5 Analyse des résidus de la procédure REG.

	Énergie spécifique, kwh/t	Indice d'égouttage, ml	Intensité de raffinage, GJ/t/impact	Longueur de fibre Kajaani, mm
Constante	+697.31	+740.61	+0.000828	+3.108
esp1	-223.13	+38.75		+0.253
cons1	+240.63	-33.00	-0.000267	
esp1 ²	+71.74	-20.01	+0.000046	-0.0864
cons1 ²	+55.62			-0.0177
esp1cons1		+18.50	+0.000055	+0.0556
cons1 ³				-0.0026
esp1*cons1 ²				-0.207
r ²	.77	.83	.92	.71
r ² ajusté	.73	.81	.92	.63

Tableau 5.2 Régression sur les propriétés des pâtes du 1^{er} stade.

La présence d'un manque d'ajustement significatif pour certaines variables, principalement les fractions Bauer McNett, nous a obligé à essayer d'ajouter des interactions triples au modèle, mais sans succès. Lors de ce premier stade, il semble n'y avoir aucune corrélation directe entre la distribution de longueur des fibres et les conditions d'opération du raffineur. La faible quantité d'énergie appliquée durant ce stade suggère l'hypothèse d'un défibrage sans travail important de la fibre, sauf dans la région correspondant à une consistance élevée

et à un espacement faible. Dans le cas de la longueur de fibre Kajaani, l'erreur vient en majorité de l'erreur pure et ne peut donc pas être améliorée. Il en résultera une prédiction peu précise de la longueur des fibres.

La figure 5.6 montre deux représentations différentes de la réponse de surface de nos équations de prédiction pour l'énergie spécifique de raffinage et l'indice d'égouttage; soit une représentation de la surface en trois dimensions et une représentation en deux dimensions par des lignes de contour. Pour cette dernière chaque ligne de contour correspond à un même niveau de la variable réponse. L'énergie spécifique et l'indice d'égouttage sont fortement influencés par l'espacement et la consistance; un espacement élevé et une consistance faible donnant les énergies les plus basses et des indices d'égouttage élevés. Le modèle proposé montre que l'indice d'égouttage atteint une valeur maximum autour de 800 ml, ce qui représente bien la réalité. Cependant, une diminution est notée lorsque l'espacement est élevé et la consistance faible. Le modèle ne comprenant que des termes d'ordre deux ou moins, il est normal que la surface redescende après avoir atteint un maximum. Ceci représente donc une zone où le modèle ne correspond pas à la réalité. L'ajout de termes d'ordre supérieur à deux au modèle permettrait probablement de mieux couvrir cette zone mais ne représente pas réellement d'intérêt présentement puisque les propriétés mécaniques sont très faibles dans cette zone.

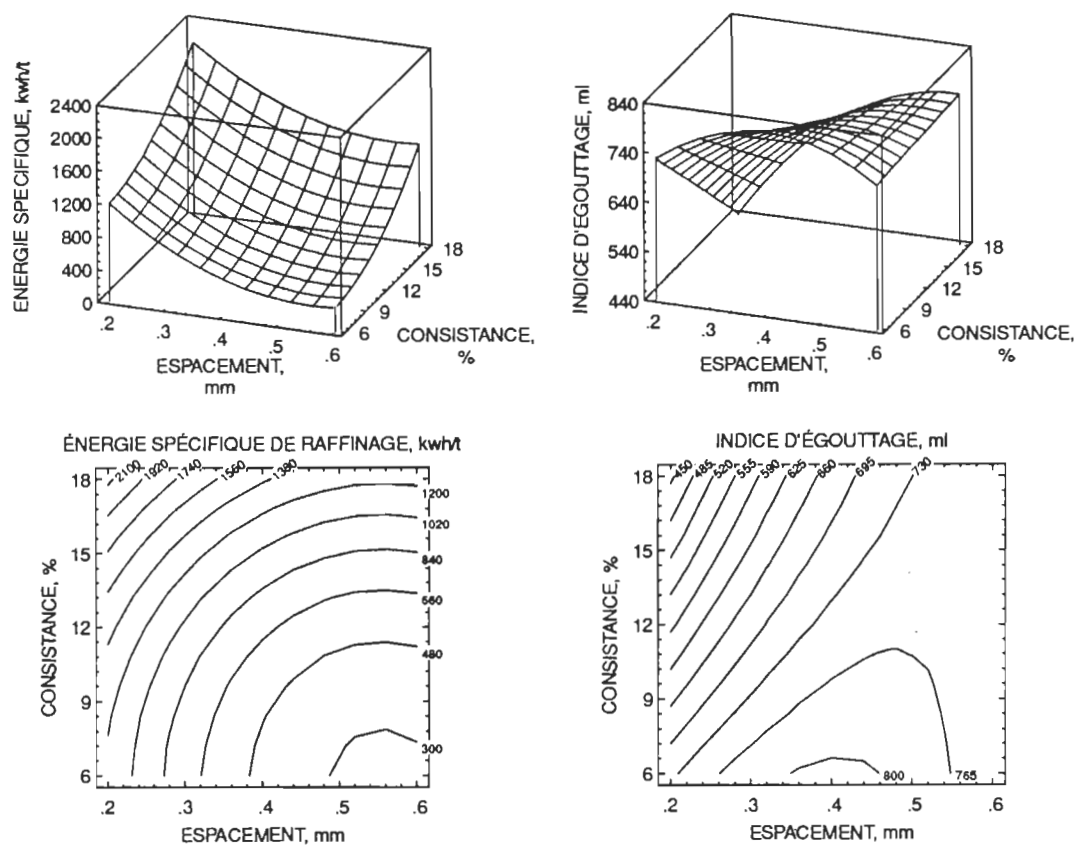


Figure 5.6 Réponse de surface pour l'énergie spécifique et l'indice d'égouttage.

De son côté l'intensité de raffinage est plutôt dominée par la variation de consistance. L'intensité diminue avec une augmentation de la consistance. De façon générale, pour ce premier stade, les pâtes d'indice d'égouttage bas ont été produites à des intensités faibles mais en appliquant une grande quantité d'énergie spécifique, donc un grand nombre d'impacts légers.

5.1.2 Propriétés des papiers du stade 1.

Les propriétés mécaniques des papiers fabriqués à partir de ces pâtes présentent des résultats très intéressants (tableau 5.3). Les r^2 ajustés permettent d'envisager des prédictions très précises des propriétés physiques en fonction de l'espacement et de la consistance à l'intérieur de la plage étudiée. L'examen des réponses de surface de la figure 5.7 pour quelques propriétés physiques, en plus de l'opacité, montre une augmentation de toutes les propriétés en même temps en allant vers des espacements faibles et des consistances élevées. Ce fait est possiblement attribuable à un travail très léger effectué sur les fibres. La partie basse de la surface de réponse des propriétés physiques, soit pour des espacements élevés et des consistances faibles, correspond à un simple défibrage alors que la partie ascendante est la résultante d'un début de fibrillation mais sans coupure de fibres notable qui aurait produit une baisse de l'indice de déchirure. Ce faible travail effectué sur les fibres est aussi visible lorsque l'on tente de relier les diverses fractions Bauer McNett aux conditions de raffinage. Il a été impossible en effet d'obtenir des corrélations avec un r^2 au dessus de 0.7.

	Densité, g/cm ³	Longueur de rupture, km	Allongement, %	ETA, g/cm	Indice d'éclatement, kPa*m ² /g	Indice de déchirure, mn*m ² /g
Constante	+0.171	1.086	+0.691	2.608	+0.508	+4.888
esp1	-0.0292	-0.628	-0.199	-3.225	-0.352	-2.041
cons1	+0.0292	+0.625	+0.166	+3.308	+0.388	+2.174
esp1 ²			+0.0436	+0.716		
cons1 ²	+0.0106	+0.179	+0.0586	+1.416	+0.124	+0.565
esp1cons1	-0.0175	-0.288	-0.1013	-2.425	-0.198	-0.968
r ²	.83	.90	.92	.94	.89	.83
r ² ajusté	.80	.88	.90	.93	.88	.81

Tableau 5.3 Régression sur les propriétés des papiers à l'état sec du 1^{er} stade.

Cette faible corrélation de la distribution des fibres indique également une action de coupe négligeable des fibres.

Il est cependant difficile d'obtenir des conditions optimales pour ce stade de raffinage par simple analyse visuelle puisque l'augmentation des propriétés est accompagnée d'une baisse marquée de l'indice d'égouttage. Pour les concilier nous utiliserons, tel que décrit plus tôt, une fonction de désirabilité. L'optimum que l'on veut obtenir étant dépendant de l'indice d'égouttage, ce dernier sera donc limité à des niveaux spécifiques. La fonction à optimiser sera donc:

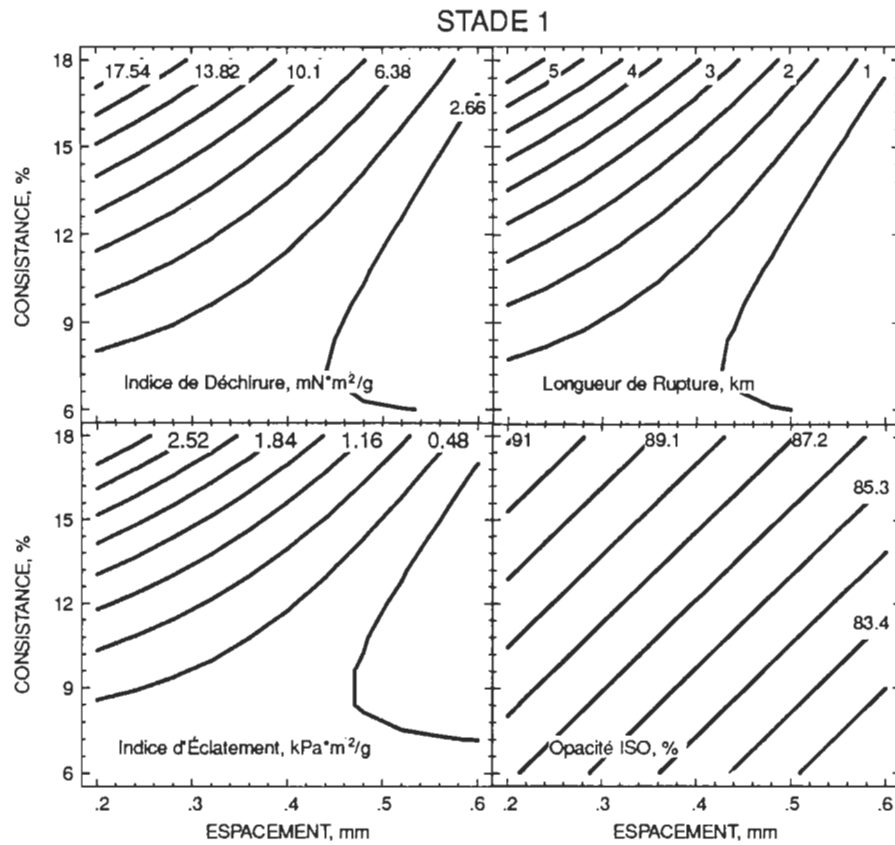


Figure 5.7 Réponses de surface pour les propriétés physiques du stade 1.

Indice d'égouttage, ml	700	650	600	550
Volume spécifique, cm ³ /g	4.28	3.24	2.45	1.79
Énergie spécifique, kwh/t	1328	1475	1629	1788
Longueur de rupture, km	2.61	3.41	4.03	4.54
Indice de déchirure, mNm ² /g	10.0	12.7	14.7	16.4
Indice d'éclatement, kPa*m ² /g	1.50	2.01	2.39	2.71
Blancheur ISO, %	59.1	59.6	60.1	60.4
Opacité ISO, %	88.0	88.9	89.6	90.1

Tableau 5.4 Résultats obtenus avec GAMS pour 4 niveaux d'indice d'égouttage au stade 1.

$$Des = (Déchirure * Rupture * Blancheur * Opacité)^{1/4}$$

avec comme contrainte supplémentaire, l'indice d'égouttage qui sera fixé. Les résultats obtenus sont regroupés au tableau 5.4 pour 4 niveaux d'indice d'égouttage. Ils montrent très nettement l'avantage d'utiliser des consistances le plus élevée possible, tel que supporté par Lemay (1), pour ce stade en ce qui concerne les propriétés optiques et mécaniques. Nous retiendrons également, pour utilisation future, que l'indice d'égouttage désiré peut être obtenu en diminuant l'espacement entre les plaques. On notera également que les gains de propriétés sont accompagnés d'une augmentation de l'énergie spécifique consommée.

Afin d'utiliser un minimum d'énergie spécifique, il est intéressant de mettre sur un même plan les contours pour certaines propriétés et l'énergie spécifique nécessaire pour obtenir ces propriétés. L'examen de la figure 5.8 est très révélatrice; elle nous indique que, pour chaque niveau d'énergie spécifique, il existe une certaine région où les propriétés sont maximales. Par exemple, pour une énergie spécifique de 1200 kWh/t, la déchirure peut varier de 4.5 à 10 mN*m²/g, dépendant des conditions de mise en pâte utilisées. **Il est donc facile de constater qu'à l'intérieur d'une certaine plage d'espacement et de consistance, l'énergie spécifique peut être utilisée de façon beaucoup plus efficace.** La région foncée représente cette région d'efficacité maximale. Si l'on désire obtenir des résistances élevées dès le premier stade, il sera nécessaire, comme on l'a vu avec le logiciel GAMS, d'aller vers des consistances élevées, ce qui a déjà été démontré par Miles (13). Puisque dans cette zone, l'énergie est utilisée de façon plus efficace, nous devons en tenir compte lors de l'analyse du second stade de façon à profiter de cet avantage.

Cependant, il n'est pas évident que l'on doive développer, dès le premier stade, des résistances mécaniques papetières élevées. L'étude du deuxième stade devrait nous permettre d'évaluer quel niveau de raffinage devrait être donné à chacun des deux stades. La zone indiquée permet néanmoins d'économiser l'énergie lors du développement de la surface des fibres. L'étude du deuxième stade de raffinage tiendra donc compte de cette zone. Comme les résistances papetières développées dans cette zone vont en augmentant avec une diminution

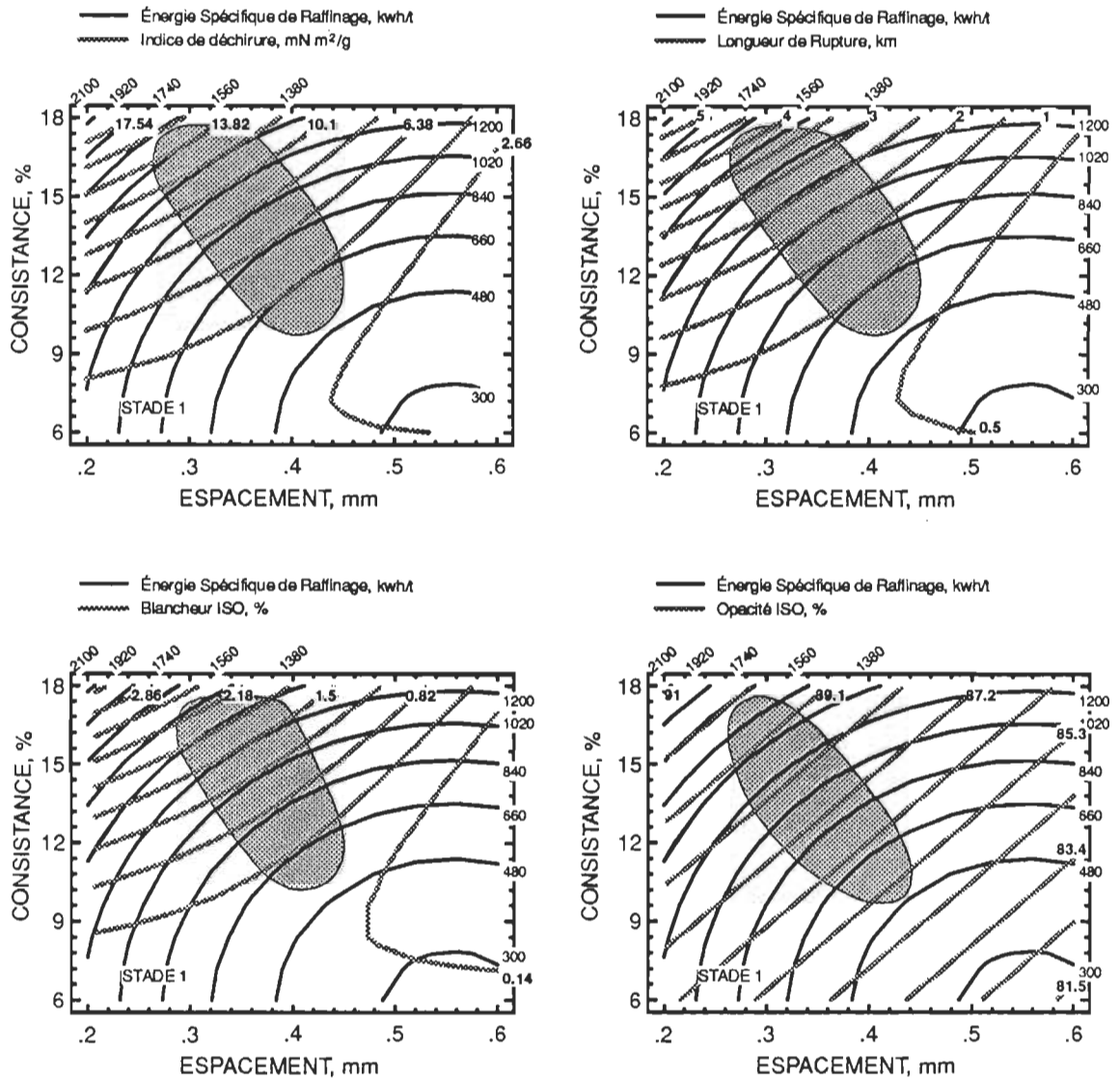


Figure 5.8 Variations des propriétés relativement à l'énergie spécifique pour le stade 1.

d'indice d'égouttage (figure 5.9), le point situant le premier stade dans cette zone doit dépendre de l'indice d'égouttage final que l'on veut, ainsi que de la quantité d'énergie spécifique que l'on veut mettre sur chacun des deux stades. Il est à noter que la zone présentée ici est une zone optimale moyenne dessinée à partir des zones de la figure 5.8. En effet, doit-on mettre plus d'énergie au deuxième stade ou au premier, et dans quelle proportion?

Pour résumer brièvement cette partie, nous dirons que le premier stade de raffinage devrait se situer à l'intérieur d'une certaine zone tel que définie plus tôt. La position dans cette zone dépendra principalement de l'étude du deuxième stade.

5.2 Propriétés des pâtes et papiers du 2^e stade de raffinage.

Bien que le premier stade de raffinage nous donne des indications sur ce qui se passe pendant cette étape importante du procédé, notre principal intérêt se porte sur la pâte finale puisque c'est cette dernière qui sera utilisée pour produire le papier. Nous examinerons donc les propriétés des pâtes et des papiers produits avec les pâtes ayant subies deux stades de raffinage.

Les propriétés des papiers produits à partir des pâtes du stade 2 ont été d'abord soumis à la procédure RSREG du logiciel SAS, comme pour celles du premier stade. L'examen de ces résultats nous a permis de vérifier de nouveau l'apport non-significatif de la variable BLOC. De plus l'erreur pure était notée pour être

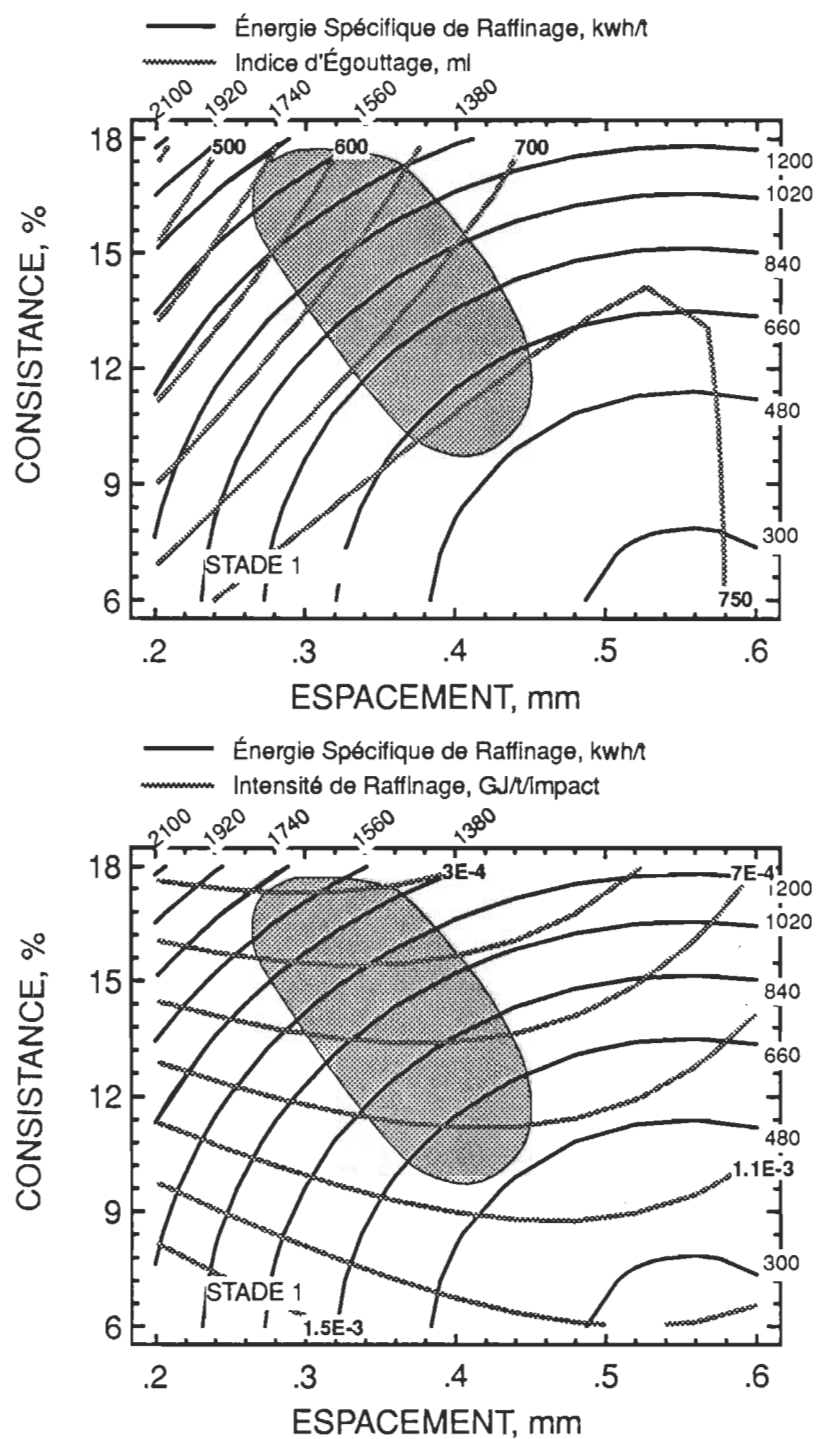


Figure 5.9 Variation de l'indice d'égouttage et de l'intensité de raffinage pour le stade 1.

utilisée comme valeur de SIGMA dans la procédure REG suivante. Les premiers essais avec la procédure REG ont été effectués avec l'option SELECTION=CP comme pour le premier stade. Malheureusement, dans le cas du deuxième stade, les modèles proposés de cette façon contiennent de 15 à 20 variables. Par exemple, pour l'énergie spécifique de raffinage, l'équation de modélisation serait:

$$\begin{aligned} \text{ENER2} = & 630.7 + 58.0 \cdot \text{ESP1} - 41.1 \cdot \text{CONS1} - 182.6 \cdot \text{ESP2} + 206.7 \cdot \text{CONS2} - \\ & 58.2 \cdot \text{BLOC} - 10.3 \cdot \text{ESP1}^2 - 16.4 \cdot \text{CONS1} \cdot \text{ESP1} + 16.4 \cdot \text{CONS1}^2 - \\ & 11.1 \cdot \text{ESP1} \cdot \text{ESP2} + 34.7 \cdot \text{ESP2} \cdot \text{CONS1} + 37.7 \cdot \text{ESP2}^2 + \\ & 59.7 \cdot \text{CONS2} \cdot \text{ESP1} - 26.0 \cdot \text{CONS2} \cdot \text{CONS1} - 40.9 \cdot \text{CONS2} \cdot \text{ESP2} - \\ & 3.89 \cdot \text{CONS2}^2 - 32.0 \cdot \text{BLOC} \cdot \text{ESP1} + 25.1 \cdot \text{BLOC} \cdot \text{CONS1} + \\ & 41.6 \cdot \text{BLOC} \cdot \text{ESP2} - 8.47 \cdot \text{BLOC} \cdot \text{CONS2}. \end{aligned}$$

Pour palier à ce problème nous avons plutôt utilisé une régression STEPWISE qui permet d'ajouter les variables une à une dans le modèle, en commençant par celle qui augmente le plus le coefficient d'explication du modèle. La sélection se fait sur la base de la valeur de F pour chaque variable. La variable possédant le F le plus élevé est entrée dans le modèle, de nouvelles valeurs de F sont calculées et une deuxième variable est entrée dans le modèle. Le processus se poursuit jusqu'à ce qu'aucune variable ne rencontre le seuil de signification fixé. Pendant le processus de sélection, toute variable dans le modèle qui tombe sous le seuil de signification est retirée du modèle.

	Blancheur ISO, %	Opacité ISO, %	b*
Constante	+57.528	+88.175	+12.827
esp1	-0.3934	-0.5874	+0.1690
cons1		+0.5207	-0.1618
esp2	-0.5041	-0.5042	+0.1757
cons2	+0.5793	+0.4015	-0.1990
esp1 ²			
cons1 ²	0.3654		
esp2 ²		+0.2771	-0.0912
cons2 ²			
esp1*esp2		-0.3811	
esp1*cons1	-0.5687		-0.1917
esp2*cons2			
cons1*cons2	-0.4493		
esp1*cons2			
esp2*cons1			
r ²	.68	.64	.72
r ² ajusté	.59	.55	.64

Tableau 5.5 Régression sur les propriétés optiques des pâtes du stade 2.

Les propriétés optiques des papiers sont présentées au tableau 5.5. Elles seront améliorées toutes trois à mesure que l'espacement entre les plaques diminue et que la consistance augmente, et ce, pour les deux stades de raffinage. En effet, la blancheur et l'opacité doivent être le plus élevées possible tandis que le b* doit

être faible. Il est intéressant de noter que le b^* , qui représente la coloration jaune du papier, peut être diminué par un raffinage approprié tandis qu'il n'existe aucune relation entre les variables étudiées et le paramètre a^* , qui décrit la coloration rouge-vert.

L'examen des coefficients de régression pour les propriétés physiques (tableau 5.6) montrent les mêmes tendances que pour les propriétés optiques. L'optimisation des propriétés physiques engendrera donc sûrement des propriétés optiques acceptables. Dans la plage étudiée, il y aura donc une augmentation de toutes les propriétés en diminuant l'espacement ou en augmentant la consistance pour l'un ou l'autre des deux stades de raffinage.

La solution semble, comme pour le stade 1, évidente si l'on considère seulement les propriétés physiques et optiques; il existe néanmoins un problème. En effet, l'examen des coefficients de régression du tableau 5.7 montre une diminution de l'indice d'égouttage avec une diminution de l'espacement et une augmentation de la consistance au premier stade alors que la consistance au deuxième stade n'a pas d'effet significatif sur l'indice d'égouttage. Il y aura donc une limite à l'augmentation des propriétés qui sera dépendante de la baisse de l'indice d'égouttage que l'on est prêt à consentir. D'un autre côté, l'on désire que ce gain de résistance soit accompagné d'un minimum d'énergie spécifique. L'examen des coefficients pour l'énergie nous indique qu'une diminution de l'espacement au 1^{er} stade diminuera l'énergie globalement utilisé tandis qu'au deuxième stade, il produira l'effet inverse. Il est donc préférable de favoriser un espacement plus

	Volume spéc., cm ³ /g	Longueur de rupture, km	Allongement, %	ETA, g/cm	Indice d'éclatement, kPa*m ² /g	Indice de déchirure, mN*m ² /g
Constante	+4.392	2.185	+1.1138	+10.316	+1.2598	+8.290
esp1	+0.5635	-0.5088	-0.1594	-4.223	-0.3942	-0.5406
cons1	-0.2668	+0.4613	+0.1036	+3.428	+0.3315	+0.8339
esp2	+0.5492	-0.3971	-0.1329	-3.420	-0.3548	
cons2	-0.3780	+0.4190	+0.1917	+3.597	+0.2756	+1.263
esp1 ²						-0.425
cons1 ²		+0.2850	+0.1014	+2.496	+0.2137	+0.5401
esp2 ²						
cons2 ²						
esp1*esp2						-0.6059
esp1*cons1		-0.2931		-2.938	-0.2381	
esp2*cons2				-2.773	-0.2212	
cons1*esp2						
esp1*cons2						
esp2*cons1						
r ²	.62	.81	.73	.82	.84	.68
r ² ajusté	.56	.76	.67	.77	.79	.60

Tableau 5.6 Régression sur les propriétés à l'état sec des papiers du stade 2.

faible au deuxième stade, ce qui est par ailleurs logique. Au point de vue consistance, on retrouve également une différence de comportement qui nous amène à privilégier une augmentation de consistance au premier stade et une diminution au deuxième. Par contre, si l'on désire conserver un indice

	Indice d'égouttage, ml	Énergie spécifique de raffinage, kwh/t
Constante	+716.88	+647.67
esp1	+90.82	+68.67
cons1	-45.34	-39.86
esp2	+69.32	-188.22
cons2		+188.84
esp1 ²	-48.71	+36.08
cons1 ²	-34.46	
esp2 ²	-31.59	
cons2 ²		
esp1*esp2	+26.74	
esp1*cons1	+26.38	
esp2*cons2	+68.89	
cons1*cons2		
esp1*cons2		+50.87
esp2*cons1		
r ²	.90	.86
r ² ajusté	.85	.82

Tableau 5.7 Régression sur les propriétés des pâtes du stade 2.

d'égouttage le plus élevé possible, il est possible d'augmenter les propriétés sans diminution significative de l'indice d'égouttage en augmentant la consistance au deuxième stade, mais au prix d'une énergie spécifique plus élevée.

L'examen des réponses de surface présente un problème. En effet, les réponses de surface permettent de visualiser 2 variables à la fois. Comme nous sommes en présence de 4 variables dépendantes, nous devons fixer deux d'entre elles, et visualiser le comportement des deux autres. L'analyse du stade 1 nous indique qu'il existe une zone intéressante pour les conditions de ce stade. Nous pouvons donc fixer l'espacement et la consistance au stade 1 à partir de la figure 5.10 montrant le comportement de l'indice d'égouttage dans cette zone.

Dans une première étape nous jetterons un regard sur le comportement de l'indice de déchirure, puisque c'est une des propriétés les plus importantes à optimiser. La figure 5.11 présente 4 graphiques montrant les lignes d'iso-réponse pour l'indice de déchirure au deuxième stade en fonction de l'espacement entre les disques et la consistance d'entrée, tous deux pour le second stade de raffinage. Les valeurs d'espacement et de consistance du stade 1 ont été choisies à partir des points 1, 2, 3 et 4 de la figure 5.10. Par exemple, le premier graphique représente le comportement de l'indice de déchirure lors du deuxième stade de raffinage. Pour ce point, les valeurs d'espacement et de consistance pour le stade 1 ont été choisis au point 1 de la figure 5.10, soit 0.41mm pour ESP1 et 11.1% pour CONS1, pour obtenir un indice d'égouttage de 750 ml après le stade 1. L'exercice est repris pour les points 2, 3 et 4, ce qui nous donnera des indices d'égouttage de 700, 650 et 600 ml après le premier stade. Il est facile ici de conclure que des valeurs plus élevées d'indice de déchirure peuvent être atteintes en diminuant l'indice d'égouttage au premier

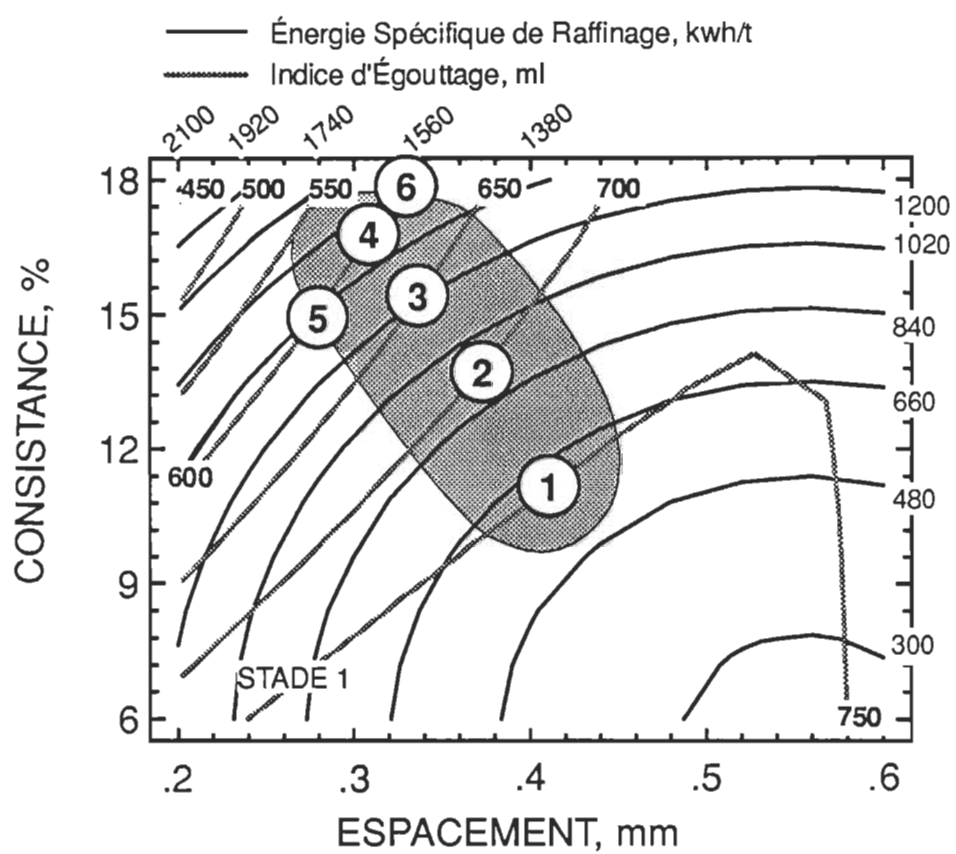


Figure 5.10 Niveaux d'indice d'égouttage du stade 1 utilisés pour l'analyse du stade 2.

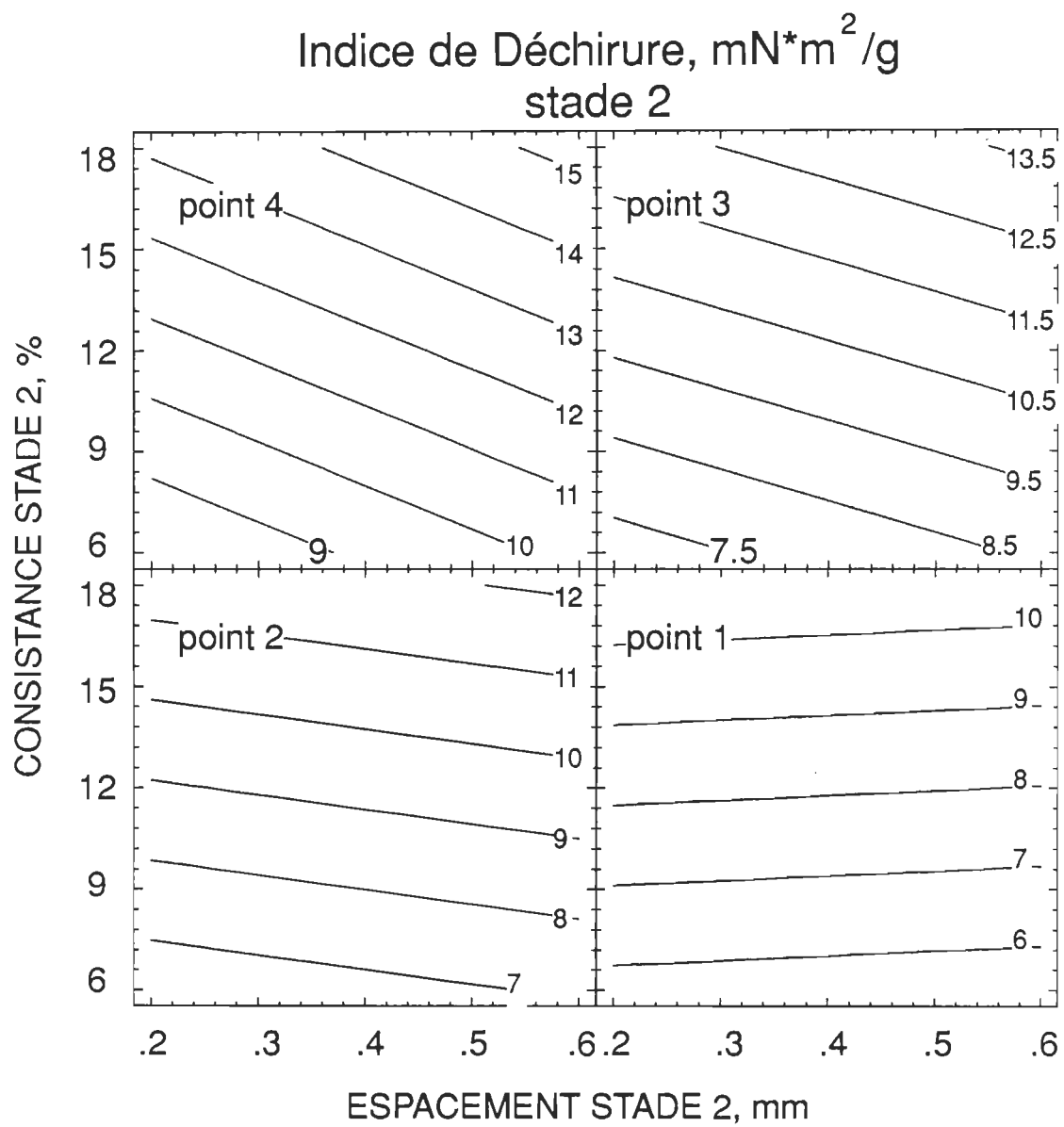


Figure 5.11 Iso-réponses pour l'indice de déchirure du stade 2.

stade. L'indice d'égouttage final désiré sera donc un facteur dominant dans le choix du graphique à utiliser. Nous avons vu au chapitre 1 que la PTHR présentement utilisée avait un indice d'égouttage d'environ 420 ml, ce qui fixe la limite inférieure puisque le mélange final doit demeurer aux environs de 120 ml. Les étapes de tamisage et d'épuration de la pâte diminuent légèrement l'indice d'égouttage; nous devons donc en tenir compte. Nous arrivons à un indice d'égouttage d'environ 500 ml pour notre pâte finale avant épuration. Nous devons donc voir comment se comporte l'indice d'égouttage final de la pâte lorsque les conditions du premier stade sont fixées de la même façon que pour l'indice de déchirure. Ces iso-réponses sont présentées à la figure 5.12. Les indices de déchirure pour les niveaux 750, 700 et 650 ml d'indice d'égouttage au premier stade étant trop faible, nous nous en tiendrons pour l'instant à l'analyse des résultats lorsque l'indice d'égouttage au premier stade est de 600 ml.

La figure 5.13 nous montre la superposition des iso-réponses pour l'indice de déchirure et l'indice d'égouttage. Pour un indice d'égouttage final de 500 ml, nous pouvons donc atteindre un indice de déchirure d'environ $14.5 \text{ mN}\cdot\text{m}^2/\text{g}$, si l'indice d'égouttage au premier stade est de 600 ml. Voyons ce qu'il advient des autres propriétés dans ces conditions.

La figure 5.14 nous présente la même superposition effectuée cette fois avec la longueur de rupture. Nous pouvons donc obtenir une longueur de rupture aussi élevée que 5.4 km si un indice d'égouttage de 600 ml est choisi au premier

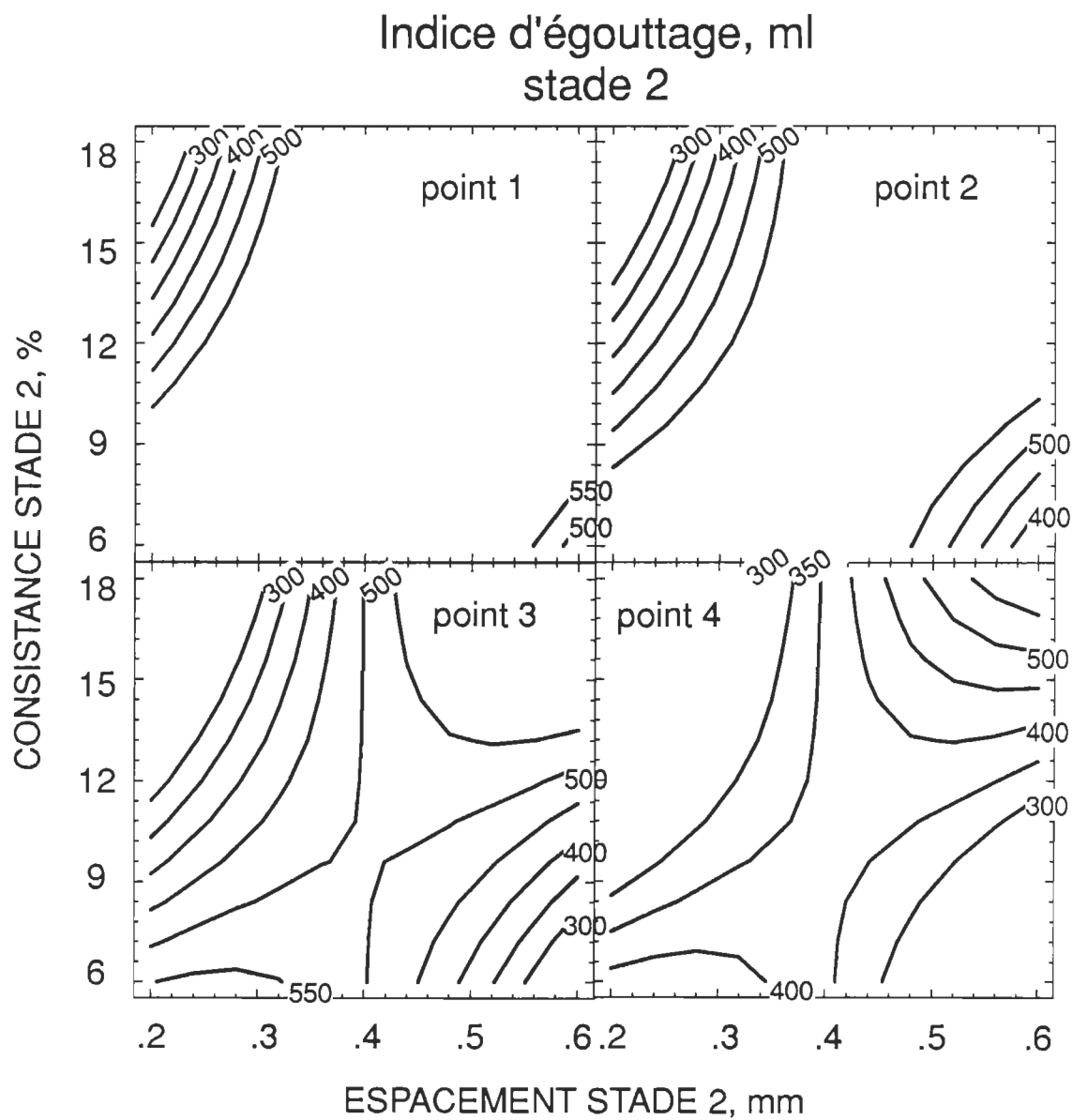


Figure 5.12 Iso-réponses pour l'indice d'égouttage du stade 2.

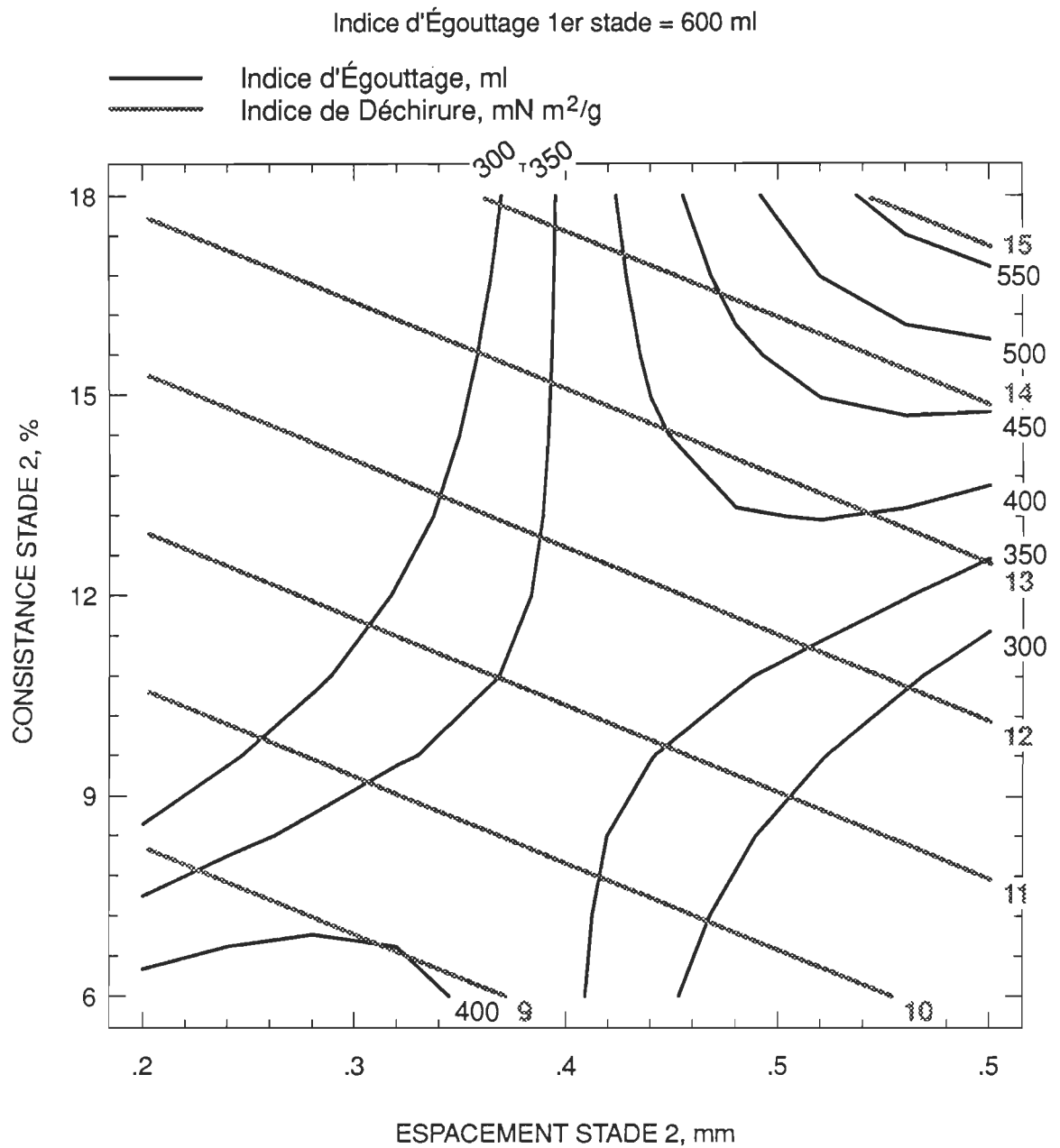


Figure 5.13 Superposition de l'indice de déchirure et de l'indice d'égouttage pour un CSF de 600 ml au stade 1.

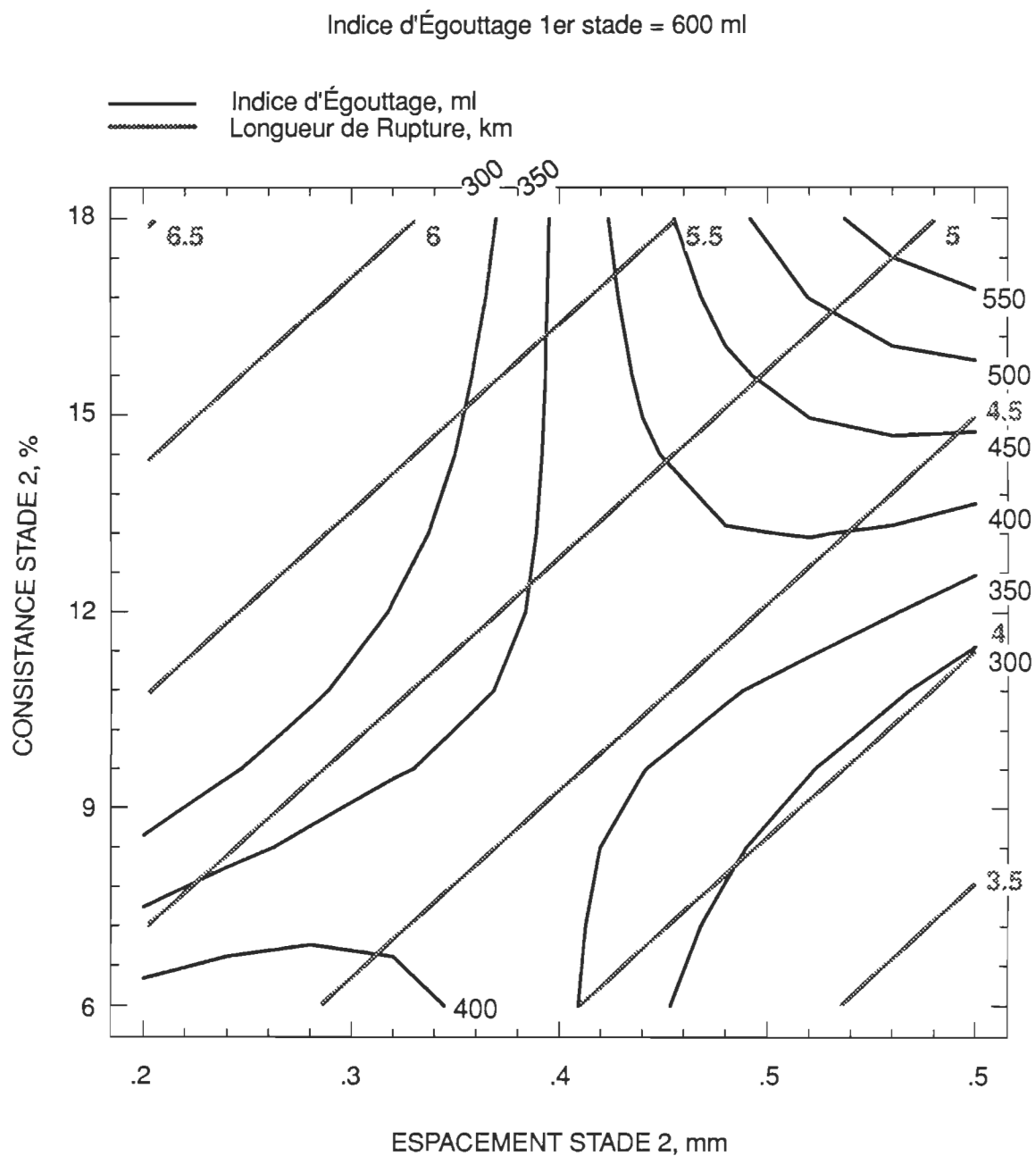


Figure 5.14 Superposition de la longueur de rupture et de l'indice d'égouttage pour un CSF de 600 ml au stade 1.

stade.

Le même exercice effectué pour l'énergie spécifique de raffinage (figure 5.15) montre une hausse d'énergie qui accompagne la hausse de la longueur de rupture. Cependant, pour le niveau d'indice d'égouttage de 500 ml, l'indice de déchirure est à peu près constant, peu importe la quantité d'énergie appliquée au deuxième stade. Ces quelques propriétés étant les plus importantes, nous finirons l'optimisation avec elles avant de calculer les autres. Pour l'instant, voyons s'il est possible d'augmenter encore les propriétés.

Nous avons vu qu'il était avantageux de diminuer l'indice d'égouttage le plus possible lors du premier stade soit, jusqu'à 600 ml, mais nous pouvons améliorer les propriétés un peu plus en nous déplaçant sur la courbe de 600 ml au stade 1. Au lieu de suivre la progression 1, 2, 3, 4 sur la figure 5.10, nous pouvons nous déplacer dans la direction 5, 4, 6. L'indice d'égouttage est le même pour les trois points mais la façon d'y arriver est différente. Le point 6 a nécessité plus d'énergie que le point 5, soit 1560 kwh/t comparé à 1380 kwh/t, mais à une intensité plus faible, soit 0.00025 au lieu de 0.00056 GJ/t/impact pour le point 5. Nous pouvons donc de nouveau superposer l'indice d'égouttage final à l'indice de déchirure (figure 5.16), à la longueur de rupture (figure 5.17) et à l'énergie spécifique consommée au deuxième stade (figure 5.18). Cet exercice nous montre qu'il est possible d'améliorer légèrement les propriétés de résistance si l'on se déplace au point 6. Nous pouvons ainsi obtenir un indice de déchirure de

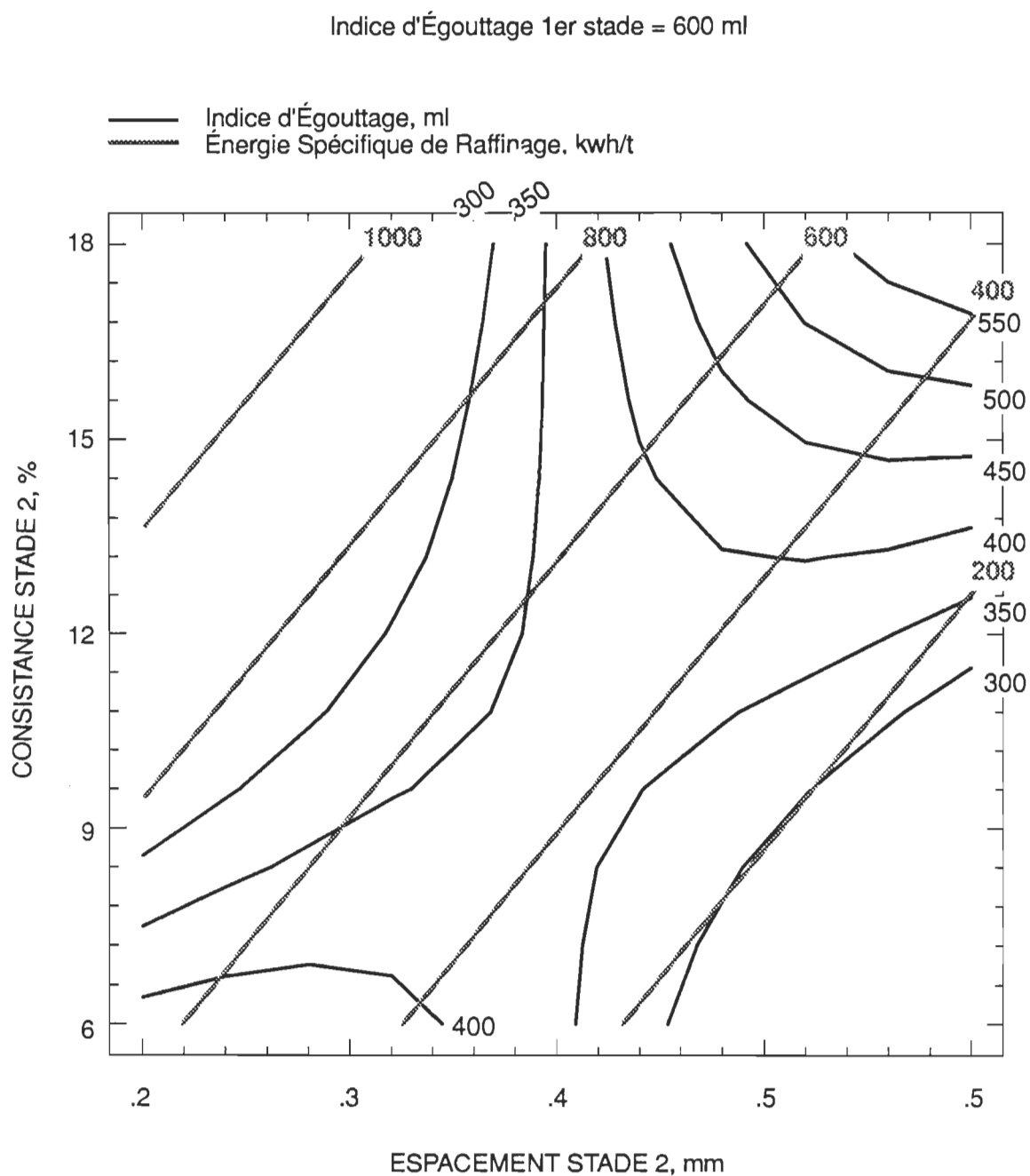


Figure 5.15 Superposition de l'énergie spécifique de raffinage et de l'indice d'égouttage pour un CSF de 600 ml au stade 1.

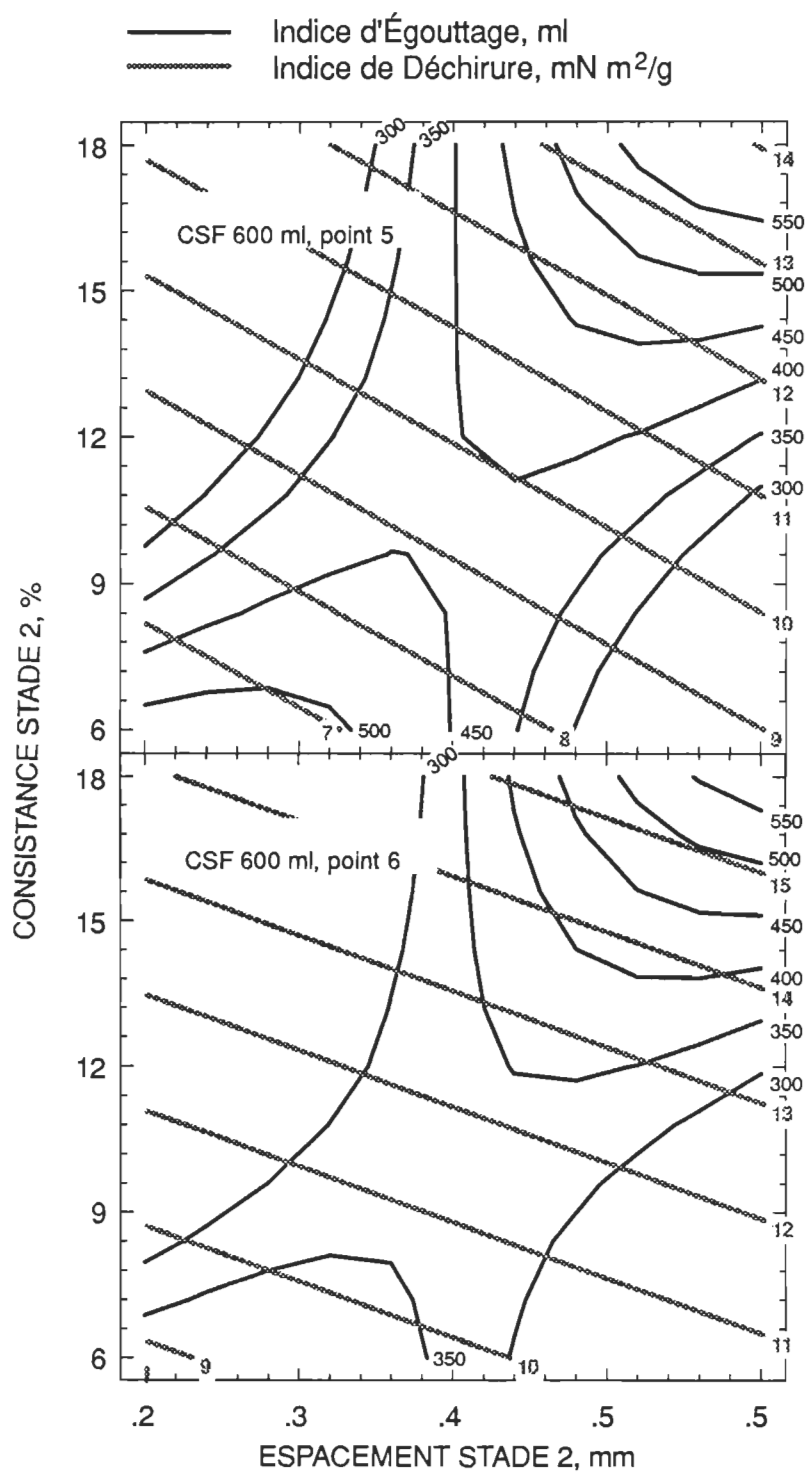


Figure 5.16 Variation de l'indice de déchirure pour les points 5 et 6.

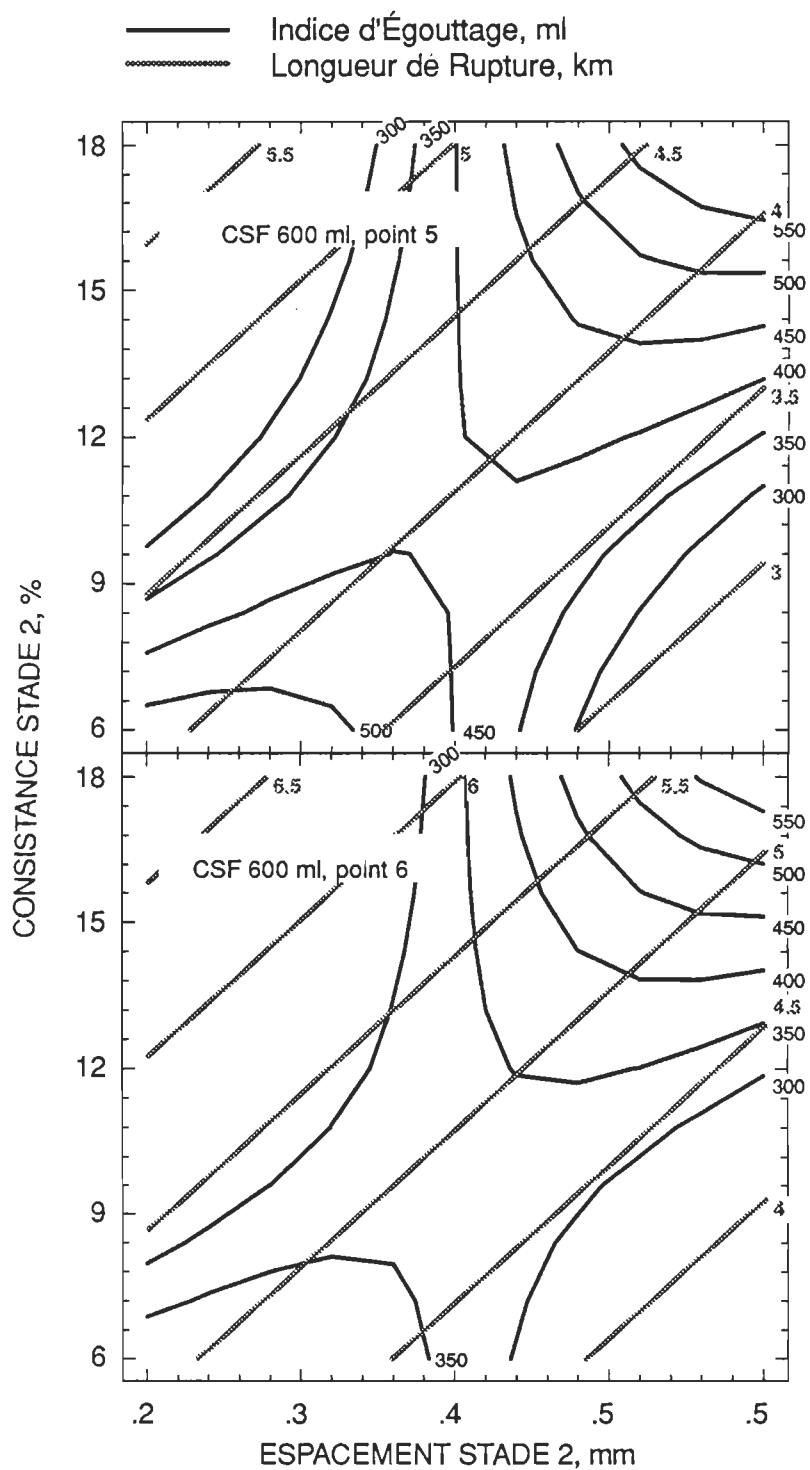


Figure 5.17 Variation de la longueur de rupture pour les points 5 et 6.

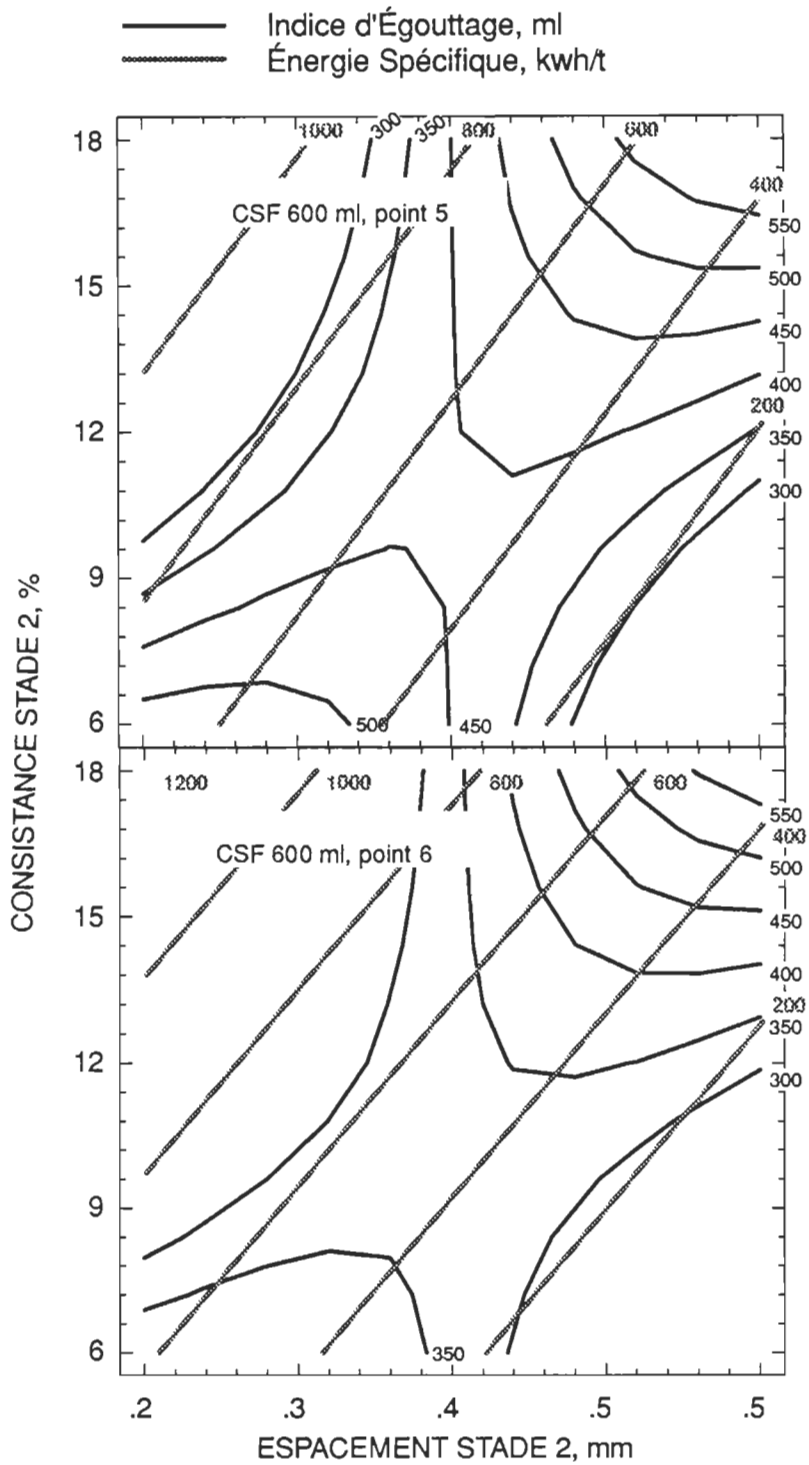


Figure 5.18 Variation de l'énergie spécifique de raffinage pour les points 5 et 6.

15.3 mN*m²/g et une longueur de rupture de 5.5 km. L'énergie spécifique consommée au deuxième stade s'avère identique pour ces deux points, la variation d'énergie totale est donc la même que pour le premier stade de raffinage. **Le point 6 sera donc conservé comme optimum. Il est intéressant de remarquer que, comme prévu, la consistance de raffinage doit être la plus élevée possible, nous amenant à des espacements plus grands entre les plaques qui nous évite de couper les fibres.**

Malheureusement, il est impossible de déterminer un maximum pour la consistance puisque la plage étudiée ne va pas au delà de 18% de consistance pour chacun des deux stades de raffinage. Il faut se rappeler que cette limite est due à notre raffineur et non au procédé lui-même. Un raffineur industriel aura une limite de stabilité plus élevée qui nous permettrait d'aller vers des consistance plus élevées. De plus, la structure des disques étant différente d'un raffineur à un autre, ainsi que les vitesses de rotation, les résultats obtenus sont difficilement transférable à l'échelle industrielle. Cependant, nous avons vu plus tôt qu'il était possible d'utiliser d'autres variables pour l'analyse. Le prochain chapitre traitera donc de l'analyse à l'aide de ces variables qui nous permettrons d'appliquer les résultats plus facilement en industrie.

CHAPITRE 6

APPLICATION A L'INDUSTRIE

Le transfert de données expérimentales du laboratoire à l'industrie pose presque toujours un problème d'envergure. Les chercheurs, de quelque domaine que ce soit, tentent de trouver des paramètres qui restent valide lors de la mise à l'échelle industrielle. Dans le domaine du raffinage le même problème existe, les variations des paramètres de contrôle ESPACEMENT et CONSISTANCE n'ont pas toujours la même signification sur un raffineur de laboratoire et sur un raffineur industriel. Nous avons vu précédemment que divers chercheurs avaient développé des théories de raffinage qui, par le calcul de paramètres secondaires, permettent de comparer divers raffineurs entre eux. Ces paramètres tiennent compte de la configuration du raffineur, de l'angle des barres, des vitesses de rotations, des dimensions, etc. Nous avons parlé précédemment d'un de ces paramètres: l'intensité de raffinage. La modélisation des diverses propriétés peut donc être faite à partir de l'énergie spécifique nécessaire et de l'intensité de raffinage, qui donne une indication de la façon dont cette énergie doit être appliquée.

Définissons donc quatre nouvelles variables soit l'énergie (ENER1 et ENER2) pour chaque stade et l'intensité (INT1 et INT2) aussi pour chacun des deux stades. Il est cependant nécessaire dans ce cas de coder les variables de façon

à leur conférer une importance relative égale. En effet, les valeurs brutes d'énergie spécifique sont environ 10^7 fois plus élevées que celles de l'intensité de raffinage. Les données ont donc été codées en soustrayant la moyenne à chacune des valeurs et en divisant par l'écart type pour chaque variable. Le codage suit donc les équations suivantes:

$$\text{ENER1 (codée)} = (\text{ENER1} - 799,14) / 347.919$$

$$\text{INT1 (codée)} = (\text{INT1} - 0.0008642) / 0.0002558$$

$$\text{ENER2 (codée)} = (\text{ENER2} - 647.84) / 251.931$$

$$\text{INT2 (codée)} = (\text{INT2} - 0.0010534) / 0.0002539$$

Si les effets principaux et les interactions doubles seulement sont conservés nous obtenons les possibilités suivantes:

- effets principaux: ENER1, ENER2, INT1, INT2
- effets quadratiques: ENER1², ENER2², INT1², INT2²
- effets croisés: INT1*INT2, INT1*ENER1, INT2*ENER2,
ENER1*ENER2, INT1*ENER2 INT2*ENER1

La question qui nous vient alors à l'esprit est: Peut-on utiliser ces deux variables pour modéliser le comportement de la pâte bisulfite lors du raffinage? Pour évaluer cette possibilité nous devons regarder d'abord s'il y a une perte importante d'orthogonalité, c'est-à-dire démontrer que nos variables sont relativement indépendantes les unes des autres. Le tableau 6.1 montre la matrice $(X'X)^{-1}$, cette matrice ne devrait contenir que des valeurs dans la diagonale. Les autres éléments devraient être nuls dans le cas d'une matrice

	ORIGINE	ENER1	INT1	ENER2	INT2
ORIGINE	.033	0	0	0	0
ENER1	0	0.045	0.021	0.010	0.007
INT1	0	0.021	0.044	0.003	0.004
ENER2	0	0.010	0.003	0.055	0.034
INT2	0	0.007	0.004	0.034	0.054

Tableau 6.1 Éléments de la matrice $(X'X)^{-1}$.

orthogonale. Nous voyons dans ce cas que la plupart des éléments en dehors de la diagonale sont dix fois plus petit que ceux de la diagonale. De plus, les valeurs des éléments de cette diagonale sont à peu près identiques. En fait la déviation de l'orthogonalité provient principalement d'une dépendance entre l'intensité et l'énergie, pour chacun des deux stades, ce qui nous donne les quatre éléments ombragés du tableau. Si nous désirons regarder un peu plus loin, nous pouvons examiner le tableau 6.2 qui nous montre une partie de la matrice des corrélations qui existe entre les variables principales et les interactions principales, c'est-à-dire celles qui ont une importance significative lors des régressions qui seront décrites plus loin. Il est d'abord possible d'y retrouver les inter-corrélations entre nos variables principales tel que vu plus tôt. On y retrouve aussi une corrélation assez importante entre chacune des variables principales et cette même variable élevée au carré. Nous avons vu que si nous voulons que les termes quadratiques soient indépendants des autres termes, il

	INT1	ENER1	INT2	ENER2
INT1	1	-0.48	-0.07	0.11
ENER1	-0.48	1	0.02	-0.16
INT2	-0.07	0.02	1	-0.60
ENER2	0.11	-0.17	-0.60	1
INT1 ²	0.22	0.10	-0.04	0.03
ENER1 ²	-0.20	0.70	-0.12	0.11
INT2 ²	0.02	-0.04	0.65	-0.27
ENER2 ²	0.06	-0.07	0.04	0.38
ENER1*ENER2	0.00	0.20	-0.01	-0.10

Tableau 6.2 Matrice des corrélations entre les variables principales et certaines interactions.

faut choisir un nombre de points centraux qui rendra la matrice orthogonale. Dans notre cas, puisque nous utilisons des variables secondaires, nous ne pouvons fixer les conditions à un point central, donc, il est impossible de rendre notre plan orthogonal. C'est pourquoi nous obtenons cette corrélation avec les termes quadratiques.

6.1 Modélisation des propriétés de la pâte finale.

Les données utilisées précédemment ont été soumises à la procédure REG du logiciel SAS, mais cette fois, avec comme variables dépendantes l'énergie

(ENER1 et ENER2) pour chaque stade et l'intensité (INT1 et INT2) aussi pour chacun des deux stades.

La sélection des variables a été effectuée avec l'option SELECTION=STEPWISE de la procédure REG tel qu'expliqué plus tôt. Le tableau 6.3 montre les coefficients de régression obtenus pour les propriétés des pâtes. Nous devons ici remarquer que l'indice d'égouttage ne dépend pas de l'intensité de raffinage mais uniquement de l'énergie spécifique appliquée à chacun des deux stades et de l'interaction de ces deux mêmes énergies. Le tableau 6.4 présente les résultats pour les propriétés optiques. Ces propriétés sont favorisées par une énergie spécifique élevée et une intensité de raffinage faible. Les propriétés de résistance mécanique sont, en général, beaucoup plus sensibles à l'énergie spécifique qu'à l'intensité avec laquelle cette énergie est appliquée. Les coefficients de régression présentés au tableau 6.5 montrent en effet que la seule propriété influencée fortement par l'intensité de raffinage est la déchirure qui est favorisée par une intensité faible.

Les modèles étant générés, voyons si l'on peut trouver un optimum.

6.2 Optimisation des propriétés papetières du stade 2.

L'optimisation des propriétés papetières devrait être assez simple puisque la tendance des coefficients de régression semble être la même pour toutes les propriétés. Examinons d'abord si le logiciel GAMS peut trouver un optimum.

	Indice d'égouttage, ml	Longueur de fibre Kajaani, mm
Constante	+629.51	3.069
int1		
ener1	-112.21	
int2		-0.180
ener2	-57.56	
int1 ²		-0.124
ener1 ²		-0.144
int2 ²		-0.159
ener2 ²		
int1*int2		
int1*ener1		-0.293
int2*ener2		-0.240
ener1*ener2	+26.40	0.155
int1*ener2		
int2*ener1		
r ²	.75	
r ² ajusté	.73	

Tableau 6.3 Régression sur les propriétés des pâtes du stade 2 en fonction de l'intensité et de l'énergie spécifique.

	Blancheur ISO, %	Opacité ISO, %	b*
Constante	+57.40	+88.42	+12.81
int1		-0.2212	
ener1	+0.5253	+0.7130	-0.2895
int2			
ener2	+0.6256	+0.6006	-0.2478
int1 ²	+0.1831	+0.0592	
ener1 ²	+0.0906		
int2 ²		-0.0369	
ener2 ²			
int1*int2		-0.1770	
int1*ener1	+0.2464	+0.4189	
int2*ener2			
ener1*ener2		-0.6201	+0.1292
int1*ener2			
int2*ener1	+0.3369	-0.7027	
r ²	.76	.70	.72
r ² ajusté	.70	.57	.69

Tableau 6.4 Régression sur les propriétés optiques des pâtes du stade 2 en fonction de l'intensité et de l'énergie spécifique.

	Densité, g/cm ³	Longueur de rupture, km	Allongement, %	ETA, g/cm	Indice d'éclatement, kPa*m ² /g	Indice de déchirure, mN*m ² /g
Constante	+0.2369	+2.203	+1.106	+10.92	+1.287	+7.590
int1						-1.085
ener1	+0.04873	+0.8196	+0.2465	+6.485	+0.6164	
int2						-1.071
ener2	+0.03486	+0.5288	+0.2033	+4.240	+0.4080	
int1 ²		+0.1074	+0.04861		+0.0795	+0.5238
ener1 ²						
int2 ²						
ener2 ²						
int1*int2						
int1*ener1				-1.261		
int2*ener2						
ener1*ener2	-0.01269	-0.2680	-0.08093	-1.768	-0.1566	-0.4838
int1*ener2						
int2*ener1						
r ²	.81	.90	.86	.89	.91	.65
r ² ajusté	.79	.89	.84	.87	.89	.59

Tableau 6.5 Régression sur les propriétés à l'état sec des papiers du stade 2 en fonction de l'intensité et de l'énergie spécifique.

6.2.1 Optimisation avec le logiciel GAMS.

L'utilisation de ce logiciel nécessite la création d'un programme adapté à chaque cas à traiter. Nous pouvons voir à l'annexe 7 le programme écrit pour l'optimisation qui nous intéresse. La première partie définit les variables, donne les limites à respecter pour chacune de ces variables, ainsi qu'un point de départ pour chaque variable. Par exemple, la variable INT2 est définie avec une limite inférieure de -1.6 et une limite supérieure de 3.8 avec comme point de départ la valeur de -1.6. Les limites couvrent toute la région expérimentale, tandis que les valeurs de départ sont prises au hasard. La partie EQUATIONS définit les équations de contrainte désirées. Dans ce cas nous avons fixé le CSF à une valeur supérieure ou égale à 500 ml, ainsi que la fonction à optimiser (Desf.). Puisque les coefficients de régression montrent que les propriétés optiques et de résistance suivent toutes la même tendance sauf pour l'indice de déchirure, nous utiliserons la longueur de rupture et l'indice de déchirure seulement pour l'optimisation. De cette façon les équations sont fortement simplifiées et il est possible de calculer les autres propriétés à partir des conditions trouvées. La fonction de désirabilité choisie est donc définie et codée suivant la méthode de Harrington tel que décrite dans un précédent chapitre. La dernière partie du programme permet le calcul de certaines valeurs à partir des conditions optimales trouvées. La ligne DISPLAY, à la fin du programme permet d'imprimer ces valeurs. Le reste de l'annexe contient les étapes suivies par le logiciel. A la fin de l'annexe nous retrouvons les valeurs que nous avons demandées avec la

commande DISPLAY. En page 165, il est important de noter que le logiciel nous averti que plus d'une solution existe par la phrase 2 **LOCALLY OPTIMAL**. Il peut alors s'agir d'optima séparés ou, ce qui est plus probable dans notre cas, d'un optimum situé en bordure des limites. L'examen de la situation de l'optimum trouvé montre que 3 des 4 variables se retrouvent à la limite que nous leur avons fixée. Il n'est donc pas totalement certain que nous nous trouvions en présence de l'optimum réel. Pour vérifier cette éventualité, nous ferons l'analyse par les réponses de surface.

6.2.2 Optimisation par réponse de surface.

L'analyse par réponse de surface est difficile dû au fait que seulement deux variables peuvent être examinées à la fois. Nous devons donc trouver un moyen de contourner ce problème. L'examen des coefficients de régression montrés plus tôt nous révèle un point important: L'indice d'égouttage n'est pas une fonction de l'intensité de raffinage. Nous pouvons donc tracer la figure 6.1 représentant le comportement de l'indice d'égouttage après les deux stades en fonction de l'énergie spécifique pour chacun des deux stades. La courbe correspondant à un indice d'égouttage de 500 ml nous apprend qu'il existe plusieurs agencements permettant d'obtenir la pâte désirée. Si nous choisissons 4 points sur la courbe de 500 ml nous obtenons les résultats présentés au tableau 6.6. Nous pouvons remarquer qu'il est possible d'avoir 500 ml d'indice d'égouttage avec une énergie totale variant de 1556 à 2040 kwh/t, dépendant de

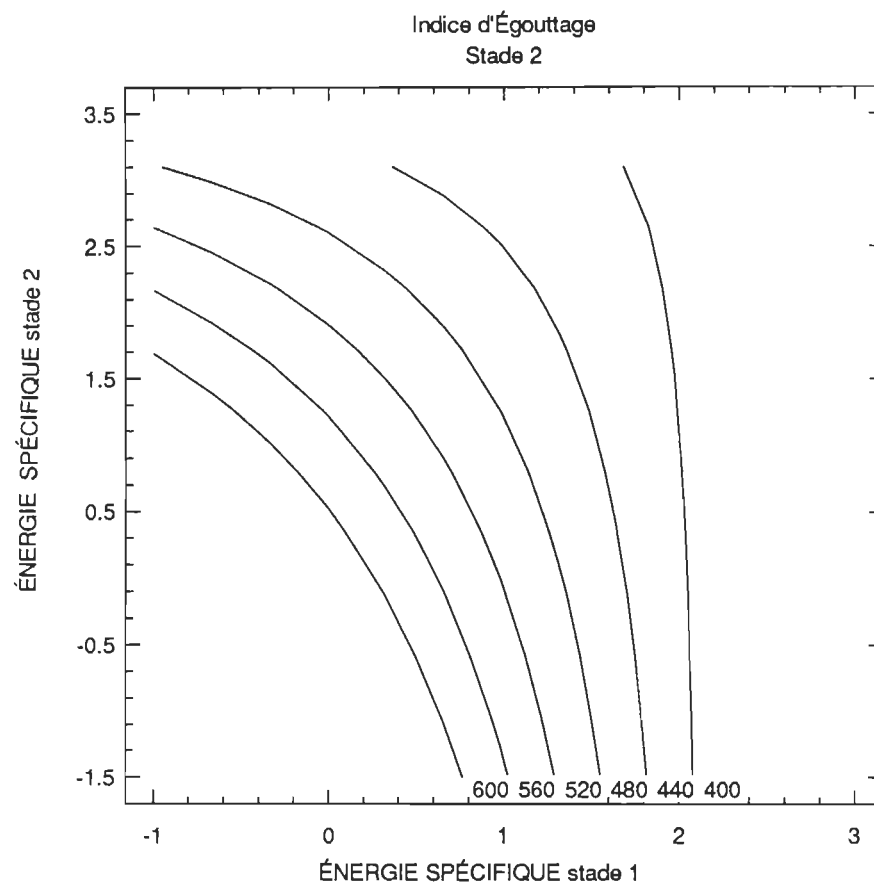


Figure 6.1 Variations de l'indice d'égouttage de la pâte finale en fonction de l'énergie spécifique des stade 1 et 2.

énergie spécifique du stade 1			énergie spécifique du stade 2			énergie totale
codé	kwh/t	%	codé	kwh/t	%	kwh/t
1.4	1286	83	-1.34	270	17	1556
1.0	1147	60	0.56	774	40	1921
0.4	938	46	1.80	1101	54	2040
-1.0	451	25	2.88	1373	75	1825

Tableau 6.6 Distribution d'énergie spécifique pour un indice d'égouttage final de 500 ml.

la façon de répartir cette énergie entre les deux stades mais nous devons vérifier le comportement des propriétés de résistance sur cette courbe.

Si nous prenons chacun de ces 4 points pour fixer les valeurs d'énergie spécifique et que nous traçons les iso-réponses pour l'indice de déchirure et la longueur de rupture nous obtenons les figures 6.2 à 6.5 qui nous montrent chacun un point différent de la courbe. L'examen de ces figures nous amène à diverses conclusions. Premièrement, sur toutes les figures, les valeurs maximales de résistance mécanique se retrouvent lorsque l'intensité au premier stade est élevée et celle du deuxième stade est faible. Deuxièmement, les points extrêmes présentent les meilleures propriétés de résistance mécanique. Il faut donc mettre beaucoup d'énergie à l'un des deux stades et très peu à l'autre pour obtenir de bonnes propriétés. Troisièmement, il semble un peu plus avantageux de mettre très peu d'énergie au premier stade et le reste au deuxième.

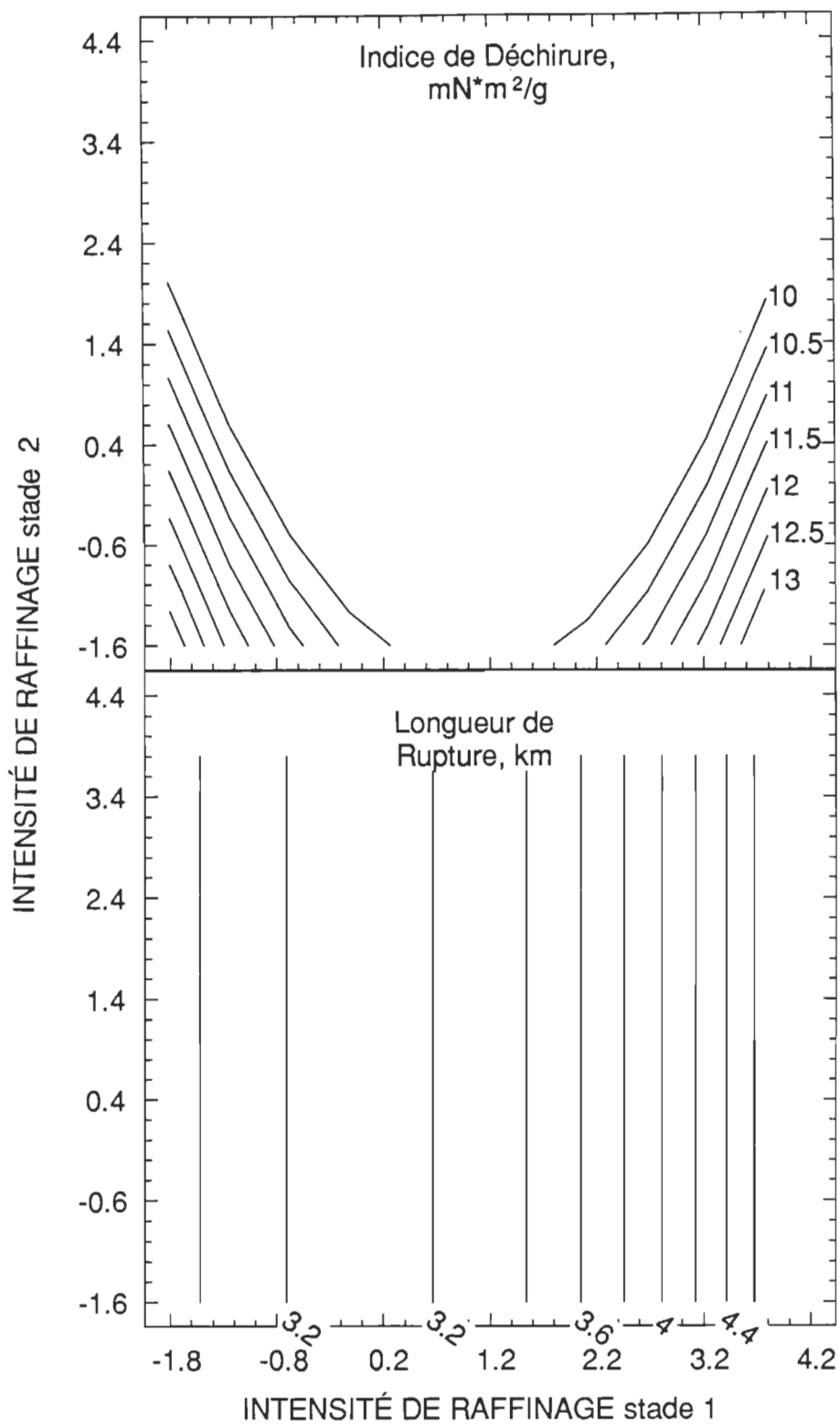


Figure 6.2 Variations de l'indice de déchirure en fonction de l'intensité des stades 1 et 2 pour le point 1.

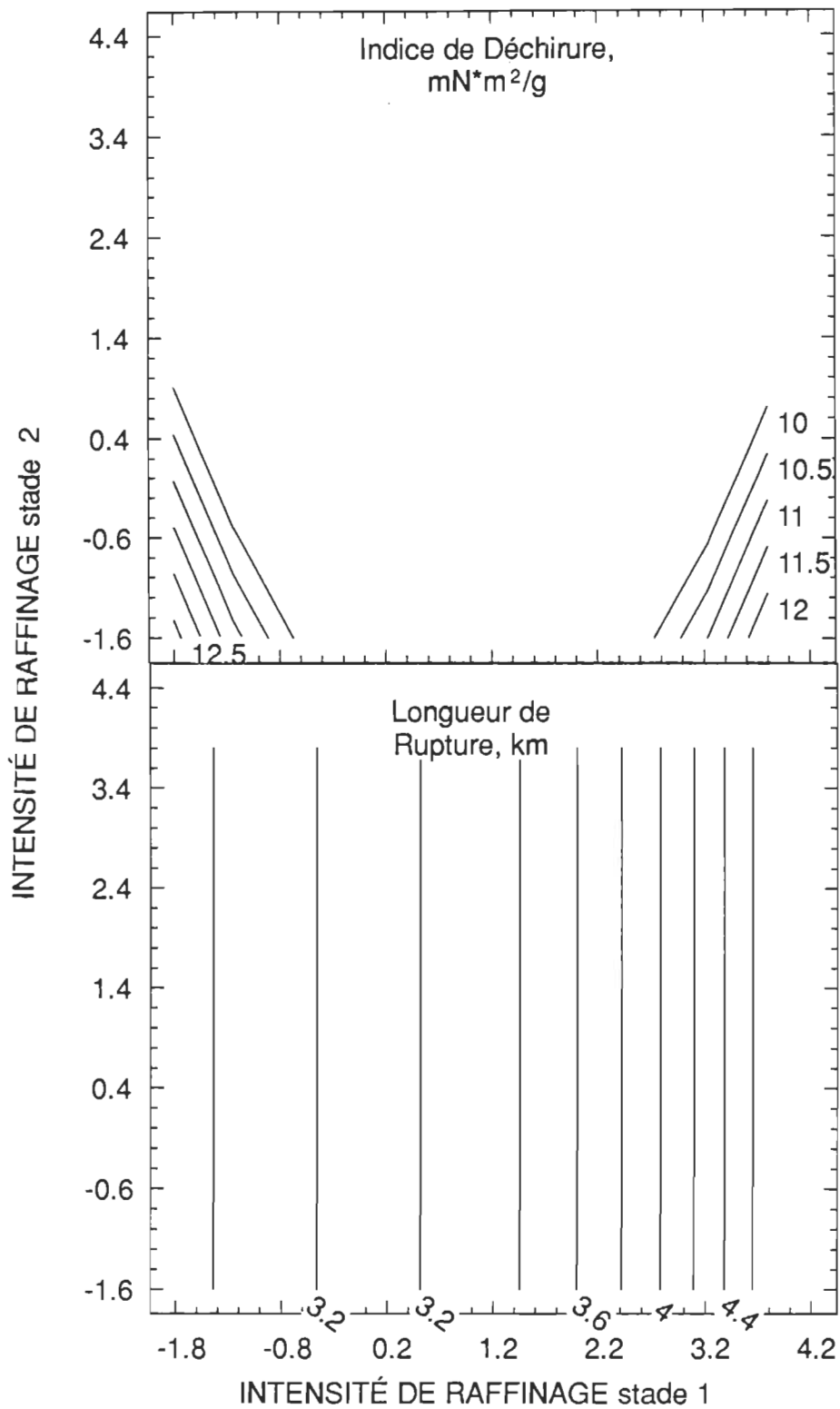


Figure 6.3 Variations de l'indice de déchirure en fonction de l'intensité des stades 1 et 2 pour le point 2.

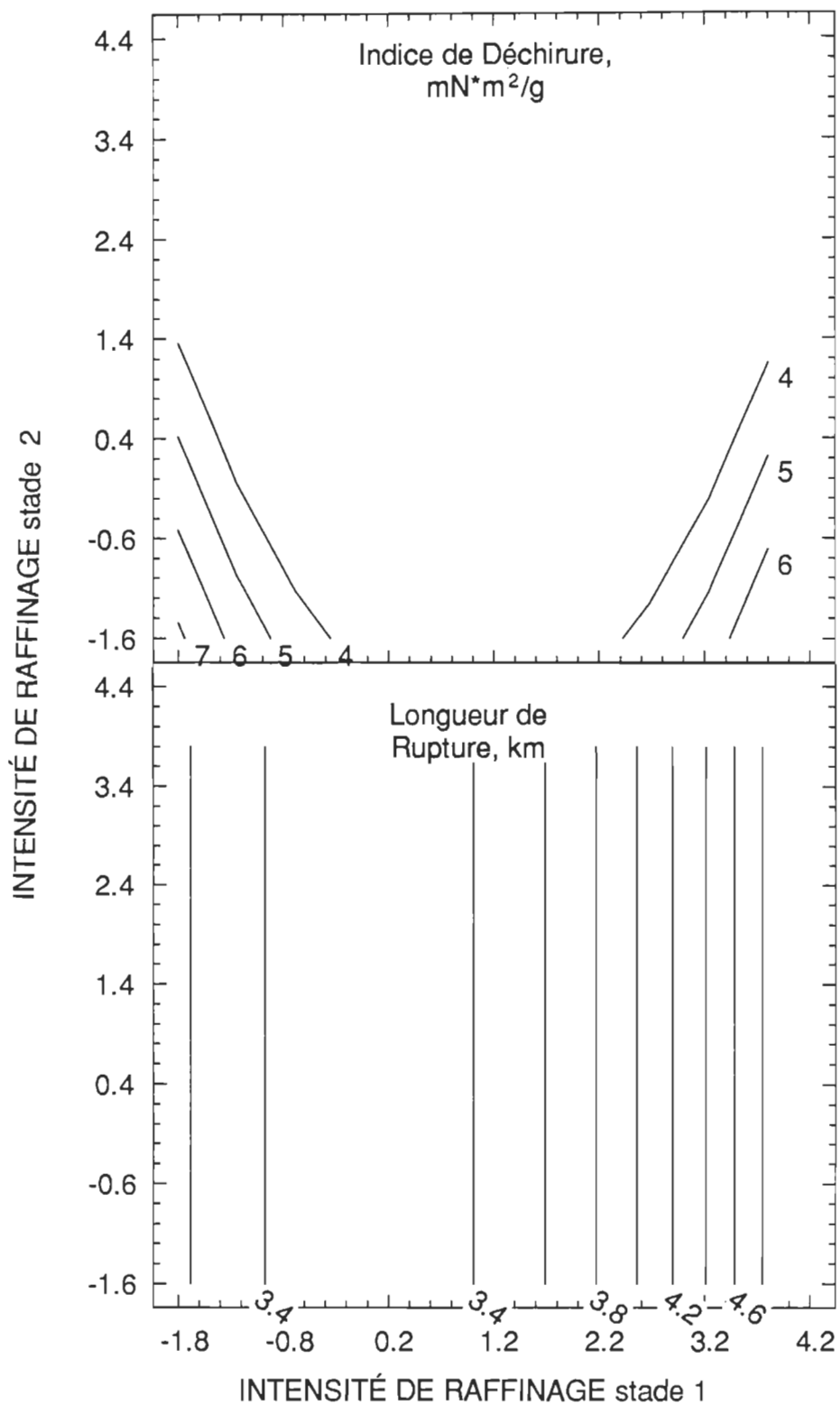


Figure 6.4 Variations de l'indice de déchirure en fonction de l'intensité des stades 1 et 2 pour le point 3.

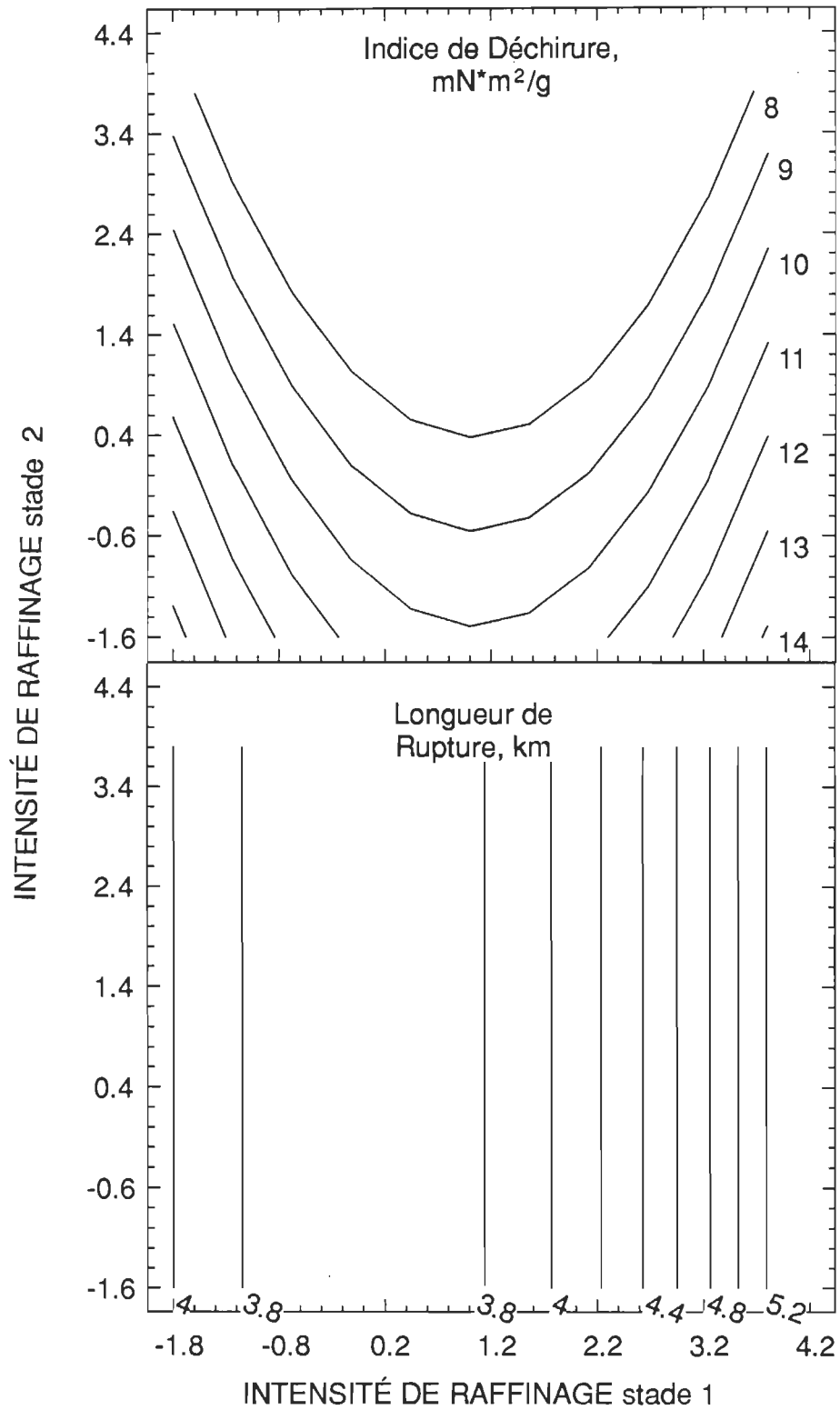


Figure 6.5 Variations de l'indice de déchirure en fonction de l'intensité des stades 1 et 2 pour le point 4.

Quatrièmement, il est intéressant de noter que l'optimum dans les propriétés n'est pas le point qui utilise le plus d'énergie; nous évitons donc un gaspillage d'énergie en l'appliquant de façon adéquate. Cinquièmement, le point optimum correspond à celui trouvé avec GAMS.

Nous aurons donc des propriétés de résistance optimales si nous appliquons très peu d'énergie à haute intensité au premier stade et beaucoup d'énergie à faible intensité au deuxième stade. La littérature nous indique qu'une faible intensité au deuxième stade est préférable pour le développement des résistances physiques mais, qu'au premier stade, une faible énergie appliquée à haute intensité est à conseiller. Nous arrivons donc aux mêmes conclusions que Stationwala (15), même si celui-ci travaillait sur des pâtes sans traitement chimique.

Rendu à ce point, il est nécessaire de se demander si les deux analyses effectuées séparément conduisent au même point. Nous pouvons pour cela prédire, à l'aide des équations développées pour la consistance et l'espacement, les valeurs d'énergie spécifique et d'intensité correspondant à notre optimum, et les comparer aux valeurs obtenues dans la deuxième partie. Cet exercice nous conduit aux valeurs du tableau 6.7.

Nous pouvons donc voir que les deux méthodes d'optimisation ne conduisent pas à une solution unique. Si nous prenons les résultats optimum du chapitre 5, que

	optimum chapitre 5	optimum chapitre 6
Énergie stade 1	1625	451
Intensité stade 1	2.35×10^{-4}	1.84×10^{-3}
Énergie stade 2	645	1373
Intensité stade 2	7.85×10^{-4}	6.47×10^{-4}

Tableau 6.7 Comparaison entre les 2 optima trouvés.

nous les ramenons à une forme codée comme pour le chapitre 6 et que nous les entrons dans les équations de prédiction en fonction de l'énergie et de l'intensité, nous retrouvons un indice de déchirure identique mais une longueur de rupture différente soit environ 4 km au lieu de 5.3 km. À quel facteur peut être attribué cette différence importante entre les deux modes d'optimisation? Comme les deux optima trouvés sont en périphérie de notre zone de travail, il s'agit probablement d'une erreur de prédiction de nos modèles. Nous pouvons cependant calculé l'intervalle de confiance à 95% pour chacun de nos optima.

Pour ce faire nous utiliserons la matrice du plan expérimental qui sera noté X. Si nous la multiplions par sa transposée qui est X' et que nous inversons la matrice résultante, nous obtiendrons $(X'X)^{-1}$. Si x_i représente notre point optimum, nous pouvons d'abord calculé h_i qui sera utilisé pour le calcul de l'écart type.

$$h_i = x_i (X'X)^{-1} x_i'$$

$$\text{Écart type } (y_i) = \sqrt{(1 + h_i) s^2}$$

L'intervalle de confiance pour la valeur individuelle prédite est donné par la formule:

$$\text{Intervalle de confiance: } (x_i b) \pm t_{\alpha/2} \sqrt{(1 + h_i) s^2}$$

Si nous regardons maintenant les valeurs prédites ainsi que l'intervalle de confiance à 95% pour les deux conditions optimales trouvées nous obtenons le tableau 6.8. Il est ainsi possible de remarquer une erreur de prédiction plus élevée dans le cas de l'optimisation qui utilise l'énergie et l'intensité comme variables indépendantes. Comme nous nous situons en périphérie de notre plage expérimentale, l'intervalle de confiance est très large amenant donc une prédiction beaucoup moins précise qu'au centre du plan. Cependant, même avec cet intervalle très large, il est impossible de rejeter totalement l'un ou l'autre des systèmes. Les tendances sont là, et ne peuvent être niées même si les deux systèmes arrivent à des résultats différents. Quelques essais supplémentaires nous permettraient de confirmer ou d'infirmer la deuxième option, mais étant donné les coûts assez élevés nécessaire, il n'apparaît pas utile de poursuivre l'optimisation. Pour une application industrielle, cette deuxième option permettrait de mieux contrôler l'opération. Comme le plan initial, en fonction de l'espacement et de la consistance, est plus structuré, nous devrions plutôt utiliser celui-là. La

	Valeur chap 5	Valeur chap 6
Indice d'égouttage stade 2, ml	500 ± 49	500 ± 54
Énergie spécifique, kwh/t	2270 ± 73	1825 ± 80
Volume spécifique, cm ³ /g	3.20 ± 1.23	3.08 ± 1.36
Longueur de rupture, km	5.56 ± 0.95	5.23 ± 1.05
Allongement, %	2.10 ± 0.45	2.10 ± 0.49
ETA, g/cm	33.5 ± 7.2	33.1 ± 7.9
Indice de déchirure, mN*m ² /g	15.3 ± 1.4	14.1 ± 1.6
Indice d'éclatement, kPa*m ² /g	3.23 ± 0.50	3.44 ± 0.55
Blancheur ISO, %	59.1 ± 1.5	61.0 ± 1.7
Opacité ISO, %	90.6 ± 1.8	89.5 ± 2.0

Tableau 6.8 Valeurs prédites et intervalle de confiance à 95%.

façon d'appliquer nos résultats à l'industrie serait d'évaluer à quelle consistance maximale il est possible de travailler dans des conditions stables pour le raffineur. Il s'agit ensuite de trouver, à cette consistance, les conditions d'espacement qui permettent d'obtenir un indice d'égouttage de 600 ml après le premier stade et 500 ml après le deuxième stade. Cette façon de procéder permettrait donc d'éviter l'incertitude des résultats obtenus puisque les tendances générales seulement pourrait être utilisé.

Nous sommes donc capable de produire une pâte de qualité supérieure à la pâte actuellement utilisée à l'usine de Masson mais est-ce que les coûts associés à

ce changement sont acceptables? Est-ce que le changement de PTHR permet une diminution importante de la quantité incorporée au mélange final? Nous allons tenter de répondre à ces questions dans le prochain chapitre au moyen d'une analyse économique.

CHAPITRE 7

CONSIDÉRATIONS ÉCONOMIQUE

L'optimisation des conditions d'opération du raffineur conduit à une pâte potentiellement utilisable. Les conditions optimales et les propriétés papetières qui en découlent sont présentées au tableau 7.1 pour cette pâte. Nous obtenons

	VALEUR CODÉE	VALEUR NON-CODÉE
Espacement stade 1	-0.8	.32 mm
Espacement stade 2	1.0	.5 mm
Consistance stade 1	2.0	18 %
Consistance stade 2	2.0	18 %
Indice d'égouttage stade 1, ml		600
Indice d'égouttage stade 2, ml		500
Énergie spécifique, kwh/t		2270
Volume spécifique, cm ³ /g		3.20
Longueur de rupture, km		5.56
Allongement, %		2.10
ETA, g/cm		33.5
Indice de déchirure, mN*m ² /g		15.3
Indice d'éclatement, kPa*m ² /g		3.23
Blancheur ISO, %		59.1
Opacité ISO, %		90.6

Tableau 7.1 Conditions optimales.

donc une pâte bisulfite à très haut rendement qui possède des résistances supérieures à celle utilisée à l'usine de Masson. Nous allons déterminer approximativement la quantité de PTHR que l'on peut retirer du mélange, en utilisant la PTHR optimisée, sans affaiblir le mélange final. Broderick (16), dans sa proposition de thèse, évalue à 300,000\$ les gains annuels découlant d'une diminution de 4% du pourcentage de PTHR entrant dans le mélange final. Pour ce faire, nous avons utilisé des équations de prédiction à partir de données de la compagnie Noranda. La forme des équations sera:

$$P_{\text{mélange}} = \text{EXP}\{x_{\text{PTHR}} \beta_{\text{PTHR}} \log P_{\text{PTHR}} + x_{\text{PMM}} \beta_{\text{PMM}} \log P_{\text{PMM}}\}$$

où $P_{\text{mélange}}$ = valeur de la propriété du mélange final

x_{PTHR} = fraction massique de PTHR dans le mélange

β_{PTHR} = paramètre d'ajustement pour la PTHR

P_{PTHR} = valeur de la propriété de la PTHR

x_{PMM} = fraction massique de PMM dans le mélange

β_{PMM} = paramètre d'ajustement pour la PMM

P_{PMM} = valeur de la propriété de la PMM

En choisissant un paramètre d'ajustement pour chaque propriété, et ce, à partir des données de la compagnie Noranda, il est possible ensuite de substituer les valeurs de notre PTHR dans ce mélange de façon à estimer les propriétés du mélange final. Le tableau 7.2 montre les propriétés prédites du mélange final lorsque l'on effectue le mélange 44% de PTHR et 56% PMM. Le mélange

	MÉLANGE PRÉDIT	MÉLANGE MASSON
PMM, %	56	56
PBTHR, %	44	44
Volume spécifique, cm ³ /g	2.87	2.8
Longueur de rupture, km	4.24	3.74
Allongement, %	1.55	1.32
ETA, g/cm	21.9	18.1
Indice de déchirure, mN*m ² /g	9.41	8.49
Indice d'éclatement, kPa*m ² /g	2.67	2.14
Blancheur ISO, %	58.0	55.1
Opacité ISO, %	96.3	96.8

Tableau 7.2 Comparaison des propriétés du mélange prédit et de la pâte actuellement utilisée.

Masson utilise la PTHR de Masson tandis que le mélange prédit utilise la PTHR optimisée. On peut y remarquer des gains intéressants au niveau de toutes les propriétés.

En utilisant la PTHR optimisée, il est possible de réduire de pourcentage de cette pâte dans le mélange jusqu'à ce que l'indice de déchirure de celui-ci soit égale à celle du mélange présentement utilisé, nous obtenons une diminution possible de 6% de PTHR. Cette diminution correspond en fait à une baisse de 15% de la quantité de PTHR produite. Nous obtiendrons ainsi les propriétés prédites du mélange qui sont montrées au tableau 7.3. Le mélange possède donc des

propriétés supérieures ou égale au mélange témoin, il est donc tout à fait acceptable.

L'économie réalisée est donc de 450,000\$ en plus de l'impact sur l'environnement résultant d'une baisse de production de cette pâte de près de 15%. Nous pouvons de plus envisager une autre possibilité, soit une augmentation de la production totale de l'usine. En effet l'usine peut produire 200,000 tonnes/année dont 44%, soit 88,000 tonnes, de pâte au sulfite. Si nous diminuons la quantité de PTHR incorporée au mélange de 44 à 38%, il sera possible de produire

	MÉLANGE PRÉDIT	MÉLANGE MASSON
PMM, %	62	56
PBTHR, %	38	44
Volume spécifique, cm ³ /g	2.87	2.8
Longueur de rupture, km	4.12	3.74
Allongement, %	1.51	1.32
ETA, g/cm	20.9	18.1
Indice de déchirure, mN*m ² /g	8.42	8.49
Indice d'éclatement, kPa*m ² /g	2.55	2.14
Blancheur ISO, %	57.8	55.1
Opacité ISO, %	96.7	96.8

Tableau 7.3 Propriétés prédites du nouveau mélange.

230000 t/an, ce qui représente une augmentation de production de l'ordre de 15% qu'il est possible de réaliser sans ajustement du plan de PTHR.

CONCLUSION

L'optimisation des conditions de raffinage de la pâte bisulfite à très haut rendement permet donc d'obtenir une pâte de qualité supérieure à celle de la pâte présentement utilisée par l'usine de Masson. Le remplacement de la pâte actuelle par cette nouvelle pâte permettrait de diminuer de 6% la quantité de PTHR dans le mélange final, d'où, une économie d'environ 450,000\$/an. Ce remplacement offre, de plus, l'opportunité d'augmenter la production de produit fini de l'usine de 15%, puisqu'une quantité moindre de PTHR est nécessaire.

Nous avons vu également qu'il est difficile d'appliquer nos résultats directement à l'usine mais que l'utilisation de variables secondaires pour l'optimisation pourrait permettre de faire une mise à l'échelle industrielle plus facile. Cependant, cette méthode donnant des résultats contradictoires à notre plan expérimental de départ, une étude plus poussée s'avère nécessaire.

Ce genre d'optimisation représente donc un moyen important pour atteindre un plus haut seuil d'efficacité de l'usine, permettant ainsi de garder une plus grande compétitivité de nos industries sur le marché international.

BIBLIOGRAPHIE

1. Lemay, Y., Goel, K., Ayroud, A. M., Beaupré, B., "Chemimechanical Pulp: Yield, Refining, and Quality", CPPA Conf. Technol. Estivale (Ste.-Adele, PQ): K1-11 (June 4-6, 1979).
2. Levlin, J.E., "The Response of Different Fibre Raw Materials to Refining", PIRA Int. Conf. New Technologies in Refining (Birmingham, England), Proc. (Vol. 2), Session 3, Paper 7: 31 p. (Dec. 9-11, 1986).
3. Claudio-da-Silva Jr., E., "Refining - Operational Variables vs. Raw Materials", PIRA Int. Conf. New Technologies in Refining (Birmingham, England), Proc. (Vol. 2), Session 4, Paper 12: 41 p. (Dec. 9-11, 1986).
4. Kirby, P. L., "Analysis of Mill Refiner System Using Specific Edge Load Theory", Appita 34, no. 1: 25-28 (July 1980).
5. Stationwala, M.I., Atack, D., Karnis, A., "Distribution and Motion of Pulp Fibres on Refiner Bar Surface.", JPPS v. 18 No. 4 J131-J137, Juillet 92.
6. Atack, D., "Toward a Theory of Refiner Mechanical Pulping", IPC Intern. Symp. Fundam. Concepts Refining (Appleton, Wis.), Preprint: 1-7 (Sept. 16-18, 1980).
7. Franzén, R. and Sweitzer, R., " Refining Forces in High Stock Concentration Pulping", Appita, 36(2):116-121 (1982).
8. Barnet, A. J., Bédard, J., Shaw, A. C., "High-yield Bisulfite (Pulp): Development of Wet Stretch and Fiber Flexibility by Alum Pretreatment Refining", CPPA Ann. Mtg. (Montreal) 61, Preprints Book A: 137-140 (1975); Pulp Paper Can. 76, no. 6: 69-71 (T185-187) (June 1975).
9. Robinson, D. H., Defoe, R. J., Fredriksson, B., "Low Intensity Refining: An Approach to Mechanical Pulp Quality Control", Pulp Paper 59, no. 5: 69-73 (May 1985).
10. Danforth, D.W., "Effect of Refining Parameters on Paper Properties", PIRA Int. Conf. New Technologies in Refining (Birmingham, England), Proc. (Vol. 2), Session 4, Paper 11: 12 p. (Dec. 9-11, 1986).

11. Miles, K.B. and Karnis, A., "The Response of Mechanicals and Chemical Pulps to Refining", Preprints, Papermakers Conference April 23-25 1990, Atlanta, Ga.
12. Fahey, M. D., "Mechanical Treatment of Chemical Pulps.", Tappi 53, no. 11: 2050-64 (Nov., 1970).
13. Miles, K.B. and May, W.D., "The Flow of Pulp in Chip Refiners" JPPS v.16 No. 2, J63-J70, March 1990.
14. Arjas, A., "Influence of Residence Time Distribution on Pulp Properties", Preprints, Intl. Symposium on Fundamental Concepts of Refining, Appleton, WI, 1980, pp 8-20.
15. Stationwala, M.I., Atack, D., Wood, J.R., Wild, D.J. and Karnis, A., "The Effect of Control Variables on Refining Conditions and Pulp Properties" Preprints, International Mechanical Pulping Conference, Toronto, 1979, pp.93-109.
16. Broderick, G., "Modélisation et Optimisation d'une Opération de Mise en Pâte Sulfite à Très Haut Rendement", proposition de sujet de thèse de doctorat, École Polytechnique, novembre 1992.
17. Broderick, G., "La Modélisation des Propriétés des Pâtes dans L'Optimisation d'une Opération de Mise en Pâte Sulfite à Très Haut Rendement", Rapport interne, 13 pages, 1990.
18. Broderick, G., "La Modélisation des Propriétés des Pâtes dans L'Optimisation d'une Opération de Mise en Pâte Sulfite à Très Haut Rendement: Phase II.", Rapport interne, 7 pages, 1991.
19. Harrington, E. C. Jr. (1965). "The Desirability Function ", Industrial Quality Control, Vol. 21, No. 10, pp. 494-498.
20. Khuri, A.I., Cornell, J.A., "Response Surfaces", Marcel Dekker, Inc. ASQC Quality Press, New York, p145.
21. Katz, S., Beatson, P. and Scallan, A.M., "The Determination of Strong and Weak Acidic Groups in Sulfite Pulps", Svensk Papperstidning, no 6, 1984, R48-53.
22. Jayme, G., Jerratsch, H.J., "Die Kj-Methode, eine Modifizierte Kappa-Zahl-Bestimmung für Halbzellstoffe in über 70% Ausbeute", Das Papier, December 25th, 1960, 14(12), 718-723.

ANNEXE 1

EXPÉRIMENTATION PLACKETT-BURMAN

C'est en 1946 que R.L. Plackett et J.P. Burman [1] ont introduit une classe de plans factoriels offrant une façon très efficace d'expérimenter avec un nombre appréciable de variables tout en conservant un nombre raisonnable d'essais. Les plans de type Plackett-Burman consistent essentiellement en une fraction très spécifique d'un design factoriel complet et se distinguent par les caractéristiques suivantes:

- i) on assigne L modalités aux variables ou facteurs considérés, où L est un nombre premier,
- ii) le nombre d'essais que comptera le plan sera un multiple de L^2 , or pour deux modalités nous utiliserons des multiples de quatre,
- iii) l'effet de chacun des facteurs principaux (effets simples) seront estimés avec la même précision,
- iv) l'utilisation de contrastes orthogonaux signifie que les effets des facteurs principaux seront estimés indépendamment les uns des autres.

Les deux dernières caractéristiques font que les plans Plackett-Burman s'adressent particulièrement bien aux études d'exploration préliminaire. La précision uniforme dans la mesure de l'impact des facteurs principaux élimine le besoin d'assigner une

importance à priori à chacun de ceux-ci. Il est souvent souhaitable de travailler avec un plan qui n'est pas complètement saturé et de se servir des quelques contrastes non-assignés pour quantifier cette précision. Bien que ces designs permettent d'évaluer l'effet de chacun des facteurs simples sans que ceux-ci se contaminent entre eux, rappelons qu'il s'agit toujours d'une résolution III. Les effets couplés seront donc confondus avec les facteurs principaux et viendront contaminer la mesure véritable de leur impact. Le passage à une résolution IV éliminerait à toute fin pratique la contamination des facteurs principaux par les effets couplés (effets simples confondus avec interactions triples) et peut s'accomplir en ajoutant au plan original, un plan réfléchi. Il en résulte cependant le double des essais et ceci peut équivaloir à des coûts prohibitifs.

La structure des alias peut s'avérer plus ou moins complexe selon qu'il s'agisse d'un plan géométrique ou non-géométrique. Par définition, un plan Plackett-Burman à deux modalités doit se composer d'un nombre d'essais qui est un multiple de quatre, mais si ce nombre est également une puissance de deux on parlera d'un plan géométrique. Dans le cas d'un plan géométrique, les interactions doubles sont confondues chacune avec un effet simple unique. Un plan non-géométrique confond une interaction double donnée avec plusieurs effets simples, ce qui apporte un degré de difficulté additionnel à l'interprétation.

Nous travaillons dans un premier avec onze variables de procédé ce qui nous amène à considérer un plan Plackett-Burman de seize ou de vingt essais. L'utilisation ici d'un design non-géométrique de vingt essais, dans l'intention d'ajouter des degrés de liberté pour l'estimation de l'erreur pure est contestable. Un design Plackett-Burman géométrique de seize essais nous aurait offert quatre degrés de liberté pour l'erreur. Un choix judicieux dans l'assignation des contrastes aux variables de procédé peut dans un tel cas faciliter énormément l'interprétation des sommes de carrés d'effets confondus. Il s'avère cependant que le problème fondamental présenté par les alias demeure à toute fin pratique le même dans ce cas précis. Le nombre d'effets couplés auxquels il serait vraisemblable d'accorder une importance réelle pour ce système est tel qu'il devient difficile sinon impossible de faire un choix judicieux de contrastes non-assignés. Puisqu'aucun avantage réel au niveau de la facilité d'interprétation n'est offert par le plan de seize essais, et qu'un ensemble de deux plans réfléchis est trop coûteux, un plan de vingt essais a été choisi.

Plackett et Burman nous fournissent alors la première rangée de la matrice d'expérimentation. Un plan entier de "n" essais est construit en permutant cette première rangée n-2 fois d'une colonne vers la gauche de façon cyclique. On ajoute en dernier lieu, une rangée où tous les facteurs prennent une valeur cible faible.

Bien qu'un design de tri se base habituellement sur deux niveaux de chaque facteur, nous pouvons aussi introduire un certain nombre de points centraux. Situés au

milieu de l'écart pour chacun des facteurs, ces points serviront à évaluer le degré de non-linéarité que possède la surface de réponse en question. Cette non-linéarité sera quantifiée au moyen d'un ratio F impliquant la différence entre réponse prédite et réponse mesurée à des conditions moyennes, rapporté à la variance de l'erreur pure. Nous avons prévu deux points centraux pour mesurer la courbure de la réponse et obtenons donc un total de 22 essais.

A1.2 Effets Confondus

A1.2.1 Calcul de la Matrice de Alias

Nous avons discuté au début de la section A1.1 de certaines caractéristiques propres au design Plackett-Burman. Une facette importante de ce type de design se rapporte à l'orthogonalité des contrastes (ou colonnes de la matrice) qui représentent chaque facteur principal. Le fait que ces vecteurs soient orthonormaux dans l'espace apporte des conséquences intéressantes, soit;

- i) l'erreur de prédiction est minimisée, or les marges de confiance globales sont plus étroites,
- ii) les intervalles de confiance individuelles de chacun des coefficients sont beaucoup plus restreints,
- iii) les coefficients de chacun des contrastes ne sont pas corrélés entre eux.

Il est approprié, avant de passer à l'analyse proprement dite des résultats d'examiner notre matrice de design. Bien que les conditions cibles sont dictées par une matrice orthogonale, il demeure que ces variables peuvent dévier en pratique. La matrice réelle des conditions d'essais ne sera donc plus nécessairement orthogonale. Il devient donc approprié de vérifier si une perte d'orthogonalité s'est produite et si une telle perte est significative et requiert des mesures correctives.

Empruntons dans les calculs qui suivent les formulations employées par Box et Draper [2]. Pour le modèle général:

$$y = Z\theta + \epsilon$$

l'approximation moindres carrés des coefficients θ se calcule de la façon suivante,

$$\theta = (Z'Z)^{-1}Z'y$$

La matrice de covariance de θ ou $V(\theta)$ est alors définie comme suit, où σ^2 est la variance de l'erreur pure;

$$V(\theta) = (Z'Z)^{-1}\sigma^2$$

Dans le cas d'une matrice Z orthogonale, la matrice de covariance ne comptera que des éléments de la diagonale. De ce fait, l'intervalle de confiance globale sera sphérique (ou hypersphérique), alors que dans le cas d'un plan non-orthogonal il assumera la forme d'une ellipse couvrant un espace plus grand. Le tableau A1.2 présente une partie de la matrice multiplicatrice $(Z'Z)^{-1}$ pour le plan expérimental prescrit.

Tel que voulu, le plan prescrit ne compte que des éléments en diagonale. On observe cependant qu'il existe effectivement des éléments non-nuls à l'écart de la diagonale. La matrice des conditions réelles n'est pas orthogonale et on pourra s'attendre à ce que nos marges de confiance soient quelque peu amplifiées. Il demeure qu'en majeure partie, ces éléments assument une valeur inférieure à 15% de l'élément diagonale. Les instances les plus importantes impliquent les contrastes

représentant les consistances d'alimentation aux raffineurs. En effet ces variables d'opération se sont avérées difficiles à contrôler en pratique et les consistances cibles n'ont pas toujours été atteintes. Malgré ces difficultés, on peut néanmoins affirmer que de façon globale, la perte d'orthogonalité observée ici n'est pas critique.

La matrice $(\mathbf{Z}'\mathbf{Z})^{-1}$ joue également un rôle au niveau des facteurs confondus dans chaque contraste. Nous travaillons toujours avec un modèle de la forme $\mathbf{y} = \mathbf{Z}\theta + \boldsymbol{\epsilon}$ où la matrice de design \mathbf{Z} est la matrice des variables de régression. Ajoutons maintenant des contrastes pour les interactions X_iX_j et divisons \mathbf{Z} en deux partitions \mathbf{Z}_1 et \mathbf{Z}_2 . La partition \mathbf{Z}_1 comprends les facteurs simples X_i alors que la partition \mathbf{Z}_2 est composée des effets couplés du type X_iX_j . Comme notre plan Plackett-Burman est de résolution III, nous savons que les interactions X_iX_j seront confondues avec les facteurs simples et que \mathbf{Z}_1 ne sera pas orthogonal à \mathbf{Z}_2 . De plus cette structure des alias sera relativement complexe puisque le design est non-géométrique. Notre modèle prendra alors l'allure suivante:

$$y = \mathbf{Z}_1 (\theta_1 + \mathbf{A}\theta_2) + (\mathbf{Z}_2 - \mathbf{Z}_1\mathbf{A}) \theta_2 + \epsilon$$

où la matrice \mathbf{A} est la matrice des alias ou la matrice biais, et se calcule comme suit;

$$A = (Z_1' Z_1)^{-1} Z_1' Z_2$$

La matrice **A** est calculée au tableau A1.3 pour le plan Plackett-Burman.

Tableau A1.3 a: Interactions Confondues Plackett Prescrit

	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11
x1x2	0	0	-0.2	0.2	0.2	0.2	-0.2	0.2	-0.6	-0.2	-0.2
x1x3	0	-0.2	0	-0.2	-0.2	-0.6	-0.2	0.2	-0.2	-0.2	-0.2
x1x4	0	0.2	-0.2	0	-0.2	0.2	-0.2	0.2	0.2	-0.2	0.2
x1x5	0	0.2	-0.2	-0.2	0	-0.2	0.2	-0.2	-0.2	0.2	0.2
x1x6	0	0.2	-0.6	0.2	-0.2	0	0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2
x1x7	0	-0.2	-0.2	-0.2	0.2	0.2	0	-0.2	0.2	0.2	-0.6
x1x8	0	0.2	0.2	0.2	-0.2	-0.2	-0.2	0	0.2	0.2	-0.2
x1x9	0	-0.6	-0.2	0.2	-0.2	-0.2	0.2	0.2	0	0.2	0.2
x1x10	0	-0.2	-0.2	-0.2	0.2	-0.2	0.2	0.2	0.2	0	-0.2
x1x11	0	-0.2	-0.2	0.2	0.2	-0.2	-0.6	-0.2	0.2	-0.2	0
x2x3	-0.2	0	0	-0.2	0.2	0.2	0.2	-0.2	0.2	-0.6	-0.2
x2x4	0.2	0	-0.2	0	-0.2	-0.2	-0.6	-0.2	0.2	-0.2	-0.2
x2x5	0.2	0	0.2	-0.2	0	-0.2	0.2	-0.2	0.2	0.2	-0.2
x2x6	0.2	0	0.2	-0.2	-0.2	0	-0.2	0.2	-0.2	-0.2	0.2
x2x7	-0.2	0	0.2	-0.6	0.2	-0.2	0	0.2	-0.2	-0.2	-0.2
x2x8	0.2	0	-0.2	-0.2	-0.2	0.2	0.2	0	-0.2	0.2	0.2
x2x9	-0.6	0	0.2	0.2	0.2	-0.2	-0.2	-0.2	0	0.2	0.2
x2x10	-0.2	0	-0.6	-0.2	0.2	-0.2	-0.2	0.2	0.2	0	0.2
x2x11	-0.2	0	-0.2	-0.2	-0.2	0.2	-0.2	0.2	0.2	0.2	0
x3x4	-0.2	-0.2	0	0	-0.2	0.2	0.2	0.2	-0.2	0.2	-0.6
x3x5	-0.2	0.2	0	-0.2	0	-0.2	-0.2	-0.6	-0.2	0.2	-0.2
x3x6	-0.6	0.2	0	0.2	-0.2	0	-0.2	0.2	-0.2	0.2	0.2
x3x7	-0.2	0.2	0	0.2	-0.2	-0.2	0	-0.2	0.2	-0.2	-0.2
x3x8	0.2	-0.2	0	0.2	-0.6	0.2	-0.2	0	0.2	-0.2	-0.2
x3x9	-0.2	0.2	0	-0.2	-0.2	-0.2	0.2	0.2	0	-0.2	0.2
x3x10	-0.2	-0.6	0	0.2	0.2	0.2	-0.2	-0.2	-0.2	0	0.2
x3x11	-0.2	-0.2	0	-0.6	-0.2	0.2	-0.2	-0.2	0.2	0.2	0

Tableau A1.3 b: Interactions Confondues Plackett Prescrit

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11
X4X5	-0.2	-0.2	-0.2	0	0	-0.2	0.2	0.2	0.2	-0.2	0.2
X4X6	0.2	-0.2	0.2	0	-0.2	0	-0.2	-0.2	-0.6	-0.2	0.2
X4X7	-0.2	-0.6	0.2	0	0.2	-0.2	0	-0.2	0.2	-0.2	0.2
X4X8	0.2	-0.2	0.2	0	0.2	-0.2	-0.2	0	-0.2	0.2	-0.2
X4X9	0.2	0.2	-0.2	0	0.2	-0.6	0.2	-0.2	0	0.2	-0.2
X4X10	-0.2	-0.2	0.2	0	-0.2	-0.2	-0.2	0.2	0.2	0	-0.2
X4X11	0.2	-0.2	-0.6	0	0.2	0.2	0.2	-0.2	-0.2	-0.2	0
X5X6	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	0	0	-0.2	0.2	0.2	0.2	-0.2
X5X7	0.2	0.2	-0.2	0.2	0	-0.2	0	-0.2	-0.2	-0.6	-0.2
X5X8	-0.2	-0.2	-0.6	0.2	0	0.2	-0.2	0	-0.2	0.2	-0.2
X5X9	-0.2	0.2	-0.2	0.2	0	0.2	-0.2	-0.2	0	-0.2	0.2
X5X10	0.2	0.2	0.2	-0.2	0	0.2	-0.6	0.2	-0.2	0	0.2
X5X11	0.2	-0.2	-0.2	0.2	0	-0.2	-0.2	-0.2	0.2	0.2	0
X6X7	0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	0	0	-0.2	0.2	0.2	0.2
X6X8	-0.2	0.2	0.2	-0.2	0.2	0	-0.2	0	-0.2	-0.2	-0.6
X6X9	-0.2	-0.2	-0.2	-0.6	0.2	0	0.2	-0.2	0	-0.2	0.2
X6X10	-0.2	-0.2	0.2	-0.2	0.2	0	0.2	-0.2	-0.2	0	-0.2
X6X11	-0.2	0.2	0.2	0.2	-0.2	0	0.2	-0.6	0.2	-0.2	0
X7X8	-0.2	0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	0	0	-0.2	0.2	0.2
X7X9	0.2	-0.2	0.2	0.2	-0.2	0.2	0	-0.2	0	-0.2	-0.2
X7X10	0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.6	0.2	0	0.2	-0.2	0	-0.2
X7X11	-0.6	-0.2	-0.2	0.2	-0.2	0.2	0	0.2	-0.2	-0.2	0
X8X9	0.2	-0.2	0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	0	0	-0.2	0.2
X8X10	0.2	0.2	-0.2	0.2	0.2	-0.2	0.2	0	-0.2	0	-0.2
X8X11	-0.2	0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.6	0.2	0	0.2	-0.2	0
X9X10	0.2	0.2	-0.2	0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	0	0	-0.2
X9X11	0.2	0.2	0.2	-0.2	0.2	0.2	-0.2	0.2	0	-0.2	0
X10X11	-0.2	0.2	0.2	-0.2	0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	0	0

Puisque la matrice prescrite est orthogonale, on remarque qu'une interaction donnée ne contamine pas ni l'un ni l'autre des facteurs simples dont elle est composée. On retrouve par exemple un 0 à l'intersection de la rangée X_1X_2 avec les colonnes X_1 et X_2 . Notons également que les éléments de la matrice **A** assument tous soit la valeur de 0.2 ou de 0.6. Comparons maintenant ce résultat avec la structure des alias du design réel. La perte d'orthogonalité souffert dans le cas des conditions réelles se remarque immédiatement par le fait que deux facteurs simples seront maintenant contaminés par leur interaction mutuelle. Prenons encore une fois l'exemple de l'interaction X_1X_2 qui maintenant contribuera à l'effet perçu pour le contraste X_1 . De plus, l'uniformité au niveau de la valeur assumée par les éléments de la matrice des alias est absente et nous trouvons toute une gamme de valeurs.

La matrice **A** nous décrit la contamination présente dans le calcul du coefficient de régression β de chaque contraste. La valeur attendue $E(b_1)$ du coefficient β_1 se rapportant au contraste étiqueté X_1 estime également les effets suivants:

$$E(b_1) = \beta_1 + 0.12 \beta_{12} + 0.03 \beta_{13} - 0.03 \beta_{14} + \dots - 0.05 \beta_{1011}$$

On devra se rappeler cette contamination au moment de l'interprétation des effets calculés pour chaque contraste. Il existe néanmoins une méthode qui introduit des notions de liens de parenté entre effets couplés et effets simples qui peut nous aider à

juger de l'importance d'un effet couplé et par ce fait de l'impact véritable que peut représenter un contraste donné.

Bibliographie pertinente:

1. Plackett, R.L. et Burman, J.P. (1946). The Design of Optimum Multifactorial Experiments. *Biometrika*, 33, 305-325 et 328-332.
2. Box, G.E.P., Draper, N.R. (1987). *Empirical Model-Building and Response Surfaces*. John Wiley, N.Y.

ANNEXE 2

EXPÉRIMENTATION CCD

A2.1 Caractéristiques d'un Plan de Modélisation

L'étude des résultats obtenus avec le Plackett-Burman démontre qu'un modèle linéaire ne suffit pas à décrire plusieurs propriétés dont l'indice de déchirure, l'indice d'égouttage et la consommation d'énergie au raffinage. L'objectif de cette étape de l'étude RSM est donc d'ajuster un polynôme du second degré aux valeurs d'une variable réponse afin de modéliser cet écart de linéarité. Or, plus de deux modalités seront requises à cette fin pour chaque variable ou facteur. Typiquement trois ou cinq modalités sont obtenues en ajoutant des essais au centre et aux extrémités des axes de l'hypercube utilisé précédemment.

Le plan devra compter au moins $p=(k+1)(k+2)/2$ essais puisque le polynôme nécessitera l'estimation de p coefficients. L'emplacement des essais dans l'espace expérimental sera dicté par le plan en question qui cherche généralement à se prévaloir de propriétés particulières telles:

- i) l'isovariance par rotation
- ii) la précision uniforme
- iii) l'orthogonalité

Ce travail utilise la matrice $Z'Z$ pour vérifier l'orthogonalité du design Plackett-Burman. Khuri [1] divise cette matrice, pour le design ξ , par le nombre d'essais N pour obtenir la matrice des moments $M(\xi) = N^{-1} Z'Z$ qui servira à caractériser plusieurs propriétés d'un plan. Cette matrice sera composée de l'ensemble des moments de degré $\delta = \sum \delta_i \geq 0$, définis comme suit:

$$[1^{\delta_1} \ 2^{\delta_2} \ \dots \ k^{\delta_k}] = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_{u1}^{\delta_1} x_{u2}^{\delta_2} \dots x_{uk}^{\delta_k}$$

où,

$$\sum_{u=1}^N x_{ui} = 0 \quad \text{et} \quad \sum_{u=1}^N x_{ui}^2 = N$$

L'isovariance par rotation est une indication de la sphéricité de la région décrite par les essais du plan. Pour un design de premier degré, l'isovariance signifie que les observations seront centrées et distribuées de façon à obtenir une variance unitaire selon chaque axe. Or le design dispose d'une symétrie spatiale et accorde une candidature (variance) d'importance égale à chaque variable contrôlée. Les moments $[i]$ et $[ij]$ seront donc nuls, de paire avec $[ii] = 1$.

L'isovariance pour un design de second degré, sera également caractérisée par des valeurs spécifiques qui devront être assignées aux moments $[iiii]$ et $[iijj]$. L'isovariance par rotation pourra s'obtenir en déplaçant les essais situés aux extrémités opposées de chaque axe à une distance α prescrite à partir du centre du plan. Les coordonnées de ces points axiaux devront être telles que si $[iijj] = \lambda_4$ alors $[iiii] = 3\lambda_4$ pour $i < j$.

L'orthogonalité des contrastes du design permet d'estimer les coefficients de chaque paramètre d'un modèle indépendamment les uns des autres. Pour un design orthogonal de premier degré, la matrice comportera les moments $[ii] = 1$ et les moments $[ij] = 0$. Or un design de second degré ne peut posséder une matrice des moments qui soit diagonale. Ceci découle du fait que le produit du contraste X_i avec lui-même produit un contraste qui est identique pour tous les X_i et qui correspond au contraste assigné à l'intercept. C'est-à-dire que les moments $[ii]$ et $[iij]$ ne sont pas nuls. Une transformation décrite par Box et Hunter [2] permet une quasi-orthogonalité selon la condition $[iij] = \lambda_4 = 1$. Cette condition de quasi-orthogonalité est réalisée en pratique par l'ajout d'essais au centre du plan.

Lorsqu'un plan est isovariant, la variance de prédiction est uniforme pour tous les points équidistants du centre. Box et Hunter [2] ont d'ailleurs démontré que la variance d'une prédiction au point x est reliée au rayon $\rho^2 = x'x$ de la façon suivante:

$$\text{Var}[Y_{\text{prédit}}(x)] = A \{2(k+2)\lambda_4^2 + 2\lambda_4(\lambda_4 - 1)(k+2)\rho^2 + [(k+1)\lambda_4 - (k-1)]\rho^2\}$$

où,

$$A = \frac{\sigma^2}{2N\lambda_4[(k+2)\lambda_4 - k]}$$

et au centre du design,

La précision avec laquelle une réponse est prédite diminue rapidement en fonction de l'éloignement radiale. Elle est maximale au centre du plan, $x=0$, et augmente plus λ_4

$$\text{Var}[Y_{\text{prédit}}(0)] = \frac{\sigma^2 \lambda_4}{N [\lambda_4 - (\frac{k}{k+2})]}$$

excède une valeur de $k/(k+2)$. La valeur $\lambda_4=k/(k+2)$ s'appelle la valeur "singulière" de λ_4 et entraîne une variance de prédiction infini.

Un design de précision uniforme est un design où la variance de prédiction à $\rho=1$ est égale à celle trouvée au centre $\rho=0$. Une précision uniforme peut-être imposée pour l'ensemble des conditions incluses dans le rayon α en modifiant, encore une fois, le nombre de points centraux. L'ajout d'essais au centre du design se fera en fonction du nombre de facteurs à l'étude, et sera associé à des valeurs de λ_4 de l'ordre de 0.8 à 0.95 tel qu'indiqué au tableau A2.1. Le type de bloc factoriel utilisé sera également un facteur.

Tableau A2.1 : Valeurs de λ_4 requises pour une précision uniforme[1]

k	2	3	4	5	6	7	8
λ_4	0.7844	0.8385	0.8704	0.8918	0.9070	0.9184	0.9274

A2.2 Le Choix d'un Plan

Élaborer des surfaces réponses requiert que chaque facteur occupe au moins trois modalités. Des plans d'expérimentation pouvant servir à cette fin sont par exemple:

- i) les designs factoriels 3^k et les factoriels fractionnés à trois modalités
- ii) les designs Box-Behnken
- iii) les designs de type composite centré (Box-Wilson)

Les designs factoriels 3^k peuvent impliquer un nombre excessif d'essais pour $k=4$ variables et plus. Lorsque les modalités sont espacées uniformément, ce type de design est orthogonal ($\lambda_4=1$). Il n'est pas cependant isovariant par rotation ($[iiii] \neq 3[ijjj]$) et l'inefficacité du design factoriel 3^k est rapportée par plusieurs auteurs dont DeBaun [3]. Bon nombre d'auteurs ont depuis proposé des configurations composées d'éléments incomplets du plan factoriel 3^k , mettant l'emphase sur l'amélioration de l'efficacité.

Contraire au design factoriel (complet ou fractionné) qui occupe une région de forme hypercubique, les designs Box-Behnken et composite centré placent les points (essais) de façon à décrire une hypersphère. Une telle géométrie reflète des limites pratiques d'opération. Très souvent, il n'est possible d'opérer à des conditions extrêmes que pour quelques variables à la fois.

Box et Behnken [4] ont contré ce problème, en omettant les essais situés aux coins de l'hypercube. Ce design n'utilise que trois modalités pour chaque facteur, ce qui peut

s'avérer un avantage pratique important dans certaines situations. Ces designs ne sont pas nécessairement isovariants et le blocage orthogonal des éléments dont il est composé n'est pas toujours possible.

Le design composite centré, proposé par Box et Wilson [5], est un design à cinq modalités. L'utilisation simultanée de conditions extrêmes est évitée dans ce design en assignant à la partie factorielle cubique une taille inférieure à l'écart maximale des facteurs.

Lucas [6], de la compagnie DuPont, compare plusieurs designs de surface de réponse dont le design centré composite et le Box-Behnken. Il utilise comme critère l'efficacité G et D qui se définissent de la façon suivante:

$$\text{efficacité } D = \left(\frac{|M(\xi^*)|}{\text{Max}_{\xi} |M(\xi)|} \right)^{1/p}$$

$$\text{efficacité } G = \frac{p}{d_{\max}} = \frac{p}{\text{Min}_{\xi} [\text{Max}_x x' (M(\xi))^{-1} x]}$$

Les valeurs de $|M(\xi)|$ et $d = x'(M(\xi))^{-1} x$, sont des indicateurs de l'information disponible par essai pour un design. Ils offrent une juste mesure de comparaison entre plans de taille N différentes. Un design particulier ξ^* est D-optimal lorsqu'il maximise la déterminant de la matrice des moments $|M(\xi^*)|$. De façon similaire, un design est dit G-

optimal lorsqu'il minimise la variance maximale de prédiction, soit $d_{\max} \sigma^2/N$, sur toute la région expérimentale.

Lucas rapporte que des efficacités G et D de l'ordre de 90% et de 98% respectivement sont obtenus pour les configurations avec un nombre optimal de points centraux. L'efficacité du plan Box-Behnken est très voisine de celle du plan composite centré pour une distribution de forme sphérique. Cependant, pour une région de forme cubique, l'efficacité du plan Box-Behnken est réduite de façon importante puisque ce design omet les combinaisons situées aux coins d'un cube. Le plan composite ne connaît pas ce problème du fait qu'il compte un design factoriel parmi ses éléments structurels.

Le plan composite centré offre donc une performance égale ou supérieure au plan Box-Behnken et permet une flexibilité accrue. Un ajustement de la distance α des points axiaux permet d'adopter une forme intermédiaire entre une sphère et un cube. De ce fait, ce plan peut décrire plus facilement une gamme importante de régions trouvées en pratique.

A2.3 Le Plan Composite Centré

Le design composite centré se compose de trois éléments structurels, soit:

- i) un nombre F de points constituant un design factoriel 2^k (complet ou fractionné)
- ii) un nombre n_c de points au centre de l'espace expérimental

- iii) n_a de points axiaux situés aux extrémités de chaque axe, soit à une distance α du centre.

Un choix judicieux de la position α des points axiaux pourra conférer au plan la propriété d'isovariance par rotation. La structure de la matrice M des moments peut se généraliser en posant $[ii] = 1$ et un facteur d'échelle g tel que:

$$g = \left[\frac{N}{(F+2\alpha^2)} \right]^{1/2}$$

- a) Isovariance du plan composite centré

La condition d'isovariance $[iiii] = 3 [iijj]$ devient alors;

$$Fg^4 + 2\alpha^4 g^4 = 3Fg^4 \quad \text{ou encore} \quad \alpha = F^{1/4}$$

- b) Orthogonalité d'un plan isovariant

Le plan composite centré sera orthogonal si $[iijj] = \lambda_4 = 1$. Cette condition s'écrit:

$$[iijj] = \frac{Fg^4}{N} = \frac{FN}{(F+2\alpha^2)^2}$$

ou encore,

$$\alpha = \left(\frac{(FN)^{1/2} - F}{2} \right)^{1/2}$$

En substituant $\alpha = F^{1/4}$ dans l'équation précédente et en calculant la valeur $N = F + n_o + n_a$, il est possible d'obtenir un nombre n_o de points centraux pour assurer l'orthogonalité d'un plan isovariant. Soit;

$$n_o \approx 4\sqrt{F+4} - 2k$$

Un design orthogonal, où $\lambda_4 = 1$, sera caractérisé d'une précision qui est maximale au centre du design et qui diminue rapidement vers la périphérie du design.

c) Précision uniforme d'un plan isovariant

La précision peut être uniformisée pour la région de rayon inférieure à α en substituant à λ_4 une valeur spécifique qui est fonction du nombre de facteurs. On obtient alors:

$$n_o \approx \lambda_4 (\sqrt{F+2}) - F - 2k$$

Les valeurs spécifiques de λ_4 qui permettent d'obtenir un plan isovariant et de précision uniforme sont énumérées au tableau A2.1.

Bibliographie pertinente:

1. Khuri, A.I., et Cornell, J.A., Response Surfaces, Designs and Analyses, New York, Marcel Dekker, (1987).
2. Box, G.E.P., et J.S. Hunter (1957). Multi-Factor Experimental Designs for Exploring Response Surfaces, Ann. Math. Statist., 28, 195-241.
3. DeBaun, R.M. (1959). Response Surface Designs for Three factors at Three Levels, Technometrics, 1, 1-8.
4. Box, G.E.P., et D.W. Behnken (1960). Some New Three Level Designs for the Study of Quantitative Variables, Technometrics, 2, 455-475.
5. Box, G.E.P. et K.B. Wilson (1951). On the Experimental Attainment of Optimum Conditions, J. Roy. Statist. Soc., B13, 1-38.
6. Lucas, J.M. (1956). Which Response Surface Design is Best, Technometrics, Vol. 18, No.4, 411-417.

ANNEXE 3

CONDITIONS D'OPÉRATION DU RAFFINEUR POUR LES STADES 1 ET 2

CODE	RCCD1-1	RCCD1-2	RCCD2-1	RCCD2-2	RCCD3-1	RCCD3-2
PUISSANCE ÉLECTRIQUE						
CHARGE EFFECTIVE (kw)	21	18	51	27	11	22
DILUTION						
DISQUES PLATS (galUS/min)	0.55	0.49	0.33	0.2	0.91	0.34
DISQUES CONIQUES (galUS/min)	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1
DISTANCE DE PLAQUES						
DISQUES PLATS (mm)(mesuré)	0.4	0.4	0.3	0.3	0.5	0.5
DISQUES CONIQUES (mm)(mesuré)	1.2	1.2	0.9	0.9	1.5	1.5
DISTANCE RÉELLE (mm)	0.40	0.40	0.30	0.30	0.50	0.50
PRODUCTION						
POIDS ÉCHANTILLON HUMIDE (g)	8330	12147	5454.3	10094	11717	9687
TEMPS D'ÉCHANTILLONNAGE (sec)	120	156	120	171	120	163
CONSISTANCE SORTIE (%)	12.70	11.03	16.37	13.65	10.87	14.81
CONSISTANCE RAFFINAGE (%)	14.43	12.35	20.05	15.89	11.88	17.23
PRODUCTION SÈCHE (kg/min)	0.529	0.515	0.447	0.483	0.637	0.528
ÉNERGIE SPÉCIFIQUE (kwh/TMSA)						
1er STAGE	661.7	661.7	1903.6	1903.6	287.9	287.9
2e STAGE		582.2		930.9		694.2
TOTAL	661.7	1243.9	1903.6	2834.5	287.9	982.1
INDICE D'ÉGOUTTAGE (ml)	730	700	528	210	700	715

CODE	RCCD4-1	RCCD4-2	RCCD5-1	RCCD5-2	RCCD6-1	RCCD6-2
PUISSANCE ÉLECTRIQUE						
CHARGE EFFECTIVE (kw)	12	32	27	29	22	16
DILUTION						
DISQUES PLATS (galUS/min)	0.91	0.36	0.91	0.29	0.33	0.29
DISQUES CONIQUES (galUS/min)	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1
DISTANCE DE PLAQUES						
DISQUES PLATS (mm)(mesuré)	0.5	0.3	0.3	0.3	0.5	0.5
DISQUES CONIQUES (mm)(mesuré)	1.5	0.9	0.9	0.9	1.5	1.5
DISTANCE RÉELLE (mm)	0.50	0.30	0.30	0.30	0.50	0.50
PRODUCTION						
POIDS ÉCHANTILLON HUMIDE (g)	11656	9034	11950	8834	7837	10635
TEMPS D'ÉCHANTILLONNAGE (sec)	120	175	120	168	120	175
CONSISTANCE SORTIE (%)	10.64	13.96	9.18	14.60	14.04	12.70
CONSISTANCE RAFFINAGE (%)	11.64	16.65	10.02	17.35	16.09	14.72
PRODUCTION SÈCHE (kg/min)	0.620	0.432	0.549	0.461	0.550	0.463
ÉNERGIE SPÉCIFIQUE (kwh/TMSA)						
1er STAGE	322.5	322.5	820.4	820.4	666.5	666.5
2e STAGE		1233.4		1049.3		575.9
TOTAL	322.5	1556.0	820.4	1869.7	666.5	1242.3
INDICE D'ÉGOUTTAGE (ml)	750	430	700	440	740	715

CODE	RCCD7-1	RCCD7-2	RCCD8-1	RCCD8-2	RCCD9-1	RCCD9-2
PUISSANCE ÉLECTRIQUE						
CHARGE EFFECTIVE (kw)	47	10	27	22	28	13
DILUTION						
DISQUES PLATS (galUS/min)	0.33	0.74	0.91	0.85	0.87	0.79
DISQUES CONIQUES (galUS/min)	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1
DISTANCE DE PLAQUES						
DISQUES PLATS (mm)(mesuré)	0.3	0.5	0.3	0.3	0.3	0.5
DISQUES CONIQUES (mm) (mesuré)	0.9	1.5	0.9	0.9	0.9	1.5
DISTANCE RÉELLE (mm)	0.30	0.50	0.30	0.30	0.30	0.50
PRODUCTION						
POIDS ÉCHANTILLON HUMIDE (g)	5060	16854	12020	17030	10697	17193
TEMPS D'ÉCHANTILLONNAGE (sec)	120	170	120	168	120	175
CONSISTANCE SORTIE (%)	19.55	9.08	9.97	9.18	10.19	10.19
CONSISTANCE RAFFINAGE (%)	24.37	9.92	10.87	10.00	11.24	11.13
PRODUCTION SÈCHE (kg/min)	0.495	0.540	0.599	0.558	0.545	0.600
ÉNERGIE SPÉCIFIQUE (kwh/TMSA)						
1er STAGE	1583.5	1583.5	751.2	751.2	856.3	856.3
2e STAGE		308.5		656.9		360.9
TOTAL	1583.5	1891.9	751.2	1408.1	856.3	1217.2
INDICE D'ÉGOUTTAGE (ml)	526	405	720	590	725	670

CODE	RCCD10-1	RCCD10-2	RCCD11-1	RCCD11-2	RCCD12-1	RCCD12-2
PUISSANCE ÉLECTRIQUE						
CHARGE EFFECTIVE (kw)	30	21	36	17	15	26
DILUTION						
DISQUES PLATS (galUS/min)	0.33	0.84	0.33	0.25	0.91	0.93
DISQUES CONIQUES (galUS/min)	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1
DISTANCE DE PLAQUES						
DISQUES PLATS (mm)(mesuré)	0.3	0.3	0.3	0.5	0.5	0.3
DISQUES CONIQUES (mm)(mesuré)	0.9	0.9	0.9	1.5	1.5	0.9
DISTANCE RÉELLE (mm)	0.30	0.30	0.30	0.50	0.50	0.30
PRODUCTION						
POIDS ÉCHANTILLON HUMIDE (g)	5112	17709	5649	10824	11305	16274
TEMPS D'ÉCHANTILLONNAGE (sec)	120	177	120	170	120	170
CONSISTANCE SORTIE (%)	20.34	9.52	19.63	13.14	10.47	9.67
CONSISTANCE RAFFINAGE (%)	25.28	10.38	23.85	15.12	11.48	10.60
PRODUCTION SÈCHE (kg/min)	0.520	0.571	0.554	0.502	0.592	0.556
ÉNERGIE SPÉCIFIQUE (kwh/TMSA)						
1er STAGE	962.0	962.0	1082.3	1082.3	422.5	422.5
2e STAGE		612.4		564.2		779.9
TOTAL	962.0	1574.4	1082.3	1646.5	422.5	1202.3
INDICE D'ÉGOUTTAGE (ml)	667	460	590	460	750	680

CODE	RCCD13-1	RCCD13-2	RCCD14-1	RCCD14-2	RCCD15-1	RCCD15-2
PUISSANCE ÉLECTRIQUE						
CHARGE EFFECTIVE (kw)	24	35	23	21	28	11
DILUTION						
DISQUES PLATS (galUS/min)	0.33	0.32	0.55	0.56	0.33	0.89
DISQUES CONIQUES (galUS/min)	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1
DISTANCE DE PLAQUES						
DISQUES PLATS (mm)(mesuré)	0.5	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5
DISQUES CONIQUES (mm)(mesuré)	1.5	0.9	1.2	1.2	1.5	1.5
DISTANCE RÉELLE (mm)	0.50	0.30	0.40	0.40	0.50	0.50
PRODUCTION						
POIDS ÉCHANTILLON HUMIDE (g)	7300	8951	8079	13071	6357	17441
TEMPS D'ÉCHANTILLONNAGE (sec)	120	174	120	178	120	157
CONSISTANCE SORTIE (%)	16.05	15.62	13.36	12.02	18.54	9.20
CONSISTANCE RAFFINAGE (%)	18.60	18.64	15.25	13.56	22.00	9.94
PRODUCTION SÈCHE (kg/min)	0.586	0.482	0.540	0.530	0.589	0.613
ÉNERGIE SPÉCIFIQUE (kwh/TMSA)						
1er STAGE	682.7	682.7	710.3	710.3	792.1	792.1
2e STAGE		1209.9		660.6		299.0
TOTAL	682.7	1892.6	710.3	1370.9	792.1	1091.1
INDICE D'ÉGOUTTAGE (ml)	740	505	745	680	735	710

CODE	RCCD16-1	RCCD16-2	RCCD17-1	RCCD17-2	RCCD18-1	RCCD18-2
PUISSANCE ÉLECTRIQUE						
CHARGE EFFECTIVE (kw)	26	20	25	16	17	14
DILUTION						
DISQUES PLATS (galUS/min)	0.55	0.53	0.91	0.28	0.91	0.91
DISQUES CONIQUES (galUS/min)	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1
DISTANCE DE PLAQUES						
DISQUES PLATS (mm)(mesuré)	0.4	0.4	0.3	0.5	0.5	0.5
DISQUES CONIQUES (mm)(mesuré)	1.2	1.2	0.9	1.5	1.5	1.5
DISTANCE RÉELLE (mm)	0.40	0.40	0.30	0.50	0.50	0.50
PRODUCTION						
POIDS ÉCHANTILLON HUMIDE (g)	7231	12981	10924	11216	11263	16464
TEMPS D'ÉCHANTILLONNAGE (sec)	120	172	120	171	120	164
CONSISTANCE SORTIE (%)	15.30	11.72	9.57	12.82	11.34	10.66
CONSISTANCE RAFFINAGE (%)	17.76	13.17	10.53	14.68	12.44	11.62
PRODUCTION SÈCHE (kg/min)	0.553	0.531	0.523	0.504	0.639	0.642
ÉNERGIE SPÉCIFIQUE (kwh/TMSA)						
1er STAGE	783.4	783.4	797.4	797.4	443.7	443.7
2e STAGE		628.2		528.6		363.5
TOTAL	783.4	1411.6	797.4	1326.0	443.7	807.2
INDICE D'ÉGOUTTAGE (ml)	725	670	730	650	745	740

CODE	RCCD19-1	RCCD19-2	RCCD20-1	RCCD20-2	RCCD21-1	RCCD21-2
PUISSANCE ÉLECTRIQUE						
CHARGE EFFECTIVE (kw)	27	20	28	24	22	5
DILUTION						
DISQUES PLATS (galUS/min)	0.55	0.56	0.33	0.89	0.54	1.57
DISQUES CONIQUES (galUS/min)	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1
DISTANCE DE PLAQUES						
DISQUES PLATS (mm)(mesuré)	0.4	0.4	0.5	0.3	0.4	0.4
DISQUES CONIQUES (mm)(mesuré)	1.2	1.2	1.5	0.9	1.2	1.2
DISTANCE RÉELLE (mm)	0.40	0.40	0.50	0.30	0.40	0.40
PRODUCTION						
POIDS ÉCHANTILLON HUMIDE (g)	9266	13136	6694	17055	8350	24617
TEMPS D'ÉCHANTILLONNAGE (sec)	120	173	120	173	120	174
CONSISTANCE SORTIE (%)	15.77	11.40	19.67	9.46	11.97	6.04
CONSISTANCE RAFFINAGE (%)	17.68	12.81	23.12	10.34	13.60	6.42
PRODUCTION SÈCHE (kg/min)	0.731	0.519	0.658	0.560	0.500	0.513
ÉNERGIE SPÉCIFIQUE (kwh/TMSA)						
1er STAGE	615.8	615.8	708.8	708.8	733.7	733.7
2e STAGE		641.7		714.7		162.5
TOTAL	615.8	1257.5	708.8	1423.6	733.7	896.2
INDICE D'ÉGOUTTAGE (ml)	730	670	720	560	730	720

CODE	RCCD22-1	RCCD22-2	RCCD23-1	RCCD23-2	RCCD24-1	RCCD24-2
PUISSANCE ÉLECTRIQUE						
CHARGE EFFECTIVE (kw)	23	21	21	31	42	18
DILUTION						
DISQUES PLATS (galUS/min)	0.54	0.5	0.54	0.51	0.18	0.48
DISQUES CONIQUES (galUS/min)	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1
DISTANCE DE PLAQUES						
DISQUES PLATS (mm)(mesuré)	0.4	0.4	0.4	0.2	0.4	0.4
DISQUES CONIQUES (mm)(mesuré)	1.2	1.2	1.2	0.6	1.2	1.2
DISTANCE RÉELLE (mm)	0.40	0.40	0.40	0.20	0.40	0.40
PRODUCTION						
POIDS ÉCHANTILLON HUMIDE (g)	9680	13959	7521	13051	3470	12321
TEMPS D'ÉCHANTILLONNAGE (sec)	120	172	120	178	120	173
CONSISTANCE SORTIE (%)	11.92	10.88	14.26	12.05	27.69	12.18
CONSISTANCE RAFFINAGE (%)	13.29	12.12	16.45	13.60	38.89	13.79
PRODUCTION SÈCHE (kg/min)	0.577	0.530	0.536	0.530	0.480	0.520
ÉNERGIE SPÉCIFIQUE (kwh/TMSA)						
1er STAGE	664.6	664.6	652.7	652.7	1457.3	1457.3
2e STAGE		660.8		974.3		576.4
TOTAL	664.6	1325.3	652.7	1627.0	1457.3	2033.7
INDICE D'ÉGOUTTAGE (ml)	730	695	740	358	590	402

CODE	RCCD25-1	RCCD25-2	RCCD26-1	RCCD26-2	RCCD27-1	RCCD27-2
PUISSANCE ÉLECTRIQUE						
CHARGE EFFECTIVE (kw)	20	17	27	13	27	27
DILUTION						
DISQUES PLATS (galUS/min)	0.54	0.56	0.54	0.47	0.54	0.14
DISQUES CONIQUES (galUS/min)	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1
DISTANCE DE PLAQUES						
DISQUES PLATS (mm)(mesuré)	0.6	0.4	0.4	0.6	0.4	0.4
DISQUES CONIQUES (mm)(mesuré)	1.8	1.2	1.2	1.8	1.2	1.2
DISTANCE RÉELLE (mm)	0.60	0.40	0.40	0.60	0.40	0.40
PRODUCTION						
POIDS ÉCHANTILLON HUMIDE (g)	8163	11998	8879	12650	8659	7727
TEMPS D'ÉCHANTILLONNAGE (sec)	120	172	120	171	120	170
CONSISTANCE SORTIE (%)	10.66	12.25	13.84	11.92	13.92	17.26
CONSISTANCE RAFFINAGE (%)	12.15	13.91	15.60	13.43	15.74	21.13
PRODUCTION SÈCHE (kg/min)	0.435	0.513	0.614	0.529	0.603	0.471
ÉNERGIE SPÉCIFIQUE (kwh/TMSA)						
1er STAGE	766.3	766.3	732.4	732.4	746.7	746.7
2e STAGE		552.6		409.7		956.0
TOTAL	766.3	1318.9	732.4	1142.1	746.7	1702.7
INDICE D'ÉGOUTTAGE (ml)	740	725	730	710	730	570

CODE	RCCD28-1	RCCD28-2	RCCD29-1	RCCD29-2	RCCD30-1	RCCD30-2
PUISSANCE ÉLECTRIQUE						
CHARGE EFFECTIVE (kw)	16	21	27	21	31	14
DILUTION						
DISQUES PLATS (galUS/min)	1.65	0.51	0.54	0.5	0.54	0.43
DISQUES CONIQUES (galUS/min)	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1
DISTANCE DE PLAQUES						
DISQUES PLATS (mm)(mesuré)	0.4	0.4	0.4	0.4	0.2	0.4
DISQUES CONIQUES (mm)(mesuré)	1.2	1.2	1.2	1.2	0.6	1.2
DISTANCE RÉELLE (mm)	0.40	0.40	0.40	0.40	0.20	0.40
PRODUCTION						
POIDS ÉCHANTILLON HUMIDE (g)	15794	13444	8626	13468	7598	13518
TEMPS D'ÉCHANTILLONNAGE (sec)	120	178	120	171	120	180
CONSISTANCE SORTIE (%)	8.23	12.07	14.38	11.21	11.06	11.54
CONSISTANCE RAFFINAGE (%)	8.79	13.57	16.27	12.54	12.74	12.98
PRODUCTION SÈCHE (kg/min)	0.650	0.547	0.620	0.530	0.420	0.520
ÉNERGIE SPÉCIFIQUE (kwh/TMSA)						
1er STAGE	410.1	410.1	725.6	725.6	1229.7	1229.7
2e STAGE		639.8		660.5		448.9
TOTAL	410.1	1049.9	725.6	1386.0	1229.7	1678.5
INDICE D'ÉGOUTTAGE (ml)	750	715	730	670	442	360

ANNEXE 4

CALCUL DE L'INTENSITÉ DE RAFFINAGE ET DE LA PUISSANCE SPÉCIFIQUE

La transmission de l'énergie spécifique à la pâte peut se faire de façon douce ou plus brutale. Pour quantifier la rapidité de ce transfert d'énergie, deux termes seront définis. Si l'on calcule l'énergie appliquée en moyenne durant chaque impact des barres du raffineur avec la pâte il s'agira de l'intensité de raffinage, tandis que si l'énergie spécifique est rapportée pour une seconde de passage de la pâte dans le raffineur, nous parlerons alors de puissance spécifique. Pour calculer ces deux termes nous devons connaître le temps de résidence de la pâte dans la zone de raffinage. Ce temps de passage dépend largement de la force centrifuge qui pousse la pâte hors du raffineur. Le schéma des plaques que l'on peut voir à la figure 1, permet de constater que cette force centrifuge s'appliquera différemment dans les sections plates et coniques. Les calculs effectués doivent donc être séparés pour tenir compte de l'angle de la section conique.

Pour ce faire, il est d'abord nécessaire de séparer la quantité d'énergie appliquée dans la section plate de celle appliquée dans la zone conique. Une pâte a donc été raffinée à distance fixe en utilisant les disques plats seulement, puis les disques plats et coniques. Ces valeurs nous permettent de séparer l'énergie spécifique en deux termes comme montré dans les équations 1a et 1b.

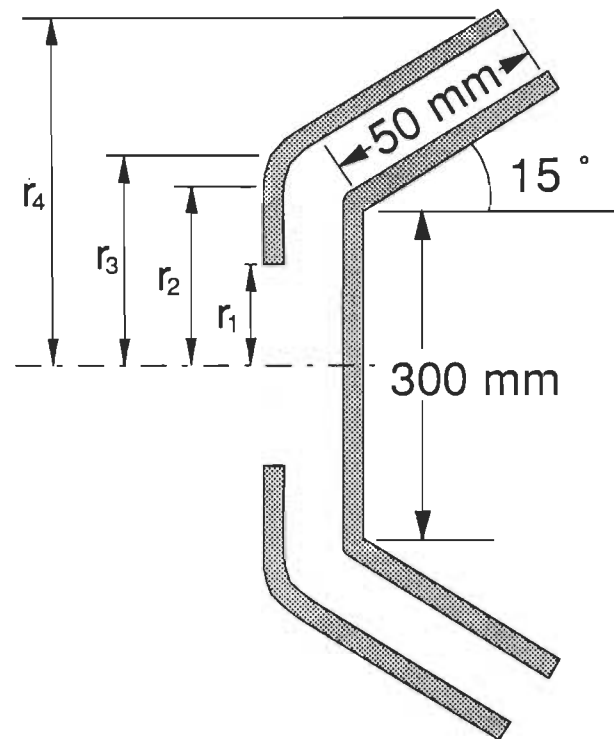


FIGURE A4.1 Schéma des plaques de raffineur.

$$E_{plat} = E_{spéc.} * \frac{282}{432} * \frac{J}{2.7778 * 10^{-7} \text{ kw} * 10^9 \text{ J}} \quad (1a)$$

$$E_{conique} = E_{totale} - E_{plat} \quad (1b)$$

où

$$E_{plat} \equiv \left(\frac{GJ}{t} \right)$$

$$E_{spéc.} \equiv \left(\frac{kW * h}{t} \right)$$

$$\frac{282}{432} \equiv \text{fraction de l'énergie spécifique associée aux disques plats}$$

On a vu précédemment que le temps de résidence de la pâte entre les plaques

dépend de la force centrifuge et que le poids de pâte soumis à cette force est fonction de la consistance de la pâte tout au long de son parcours. Il est donc nécessaire de déterminer le changement de consistance lors du raffinage.

Une consistance moyenne pour chacune des sections peut être calculée selon les équations 2 et 3. Ces équations tiennent compte des consistances d'entrée et de sortie ainsi que de la quantité d'eau évaporée, qui est fonction de l'énergie spécifique appliquée. Dans l'équation 3b, une dilution à l'entrée de la zone conique est assumée, alors que dans les faits cette dernière se fait plutôt au centre de la zone conique.

$$\frac{1}{c_{r_{conique}}} = \frac{E_{conique}}{H_{fg}} \frac{(r_4^2 - \bar{r}^2)}{(r_4^2 - r_3^2)} + \frac{1}{c_{r_4}} \quad (2)$$

où

$c_{r_{conique}}$ = Consistance moyenne de la zone conique

$$r_1 = 110 \text{ mm} = .110 \text{ m}$$

$$r_2 = 152.5 \text{ mm} = .1525 \text{ m}$$

$$r_3 = 161.5 \text{ mm} = .1615 \text{ m}$$

$$r_4 = 174.5 \text{ mm} = .1745 \text{ m}$$

$$\bar{r} = \frac{(r_3^2 + r_4^2)}{2} = 168 \text{ mm} = .168 \text{ m}$$

$$H_{fg} = 2.502 \text{ GJ/kg}$$

c_{r_4} = Consistance à la sortie du raffineur

$$\frac{1}{c_{r_3}} = \frac{E}{H_{fg}} + \frac{1}{c_{r_4}} \quad (3a)$$

$$\frac{1}{c_{r_3}'} = \frac{1}{c_{r_3}} - \frac{dil. \text{conique}}{production * 0.26} \quad (3b)$$

$$\frac{1}{c_{r_{plat}}} = \frac{E_{plat}}{H_{fg}} \frac{(r_2^2 - \bar{r}^2)}{(r_2^2 - r_1^2)} + \frac{1}{c_{r_3}'} \quad (3c)$$

où

$c_{r_{plat}}$ = Consistance moyenne dans la zone plate

$$\bar{r} = \frac{(r_3^2 + r_4^2)}{2} = 152.5 \text{ mm} = .1525 \text{ m}$$

c_{r_3}' = Consistance à la sortie de la zone plate

Connaissant les coefficients de friction radial et tangentiel de la pâte entre les disques et la vitesse angulaire, nous pouvons maintenant calculer la vitesse radiale moyenne dans chacune des deux sections tel que montré aux figures 4 et 5.

$$\bar{V}_{plat} = \left(\frac{\mu_t}{\mu_r} \right) \left(\frac{r_1 + r_2}{2} \right) \omega^3 \frac{(r_2^2 - r_1^2)}{4 E_{plat} c_{r_{plat}}} \quad (4)$$

\bar{V}_{plat} = Vitesse radiale dans la section plate en m/s

$\mu_t \approx 0.75$ coeff. friction tangentiel

$\mu_r \approx 0.25$ coeff. friction radial

$$\frac{\mu_t}{\mu_r} \approx 3.0$$

$$\omega = 3725 \text{ rév} * \frac{\text{min}}{60 \text{ sec}} * \frac{2 \pi \text{ rad}}{\text{rév}} = 390.08 \frac{\text{rad}}{\text{sec}}$$

$$\bar{V}_{conique} = \left(\frac{\mu_t}{\mu_r} \right) \left(\frac{r_4 + r_3}{2} \right) \omega^3 \frac{(r_4^2 - r_3^2)}{4 E_{conique} C_{r_{conique}}} * (1 + \mu_r \cot(\theta)) \quad (5)$$

où

$\bar{V}_{conique}$ = Vitesse dans la section conique en m / sec

$$\theta = 15^\circ$$

De cette vitesse radiale, le temps de résidence se trouve facilement grâce aux équations 6a et 7a. Le nombre d'impacts (n) est défini comme le nombre de barres que rencontre la fibre lors de son passage. Il peut être calculé grâce aux équations 6b et 7b.

$$\tau_{plat} = \frac{(r_2 - r_1)}{\bar{V}_{plat}} \quad (6a)$$

$$n_{plat} = \tau_{plat} * \frac{(r_1 + r_2)}{2} \omega * \frac{\text{nb barres}}{\text{mm arc}} \quad (6b)$$

où

τ_{plat} = Temps de résidence en sec.

n_{plat} = Nombre d'impacts

rotor = 1 barre / 3.5 mm

stator = 1 barre / 8.5 mm

$$\text{moyenne} = \left(\frac{1}{3.5} + \frac{1}{8.5} \right) * \frac{1}{2} = 0.2 \text{ barres / mm}$$

$$\tau_{conique} = \frac{(r_4 - r_3)}{V_{conique}} \quad (7a)$$

$$n_{conique} = \tau_{conique} * \frac{(r_4 + r_3)}{2} \omega * \frac{nb \text{ barres}}{mm \text{ arc}} \quad (7b)$$

où

$\tau_{conique}$ = Temps de résidence dans la zone conique en sec.

$n_{conique}$ = Nombre d'impacts

rotor = stator = 1 barre / 4.03 mm

L'intensité de raffinage ainsi que la puissance spécifique sont calculés selon les équations 8 et 9.

$$e_{plat} = \frac{E_{plat}}{n_{plat}} \quad (8a)$$

$$\dot{e}_{plat} = \frac{E_{plat}}{\tau_{plat}} \quad (8b)$$

où

e_{plat} = Intensité de raffinage en GJ | t | impact

\dot{e}_{plat} = Puissance spécifique en GJ | t | sec

$$e_{conique} = \frac{E_{conique}}{n_{conique}} \quad (9a)$$

$$\dot{e}_{conique} = \frac{E_{conique}}{\tau_{conique}} \quad (9b)$$

où

$e_{conique}$ = Intensité de raffinage en GJ | t | impact

$\dot{e}_{conique}$ = Puissance spécifique en GJ | t | sec

ANNEXE 5

PROPRIÉTÉS DES PÂTES ET PAPIERS DU STADE 1

CODE		RCCD1	RCCD2	RCCD3	RCCD4	RCCD5	RCCD6
ÉNERGIE SPÉCIFIQUE	kwh/t	662	1904	288	323	820	667
	MJ/kg	2.38	6.85	1.04	1.16	1.16	2.95 2.40
INTENSITÉ DE RAFFINAGE (GJ/t/impact)		8.64e-04	7.03e-04	1.05e-03	1.07e-03	1.29e-03	7.74e-04
NOMBRE D'IMPACTS (disques plats)		1692	5767	603	660	1370	1907
NOMBRE D'IMPACTS (disques coniques)		1066	3976	388	425	920	1193
INDICE D'ÉGOUTTAGE (ml)		759	576	789	784	748	735
FRACTIONS BAUER	R14	30.7	18.8	40.9	42.8	24.4	30.9
McNETT (%)	R28	32.8	32.4	28.1	27.8	33.1	33.5
	R48	15.0	18.9	11.3	11.2	17.6	14.6
	R100	7.8	10.5	5.5	5.7	9.6	7.2
	R200	2.6	3.8	1.9	1.9	3.4	2.3
	P200	11.1	15.6	12.3	10.6	11.9	11.5
LONGUEUR DES FIBRES, calculée (mm)		1.86	1.57	2.02	2.07	1.73	1.87
LONGUEUR DES FIBRES, Kajaani (mm)		2.97	2.83	2.71	3.03	2.87	3.01
REJETS PULMAC, .006* (%)		0.05	0.05	16.35	15.70	0.01	0.12
VOLUME SPÉCIFIQUE (cm ³ /g)		7.17	3.76	7.47	7.29	5.12	7.18
DENSITÉ (g/cm ³)		0.14	0.27	0.13	0.14	0.20	0.14
LONGUEUR DE RUPTURE (km)		0.47	3.21	0.15	0.20	1.52	0.53
ALLONGEMENT (%)		0.56	1.38	0.56	0.54	0.92	0.63
TEA (g/cm)		0.9	17.1	0.3	0.2	4.8	1.1
IND. ÉCLATEMENT (kPa*m ² /g)		0.29	1.84	0.12	0.12	0.70	0.21
INDICE DÉCHIRURE (mN*m ² /g)		2.59	11.51	1.75	1.36	6.23	2.66
L.R. LIMITE (km)		12.11	12.60	7.51	8.28	12.13	12.15
RÉSISTANCE HUMIDE (30%)							
LONGUEUR DE RUPTURE (km)		53	140	29	11	76	49
ALLONGEMENT (%)		1.6	2.7	1.5	1.4	1.8	1.3
TEA (g/cm)		0.22	1.09	0.08	0.05	0.39	0.17
BLANCHEUR (8-457nm,%)		57.4	59.8	55.2	55.9	57.8	55.2
OPACITÉ (%)		86.8	89.1	80.2	82.6	86.7	87.9
COEFFICIENT DE DIFFUSION (m ² /kg)		36	40	28	28	37	35
COEFFICIENT D'ABSORPTION (m ² /kg)		2.0	1.9	1.8	1.6	1.9	2.6
L*		87.91	88.68	86.94	87.43	88.05	86.09
a*		-0.17	-0.13	-0.3	-0.26	0.02	-0.22
b*		13.71	12.71	14.09	14.31	13.51	12.68

CODE		RCCD7	RCCD8	RCCD9	RCCD10	RCCD11	RCCD12
ÉNERGIE SPÉCIFIQUE	kwh/t	1584	751	856	962	1082	423
	MJ/kg	5.70	2.70	3.08	3.46	3.90	1.52
INTENSITÉ DE RAFFINAGE (GJ/t/impact)		5.69e-04	1.19e-03	1.15e-03	4.95e-04	5.46e-04	1.09e-03
NOMBRE D'IMPACTS (disques plats)		6001	1360	1611	4385	4364	847
NOMBRE D'IMPACTS (disques coniques)		4017	914	1074	2618	2769	548
INDICE D'ÉGOUTTAGE (ml)		622	755	753	704	658	766
FRACTIONS BAUER	R14	25.0	28.0	28.0	32.2	24.2	43.2
McNETT (%)	R28	30.5	34.3	33.9	33.4	31.5	31.0
	R48	16.3	17.3	17.3	15.0	17.8	13.0
	R100	9.2	9.2	8.9	7.8	11.0	6.4
	R200	3.5	3.4	3.1	2.6	4.0	2.3
	P200	15.5	7.8	8.8	9.0	11.5	4.1
LONGUEUR DES FIBRES, calculée (mm)		1.68	1.84	1.84	1.92	1.70	2.16
LONGUEUR DES FIBRES, Kajaani (mm)		2.88	3.18	3.00	3.02	2.82	3.08
REJETS PULMAC, .006* (%)		0.00	0.05	0.03	0.02	0.00	8.89
VOLUME SPÉCIFIQUE (cm ³ /g)		4.14	6.75	6.48	3.90	4.04	6.59
DENSITÉ (g/cm ³)		0.24	0.15	0.15	0.26	0.25	0.15
LONGUEUR DE RUPTURE (km)		2.86	0.84	0.94	2.81	2.76	0.43
ALLONGEMENT (%)		1.31	0.66	0.80	1.24	1.28	0.53
TEA (g/cm)		13.9	2.1	2.7	13.6	13.2	0.8
IND. ÉCLATEMENT (kPa*m ² /g)		1.63	0.44	0.41	1.43	1.58	0.06
INDICE DÉCHIRURE (mN*m ² /g)		11.11	5.33	4.10	10.45	11.41	2.92
L.R. LIMITE (km)		12.70	12.44	11.86	12.26	12.98	9.07
RÉSISTANCE HUMIDE (30%)							
LONGUEUR DE RUPTURE (km)		160	71	70	111	137	32
ALLONGEMENT (%)		2.8	1.8	1.9	2.3	2.4	1.0
TEA (g/cm)		1.3	0.34	0.3	0.74	1.1	0.09
BLANCHEUR (8-457nm,%)		59.3	58.3	57.4	58.2	59.0	56.6
OPACITÉ (%)		87.8	85.8	87.4	88.5	87.7	85.0
COEFFICIENT DE DIFFUSION (m ² /kg)		39	35	35	37	38	32
COEFFICIENT D'ABSORPTION (m ² /kg)		1.8	1.7	1.9	1.9	2.0	1.8
L*		88.49	88.46	87.9	88.09	88.4	87.77
a*		-0.12	-0.36	-0.25	-0.22	-0.16	-0.47
b*		12.81	13.85	13.71	13.26	12.96	14.2

CODE		RCCD13	RCCD14	RCCD15	RCCD16	RCCD17	RCCD18
ÉNERGIE SPÉCIFIQUE	kwh/t	683	710	792	783	797	444
	MJ/kg	2.46	2.56	2.85	2.82	2.87	1.60
INTENSITÉ DE RAFFINAGE (GJ/t/impact)		6.71e-04	8.22e-04	5.72e-04	7.08e-04	1.22e-03	1.01e-03
NOMBRE D'IMPACTS (disques plats)		2257	1907	3081	2447	1418	957
NOMBRE D'IMPACTS (disques coniques)		1406	1205	1907	1536	940	622
INDICE D'ÉGOUTTAGE (ml)		757	745	737	728	726	760
FRACTIONS BAUER	R14	42.3	38.3	35.6	30.1	27.1	30.8
McNETT (%)	R28	31.4	29.5	32.0	32.5	27.8	31.3
	R48	14.2	14.0	14.4	15.7	18.6	12.6
	R100	6.8	6.9	7.2	7.9	10.1	6.1
	R200	2.4	2.4	2.7	2.7	4.1	2.1
	P200	2.9	8.9	8.1	11.1	12.3	17.1
LONGUEUR DES FIBRES, calculée (mm)		2.15	2.00	1.98	1.85	1.72	1.80
LONGUEUR DES FIBRES, Kajaani (mm)		3.09	2.98	3.07	3.31	2.97	3.12
REJETS PULMAC, .006" (%)		0.20	0.12	0.08	0.01	0.04	4.94
VOLUME SPÉCIFIQUE (cm ³ /g)		5.31	6.16	6.22	6.29	6.10	7.16
DENSITÉ (g/cm ³)		0.19	0.16	0.16	0.16	0.16	0.14
LONGUEUR DE RUPTURE (km)		1.46	0.77	1.07	1.01	1.16	0.33
ALLONGEMENT (%)		0.65	0.67	0.74	0.71	0.78	0.56
TEA (g/cm)		3.2	1.9	2.9	2.3	3.0	0.7
IND. ÉCLATEMENT (kPa*m ² /g)		0.58	0.43	0.56	0.47	0.55	0.16
INDICE DÉCHIRURE (mN*m ² /g)		5.99	4.98	4.34	4.34	4.33	1.73
L.R. LIMITE (km)		11.79	12.62	12.12	12.18	12.40	10.06
RÉSISTANCE HUMIDE (30%)							
LONGUEUR DE RUPTURE (km)		46	54	77	75	74	41
ALLONGEMENT (%)		1.1	2.9	1.5	2.6	1.6	1.2
TEA (g/cm)		0.16	2.85	0.34	0.39	0.33	0.15
BLANCHEUR (8-457nm,%)		57.5	57.8	58.6	57.9	57.9	56.1
OPACITÉ (%)		85.3	86.5	86.7	86.0	86.0	84.7
COEFFICIENT DE DIFFUSION (m ² /kg)		35	36	34	35	36	30
COEFFICIENT D'ABSORPTION (m ² /kg)		1.9	1.8	1.8	2.0	1.9	1.7
L*		88.04	88.2	88.56	88.1	88.1	87.53
a*		-0.34	-0.25	-0.37	-0.27	-0.27	-0.1
b*		13.88	13.83	13.73	13.56	13.56	14.25

CODE		RCCD19	RCCD20	RCCD21	RCCD22	RCCD23	RCCD24
ÉNERGIE SPÉCIFIQUE	kwh/t	616	709	734	665	653	1457
	MJ/kg	2.22	2.55	2.64	2.39	2.35	5.25
INTENSITÉ DE RAFFINAGE (GJ/t/impact)		7.24e-04	5.46e-04	9.20e-04	9.54e-04	7.51e-04	3.48e-04
NOMBRE D'IMPACTS (disques plats)		1851	2876	1758	1521	1934	9393
NOMBRE D'IMPACTS (disques coniques)		1211	1798	1112	987	1195	5662
INDICE D'ÉGOUTTAGE (ml)		732	744	730	728	722	650
FRACTIONS BAUER	R14	16.6	5.0	30.3	39.1	33.9	31.8
McNETT (%)	R28	36.8	30.6	32.4	32.5	32.7	30.1
	R48	19.3	22.8	14.9	15.5	15.2	14.5
	R100	12.1	17.3	7.5	7.8	7.9	7.2
	R200	4.2	7.2	2.4	2.7	2.4	2.6
	P200	11.0	17.1	12.5	2.4	7.9	13.8
LONGUEUR DES FIBRES, calculée (mm)		1.60	1.23	1.84	2.10	1.95	1.84
LONGUEUR DES FIBRES, Kajaani (mm)		3.02	3.19	3.29	3.07	3.12	3.04
REJETS PULMAC, .006" (%)		0.08	0.16	0.12	0.06	0.01	0.00
VOLUME SPÉCIFIQUE (cm ³ /g)		4.64	6.72	6.21	6.43	5.61	3.62
DENSITÉ (g/cm ³)		0.22	0.15	0.16	0.16	0.18	0.28
LONGUEUR DE RUPTURE (km)		1.60	0.62	0.87	0.92	1.24	3.03
ALLONGEMENT (%)		0.69	0.60	0.62	0.68	0.63	1.24
TEA (g/cm)		3.7	1.2	1.9	2.1	2.6	14.6
IND. ÉCLATEMENT (kPa*m ² /g)		0.78	0.33	0.40	0.46	0.58	1.85
INDICE DÉCHIRURE (mN*m ² /g)		7.91	3.77	4.35	3.73	5.22	11.60
L.R. LIMITE (km)		12.18	12.72	12.23	12.29	12.03	13.20
RÉSISTANCE HUMIDE (30%)							
LONGUEUR DE RUPTURE (km)		68	64	67	55	67	155
ALLONGEMENT (%)		1.5	1.4	1.8	2.1	1.7	2.0
TEA (g/cm)		0.34	0.3	0.31	0.38	0.31	1.1
BLANCHEUR (8-457nm,%)		58.4	58.4	57.9	58.3	58.1	60.0
OPACITÉ (%)		86.0	85.2	86.7	85.8	85.8	88.9
COEFFICIENT DE DIFFUSION (m ² /kg)		36	35	35	35	35	39
COEFFICIENT D'ABSORPTION (m ² /kg)		1.9	1.7	1.8	1.9	1.9	1.9
L*		88.37	88.43	88.08	88.33	88.35	88.73
a*		-0.41	-0.59	-0.27	-0.39	-0.3	-0.17
b*		13.63	13.72	13.55	13.6	13.85	12.61

CODE		RCCD25	RCCD26	RCCD27	RCCD28	RCCD29	RCCD30
ÉNERGIE SPÉCIFIQUE	kwh/t	766	732	747	410	726	1230
	MJ/kg	2.76	2.64	2.69	1.48	2.61	4.43
INTENSITÉ DE RAFFINAGE (GJ/t/impact)		1.02e-03	8.19e-04	8.11e-04	1.45e-03	7.84e-04	1.01e-03
NOMBRE D'IMPACTS (disques plats)		1664	1951	2012	607	2022	2661
NOMBRE D'IMPACTS (disques coniques)		1040	1269	1304	408	1310	1722
INDICE D'ÉGOUTTAGE (ml)		750	748	760	772	750	550
FRACTIONS BAUER	R14	41.7	32.7	41.3	35.8	35.0	2.4
McNETT (%)	R28	32.1	33.3	26.3	34.2	28.1	20.9
	R48	13.8	15.8	13.2	13.3	14.0	22.4
	R100	6.8	8.3	6.2	6.7	6.9	23.0
	R200	2.4	2.9	1.0	2.2	2.3	12.4
	P200	3.2	7.0	12.0	7.8	13.7	18.9
LONGUEUR DES FIBRES, calculée (mm)		2.15	1.94	2.02	2.01	1.89	1.01
LONGUEUR DES FIBRES, Kajaani (mm)		3.29	3.20	3.06	3.08	3.15	2.28
REJETS PULMAC, .006* (%)		3.78	0.00	0.05	2.33	0.12	0.03
VOLUME SPÉCIFIQUE (cm ³ /g)		7.40	6.45	6.78	6.55	5.25	3.93
DENSITÉ (g/cm ³)		0.14	0.15	0.15	0.15	0.19	0.25
LONGUEUR DE RUPTURE (km)		0.27	1.04	0.79	0.41	1.42	2.15
ALLONGEMENT (%)		0.50	0.70	0.60	0.49	0.81	1.11
TEA (g/cm)		0.5	2.5	1.6	0.7	4.1	9.2
IND. ÉCLATEMENT (kPa*m ² /g)		0.00	0.54	0.00	0.00	0.68	1.00
INDICE DÉCHIRURE (mN*m ² /g)		1.56	5.70	3.68	2.26	7.20	6.08
L.R. LIMITE (km)		11.26	12.25	12.16	10.93	11.96	12.03
RÉSISTANCE HUMIDE (30%)							
LONGUEUR DE RUPTURE (km)		42	60	67	34	75	105
ALLONGEMENT (%)		1.4	1.8	1.9	1.0	1.9	3.1
TEA (g/cm)		0.11	0.3	0.32	0.1	0.39	0.76
BLANCHEUR (8-457nm,%)		56.9	58.0	58.1	55.7	57.8	59.7
OPACITÉ (%)		84.7	86.0	86.0	84.8	85.8	89.4
COEFFICIENT DE DIFFUSION (m ² /kg)		33	36	36	33	35	40
COEFFICIENT D'ABSORPTION (m ² /kg)		1.9	1.9	1.7	1.9	1.9	1.9
L*		87.7	88.12	88.53	87.33	88.08	88.48
a*		-0.38	-0.32	-0.54	-0.61	-0.14	-0.12
b*		13.88	13.47	13.62	13.97	13.54	12.5

ANNEXE 6

PROPRIÉTÉS DES PÂTES ET PAPIERS DU STADE 2

CODE		RCCD1	RCCD2	RCCD3	RCCD4	RCCD5	RCCD6
ÉNERGIE SPÉCIFIQUE	kwh/t	582	931	694	1233	1049	576
	MJ/kg	2.10	3.35	2.50	4.44	3.78	2.07
INTENSITÉ DE RAFFINAGE (GJ/t/impact)		1.07e-03	8.59e-04	7.77e-04	8.41e-04	7.97e-04	8.89e-04
NOMBRE D'IMPACTS (disques plats)		1152	2272	1888	3047	2753	1382
NOMBRE D'IMPACTS (disques coniques)		807	1630	1327	2231	1989	949
INDICE D'ÉGOUTTAGE (ml)		744	279	750	508	498	745
FRACTIONS BAUER	R14	25.8	10.1	19.1	9.5	12.8	24.6
McNETT (%)	R28	33.7	29.3	33.4	29.4	30.2	33.1
	R48	15.9	21.8	16.8	22.2	20.5	14.8
	R100	8.4	13.3	9.1	14.5	13.0	7.9
	R200	2.9	4.8	3.2	6.1	5.4	2.8
	P200	13.3	20.7	18.4	18.3	18.1	16.8
LONGUEUR DES FIBRES, calculée (mm)		1.75	1.31	1.57	1.31	1.39	1.69
LONGUEUR DES FIBRES, Kajaani (mm)		3.02	2.675	2.985	2.52	2.59	2.995
REJETS PULMAC, .006* (%)		0.00	0.02	0.11	0.00	0.00	0.00
VOLUME SPÉCIFIQUE (cm ³ /g)		4.82	2.57	5.07	3.30	3.10	5.48
DENSITÉ (g/cm ³)		0.21	0.39	0.20	0.30	0.32	0.18
LONGUEUR DE RUPTURE (km)		1.86	4.30	1.44	3.16	3.33	1.62
ALLONGEMENT (%)		0.95	1.83	0.85	1.54	1.57	0.89
TEA (g/cm)		6	31	5	19	20	5
IND. ÉCLATEMENT (kPa*m ² /g)		1.01	3.07	0.78	1.96	2.33	0.77
INDICE DÉCHIRURE (mN*m ² /g)		8.76	8.87	6.98	9.55	8.97	7.10
L.R. LIMITE (km)		12.22	12.98	12.32	12.14	12.68	12.69
RÉSISTANCE HUMIDE (30%)							
LONGUEUR DE RUPTURE (km)		95	245	78	152	153	91
ALLONGEMENT (%)		2.0	2.9	2.2	3.7	3.8	1.9
TEA (g/cm)		0.59	2.3	0.48	1.42	1.62	0.54
BLANCHEUR (8-457nm,%)		56.7	59.7	58.1	59.8	59.3	55.7
OPACITÉ (%)		88.1	90.3	87.8	89.4	89.3	87.4
COEFFICIENT DE DIFFUSION (m ² /kg)		35	43	36	41	41	34
COEFFICIENT D'ABSORPTION (m ² /kg)		2.1	2.1	1.9	2.0	2.2	2.4
L*		87.18	88.36	87.98	88.45	88.2	86.41
a*		0.3	0.61	0.34	0.09	0.36	0.68
b*		13.03	12.22	13.15	12.32	12.35	12.66

CODE		RCCD7	RCCD8	RCCD9	RCCD10	RCCD11	RCCD12
ÉNERGIE SPÉCIFIQUE	kwh/t	309	657	361	612	564	780
	MJ/kg	1.11	2.36	1.30	2.20	2.03	2.81
INTENSITÉ DE RAFFINAGE (GJ/t/impact)		1.31e-03	1.33e-03	1.18e-03	1.28e-03	8.70e-04	1.27e-03
NOMBRE D'IMPACTS (disques plats)		501	1035	651	1004	1381	1286
NOMBRE D'IMPACTS (disques coniques)		347	739	455	715	954	926
INDICE D'ÉGOUTTAGE (ml)		458	630	532	532	540	708
FRACTIONS BAUER	R14	23.2	6.1	22.6	14.2	17.4	14.6
McNETT (%)	R28	30.7	32.7	34.2	33.9	33.6	35.7
	R48	16.8	22.4	17.1	19.5	18.1	20.9
	R100	9.6	16.0	9.5	11.5	11.2	12.4
	R200	3.7	6.2	3.4	4.0	4.0	4.5
	P200	16.0	16.6	13.2	16.9	15.7	11.9
LONGUEUR DES FIBRES, calculée (mm)		1.64	1.28	1.69	1.48	1.55	1.54
LONGUEUR DES FIBRES, Kajaani (mm)		2.845	2.54	3.58	3.155	2.9	2.665
REJETS PULMAC, .006* (%)		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
VOLUME SPÉCIFIQUE (cm ³ /g)		3.17	4.08	4.78	3.41	3.79	4.40
DENSITÉ (g/cm ³)		0.32	0.24	0.21	0.29	0.26	0.23
LONGUEUR DE RUPTURE (km)		4.03	2.12	1.75	3.27	3.43	1.86
ALLONGEMENT (%)		1.64	1.06	0.93	1.33	1.52	1.01
TEA (g/cm)		26	8	6	16	20	7
IND. ÉCLATEMENT (kPa*m ² /g)		2.62	1.24	0.96	2.24	2.03	0.98
INDICE DÉCHIRURE (mN*m ² /g)		10.58	7.03	7.49	10.54	11.50	7.74
L.R. LIMITE (km)		13.20	11.96	12.91	12.48	12.90	12.66
RÉSISTANCE HUMIDE (30%)							
LONGUEUR DE RUPTURE (km)		203	100	100	185	198	83
ALLONGEMENT (%)		3.1	2.3	1.9	2.6	2.8	1.8
TEA (g/cm)		2.12	0.77	0.66	1.48	1.53	0.5
BLANCHEUR (8-457nm,%)		59.2	57.5	57.0	58.7	58.7	57.4
OPACITÉ (%)		88.7	88.1	87.5	88.5	89.5	88.6
COEFFICIENT DE DIFFUSION (m ² /kg)		38	37	34	38	40	37
COEFFICIENT D'ABSORPTION (m ² /kg)		1.9	2.2	2.1	2.2	2.1	2.1
L*		88.22	87.53	87.26	88	87.96	87.61
a*		0.42	0.9	0.76	0.7	0.32	0.44
b*		12.41	12.86	12.86	12.54	12.49	13.14

CODE		RCCD13	RCCD14	RCCD15	RCCD16	RCCD17	RCCD18
ÉNERGIE SPÉCIFIQUE	kwh/t	1210	661	299	628	529	364
	MJ/kg	4.36	2.38	1.08	2.26	1.90	1.31
INTENSITÉ DE RAFFINAGE (GJ/t/impact)		7.61e-04	9.83e-04	1.31e-03	1.01e-03	8.93e-04	1.13e-03
NOMBRE D'IMPACTS (disques plats)		3284	1418	482	1315	1261	682
NOMBRE D'IMPACTS (disques coniques)		2438	1001	337	926	870	478
INDICE D'ÉGOUTTAGE (ml)		567	725	697	703	698	777
FRACTIONS BAUER	R14	14.9	33.1	26.9	23.3	27.1	31.3
McNETT (%)	R28	30.1	29.7	34.3	32.5	27.8	32.6
	R48	18.1	16.5	14.1	18.2	18.6	14.0
	R100	11.3	8.5	8.1	10.4	10.1	6.6
	R200	4.2	3.3	2.8	3.6	4.1	2.2
	P200	21.4	8.9	13.8	12.0	12.3	13.3
LONGUEUR DES FIBRES, calculée (mm)		1.42	1.90	1.77	1.69	1.72	1.86
LONGUEUR DES FIBRES, Kajaani (mm)		2.765	2.995	3.325	3	2.875	3.17
REJETS PULMAC, .006* (%)		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.15
VOLUME SPÉCIFIQUE (cm ³ /g)		3.69	5.37	5.61	4.76	4.45	5.75
DENSITÉ (g/cm ³)		0.27	0.19	0.18	0.21	0.22	0.17
LONGUEUR DE RUPTURE (km)		3.05	1.62	1.61	1.89	2.10	0.86
ALLONGEMENT (%)		1.43	0.95	0.89	0.92	1.14	0.63
TEA (g/cm)		17	6	5	6	9	2
IND. ÉCLATEMENT (kPa*m ² /g)		1.98	0.89	0.78	1.04	1.15	0.40
INDICE DÉCHIRURE (mN*m ² /g)		9.98	7.99	7.26	8.31	8.73	4.02
L.R. LIMITE (km)		12.50	12.77	12.93	12.53	12.40	11.78
RÉSISTANCE HUMIDE (30%)							
LONGUEUR DE RUPTURE (km)		170	113	72	117	118	57
ALLONGEMENT (%)		3.3	2.3	2.0	2.0	2.7	1.2
TEA (g/cm)		1.95	0.77	0.47	0.69	0.85	0.22
BLANCHEUR (8-457nm,%)		57.6	56.9	57.3	57.3	58.0	56.2
OPACITÉ (%)		89.8	88.2	87.9	88.3	88.9	86.0
COEFFICIENT DE DIFFUSION (m ² /kg)		38	36	36	36	38	34
COEFFICIENT D'ABSORPTION (m ² /kg)		2.4	2.1	2.1	2.1	2.1	2.0
L*		87.16	87.37	87.78	87.41	87.95	87.33
a*		0.55	0.48	0.25	0.69	0.35	0.38
b*		12.11	13.16	13.56	12.9	13.06	13.82

CODE		RCCD19	RCCD20	RCCD21	RCCD22	RCCD23	RCCD24
ÉNERGIE SPÉCIFIQUE	kwh/t	642	715	163	661	974	576
	MJ/kg	2.31	2.57	0.58	2.38	3.51	2.08
INTENSITÉ DE RAFFINAGE (GJ/t/impact)		1.04e-03	1.30e-03	2.02e-03	1.10e-03	1.01e-03	9.58e-04
NOMBRE D'IMPACTS (disques plats)		1307	1157	170	1267	2011	1276
NOMBRE D'IMPACTS (disques coniques)		920	829	119	897	1465	891
INDICE D'ÉGOUTTAGE (ml)		722	607	770	749	474	455
FRACTIONS BAUER	R14	16.6	5.0	23.7	28.2	11.3	26.9
McNETT (%)	R28	36.8	30.6	38.1	34.3	28.4	28.6
	R48	19.3	22.8	15.7	14.9	22.8	15.0
	R100	12.1	17.3	8.5	7.8	15.3	7.7
	R200	4.2	7.2	2.8	2.8	6.6	2.4
	P200	11.0	17.1	11.2	12.0	15.6	19.4
LONGUEUR DES FIBRES, calculée (mm)		1.60	1.23	1.77	1.82	1.35	1.68
LONGUEUR DES FIBRES, Kajaani (mm)		2.855	2.43	2.955	2.965	2.575	2.995
REJETS PULMAC, .006* (%)		0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00
VOLUME SPÉCIFIQUE (cm ³ /g)		5.14	4.25	6.80	5.67	3.24	3.16
DENSITÉ (g/cm ³)		0.19	0.24	0.15	0.18	0.31	0.32
LONGUEUR DE RUPTURE (km)		1.83	2.08	0.75	1.44	3.11	4.34
ALLONGEMENT (%)		1.07	1.09	0.58	0.76	1.39	1.68
TEA (g/cm)		7	9	2	4	17	29
IND. ÉCLATEMENT (kPa*m ² /g)		0.96	1.06	0.42	0.79	1.95	2.93
INDICE DÉCHIRURE (mN*m ² /g)		7.59	7.42	3.21	7.82	8.15	12.36
L.R. LIMITE (km)		12.78	12.92	12.42	12.87	12.57	13.53
RÉSISTANCE HUMIDE (30%)							
LONGUEUR DE RUPTURE (km)		110	114	63	99	153	225
ALLONGEMENT (%)		1.9	2.2	2.0	1.9	3.2	3.3
TEA (g/cm)		0.55	0.785	0.41	0.58	1.37	2.09
BLANCHEUR (8-457nm,%)		57.5	57.2	55.6	56.1	58.6	59.0
OPACITÉ (%)		88.0	89.8	86.6	86.9	89.3	89.4
COEFFICIENT DE DIFFUSION (m ² /kg)		36	38	32	33	39	39
COEFFICIENT D'ABSORPTION (m ² /kg)		2.1	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1
L*		87.8	87.38	86.53	86.82	87.79	88.04
a*		0.44	0.74	0.77	0.77	0.72	0.42
b*		13.3	12.89	12.98	13	12.27	12.3

CODE		RCCD25	RCCD26	RCCD27	RCCD28	RCCD29	RCCD30
ÉNERGIE SPÉCIFIQUE	kwh/t	553	410	956	640	661	449
	MJ/kg	1.99	1.47	3.44	2.30	2.38	1.62
INTENSITÉ DE RAFFINAGE (GJ/t/impact)		9.46e-04	9.69e-04	6.53e-04	9.82e-04	1.06e-03	1.01e-03
NOMBRE D'IMPACTS (disques plats)		1241	902	3077	1374	1311	951
NOMBRE D'IMPACTS (disques coniques)		862	620	2196	971	927	656
INDICE D'ÉGOUTTAGE (ml)		748	734	636	730	713	323
FRACTIONS BAUER	R14	33.1	45.7	25.4	22.1	24.8	2.0
McNETT (%)	R28	36.8	26.8	32.7	38.9	35.1	20.0
	R48	16.6	13.1	17.1	18.6	17.2	22.4
	R100	8.7	6.2	9.3	10.3	9.5	21.7
	R200	3.1	2.4	4.0	3.7	3.4	11.2
	P200	1.7	5.8	11.5	6.4	10.0	22.7
LONGUEUR DES FIBRES, calculée (mm)		2.02	2.15	1.74	1.78	1.77	0.97
LONGUEUR DES FIBRES, Kajaani (mm)		3.08	3.18	2.92	2.94	3.23	2.375
REJETS PULMAC, .006* (%)		0.04	0.00	0.00	0.09	0.00	0.01
VOLUME SPÉCIFIQUE (cm ³ /g)		5.84	5.18	3.88	5.26	4.46	2.80
DENSITÉ (g/cm ³)		0.17	0.19	0.26	0.19	0.22	0.36
LONGUEUR DE RUPTURE (km)		1.30	1.51	3.32	1.77	2.47	3.50
ALLONGEMENT (%)		0.80	0.98	1.66	1.19	1.24	1.56
TEA (g/cm)		4	6	21	8	12	22
IND. ÉCLATEMENT (kPa*m ² /g)		0.60	0.82	1.98	0.83	1.33	1.92
INDICE DÉCHIRURE (mN*m ² /g)		5.59	7.48	12.51	7.46	8.92	6.51
L.R. LIMITE (km)		12.28	12.71	13.40	12.71	13.38	12.49
RÉSISTANCE HUMIDE (30%)							
LONGUEUR DE RUPTURE (km)		89	91	170	100	131	155
ALLONGEMENT (%)		2.0	1.7	3.0	1.5	1.9	2.6
TEA (g/cm)		0.51	0.42	1.7	0.39	0.64	1.1
BLANCHEUR (8-457nm,%)		57.3	56.5	58.8	57.9	57.6	58.2
OPACITÉ (%)		85.5	88.3	88.5	85.9	88.9	90.9
COEFFICIENT DE DIFFUSION (m ² /kg)		33	34	39	35	36	41
COEFFICIENT D'ABSORPTION (m ² /kg)		1.8	2.2	2.2	1.9	2.2	2.4
L*		87.65	86.9	88.02	87.88	87.47	87.44
a*		0.35	1.08	0.67	0.54	0.75	1.2
b*		13.27	12.78	12.48	13.1	12.69	12.09

ANNEXE 7

OPTIMISATION AVEC LE LOGICIEL GAMS

■GAMS 2.05/S PC AT/XT

93/01/06 09:26:09 PAGE

1
OPTIMISATION RCCD AVEC INTENSITE

```
3 * Ce programme permet l'optimisation d'une fonction de
4 * desirabilite qui utilise la rupture et la déchirure.
5 *
6 * Version du 8 janvier 1993.
7
8 * Note: Utilisation des variables codees
9
10
11 VARIABLES
12     INT1     Intensite de raffinage pour le stade 1
13
14     ENER1    Energie specifique pour le stade 1
15
16     INT2     Intensite de raffinage pour le stade 2
17
18     ENER2    Energie specifique pour le stade 2
19
20     DES      Fonction de desirabilite ;
21
22
23 FREE VARIABLE     INT1 ENER1 INT2 CONS2 DES ;
24
25 INT2.LO = -1.6;
26 INT2.UP = 3.8;
27 INT2.L  = -1.6;
28
29 ENER2.LO = -1.5;
30 ENER2.UP = 3.1;
31 ENER2.L  = 3;
32
33 INT1.LO = -1.8;
34 INT1.UP = 3.8;
35 INT1.L  = 3;
36
37 ENER1.LO = -1.0;
38 ENER1.UP = 2.3;
39 ENER1.L  = -1.0;
40
41
```

2
OPTIMISATION RCCD AVEC INTENSITE

```

42
43 EQUATIONS
44     CSF
45     Desf;
46 *   Contrainte pour l'indice d'egouttage
47     CSF.. 500 =L= 629.51 - 112.21*ENER1 - 57.56*ENER2
48           + 26.4*ENER1*ENER2;
49
50 *   Overall desirability will be;
51 *   ( LR * dech)**1/2
52
53     Desf.. DES =E= (
54           ((2.203 + 0.8196*ENER1 + 0.5288*ENER2
55             + 0.1074*INT1*INT1
56             - 0.2680*ENER1*ENER2)-0.75)/3.69)
57           *
58           (((7.59 - 1.085*INT1 - 1.071*INT2
59             + 0.5238*INT1*INT1 - 0.4838*ENER1*ENER2)
60             -3.21)/9.3)
61           )**0.5;
62
63
64
65 MODEL PROP /ALL/ ;
66
67 SOLVE PROP USING NLP MAXIMIZING DES ;
68
69
70
71
72
73 PARAMETER LR Longueur de rupture;
74
75     LR = 2.203 + 0.8196*ENER1.L + 0.5288*ENER2.L
76           + 0.1074*INT1.L*INT1.L
77
78           - 0.2680*ENER1.L*ENER2.L;
79
80 PARAMETER DECH Dechirure;
81
82     DECH = 7.59 - 1.085*INT1.L - 1.071*INT2.L
83            + 0.5238*INT1.L*INT1.L
84            - 0.4838*ENER1.L*ENER2.L;
85
86 PARAMETER BL Blancheur ISO;
87
88     BL = 57.4 + 0.5253*ENER1.L + 0.6256*ENER2.L
89            + 0.1831*INT1.L*INT1.L + 0.0906*ENER1.L*ENER1.L
90            + 0.2464*INT1.L*ENER1.L + 0.3369*INT2.L*ENER1.L;
91
92 PARAMETER OP Opacite;
93
94     OP = 88.42 - 0.2212*INT1.L + 0.7130*ENER1.L
95            + 0.6006*ENER2.L + 0.0592*INT1.L*INT1.L

```

```
96          - 0.0369*INT2.L*INT2.L - 0.177*INT1.L*INT2.L
97          + 0.4189*INT1.L*ENER1.L - 0.6201*ENER1.L*ENER2.L
98          - 0.7027*INT2.L*ENER1.L ;
99
100 PARAMETER IE Indice d'egouttage;
101     IE = 629.51 - 112.21*ENER1.L - 57.56*ENER2.L
102           + 26.4*ENER1.L*ENER2.L;
103
104 PARAMETER DENS Densite;
105     DENS = 0.2369 + 0.0487*ENER1.L + 0.03486*ENER2.L -
106           0.01269*ENER1.L*ENER2.L;
107
108 PARAMETER ECL Indice d'eclatement;
109     ECL = 1.287 + 0.6164*ENER1.L + 0.4080*ENER2.L
110           + 0.0795*INT1.L*INT1.L - 0.1566*ENER1.L*ENER2.L;
111
112 PARAMETER IN1 Intensite 1er stade;
113     IN1 = INT1.L*0.0002558 + 0.0008642;
114
115 PARAMETER ENE1 Energie specifique stade 1;
116     ENE1 = ENER1.L*347.91892 + 799.14;
117
118 PARAMETER IN2 Intensite stade 2;
119     IN2 = INT2.L*0.0002539 + 0.0010534;
120
121 PARAMETER ENE2 Energie specifique stade 2;
122     ENE2 = ENER2.L*251.9307 + 647.84333;
123
124
125 DISPLAY IN1, INT1.L, ENE1, ENER1.L, IN2, INT2.L, ENE2, ENER2.L,
126 IE, DENS, LR, DECH, ECL, BL,
127     OP;
128
129
130
```

GAMS 2.05/S PC AT/XT

93/01/06 09:26:09 PAGE

4

OPTIMISATION RCCD AVEC INTENSITE
SYMBOL LISTING

SYMBOL	TYPE	REFERENCES					
BL	PARAM	DECLARED	86	ASSIGNED	88	REF	126
CSF	EQU	DECLARED	44	DEFINED	47	IMPL-ASN	67
		REF	65				
DECH	PARAM	DECLARED	80	ASSIGNED	82	REF	126
DENS	PARAM	DECLARED	104	ASSIGNED	105	REF	126
DES	VAR	DECLARED	20	IMPL-ASN	67	REF	53
		67					
DESF	EQU	DECLARED	45	DEFINED	53	IMPL-ASN	67
		REF	65				
ECL	PARAM	DECLARED	108	ASSIGNED	109	REF	126
ENE1	PARAM	DECLARED	115	ASSIGNED	116	REF	125
ENE2	PARAM	DECLARED	121	ASSIGNED	122	REF	125
ENER1	VAR	DECLARED	14	IMPL-ASN	67	ASSIGNED	37
		38	39	REF	47	48	54
		57	60	75	78	84	88
		2*89	2*90	94	2*97	98	101
		102	105	106	109	110	116
		125					
ENER2	VAR	DECLARED	18	IMPL-ASN	67	ASSIGNED	29
		30	31	REF	47	48	54
		57	60	75	78	84	88
		95	97	101	102	105	106
		109	110	122	125		
IE	PARAM	DECLARED	100	ASSIGNED	101	REF	126
IN1	PARAM	DECLARED	112	ASSIGNED	113	REF	125
IN2	PARAM	DECLARED	118	ASSIGNED	119	REF	125
INT1	VAR	DECLARED	12	IMPL-ASN	67	ASSIGNED	33
		34	35	REF	23	2*55	59
		2*60	2*76	82	2*83	2*89	90
		94	2*95	96	97	2*110	113
		125					
INT2	VAR	DECLARED	16	IMPL-ASN	67	ASSIGNED	25
		26	27	REF	59	82	90
		3*96	98	119	125		
LR	PARAM	DECLARED	73	ASSIGNED	75	REF	126
OP	PARAM	DECLARED	92	ASSIGNED	94	REF	127
PROP	MODEL	DECLARED	65	DEFINED	65	REF	67

PARAMETERS

BL	BLANCHEUR ISO
DECH	DECHIRURE
DENS	DENSITE
ECL	INDICE D'ECLATEMENT
ENE1	ENERGIE SPECIFIQUE STADE 1
ENE2	ENERGIE SPECIFIQUE STADE 2
IE	INDICE D'EGOUTTAGE
IN1	INTENSITE 1ER STADE
IN2	INTENSITE STADE 2
LR	LONGUEUR DE RUPTURE
OP	OPACITE

■GAMS 2.05/S PC AT/XT
5
OPTIMISATION RCCD AVEC INTENSITE
SYMBOL LISTING

93/01/06 09:26:09 PAGE

VARIABLES

DES	FONCTION DE DESIRABILITE
ENER1	ENERGIE SPECIFIQUE POUR LE STADE 1
ENER2	ENERGIE SPECIFIQUE POUR LE STADE 2
INT1	INTENSITE DE RAFFINAGE POUR LE STADE 1
INT2	INTENSITE DE RAFFINAGE POUR LE STADE 2

EQUATIONS

CSF
DESF

MODELS

PROP

COMPILATION TIME = 0.060 MINUTES

■GAMS 2.05/S PC AT/XT

93/01/06 09:26:09 PAGE

6

OPTIMISATION RCCD AVEC INTENSITE

EQUATION LISTING SOLVE PROP USING NLP FROM LINE 67

---- CSF =L=

CSF.. (33.01)*ENER1 + (83.96)*ENER2 =L= 129.51 ; (LHS = 139.67 ***)

---- DESF =E=

DESF.. - (0.1995)*INT1 + (0.0805)*ENER1 + (0.0609)*INT2 - (0.1296)*ENER2
+ DES

=E= 0 ; (LHS = -1.0232 ***)

COLUMN LISTING SOLVE PROP USING NLP FROM LINE 67

---- INT1 INTENSITE DE RAFFINAGE POUR LE STADE 1

INT1

(-0.1995) (.LO, .L, .UP = -1.8, 3, 3.8)
DESF

---- ENER1 ENERGIE SPECIFIQUE POUR LE STADE 1

ENER1

(33.01) (.LO, .L, .UP = -1, -1, 2.3)
CSF
(0.0805) DESF

---- INT2 INTENSITE DE RAFFINAGE POUR LE STADE 2

INT2

(0.0609) (.LO, .L, .UP = -1.6, -1.6, 3.8)
DESF

---- ENER2 ENERGIE SPECIFIQUE POUR LE STADE 2

ENER2

(83.96) (.LO, .L, .UP = -1.5, 3, 3.1)
CSF
(-0.1296) DESF

---- DES FONCTION DE DESIRABILITE

DES

```
1      (.LO, .L, .UP = -INF, 0, +INF)  
      DESF
```

■GAMS 2.05/S PC AT/XT

93/01/06 09:26:09 PAGE

7

OPTIMISATION RCCD AVEC INTENSITE

MODEL STATISTICS SOLVE PROP USING NLP FROM LINE 67

MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS	2	SINGLE EQUATIONS	2
BLOCKS OF VARIABLES	5	SINGLE VARIABLES	5
NON ZERO ELEMENTS	7	NON LINEAR N-Z	6
DERIVATIVE POOL	10	CONSTANT POOL	16
CODE LENGTH	222		

GENERATION TIME = 0.016 MINUTES

EXECUTION TIME = 0.073 MINUTES

SOLUTION REPORT SOLVE PROP USING NLP FROM LINE 67

S O L V E S U M M A R Y

MODEL	PROP	OBJECTIVE	DES
TYPE	NLP	DIRECTION	MAXIMIZE
SOLVER	MINOS5	FROM LINE	67

**** SOLVER STATUS 1 NORMAL COMPLETION
 **** MODEL STATUS 2 LOCALLY OPTIMAL
 **** OBJECTIVE VALUE 1.1941

RESOURCE USAGE, LIMIT	0.046	1000.000
ITERATION COUNT, LIMIT	2	1000
EVALUATION ERRORS	0	0

M I N O S 5.2 (Mar 1988)

=====

B. A. Murtagh, University of New South Wales

and

P. E. Gill, W. Murray, M. A. Saunders and M. H. Wright
 Systems Optimization Laboratory, Stanford University.

WORK SPACE NEEDED (ESTIMATE)	--	434 WORDS.
WORK SPACE AVAILABLE	--	8100 WORDS.

EXIT -- OPTIMAL SOLUTION FOUND
 MAJOR ITNS, LIMIT 3 50
 FUNOBJ, FUNCON CALLS 8 8
 SUPERBASICS 0
 INTERPRETER USAGE .00
 NORM RG / NORM PI 0.000E+00

GAMS 2.05/S PC AT/XT

93/01/06 09:26:21 PAGE

9

OPTIMISATION RCCD AVEC INTENSITE
E X E C U T I N G

PARAMETER IN1	= 1.84E-3	INTENSITE 1ER STADE
VARIABLE INT1.L	= 3.80	INTENSITE DE RAFFINAGE POUR LE STADE 1
PARAMETER ENE1	= 451	ENERGIE SPECIFIQUE STADE 1
VARIABLE ENER1.L	= -1.00	ENERGIE SPECIFIQUE POUR LE STADE 1
PARAMETER IN2	= 6.47E-4	INTENSITE STADE 2
VARIABLE INT2.L	= -1.60	INTENSITE DE RAFFINAGE POUR LE STADE 2
PARAMETER ENE2	= 1373	ENERGIE SPECIFIQUE STADE 2
VARIABLE ENER2.L	= 2.88	ENERGIE SPECIFIQUE POUR LE STADE 2
PARAMETER IE	= 500	INDICE D'EGOUTTAGE
PARAMETER DENS	= 0.325	DENSITE
PARAMETER LR	= 5.23	LONGUEUR DE RUPTURE
PARAMETER DECH	= 14.1	INDICE DE DECHIRURE
PARAMETER ECL	= 3.44	INDICE D'ECLATEMENT
PARAMETER BL	= 61.0	BLANCHEUR ISO
PARAMETER OP	= 89.5	OPACITE

**** FILE SUMMARY

INPUT C:\GAMS205\GAMSLIB\PRCCDINT.GMS
OUTPUT C:\GAMS205\GAMSLIB\PRCCDINT.LST

EXECUTION TIME = 0.071 MINUTES