

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DES PÂTES ET PAPIERS

PAR
CLAUDINE DELISLE

EFFETS DU CONTRÔLE DE L'INTENSITÉ DE RAFFINAGE SUR LES
PROPRIÉTÉS FINALES DES PÂTES ET L'ÉNERGIE TOTALE CONSOMMÉE

SEPTEMBRE 2008

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.

Avant-propos

Lors du raffinage, l'objectif est d'obtenir des propriétés de pâtes optimales tout en utilisant l'énergie minimale. Une façon d'atteindre cet objectif consiste à utiliser l'intensité de raffinage et déterminer de quelle façon son contrôle affecte l'énergie consommée et la qualité de pâte.

Dans un premier temps, on utilise la base de données du CIPP-CRIQ, qui contient les résultats d'essais pilotes. Elle comprend toutes les données liées au procédé de raffinage telles que le pourcentage des essences du mélange des copeaux, divers paramètres de procédé, dont l'énergie du premier et second stade et plusieurs propriétés de pâte, ces valeurs sont utilisées afin de construire un modèle mathématique (plus exactement un modèle par PLS). Par la suite, à l'aide du logiciel Cadsim Plustm, on simule le procédé au moyen d'un modèle de prédiction qui comprendra le module de prédiction, c'est à dire le PLS obtenu préalablement, et un module d'optimisation. Deux simulations sont utilisées, l'une avec contrôle de l'intensité et l'autre sans contrôle de l'intensité. La comparaison des résultats de ces deux simulations permet de vérifier s'il y a effectivement un meilleur contrôle des propriétés à énergie moindre lorsque l'intensité est prise en compte.

Remerciements

Je remercie mon directeur de recherche, monsieur Luc Laperrière, de m'avoir enseigné patiemment les rudiments de la simulation. Je tiens également à témoigner ma reconnaissance à mon codirecteur de recherche, monsieur Robert Lanouette, pour le partage de ses connaissances du procédé de mise en pâte thermomécanique et tout ce qui lié à l'élaboration des modèles mathématiques. Merci de votre encouragement constant et votre disponibilité tout au long de ce travail.

Septembre 2008

Résumé

La montée du coût des copeaux de bois, l'augmentation du coût de l'énergie, la force de la devise canadienne sont quelques facteurs qui font en sorte que l'industrie des pâtes et papiers fait face à la précarité. On se doit de trouver des solutions permettant d'améliorer le procédé et les équipements déjà en place, et ce, sans investissement majeur. L'étude de ce projet porte sur une analyse PLS et simulation du procédé de pâte thermomécanique incluant les variables intensité et pourcentage des copeaux.

Les variables du PTM peuvent être divisées en trois (3) catégories. Il y a premièrement, les variables liées à la caractérisation des copeaux comme par exemple, le pourcentage de chacune des essences, l'humidité, la densité basale et la fraîcheur des copeaux. Il existe différents appareils permettant d'obtenir ces mesures. Il est important de noter que les mesures de la qualité des copeaux ne sont pas obtenues dans toutes les usines. Le deuxième type de variable est lié au contrôle de procédé. Dans le cadre de ce projet, deux variables sont particulièrement importantes, l'énergie spécifique et l'intensité de raffinage. L'énergie spécifique, dont les unités sont des kWh/tonne, est un moyen de contrôle très répandu dans l'industrie et est fonction de la charge du moteur du raffineur divisé par le taux de production. L'intensité est une mesure de la façon dont l'énergie est appliquée. Elle peut l'être brusquement (application d'une force sur une petite surface) ou encore doucement (application de la même force sur une plus grande surface). À intensité variable, les fibres ne se développeront pas de la même façon. Les unités de l'intensité sont des kWh/tonne/nombre d'impacts. Le nombre d'impacts est fonction du temps de résidence de la pâte entre les deux plaques et du patron des plaques. Il est possible d'affecter le temps de résidence en faisant varier la consistance de la pâte au moyen de la dilution ou en modifiant la vitesse de rotation des plaques. La notion d'intensité n'est pas utilisée dans toutes les usines. Le dernier type de variable est lié à la qualité de la pâte, ces mesures sont facilement disponibles.

Le premier objectif de ce projet est, d'utiliser l'analyse multivariable afin de déterminer s'il est possible d'établir des relations entre les trois types de variables mentionnés

précédemment. Pour ce faire, nous utiliserons la méthode PLS. Plusieurs modèles ont été testés afin d'obtenir le plus performant. Après analyse des résultats, le modèle combinant les variables du premier et second stade est retenu. On observe que les valeurs prédites ne sont pas plus précises lorsqu'on utilise les données de l'intensité. Malgré ce résultat, les variables intensité sont conservées dans le modèle. L'hypothèse suivante est posée : l'énergie spécifique joue un grand rôle dans l'atteinte des propriétés de la pâte tandis que le contrôle de l'intensité peut être comparé à un calibrage fin. Son utilisation aura donc un effet sur l'énergie spécifique consommée et sur les propriétés de la pâte.

Par la suite, il y a élaboration d'un modèle dans le logiciel Cadsim PlusTM. Au départ, deux modèles prédictifs ont été construits. La valeur à minimiser est toujours la même, soit la sommation normalisée des différences entre la valeur prédite et le point de consigne spécifié pour les cinq (5) propriétés. La différence entre les deux simulations est que la première fixe quatre (4) variables à la sortie de l'optimisation, soit l'énergie et l'intensité aux 1^{er} et 2^{ième} stades. La deuxième optimisation ne comportera que deux valeurs à la sortie de l'optimisation, soit l'énergie aux 1^{er} et 2^{ième} stades.

Les résultats basés sur trente (30) essais montrent que pour vingt-trois (23) d'entre eux, les valeurs d'énergie sont plus basses lorsqu'il y a utilisation du modèle prédictif avec contrôle de l'intensité. Ceci suggère que les pâtes auraient pu être obtenues à énergie moindre si l'intensité avait fait l'objet d'un contrôle. Par la suite, on compare les énergies totales obtenues avec le contrôle de l'intensité versus sans contrôle de l'intensité. En calculant leur ratio, on constate que pour vingt-quatre (24) essais il y a variation de $\pm 10\%$ de l'énergie. Pour un (1) essai, on observe une diminution de 19% lorsqu'il y a contrôle de l'intensité. Pour cinq (5) essais, on observe une diminution entre 15 et 30% de l'énergie lorsqu'il n'y a pas de contrôle de l'intensité. Donc à partir de ces résultats nous ne pouvons toujours pas conclure que le contrôle de l'intensité permet une diminution de l'énergie spécifique.

Une analyse de l'effet du contrôle de l'intensité sur les propriétés de la pâte a ensuite été réalisée. On calcule l'erreur absolue entre le point de consigne et la valeur obtenue par le

modèle prédictif. On conclut que le contrôle de l'intensité permet d'améliorer les propriétés de la pâte et ce pour les cinq (5) propriétés, en particulier la déchirure et la rupture.

Finalement, comme il n'y a pas eu de diminution significative de l'énergie spécifique avec contrôle de l'intensité, nous avons apporté des modifications au modèle prédictif. Deux nouvelles valeurs d'erreurs ont été ajoutées aux cinq (5) erreurs calculées. Il s'agit de la différence entre l'énergie calculée par le module d'optimisation et le minimum obtenu dans la base de données pour le premier et le deuxième stade de raffinage. Il en résulte une forme d'optimisation de l'énergie. Trente (30) nouveaux essais ont été analysés. Pour huit (8) essais, on observe une diminution significative de l'énergie entre 5% et 30% lorsqu'il y a optimisation de cette dernière. Pour onze (11) essais, la diminution de l'énergie est moindre, elle se situe entre 1% et 5%. Pour sept (7) essais, il n'y a pas de diminution de l'énergie. Enfin pour quatre (4) essais on observe une augmentation de l'énergie qui se situe entre 1% et 4%. Donc globalement, on obtient une diminution d'énergie additionnelle lorsqu'il y a optimisation de cette dernière.

Nous avons alors analysé les effets de cette optimisation de l'énergie sur les propriétés de la pâte. Si on calcule l'erreur absolue pour chacune des propriétés on observe que l'on s'éloigne du point de consigne pour quatre (4) propriétés soit le CSF, la rupture, le coefficient de diffusion et la déchirure. On s'approche du point de consigne pour une propriété, c'est à dire la longueur de fibre. Si on pousse l'analyse, on observe une diminution moyenne de 12,72 % de l'énergie totale de raffinage. Cette variation affecte les propriétés de la façon suivante : pour le CSF une augmentation moyenne de 3,06%, pour la longueur de fibre une diminution de 1,21%, pour la rupture une diminution de 3,13%. Pour les deux propriétés restantes, les résultats sont très variables. Pour le coefficient de diffusion de la lumière, une augmentation de 15,27% et une diminution de 15,28%. Pour la déchirure, encore une fois les résultats sont très variables puisqu'on remarque une augmentation de 18,10% et une diminution de 11,76%.

Mots Clés

Procédé de raffinage, énergie spécifique, intensité, caractéristiques des copeaux, qualité de la pâte, modèle mathématique, modèle de prédiction, analyse multivariable, simulation, optimisation, méthode du simplexe.

Table des Matières

Avant-propos.....	i
Remerciements.....	ii
Résumé.....	iii
Mots Clés.....	vi
Table des Matières	vii
Liste des Figures	xi
Liste des Tableaux	xiii
Liste des Équations	xiv
Liste des Abréviations.....	xvi
Chapitre 1 - Revue de la littérature	1
1.1 Mise en pâte mécanique	1
1.1.1 Introduction	1
1.1.2 Développement de la fibre lors du processus de raffinage.....	3
1.1.3 Impact de la qualité des copeaux.....	4
1.1.3.1 Recherches CRIQ/UQTR.....	4
1.1.3.2 Essences des copeaux	5
1.1.3.3 Compression des copeaux.....	6
1.2 Variables influentes dans la mise en pâte mécanique.....	6
1.2.1 Énergie.....	6
1.2.2 Intensité	7
1.2.2.1 Théorie liée à l'intensité.....	7
1.2.2.2 Description entre l'énergie spécifique et l'intensité ...	12
1.2.2.3 Technologie RTS	13
1.3 Réduction de l'énergie spécifique	14
1.3.1 Fractionnement des fibres.....	14

1.3.2	Utilisation de nouveaux modèles de plaques de raffineur	15
1.3.3	Autres solutions afin de diminuer les coûts énergétiques	15
1.4	Contrôle avancé	15
1.4.1	Les senseurs en ligne	16
1.4.2	Modèles de prédiction et simulation.....	16
1.4.3	Approche mécanistique	16
1.4.4	Approche statistique	18
1.4.4.1	Régression.....	18
1.4.4.2	Composantes principales (PCA).....	18
1.4.4.3	Projection sur une structure latente (PLS)	19
1.4.4.4	Réseaux de neurones.....	20
1.5	Positionnement de la recherche	23
Chapitre 2 - Matériel et méthodes.....		25
2.1	Base de données CIPP et CRIQ.....	25
2.1.1	Élimination de données de la base CRIQ/CIPP	27
2.2	Tests additionnels effectués en laboratoire au CIPP (Hiver 2006).....	27
2.2.1	Déroulement des tests du premier stade de raffinage	28
2.2.2	Déroulement des tests du deuxième stade de raffinage.....	28
2.3	Les variables de la base de données	28
2.3.1	Variables liées à la qualité des copeaux	29
2.3.2	Variables du procédé	29
2.3.3	Variables liées à la qualité de la pâte.....	30
2.4	Construction du modèle mathématique	32
2.4.1	Principales étapes afin de construire les modèles mathématiques.....	32
2.5	Construction du modèle prédictif sur la plate-forme CadsimPlus tm	33
2.5.1	Module de prédiction.....	33
2.5.2	Module d'optimisation	33
Chapitre 3 - Résultats des analyses multivariées		37
3.1	Construction des PLS global, premier et deuxième stades.....	37
3.2	Analyse des résultats du PLS Global.....	38
3.2.1	Principales composantes.....	39

3.2.1.1	Répartition des valeurs de la base de données	39
3.2.1.2	Analyse des variations pour les composantes 5 et 6 ...	45
3.2.2	Performance générale du modèle PLS Global.....	47
3.2.3	Poids des variables d'entrée sur les sorties.....	48
3.2.3.1	Comparaison entre les modèles avec intensité versus sans intensité du PLS Global	52
3.2.3.2	Variables observées versus variables prédites	53
3.3	Construction du PLS Stadel et PLS Stadel2	59
3.3.1	Analyse des résultats du PLS Stadel	59
3.3.2	Analyse des résultats du PLS Stadel2.....	61
3.4	Comparaison entre le modèle PLS Global et la combinaison des modèles PLS Stadel 1 et PLS Stadel2	64
Chapitre 4 - Résultats des simulations.....		68
4.1	Modèle avec l'intensité.....	68
4.2	Modèle sans l'intensité	69
4.3	Résultats comparatifs sans optimisation de l'énergie spécifique	70
4.3.1	Répartition de l'énergie entre le premier stade et le deuxième stade.....	71
4.3.2	Effet du contrôle de l'intensité sur l'énergie spécifique totale....	73
4.3.3	Effet du contrôle de l'intensité sur les propriétés de la pâte.....	75
4.4	Résultats comparatifs avec optimisation de l'énergie spécifique	76
4.4.1	Stratégie d'optimisation.....	76
4.4.2	Effet de l'optimisation de l'énergie sur l'énergie spécifique totale	78
4.4.3	Effet de l'optimisation de l'énergie sur les propriétés de la pâte	81
4.4.4	Effet de l'optimisation de l'énergie sur le ratio d'énergie.....	82
Conclusions.....		84
Bibliographie.....		88
Annexe I.....		93
Base de données complète contenant les résultats des essais de raffinage effectués en usine pilote.		93

Annexe II	130
Simulations dans Cadsim Plus TM	130

Liste des Figures

Figure 1.1	Diagramme du raffineur [1].....	1
Figure 1.2	Écoulement radial de la pâte [2]	2
Figure 1.3	Représentation schématique de l'action du raffinage [1]	2
Figure 1.4	Étapes du procédé de raffinage [2]	3
Figure 1.5	Anneau de pâte d'épaisseur dr	8
Figure 1.6	Forces agissant sur l'anneau de pâte [13]	8
Figure 1.7	Relation entre l'énergie spécifique et l'intensité	12
Figure 1.8	Modèle de réseau de neurones	20
Figure 1.9	Réseau de neurones à trois niveaux	21
Figure 2.1	Module Array matrix and offset de Cadsim Plus. Entrée 1 à 3 : variables X du PLS; sorties 1 et 2 : variables Y du PLS	33
Figure 2.2	Module d'optimisation dans Cadsim Plus. Entrée 1 : valeur de la fonction objective; Sorties 1 à 4 : variables manipulées par l'optimisateur	35
Figure 2.3	Spécification des paramètres dans le module d'optimisation.....	35
Figure 3.1	Composantes principales du modèle PLS Global.....	39
Figure 3.2	Répartition de l'énergie au premier stade de raffinage.....	40
Figure 3.3	Répartition de l'intensité au premier stade	41
Figure 3.4	Intensité en fonction de l'énergie premier stade.....	42
Figure 3.5	Répartition de l'énergie du deuxième stade	43
Figure 3.6	Répartition de l'intensité au deuxième stade de raffinage.....	43
Figure 3.7	Intensité en fonction de l'énergie pour le deuxième stade	44
Figure 3.8	Diagramme de charge entre les composantes 4 et 5	46
Figure 3.9	Digramme de charge entre les composantes 5 et 6.....	47
Figure 3.10	Performance générale du modèle PLS Global.....	48
Figure 3.11	Influence des variables d'entrée sur la longueur de fibre	49
Figure 3.12	Influence des variables d'entrée sur la rupture	50
Figure 3.13	Influence des variables d'entrée sur le coefficient de diffusion	51
Figure 3.14	Influence des variables d'entrée sur la déchirure	51
Figure 3.15	Influence des variables d'entrée sur le CSF_2	52
Figure 3.16	Composantes principales du modèle PLS Global.....	53

Figure 3.17	Valeurs de la longueur des fibres versus les valeurs prédites.....	54
Figure 3.18	Valeurs de la rupture versus les valeurs prédites.....	55
Figure 3.19	Valeurs du coefficient de diffusion versus les valeurs prédites.....	56
Figure 3.20	Valeurs de la déchirure versus les valeurs prédites	57
Figure 3.21	Valeurs du CSF_2 versus les valeurs prédites.....	57
Figure 3.22	PCA-X du modèle PLS Global.....	58
Figure 3.23	PCA_Y du modèle PLS Global	59
Figure 3.24	Composantes principales du modèle PLS Stade1.....	60
Figure 3.25	Performance générale du modèle sur la variable de sortie CSF_1	61
Figure 3.26	Composantes principales du modèle PLS Stade2.....	62
Figure 3.27	Performance du modèle sur les variables de sortie PLS Stade2.....	63
Figure 4.1	Ratio entre l'énergie du premier stade et l'énergie totale.....	72
Figure 4.2	Énergie totale de la base de données versus énergie totale obtenue avec contrôle de l'intensité	73
Figure 4.3	Énergie avec contrôle de l'intensité versus sans contrôle de l'intensité	74
Figure 4.4	Ratio énergie spécifique sans intensité versus avec intensité.....	75
Figure 4.5	Effet du contrôle de l'intensité sur les propriétés de la pâte.....	76
Figure 4.6	Inclusion des énergies dans la fonction objective	78
Figure 4.7	Comparaison entre les différentes énergies	78
Figure 4.8	Ratio entre l'énergie de la base de données et l'énergie sans optimisation	79
Figure 4.9	Ratio entre l'énergie sans optimisation et l'énergie avec optimisation, tous deux avec contrôle de l'intensité.....	80
Figure 4.10	Effet de l'optimisation de l'énergie sur les qualités de la pâte	81
Figure 4.11	Comparaison des ratios d'énergie du premier stade	83

Liste des Tableaux

Tableau 2.1	Plan d'expérience base de données CRIQ/CIPP	25
Tableau 2.2	Plan expérimental de différentes épaisseurs de copeaux.....	26
Tableau 2.3	Tests hiver 2006.....	27
Tableau 2.4	Variables de la base de données	31
Tableau 3.1	Description des variables du modèle PLS Global	38
Tableau 3.2	Détails chiffrés du modèle PLS Global	48
Tableau 3.3	Variables contenues dans le modèle PLS Stade1	60
Tableau 3.4	Prédictions de la variable de sortie du PLS Stade1	61
Tableau 3.5	Variables contenues dans le modèle PLS Stade2	62
Tableau 3.6	Prédictions des variables de sortie du PLS Stade2	63
Tableau 3.7	Erreurs absolues et relatives du modèle PLS Global.....	64
Tableau 3.8	Erreurs absolues et relatives du modèle PLS Stade1	65
Tableau 3.9	Erreurs absolues et relative du modèle PLS Stade 2 avec et sans essence	66
Tableau 3.10	Erreurs absolues et relatives du modèle PLS Stade2 avec essences.....	67
Tableau 4.1	Coefficients du modèle mathématique PLS avec intensité	69
Tableau 4.2	Coefficients du modèle mathématique PLS sans intensité.....	70
Tableau 4.3	Impact de l'optimisation de l'énergie sur la qualité de pâte.....	82

Liste des Équations

$\tau = \frac{M}{m}$	Équ. 1.1..... 7
$F = C - F_{r1} - F_{r2} + bS$	Équ. 1.2..... 8
$Vt = \omega r$	Équ. 1.3..... 9
$At = \frac{V^2}{r} = \omega^2 r$	Équ. 1.4..... 9
$C = dM(r)\omega^2 r$	Équ. 1.5..... 9
$F_{r1} + F_{r2} = (\mu_{r1} + \mu_{r2})T(r)$	Équ. 1.6..... 9
$F_{r1} + F_{r2} = 2\mu_r T(r)$	Équ. 1.7..... 10
$T(r) = 2\pi dr Pm(r)$	Équ. 1.8..... 10
$F(r) = 4\pi\mu_r r Pm(r)dr$	Équ. 1.9..... 10
$F = dM(r)\frac{dv}{dt}$	Équ. 1.10..... 10
$dM(r)\frac{dv}{dt} = dM(r)r\omega^2 - 4\pi\mu_r r Pm(r)dr$	Équ. 1.11..... 10
$\frac{dv}{dr} = \frac{r\omega^2}{v} - \frac{a\mu_r}{\mu_{r1}} \frac{E_{spécifique}c(r)}{\omega(r_2^2 - r_1^2)}$	Équ. 1.12..... 10
$ML = e^{a+b \ln(tss) + c \ln(Pc) + d \ln(Fdv)}$	Équ. 1.13..... 17
$F_c = 1,44.k_c.\rho.t_{ss}$	Équ. 1.14..... 17
$Y = b_0 + b_1 X$	Équ. 1.15..... 18
$Y = b_0 + b_1 X^2$	Équ. 1.16..... 18
$Y = b_0 + b_1 P + b_2 P^2 + b_3 P^3 + \dots + b_{n-1} P^{n-1} + b_n P^n$	Équ. 1.17..... 18
$SM = a_1 MM + a_2 H + a_3 S + a_4 L + a_5 N + C(1)$	Équ. 1.18..... 19
$S = X_1 W_1 + X_2 W_2 + X_3 W_3 + \dots + X_n W_n$	Équ. 1.19..... 20
$Siccité = (100 - Humidité)$	Équ. 2.1..... 29
$Siccité = (\%Ep.43,35) + (\%Sap.46,89) + (\%PG.48,30) + (\%Boul.46,90)$	Équ. 2.2..... 29
$\left(\frac{\text{propriété, prédite} - \text{consigne propriété}_i}{\text{propriété, maximum} - \text{propriété, minimum}} \right)$	Équ. 2.3..... 34

$$\Sigma \left(w_i \cdot \left(\frac{\text{propriété}_i \text{prédite} - \text{consigne propriété}_i}{\text{propriété}_i \text{maximum} - \text{propriété}_i \text{minimum}} \right) \right) \quad \text{Équ. 2.4..... 34}$$

$$\frac{\text{Valeurabsolue}(\text{valeurpréditeY} - \text{valeurY})}{\text{ValeurY}} \times 100 \quad \text{Équ. 3.1..... 64}$$

$$\frac{\text{Valeurabsolue}(\text{valeurpréditeY} - \text{valeurY})}{(\text{maxvaleurY} - \text{minvaleurY})} \times 100 \quad \text{Équ. 3.2..... 64}$$

$$\frac{\text{énergie spécifique 1er stade}}{\text{énergie totale}} \quad \text{Équ. 4.1..... 71}$$

$$\frac{\text{énergie sans intensité} - \text{énergie avec intensité}}{\text{énergie sans intensité}} \quad \text{Équ. 4.2..... 74}$$

$$\Sigma \left(w_i \cdot \left(\frac{\text{propriété}_i \text{prédite} - \text{consigne propriété}_i}{\text{propriété}_i \text{maximum} - \text{propriété}_i \text{minimum}} \right) \right) \quad \text{Équ. 4.3..... 77}$$

$$\frac{\text{énergie base données} - \text{énergie sans optimisation}}{\text{énergie base données}} \quad \text{Équ. 4.4..... 79}$$

$$\frac{\text{énergie sans optimisation} - \text{énergie avec optimisation}}{\text{énergie sans optimisation}} \quad \text{Équ. 4.5..... 80}$$

Liste des Abréviations

PTM	Pâte thermomécanique
CIPP	Centre intégré en Pâtes et Papiers
UQTR	Université du Québec à Trois-Rivières
CRIQ	Centre de recherche industriel du Québec
CMS	Appareil de mesure en ligne de la qualité des copeaux (Chip Management System)
PCA	Principal component analysis
PCAX	Principal component analysis x variables
PLS	Partial Least Square
RTS	Procédé à haute intensité de la compagnie Andritz (Retention Temperature Speed)
LF	Longueur des fibres
C_DIFF	Coefficient de diffusion de la lumière
RN	Réseau de neurones
RMSEE	Root Mean Square of Error Estimate

Chapitre 1 - Revue de la littérature

1.1 Mise en pâte mécanique

1.1.1 Introduction

Dans le procédé de mise en pâte au moyen de raffineur, les copeaux sont la matière première utilisée. Le déplacement des copeaux entre deux surfaces abrasives permet le raffinage, soit la désintégration des copeaux en fibres (figure 1.1). La force centrifuge permet le déplacement du matériel dans le raffineur. Le raffinage des copeaux génère une grande quantité de vapeur soit environ 2 tonnes de vapeur/par tonne de pâte [1]. Une partie de cette vapeur est évacuée avec la pâte. Une autre partie se dirige dans le sens contraire, empêchant la pâte et les copeaux de se déplacer. Lorsqu'il y a pressurisation d'un raffineur (TMP) le volume de la vapeur est réduit d'un facteur de quatre par conséquent le problème de retour de pâte diminue [2].

Afin de bien comprendre ce phénomène, des fenêtres furent installées sur le bâti du raffineur et les chercheurs filmèrent le déplacement de la pâte/copeaux/vapeur [3]. Le matériel qui passe entre les deux barres du raffineur est constitué de fragments de copeaux et de bûchettes après avoir été désintégrés en partie dans les barres grossières des plaques.

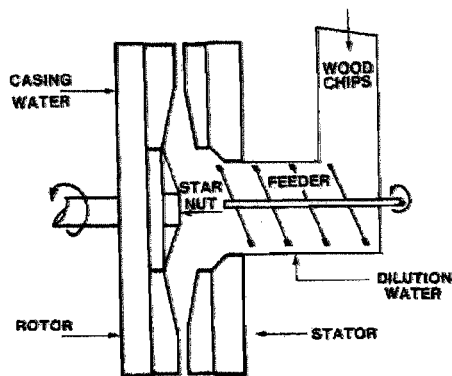


Figure 1.1 Diagramme du raffineur [1]

Dans la première moitié de la zone de raffinage, soit jusqu'au point de pression maximale, une partie de la pâte se dirige à contre-courant. Cet écoulement en sens contraire est dû à la circulation de la vapeur. La figure 1.2 illustre cette situation.

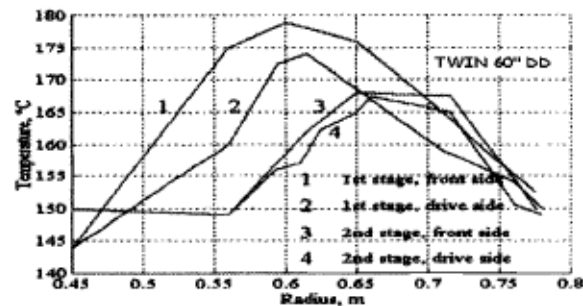


Figure 1.2 Écoulement radial de la pâte [2]

L'action du raffinage est illustrée à la figure 1.3. Les fibres et les flocs de fibres subissent des cycles de compression et de cisaillement lors du déplacement des barres.

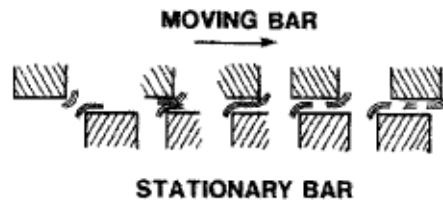


Figure 1.3 Représentation schématique de l'action du raffinage [1]

L'écoulement de la pâte (fibres, flocs et fragments de copeaux) et de la vapeur est donc complexe.

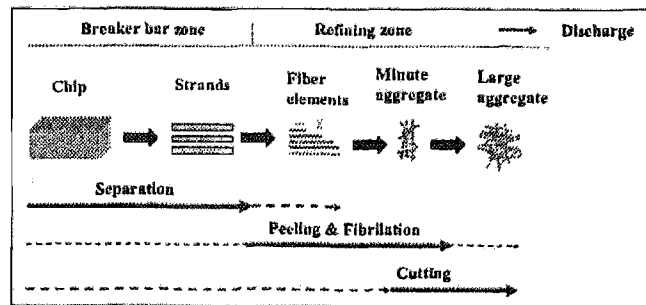


Figure 1.4 Étapes du procédé de raffinage [2]

1.1.2 Développement de la fibre lors du processus de raffinage

La fibre est une matière viscoélastique, ses propriétés ne sont donc pas élastique comme un ressort, ni visqueuse comme un liquide mais plutôt une combinaison entre ces deux états [2]. La fibre contient plusieurs constituants dont les principaux sont la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. Dans des conditions sèches, sans ajout d'eau, la température de ramollissement pour la lignine et l'hémicellulose se situe entre 180 et 220°C. Les substances hydrophiles, telle que l'hémicellulose et la cellulose amorphe peuvent absorber de 4 à 5 fois plus d'eau que la lignine. À pleine saturation la température d'assouplissement de ces deux constituants est d'environ 20°C. Pour une lignine saturée en eau la température d'assouplissement se situe entre 80 et 90°C. Afin de fatiguer la structure du bois, les paramètres les plus importants sont l'amplitude de la force appliquée, la fréquence à laquelle est appliquée cette force, la température du procédé et la nature du bois qui doit être développé.

Selon les auteurs Sabourin et Harris [4], lors du processus de raffinage il est important de bien séparer les fibres (défibrage) et de développer la surface des fibres afin d'obtenir un bon potentiel de liaison. Il doit donc y avoir gonflement de la fibre et fibrillation de la paroi de la fibre afin d'obtenir des longues fibres de bonne qualité. De plus, il doit y avoir délamination de la paroi de la fibre afin de produire des fines ayant un bon potentiel de liaison. La fraction de longues fibres permet de consolider les forces dans les trois directions (x, y et z). Les fines sont celles qui permettent la consolidation de la feuille,

elles remplissent les espaces entre les plus grosses particules, de plus elles sont liées aux propriétés optiques de la feuille. Afin de mesurer la bonne qualité d'une pâte il est important de mesurer les paramètres suivants:

Qualité des longues fibres

Qualité des fibres fines

Quantité des longues fibres

Quantité des fibres fines

Au niveau de la qualité des fibres longues et fines il n'existe aucun test ligne. Il est par contre possible de faire des mesures de surface spécifique en laboratoire, directes ou indirectes.

1.1.3 Impact de la qualité des copeaux

1.1.3.1 Recherches CRIQ/UQTR

Les copeaux alimentés au raffineur sont une matière hétérogène dont les caractéristiques suivantes varient :

Les essences de bois : L'épinette est l'essence avec laquelle on fabrique la meilleure pâte.

Au Québec, un mélange de copeaux composé principalement d'épinette, de sapin, de bouleau et de pin gris est alimenté vers le raffineur.

La grosseur des copeaux : Elle doit être le plus uniforme possible, les usines sont dépendantes des coupes effectuées à la scierie.

Le pourcentage d'humidité : Il a un impact sur la consistance de la pâte.

Densité basale : Elle est liée à la proportion relative de la paroi dans la fibre, elle a un impact sur la consistance de la pâte.

La fraîcheur des copeaux : Une meilleure fraîcheur des copeaux permet une augmentation de la production, une diminution de l'utilisation d'hydrosulfite de sodium et une stabilisation du procédé de raffinage.

Le contenu en impuretés : que ce soit les nœuds, l'écorce, les racines, le métal et le sable.

Leur présence décroît la force et la blancheur de la pâte.

Dans un premier temps, le CRIQ a développé le CMS. Cet appareil permet de quantifier certaines propriétés des copeaux [5]. Les principaux avantages de mesurer en ligne les propriétés des copeaux sont de les payer à juste prix, d'obtenir un contrôle de procédé optimal et d'être capable de prédire la qualité de la pâte et donc du papier. Il est à noter qu'il existe d'autres appareils mesurant les propriétés des copeaux tel que le Scan Chip [6].

Dans un deuxième temps, une recherche conjointe entre le CIPP de l'UQTR et le CRIQ s'est déroulée et plusieurs résultats ont été tirés de cette base de données. Les auteurs Lanouette, Bédard et Benaoudia [7] ont évalué les effets de la dégradation et de la qualité des copeaux sur la qualité de la pâte au moyen de tests effectués en laboratoire. Ils ont par la suite déterminé si le CMS peut remplacer une évaluation formelle des copeaux afin d'obtenir une évaluation rapide. Il s'agissait d'établir une relation entre la qualité mesurée des copeaux et les propriétés de la pâte. Les auteurs obtiennent une relation correcte entre les matières premières et la qualité finale de la pâte mais le modèle requiert d'entrer le pourcentage de chaque essence ce qui n'est pas pratique et pas toujours possible. Le modèle prédictif obtenu à partir des données du CMS est valable lorsque l'alimentation est constante. Dans le cas contraire, il serait préférable d'obtenir le pourcentage de chacune des essences par des tests en parallèle ou par un meilleur suivi provenant de l'usine. En utilisant toujours la même base de données, les auteurs ont construit un PLS afin de mieux comprendre les impacts de la présence de chacune des essences sur la qualité de la pâte. Ils concluent que la présence du sapin et/ou bouleau permet d'améliorer le coefficient de diffusion de la lumière. Tandis que le pin gris permet d'obtenir une bonne longueur de fibres et une meilleure déchirure. La plupart des propriétés physiques des pâtes et papiers peuvent être fixées en utilisant une bonne combinaison des essences et des conditions optimales d'opération du raffineur.

1.1.3.2 Essences des copeaux

La plupart des tests afin d'obtenir le pourcentage des essences d'un échantillon de copeaux doivent être effectués en laboratoire, les résultats ne peuvent donc pas être obtenus rapidement. Un test a été développé par "Alberta Research Council" dont les

mesures peuvent être obtenues en temps réel. Il s'agit d'un appareil muni d'un senseur utilisant la chromatographie gazeuse pour mesurer exactement le ratio de terpènes présent dans chacune des essences. Des résultats significatifs ont été obtenus par les auteurs B.J Fuhr et al [8] pour un mélange d'épinette blanche et de pin tordu.

1.1.3.3 Compression des copeaux

Il est possible de réduire l'énergie en appliquant un traitement mécanique aux copeaux avant qu'ils subissent le raffinage. Selon les auteurs Lanouette et Law [9], il existe de nombreux avantages à la compression tel que l'extraction de la résine et des ions métalliques, l'amélioration de l'imprégnation des produits chimiques, la délamination de la fibre, l'augmentation de la surface spécifique et donc du potentiel de liaison. Ils comparent les propriétés de pâtes obtenues de diverses façons:

Sans compression.

Copeaux comprimés au moyen d'une vis de compression.

Copeaux comprimés à l'aide d'une presse hydraulique (compression statique).

Une forte compression volumétrique (vis de compression) brise les fibres et crée une diminution de la longueur des fibres, ce qui est évidemment désavantageux. Une force appliquée perpendiculairement (presse hydraulique) permet le délaminage des fibres sans toutefois les briser. Ils concluent que la compression statique comparativement à des copeaux non-traités permet une réduction d'énergie spécifique, amélioration de la qualité de la fibre et donc augmente les qualités physiques et optiques de la feuille.

1.2 Variables influentes dans la mise en pâte mécanique

1.2.1 Énergie

Dans le procédé de mise en pâte, l'énergie spécifique est une variable importante de contrôle. Il s'agit de l'énergie appliquée divisée par la production de pâte. On obtient donc des kWh/tonnes ou encore des MJ/kg. Un procédé PTM requiert entre 7-8 MJ/kg.

1.2.2 Intensité

1.2.2.1 Théorie liée à l'intensité

En 1987, Danforth [10] développe une nouvelle théorie basée sur le temps de résidence de la pâte dans le raffineur. De nouveaux termes sont définis dont le nombre d'impacts que les fibres subissent lors du raffinage et l'intensité qui est définie comme étant l'énergie appliquée par impact, en fait c'est une mesure de la façon dont l'énergie est appliquée sur les fibres. Afin de déterminer le nombre d'impacts, le temps de résidence de la pâte entre les deux plaques doit être calculé. Plusieurs études ont porté sur ce sujet [11, 12]. Ils ont défini un temps de résidence :

$$\tau = \frac{M}{m} \quad \text{Équ. 1.1}$$

où

τ = temps de résidence

M = masse entre les deux plaques

m = débit de pâte

La difficulté dans cette approche est d'obtenir la masse de la pâte entre les deux plaques, le matelas fibreux n'est pas uniforme. Dans les années 1990, Miles et May [13] ont utilisé une approche constitutive afin d'obtenir la valeur de l'intensité. Pour ce faire, ils ont fait ressortir toutes les forces agissant entre deux plaques de raffineur (voir la figure 1.6). Ils ont donc développé un modèle mécanistique, à partir d'un élément infinitésimal, soit un anneau de pâte d'épaisseur dr subissant le processus de raffinage (voir la figure 1.5).

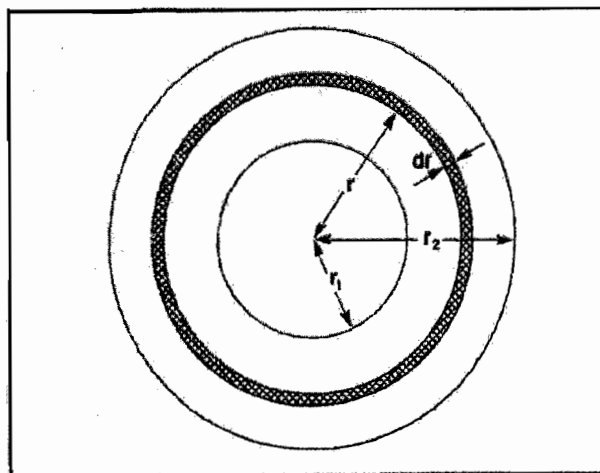


Figure 1.5 Anneau de pâte d'épaisseur dr

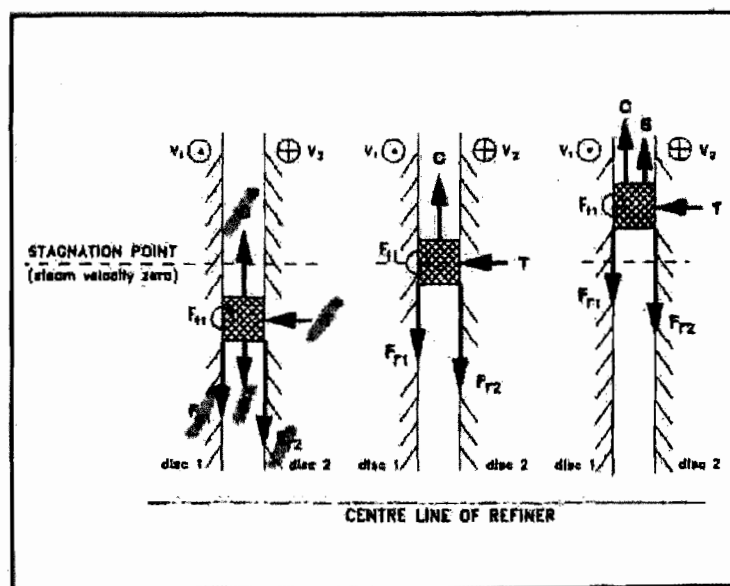


Figure 1.6 Forces agissant sur l'anneau de pâte [13]

$$F = C - F_{r1} - F_{r2} + bS$$

Équ. 1.2

où

F = Force totale agissant sur la pâte

C = Force centrifuge

F_{r1}, F_{r2} = Forces de friction agissant sur la pâte

bS = Force de la vapeur poussant la pâte vers la sortie ou l'entrée du raffineur

Pour ce qui est de la force centrifuge, en utilisant une unité infinitésimale $dM(r)$ et ω la vitesse angulaire du disque on sait que :

$$Vt = \omega r \quad \text{Équ. 1.3}$$

$$At = \frac{V^2}{r} = \omega^2 r \quad \text{Équ. 1.4}$$

$$C = dM(r) \omega^2 r \quad \text{Équ. 1.5}$$

où

r = rayon du disque du raffineur

$dM(r)$ = masse humide de la pâte dans l'anneau dr du raffineur

ω = vitesse de rotation du disque du raffineur

V = vitesse centrifuge

A = accélération centrifuge

C = force centrifuge

T = temps

Les formules des forces de friction sont développées à partir des relations de la physique mécanique.

$$F_{r1} + F_{r2} = (\mu_{r1} + \mu_{r2}) T(r) \quad \text{Équ. 1.6}$$

où

μ_{r1} et μ_{r2} = coefficients de friction.

$T(r)$ = force axiale exercée sur l'anneau de pâte dr .

L'équation devient donc

$$F_{r1} + F_{r2} = 2\mu_r T(r) \quad \text{Équ. 1.7}$$

La force axiale peut être exprimée à l'aide de la pression, la pression mécanique appliquée sur l'anneau de pâte.

$$T(r) = 2\pi r dr P_m(r) \quad \text{Équ. 1.8}$$

En combinant les deux dernières équations, on obtient

$$F(r) = 4\pi\mu_r r P_m(r) dr \quad \text{Équ. 1.9}$$

où

μ_r = moyenne des coefficients de friction

$F(r)$ = force de friction radiale totale

La relation exprimant la force de poussée de la vapeur a également été développée. Après plusieurs années d'étude, les chercheurs Miles et May [14, 15] ont conclu que l'effet d'entraînement de la pâte par la vapeur vers l'entrée du raffineur est égal à l'effet d'entraînement vers la sortie du raffineur. Cette force (bS) peut donc être négligée.

La force totale agissant sur la pâte peut être exprimée sous la forme $F = m a$ on obtient donc :

$$F = dM(r) \frac{dv}{dt} \quad \text{Équ. 1.10}$$

$$dM(r) \frac{dv}{dt} = dM(r) r \omega^2 - 4\pi\mu_r r P_m(r) dr \quad \text{Équ. 1.11}$$

L'équation subit des modifications afin d'obtenir la vitesse d'écoulement de la pâte, on obtient une équation de la variation de la vitesse en fonction du rayon du raffineur.

$$\frac{dv}{dr} = \frac{r \omega^2}{v} - \frac{a \mu_r}{\mu_{r1}} \frac{E_{spécifique} c(r)}{\omega (r_2^2 - r_1^2)} \quad \text{Équ. 1.12}$$

À partir de l'équation de la vitesse, il est possible d'obtenir le temps de résidence, le nombre d'impacts et l'intensité. Le calcul de l'intensité inclut trois variables d'opération:

Énergie spécifique

Consistance à l'entrée du raffineur

Vitesse de rotation des plaques

Ils incluent aussi trois variables de design:

Grosueur et type de raffineur

Ratio des coefficients de friction

Distance des barres de plaques

Ces équations ont été développées pour des raffineurs à disques plats. Les équations doivent donc être modifiées afin de s'appliquer à des raffineurs ayant des plaques à zone conique. Les équations modifiées se retrouvent dans le mémoire de Lanouette [16]. Il est à noter que toutes les données sont disponibles en usine afin de calculer l'intensité. Par contre, ce type de contrôle n'est pas utilisé dans toutes les usines, puisque dans certains cas, des investissements importants seraient requis afin de modifier la stratégie de contrôle.

Selon Stationwala [3], l'intensité élevée ne peut pas s'appliquer aux deux stades. Ce chercheur affirme que la combinaison d'une basse énergie appliquée à une haute intensité au premier stade suivi d'un second stade à basse intensité serait une amélioration au procédé. On doit toujours garder comme limite une application d'une haute intensité sans pour autant casser les fibres.

Harkonen et ses collaborateurs [17, 18] ont poursuivi des recherches sur l'intensité. Ils ont développé un modèle mathématique afin de décrire l'écoulement des fibres/eau et de la vapeur entre deux plaques d'un raffineur. Ils mentionnent que selon eux, les équations de Miles et May sont incomplètes puisqu'elles ne tiennent compte que des forces dans le sens radial. Leur modèle inclut donc les forces dans le sens radial mais également dans les sens tangentiel et axial. De plus, ils incluent un bilan de masse, un bilan d'énergie et des équations de phénomène de transport. Les équations sont résolues par itération et ils obtiennent les valeurs suivantes : les vitesses d'écoulement du mélange fibre/eau et de la vapeur, les fractions volumiques fibre/eau et vapeur, la température, la pression, la puissance dissipée et l'intensité. Les valeurs obtenues grâce au modèle sont validées avec

des tests effectués en laboratoire et par une mesure de l'intensité au moyen d'un traceur radioactif.

1.2.2.2 Description entre l'énergie spécifique et l'intensité

Donc en résumé, l'intensité est définie comme étant l'énergie appliquée par le nombre d'impacts, les unités sont GJ/tonne/impact. La figure 1.7 présente sous forme d'organigramme les liens entre l'énergie spécifique et l'intensité.

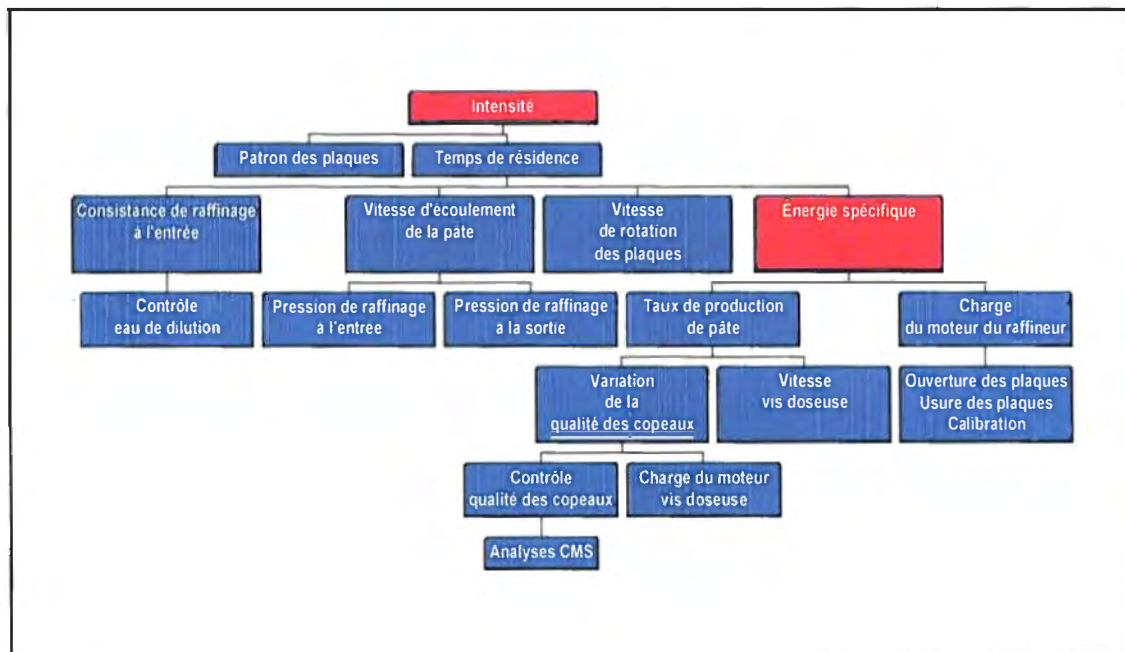


Figure 1.7 Relation entre l'énergie spécifique et l'intensité

On peut faire varier l'intensité de deux façons :

En changeant le patron des plaques des raffineurs.

En variant le temps de résidence de la pâte entre les deux plaques de raffineur.

Dans ce dernier cas, les paramètres impliqués sont :

Le différentiel de pression : Cette différence existe entre l'entrée du raffineur et le bâti. Lorsque le différentiel de pression augmente la pâte est évacuée plus rapidement ce qui diminue le temps de résidence.

La consistance de la pâte : Une fibre mouillée sera plus facile à déplacer qu'une fibre sèche étant donné que le déplacement radial se fait par la force centrifuge. Le contrôle de l'ajout d'eau de dilution est très difficile, principalement dû au fait que la plupart des usines n'ont pas de capteur de consistance en ligne. Habituellement, on mesure la consistance par un analyseur à infrarouge placé en aval du procédé, il est également possible de mesurer la consistance au moyen de bilan de masse et d'énergie [19].

La vitesse de rotation : Plus les disques du raffineur tournent rapidement plus la pâte est évacuée rapidement. À l'usine pilote, il est possible de faire varier la vitesse de rotation des plaques, ce contrôle de l'intensité est donc utilisé.

1.2.2.3 Technologie RTS

Dans les années 95, le procédé RTS a été développé par la compagnie finlandaise Andritz à partir de la théorie de l'intensité. Le terme R représente le temps de résidence des copeaux entre les deux plaques de raffineur (rétention). Le terme T est la température, le raffinage s'effectue à des températures élevées. Finalement, S (speed) correspond à la variable vitesse, celle de la rotation des disques. Dans le procédé RTS, les copeaux subissent une étape de pré-étuvage. On ajoute pendant une période de 10 à 20 secondes de la vapeur à température élevée (une pression entre 5,5 et 6,0 bars). Lors du raffinage, la vitesse de rotation des plaques du raffineur se situe entre 2000 et 2500 rpm (comparativement à 1800 rpm pour un raffinage normale). Le raffinage se fait à haute intensité, ils espèrent ainsi réduire la dissipation viscoélastique (la fibre n'absorbe plus l'énergie comme un ressort). On obtient une pâte ayant une bonne blancheur malgré la température élevée puisque le temps de rétention est faible, les propriétés de force sont les mêmes et l'énergie utilisée est moindre.

Au cours des dernières années, plusieurs études ont été effectuées sur les différentes configurations du procédé RTS [20-25]:

RTS pour le premier stade de raffinage.

RTS2 pour le premier et deuxième stade de raffinage.

RTS3 pour le premier stade, deuxième stade et troisième stade de raffinage.

RT-RTS pré-compression des copeaux et RTS au premier stade de raffinage.

RT-RTS2 pré-compression des copeaux et RTS au premier et deuxième stade.

Selon les auteurs Sabourin et Harris [4], des économies d'énergie se situant entre 300 et 600 kWh/tonne ont été comptabilisées tout en maintenant une qualité de pâte comparable à celle produite par un PTM. À travers le monde, onze usines utilisent la configuration RT-RTS, donc utilisation du RTS que pour un stade de raffinage.

1.3 Réduction de l'énergie spécifique

En raison de la diminution du prix des papiers, l'augmentation du dollar canadien et l'augmentation des coûts de l'énergie (électricité, gaz naturel et pétrole), la rentabilité des usines de pâtes et papiers est en nette diminution. Les investissements afin d'améliorer les équipements sont au plus bas. Les représentants de l'industrie doivent donc trouver des solutions peu coûteuses afin d'améliorer leur procédé. La réduction de l'énergie de raffinage est un but qui doit être atteint et ce sans investissement majeur, l'électricité constituant 33% des coûts d'opération du PTM [26]. Plusieurs solutions sont au stade d'étude ou encore ont déjà été implantées, en voici quelques unes.

1.3.1 Fractionnement des fibres

Certains auteurs supposent que la séparation des fibres au moyen de tamis ne se fait pas de façon optimale. Il serait donc préférable de remplacer cet équipement par des hydrocyclones ou encore d'utiliser un agencement tamis hydrocyclones [27, 28]. Le fractionnement par hydrocyclone a démontré une meilleure aptitude à séparer les fibres sur la base de l'épaisseur de la paroi. Les fibres récupérées dans les rejets sont donc de moins bonne qualité. C'est cette fraction qui doit être mieux développée afin de produire une pâte aux propriétés optimales. Donc, par l'ajout de cet équipement on prédit une augmentation des propriétés de force de la pâte et une diminution de l'énergie spécifique puisque seule la fraction des fibres non-développées est dirigée vers le raffinage de rejet.

1.3.2 Utilisation de nouveaux modèles de plaques de raffineur

Une autre façon de réduire les coûts de l'énergie tout en maintenant des qualités de pâtes optimales consiste à développer de nouveaux patrons de plaques de raffineur. Pour ce faire, on utilise la théorie liée à l'intensité de raffinage. La compagnie Metso [29] utilise des plaques appelées "Turbine segmentsTM". Il s'agit de modifier les patrons des plaques afin d'éviter le retour des fibres vers l'œil du raffineur, il est ainsi possible de diminuer le temps de résidence de la pâte de 50% et donc de réduire l'énergie spécifique appliquée. D'autres chercheurs développent également de nouveaux patrons de plaques [30, 31]. Il s'agit de diminuer l'énergie spécifique tout en maintenant un niveau de qualité de pâte acceptable. L'essai d'un nouveau modèle de plaque se fait habituellement par essai et erreur, il s'agit d'un long processus, afin d'améliorer l'implantation on utilise des senseurs de température dans le sens radial de la plaque [29].

1.3.3 Autres solutions afin de diminuer les coûts énergétiques

Il y a eu installation de systèmes de récupération de vapeur produite par le TMP. Selon les auteurs Sabourin et al [22] la réduction des coûts est minime par rapport à la grande utilisation d'énergie d'un PTM.

Chaque solution, afin de diminuer l'énergie, comporte des avantages et des désavantages, on doit tenir compte de l'efficacité, du coût d'implantation du nouveau système ainsi que du retour à l'investissement.

1.4 Contrôle avancé

Selon l'auteur Strand [32] les principaux avantages de l'utilisation d'un contrôle avancé sont:

- Augmentation de la productivité
- Élimination ou diminution des pertes
- Bon retour sur l'investissement
- Utilisation maximale des équipements de l'usine

Il note cependant que dans l'industrie des pâtes et papiers le contrôle avancé ne connaît pas beaucoup de succès. Certains suggèrent qu'il y a trop de variations dans la qualité de la matière première et qu'il y a un manque de précision dans les mesures de la qualité. Strand suggère plutôt que les notions de contrôle avancé et d'amélioration continue sont indissociables, principe que l'industrie ne suit pas adéquatement.

1.4.1 Les senseurs en ligne

Un contrôle avancé demande souvent la création de modèles dont certaines variables doivent être mesurées par des capteurs en ligne. Ceci inclut les mesures de la qualité de la pâte (indice d'égouttage, longueur des fibres, taux de bûchettes), les senseurs permettant de lire la distance des plaques du raffineur, de la consistance de la pâte de la ligne de soufflage [19] et de la blancheur de la pâte [33].

1.4.2 Modèles de prédiction et simulation

Les simulateurs commerciaux font utilisation de modèles internes (liste d'équations) basés sur les bilans de masse et d'énergie (variables de débit, de température et de pression). Certains logiciels plus performants peuvent de plus inclure une dynamique, soit une variable liée au temps. Par la seule utilisation de ces bilans dynamiques d'énergie et de masse on ne considère pas les variables liées à la qualité des produits ni les coûts. D'autres types de modèles peuvent alors être inclus dans ces logiciels pour prendre ce type de variables clés en considération, tel que discuté par Laperrière et Wasik [34]. Quoi qu'il en soit, en général on dénombre deux grandes catégories de modèles utilisés en simulation: les modèles mécanistiques et les modèles statistiques.

1.4.3 Approche mécanistique

Les modèles mécanistiques utilisent des lois de la nature. Dans ces modèles on retrouve par exemple les équations de la mécanique des fluides, des principes de thermomécanique (bilans de masse et d'énergie) ou encore le développement d'équations empiriques. Les auteurs Puolakka et Kortela [35] calculent la compaction des copeaux de bois durs et mous dans un réacteur de procédé kraft. À partir des résultats, il est possible d'obtenir un temps de résidence, la compaction et l'écoulement des copeaux donc un degré de cuisson et de l'utiliser comme une variable de contrôle ou de qualité du procédé.

Dans ce cas, le modèle mécanistique utilise de nombreuses équations provenant des notions de la mécanique des fluides, du phénomène de transport, d'un bilan de masse, d'un bilan de chaleur et d'équations empiriques. La théorie liée à l'intensité abordée dans la section 1.2.2.1 a aussi été développée grâce à l'approche mécanistique [10-16].

Les auteurs Lama, Perrier et Stuart [36] utilisent des équations empiriques afin de calculer la charge du moteur du raffineur,

$$ML=e^{a+b.\ln(tss)+c.\ln(Pc)+d.\ln(Fdv)} \quad \text{Équ. 1.13}$$

où

a, b,c,d sont des constantes qui dépendent des conditions d'opération et des caractéristiques de conception du raffineur.

tss = vitesse de la vis de transfert

P_c = pression hydraulique au raffineur

Fdv = taux de dilution au raffineur

Le taux de production de pâte est obtenu par l'équation suivante,

$$F_c=1,44.k_c.\rho.tss \quad \text{Équ. 1.14}$$

où

k_c = valeur expérimentale qui tient compte de la grosseur des copeaux, du taux d'humidité et de la proportion des essences.

ρ = densité des copeaux.

Finalement, les valeurs de certaines variables liées à la qualité de la pâte tel que le taux de bûchettes, la longueur de fibres et la surface spécifique de la fibre raffinée sont obtenues par des modèles mécanistiques.

1.4.4 Approche statistique

Quatre méthodes sont couramment rencontrées dans la littérature soit la régression, l'analyse multivariable des composantes principales (PCA), la projection sur une structure latente (PLS) et les réseaux de neurones (RDN).

1.4.4.1 Régression

La régression est une méthode qui permet de tracer une courbe à partir d'un nuage de points. L'équation obtenue peut être de type linéaire généralement du premier ordre ou du second ordre:

$$Y = b_0 + b_1 X \quad \text{Équ. 1.15}$$

$$Y = b_0 + b_1 X^2 \quad \text{Équ. 1.16}$$

Il est également possible d'obtenir une régression dans un espace à trois dimensions et plus, l'équation de la régression polynomiale est la suivante:

$$Y = b_0 + b_1 P + b_2 P^2 + b_3 P^3 + \dots + b_{n-1} P^{n-1} + b_n P^n \quad \text{Équ. 1.17}$$

Dans l'équation 1-15, les coefficients b_i sont fixés à l'aide de la méthode des moindres carrés, ce sont les valeurs qui minimisent la somme du carré de la distance entre la ligne et les points (la somme doit tendre vers zéro).

1.4.4.2 Composantes principales (PCA)

Avec l'automatisation des contrôles et l'archivage des données, il est possible de recueillir une grande quantité de variables (ex : pression, température, débit, dilution ...) et ce en grand nombre (plusieurs prélèvements pour un temps déterminé).

Le PCA est une méthode statistique qui permet d'analyser un système lorsqu'une grande quantité de variables sont présentes. Cette méthode permet de déterminer comment les variables sont liées entre-elles (colinéaires) et si certaines observations ou groupe d'observations sont hors normes. Le point de départ d'un PCA est donc une matrice de données avec N lignes (observations) et K colonnes (variables). Le modèle mathématique détermine combien de composantes orthogonales sont nécessaires afin de représenter

adéquatement les données en réduisant le nombre de dimensions en liant les variables qui sont colinéaires par un système de vecteurs latents orthogonaux. Ainsi, on peut obtenir une ligne, un plan ou encore un hyperplan à k dimensions selon le nombre de composantes fixées.

Une étude s'est déroulée dans une usine de pâtes et papiers finlandaise [37] afin d'établir un modèle entre les mesures de propriétés de la pâte (mesures en ligne) et la qualité des papiers.

1.4.4.3 Projection sur une structure latente (PLS)

Le PLS est une extension du modèle de régression multiple linéaire et de la méthode PCA. Il permet d'obtenir un modèle mathématique entre des variables d'entrée (x) et des variables de sortie (y). Plusieurs études utilisent ce type de modèle, en voici quelques exemples.

Le taux d'humidité des copeaux a un impact sur les propriétés des forces de la pâte. Il est possible de calculer ce taux à partir de certaines propriétés optiques mesurées à l'aide du CMS en utilisant un PLS [38]. Les chercheurs obtiennent l'équation suivante :

$$SM = a_1MM + a_2H + a_3S + a_4L + a_5N + C(1) \quad \text{Équ. 1.18}$$

où

SM = Contenu en humidité de surface (%)

MM = Mesure du contenu en humidité (%)

H, S, L = paramètres optiques obtenus à l'aide du CMS

N = brillance des copeaux

$a_1 - a_5$ et C = les coefficients du modèle

Le PLS a été utilisé afin de connaître les relations existant entre les variables qualités des copeaux et la qualité de la pâte obtenue [39]. Les données de départ sont l'essence de bois, la densité (élevée ou basse), la siccité initiale (copeaux verts ou secs), épaisseur des copeaux (0-4 mm ou 4-8mm) et les conditions d'opération de raffinage tel que

l'ouverture des plaques, la consistance et la température. Des relations significatives ont pu être obtenues pour le CSF, la longueur de fibres, l'élongation, la main et le coefficient de diffusion de la lumière. Ils tirent plusieurs conclusions importantes :

Afin d'obtenir une pâte de meilleure qualité, il est préférable de combiner un premier stade haute intensité et un second stade à basse intensité.

La matière première demeure une variable importante afin de déterminer la qualité de la pâte.

Mieux comprendre les impacts de la présence de différentes essences sur la qualité de la pâte permet de diminuer la quantité d'épinette et donc, favorise une meilleure utilisation des ressources naturelles. La plupart des propriétés physiques des pâtes peuvent être fixées en utilisant une bonne combinaison des essences et des conditions d'opération de raffinage.

1.4.4.4 Réseaux de neurones

Il s'agit d'un modèle de calcul dont la conception est un paradigme biologique. Un réseau de neurones est composé de cellules d'entrée. Un ou deux niveaux de cellules cachées (appelées cellules cachées A et cellules cachées B) et d'une couche de cellules de sortie. À chaque cellule, on associe une connexion à laquelle on donne une valeur pondérée, soit un poids w . Le réseau de neurones établit une relation entre les données d'entrée et les données de sortie. On obtient un vecteur égal à :

$$S = X_1W_1 + X_2W_2 + X_3W_3 + \dots + X_nW_n \quad \text{Équ. 1.19}$$

Les entrées pondérées sont totalisées pour déterminer le niveau d'activation du neurone, la figure suivante présente le modèle de neurone.

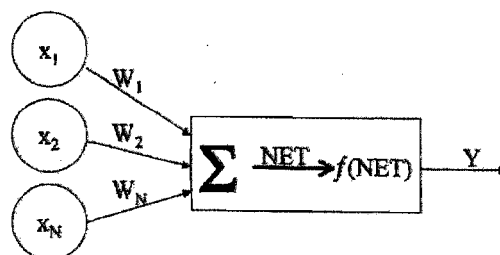


Figure 1.8 **Modèle de réseau de neurones**

À ce vecteur, on applique une fonction d'activation (ou encore une fonction de transfert) afin d'introduire une non linéarité. On peut utiliser, par exemple, la fonction sigmoïde ou la fonction tangente hyperbolique. Le vecteur prend donc la forme de l'équation 1.14 dans le cas de l'utilisation de la fonction tangente hyperbolique, équation 1.20.

La figure 1.9 présente la structure d'un système de neurones artificiels à trois niveaux soit une entrée, une couche de cellules cachées et une sortie.

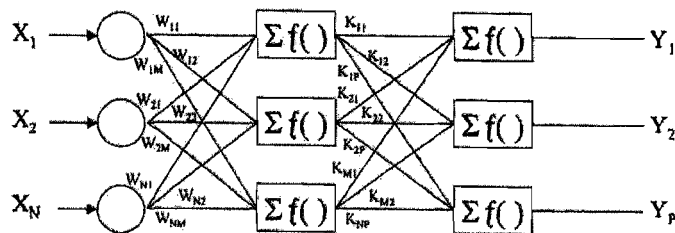


Figure 1.9 Réseau de neurones à trois niveaux

Chacun des vecteurs doit converger vers une réponse optimale qui réduira certains critères d'erreur entre les valeurs d'entrée et les valeurs de sortie obtenues par le réseau de neurones.

Des chercheurs du CIPP et du CRIQ [38] ont construit plusieurs réseaux de neurones afin de déterminer certaines caractéristiques des copeaux à partir de mesures effectuées au moyen de l'appareil CMS qui sont des propriétés optiques et certaines mesures de laboratoire (dimension des copeaux, le taux d'humidité etc...). Le premier réseau permet de prédire la fraîcheur et l'espèce des copeaux (deux sorties) en utilisant huit (8) entrées qui sont des propriétés optiques des copeaux. Le deuxième réseau a été développé afin de fixer une mesure qualitative d'un grade de grosseur des copeaux (entre 2 et 9), à partir de cinq (5) entrées selon la distribution de grosseur de copeaux. Selon les auteurs, obtenir des informations complémentaires sur la qualité des copeaux comporte plusieurs avantages dont le paiement des copeaux à un juste prix selon leur qualité et une meilleure gestion des copeaux.

Les chercheurs Laperrière, Lanouette et Li [40] incluent dans le modèle de prédiction (réseau de neurones) les données du procédé et également les propriétés des copeaux qui sont mesurées en ligne par le CMS. Il est ainsi possible de prédire les propriétés des pâtes finales qui peuvent être comparées à des points de consigne. L'erreur obtenue entre ces deux dernières est minimisée au moyen de l'optimisation.

Un réseau de neurones a été construit afin de déterminer la quantité minimale de peroxyde d'hydrogène requise (pour un degré de blancheur donné) tout en tenant compte de la fluctuation des propriétés des copeaux et des paramètres d'opération [41]. Dans un premier temps, la construction d'un PLS permet de déterminer quelles variables ont le plus d'impact, ce sont ces dernières qui seront utilisées dans le réseau de neurones. Le RDN contient sept (7) entrées et une sortie (la blancheur). La valeur prédite est comparée à un point de consigne. Le signal d'erreur obtenue est dirigé vers un module d'optimisation, lorsque le minimum est atteint, il y a action sur la valve de peroxyde d'hydrogène.

Retsina et al utilisent également les réseaux de neurones [42, 43]. Le coût de l'énergie constitue une grosse proportion des coûts totaux d'opération dans une usine de pâtes et papiers. Afin de réduire ces coûts, le logiciel Energy MonitoringTM a été implanté dans une usine de la Louisiane. Ce logiciel utilise les réseaux de neurones afin de prédire la génération de vapeur, ainsi deux objectifs peuvent être atteints :

Récupération de l'énergie

Diminution de l'utilisation de l'énergie

Sans contrôle de la production de vapeur on a observé une augmentation de 23 klb de vapeur/heure, c'est à dire une augmentation de 4% de la production de vapeur pour le premier trimestre de 2003. Après l'implantation du réseau de neurones afin de mesurer la vapeur produite on calcule une diminution de 33 klb de vapeur/heure, soit une diminution de 5% de la production.

La deuxième étude de ce groupe de chercheurs porte sur l'utilisation d'un réseau de neurones afin de calculer le coût d'opération d'une machine à papier. Le réseau de neurones considère les multiples interactions existantes entre les différents départements de l'usine. La sortie du RN permet de calculer le coût d'opération de la machine à papier et ce pour différents grades de papier. Le RN n'inclut pas l'énergie spécifique mais plutôt les coûts des copeaux, les coûts de l'énergie, les coûts des achats des produits chimiques. Une fois l'ensemble des données colligées et l'entraînement du réseau de neurones complété, les auteurs concluent qu'il est possible d'implanter le RN afin qu'il soit utilisé en temps réel par les gestionnaires de l'usine.

1.5 Positionnement de la recherche

La revue de la littérature a permis de tirer certaines conclusions.

Premièrement, plusieurs études ont confirmé l'importance de connaître les caractéristiques des copeaux composant le mélange. Ces données sont disponibles et seront utilisées. De plus, chacune des essences a des effets particuliers sur les propriétés de la pâte, il est donc important d'effectuer des essais sur plusieurs mélanges de copeaux afin de tenir compte de ces interactions.

Deuxièmement, il existe de nombreuses variables liées au procédé de raffinage. Elles peuvent être divisées en trois catégories : les caractéristiques de raffinage, les variables du procédé et les propriétés de la pâte. Il n'existe pas de relations mécanistiques complètes liant ces trois types de variable. Ce sont donc des modèles statistiques qui seront utilisés afin d'établir des relations.

Troisièmement, il ressort que le contrôle de la variable intensité est complémentaire à un contrôle de l'énergie spécifique. Il est possible de la faire varier de plusieurs façons comme par exemple changer le patron des plaques, varier la consistance de la pâte ou encore modifier la vitesse de rotation des plaques du raffineur.

Sur la base de ces conclusions, les deux objectifs de l'étude sont :

Vérifier l'effet du contrôle de l'intensité sur les propriétés de pâtes obtenues;

Vérifier l'effet du contrôle de l'intensité sur l'énergie spécifique consommée.

Dans le deux cas, les caractéristiques des copeaux composant le mélange feront partie intégrale de l'étude.

Chapitre 2 - Matériel et méthodes

2.1 Base de données CIPP et CRIQ

Les données utilisées lors de notre simulation proviennent, dans un premier temps, de tests effectués conjointement entre le CIPP et le CRIQ. Les tests se sont déroulés de la façon suivante. Les copeaux de quatre essences d'arbre ont été utilisés soit l'épinette noire, le sapin, le pin gris et le bouleau. Des piles extérieures furent formées au mois de septembre. Au cours de l'année suivante, six (6) échantillons furent prélevés pour effectuer le plan d'expérience du tableau 2.1. Les échantillons A, B, C et D sont prélevés à des intervalles réguliers. En raison de la saison hivernale et de la baisse de température on observe qu'il y a une forte diminution de la dégradation des copeaux, le prélèvement des échantillons E et F s'est donc fait plus tard. Chaque échantillon de copeaux subit deux stades de raffinage. Le premier stade se fait avec l'entrefer constant, donc une énergie et un indice d'égouttage constants sont obtenus. Pour le deuxième stade, l'entrefer varie de façon à obtenir quatre (4) niveaux d'énergie/indice d'égouttage.

Tableau 2.1 Plan d'expérience base de données CRIQ/CIPP

Essai	Épinette (%)	Sapin (%)	Pin gris (%)	Bouleau (%)
1	0	20	40	40
2	100	0	0	0
3	0	100	0	0
4	60	0	0	40
5	0	60	40	0
6	60	0	40	0
7	0	60	0	40
8	20	0	40	40
9	100	0	0	0
10	0	100	0	0
11	0	0	100	0
12	0	0	0	100

Pour les tests V et S, cette fois, il y a eu division des copeaux selon les caractéristiques physiques (voir le tableau 2.2).

Tableau 2.2 Plan expérimental de différentes épaisseurs de copeaux

Copeaux frais	Copeaux (4-8 mm)	Petits copeaux (0-4 mm)
Basse densité		
épinette	V1	V2
sapin	V3	V4
Haute densité		
épinette	V5, V6	V7
sapin	V8	V9, V10
Copeaux agés		
Basse densité		
épinette	S1	S2, S3
sapin	S4, S5	S6
Haute densité		
épinette	S7	S8
sapin	S9	S10

Les copeaux verts (tests V) sont triés selon la densité et leur dimension. Le même tri s'effectue pour les copeaux secs (tests S). Des tests additionnels sont effectués afin de mesurer les effets du vieillissement estival pour des échantillons 100% épinette (tests P) et 100% sapin (tests Q). Finalement les données des tests effectués par l'étudiant au doctorat Yang Li, à l'hiver 2005, seront également utilisés afin d'obtenir de meilleurs résultats pour la simulation (tests Y). Au cours des ces essais, les opérateurs ont varié la vitesse de rotation des plaques de raffineur entre 3000 et 3565 rpm afin d'obtenir différentes intensités de raffinage. La base de données complète est disponible en annexe I.

2.1.1 Élimination de données de la base CRIQ/CIPP

Un des rôles de la base de données était de mesurer l'effet du vieillissement des copeaux sur les propriétés physiques de la pâte raffinée. Dans le cadre de ce projet, cet effet doit être mis de côté. Les données S, V, P et Q seront conservées puisque ces échantillons n'ont subi qu'une faible dégradation. Afin de déterminer les données à éliminer, des graphiques Rupture en fonction du CSF ont été construits dans Excel pour les tests A01 à F01, A02 à F02 et ainsi de suite. On note que dans certains graphiques la relation Rupture/CSF provenant des prélèvements D, E et F s'éloignent des essais A, B et C. Les données D, E et F ne seront pas utilisées dans notre modèle mathématique.

2.2 Tests additionnels effectués en laboratoire au CIPP (Hiver 2006)

Un mélange de copeaux a été obtenu en utilisant quatre essences de copeaux différents soit le bouleau, le sapin, l'épinette et le pin suivant les compositions suivantes décrites au tableau 2.3:

Tableau 2.3 Tests hiver 2006

Essai	Épinette (%)	Sapin (%)	Pin gris (%)	Bouleau (%)
1	50	25	25	0
2	25	25	0	5
3	25	25	25	25
4	70	0	15	15
5	35	35	0	25
6	50	25	0	25
7	35	35	15	15
8	50	0	25	25

Donc huit (8) journées de raffinage se sont déroulées. Pour chacune des huit (8) journées de raffinage, on a effectué un raffinage de premier stade et un raffinage de deuxième stade pour lesquels les conditions d'opération variaient.

2.2.1 Déroulement des tests du premier stade de raffinage

Trois échantillons ont été prélevés lors du premier stade de raffinage (A, B, et C). Il y a eu variation de l'entrefer, donc variation de la charge au raffineur. Pour l'échantillon XA, l'entrefer a été fixé à 1,4mm, pour l'échantillon XB, l'entrefer a été fixé à 1,0mm et pour l'échantillon XC, l'entrefer est fixé à 1,2mm. .

Les tests effectués lors du premier stade de raffinage sont le CSF_1 et la consistance_1 sur toutes les pâtes. Pour les échantillons de la pâte C, les tests du taux de bûchettes et de longueur de fibres ont été également obtenus.

2.2.2 Déroulement des tests du deuxième stade de raffinage

Des trois échantillons produits lors du premier stade de raffinage on en retient deux (2), par exemple pour le premier stade de raffinage on obtient 1A, 1B, et 1C. On conserve 1A et 1B qui seront raffinées au deuxième stade de raffinage. Lors de ce raffinage, il y a plusieurs variations de l'entrefer jusqu'à ce que l'on obtienne une variation du CSF d'environ 100mL. On varie également l'eau de dilution (dilution_2). On obtient, à partir de l'échantillon 1A (par exemple) dix (10) échantillons raffinés à des ouvertures de plaque variables et d'addition d'eau de dilution variable. Donc 1A-1, 1A-2, 1A-3, 1A-4, 1A-5, 1A-6, 1A-7, 1A-8, 1A-9, 1A-10. Les tests physiques ne sont effectués que sur quelques échantillons (voir les résultats à l'annexe I).

Les principaux tests physiques faits sur la pâte sont l'indice d'égouttage (CSF), la consistance, la longueur de fibres, la rupture et le coefficient de diffusion de la lumière.

Il est à noter que la vitesse de rotation au deuxième stade est une constante pour ces tests effectués en hiver 2006.

2.3 Les variables de la base de données

De la base de données du CRIQ/CIPP, dix-neuf (19) variables seront utilisées afin de construire un modèle mathématique. Les variables du procédé de raffinage peuvent se diviser en trois groupes. Il existe les variables liées à la qualité des copeaux, celles liées aux valeurs du procédé et finalement les variables liées à la qualité de la pâte.

2.3.1 Variables liées à la qualité des copeaux

Pourcentage des essences : Tel que mentionné précédemment, quatre essences ont été raffinés : l'épinette, le sapin, le pin gris et le bouleau. La variation se situe entre 0% et 100% pour chacune des essences (PourcEP, PourcSAP, PourcPG, PourcBOU).

Siccité : Elle peut être calculée à partir de la relation suivante

$$Siccité = (100 - Humidité) \quad \text{Équ. 2.1}$$

L'unité est le pourcentage (%). L'humidité a un impact sur le ramollissement de la lignine. De plus, l'indice de déchirure augmente avec l'humidité initiale des copeaux. Pour les tests A-B-C-D-E-F-P-Q-S-V et Y, les données se situent entre 35% et 87%. Pour les essais effectués en hiver 2006, la relation suivante a été utilisée puisque la siccité n'a été mesurée que sur les essences pures:

$$Siccité = (\%Ep.43,35) + (\%Sap.46,89) + (\%PG.48,30) + (\%Boul.46,90) \quad \text{Équ. 2.2}$$

Elle se situe entre 43% et 46% pour ces derniers tests.

Densité basale : Elle est définie comme étant la masse volumique de la paroi dans la fibre. La densité est une cause de fluctuation lors du raffinage en terme d'énergie appliquée. Il est possible de la mesurer en effectuant le test, les unités de mesure sont en g/cm^3 .

2.3.2 Variables du procédé

Température: Il s'agit de la température à l'entrée du raffineur. Pour le premier stade, on utilise la pression à l'étuveur et l'on déduit la température (Temp_1) puisque la pressurisation se fait par de la vapeur saturée. Pour le deuxième stade, la pression se prend à la ligne de soufflage et on obtient la température (Temp_2). Les unités sont en degrés Celsius.

Dilution : Il s'agit de l'eau ajoutée dans le bâti du raffineur. Pour le premier stade (Dil_DP_1) elle est difficile à fixer et permet de faire varier la consistance. Les unités sont des Gallon US/min. Pour le deuxième stade (Dil_DP_2) les unités sont en mL/min.

Entrefer: L'ouverture des plaques a également une incidence sur l'énergie appliquée lors du procédé de raffinage. La mesure est en mm et elle est normalement lue au moyen du

DCS. Dans le cas du raffineur du CIPP, la lecture se fait mécaniquement (Ent_DP_1 pour le premier stade et Ent_DP_2 pour le deuxième stade).

Énergie spécifique : La consommation d'énergie par quantité de pâte produite est évidemment une valeur qui doit être incluse dans la simulation puisque l'on veut quantifier la diminution d'énergie. Les unités sont des MJ/kg. (Ener_1 pour le premier stade, Ener_2 pour le deuxième stade et Ener pour l'énergie moyenne des deux stades).

Intensité : Elle est définie comme étant l'énergie appliquée par tonne par impact. C'est une mesure qui est complémentaire à l'énergie puisqu'elle donne une mesure de la façon dont cette dernière est appliquée. Une même quantité d'énergie peut être appliquée tout en douceur ou brusquement. (Int e Moy Prim pour le premier stade, Int e Moy Sec pour le deuxième stade et Intensité Moyenne pour les deux stades).

2.3.3 Variables liées à la qualité de la pâte

Il y a l'indice d'égouttage (CSF_1 et CSF_2), la longueur de fibre (LF(lw)), l'indice de rupture (Rupture), l'indice de déchirure (Tear) et le coefficient de diffusion de la lumière (C_diff). Le tableau 2.4 résume les variables, leurs unités, et leurs plages de valeurs.

Tableau 2.4 Variables de la base de données

Variables	CRIQ/CIPP	Hiver 2005	Hiver 2006
Pourcentage essence, %	0-100	0-100	0-100
Siccité, %	35-87	40 (constante)	43-46
Densité Basale g/cm ³	0,33 - 0,51	Non disponible	0,39-0,44
Température zone plate °C	140	124-132	140
Dilution zone plate stade 1, Gal US/min	0,2 -0,4	0,5 -0,6	0,38 -0,5
Entrefer zone plate stade 1, mm	0,5-1,20	1,20-1,40	1,00-1,40
Energie moyenne, KWh/TMSA	5,7-13,1	7,04-11,93	7,83-12,62
Energie spécifique stade 1, MJ/kg	775-1381	737 -1848	1308 -1838
Intensité Moyenne, GJ/tonne/impact	0,00074 – 0,0013	0,00083 – 0,0013	0,00075 – 0,0012
Intensité primaire, GJ/tonne/impact	0,00049 – 0,0011	0,00071 – 0,001	0,00075 – 0,0013
CSF stade 1, mL	285,25 – 618,25	157 – 515	250 – 570
Entrefer zone plate stade 2, mm	0 – 3	0,42 – 4	0,35 – 2
Dilution zone plate stade 2, mL/min	569 – 2009	948 – 1500	1514
Énergie spécifique stade 2, MJ/kg	541 – 2531	431 – 2025	621 – 1754
CSF Stade 2, mL (Objectif 100 mL)	79 – 277	70 – 240	65 – 169
Longueur de fibre Stade 2, mm	0,61 – 2	1,42 – 2,07	1,14 – 1,85
Rupture Stade 2, Nm/g	10,62 – 56,87	32,85 – 49,43	25,60 – 46,90
Déchirure Stade 2, mNm ² /g	1,77 – 12,97	9,29 – 14,19	Non disponible
Intensité secondaire, GJ/tonne/impact	0,001 – 0,0018	0,00088 – 0,00154	0,00071 – 0,0013
Coefficient de diffusion Stade 2, m ² /kg	43, 07 – 64,74	46,96 – 56,11	53,10 – 67,80

2.4 Construction du modèle mathématique

Dans le cadre de ce projet, le PLS sera utilisé afin de construire un modèle mathématique. Cette technique particulière de régression permet de lier ensemble deux matrices de données soit les variables X et Y. Ce type de modèle peut être utilisé dans des situations où il y a des variables colinéaires ou encore incomplètes. De plus, il est habituellement plus performant lorsqu'il contient plusieurs variables puisque sa principale caractéristique est de réduire le nombre de dimensions des variables.

2.4.1 Principales étapes afin de construire les modèles mathématiques

Dans un premier temps, toutes les données de la base sont mises à l'échelle afin qu'elles aient un poids égal dans le modèle. On obtient donc une moyenne de zéro et un écart type de 1. Après cette transformation, toutes les variables ont le même poids dans le modèle quel que soit leur unité respective (par exemple des millimètres, des centimètres, des mètres).

Par la suite les composantes sont définies. La première composante est orientée de sorte qu'elle englobe le plus de variation possible. La deuxième composante est fixée orthogonalement à la première toujours de façon à englober le plus de variation résiduelle.

Deux variables sont importantes afin de déterminer combien de composantes sont nécessaires. Il y a R^2 , ce coefficient indique avec quel taux le modèle est capable de reproduire les données qui sont présentes dans la base de données. Le deuxième coefficient est le Q^2 , qui mesure l'exactitude des prédictions.

Une nouvelle valeur est calculée soit la coordonnées, qui est la projection de la valeur sur la nouvelle composante. Lorsqu'on tient compte de l'ensemble des projections on obtient un vecteur t_i . Par exemple pour la composante 1 on obtient t_1 , pour la composante 2 on obtient t_2 .

2.5 Construction du modèle prédictif sur la plate-forme CadsimPlustm

Le modèle prédictif contient deux modules principaux : le module de prédiction, qui calcule les propriétés de pâtes et le module d'optimisation, qui minimise l'erreur entre la prédiction et la consigne.

2.5.1 Module de prédiction

Tel que décrit précédemment, il est possible d'obtenir un modèle mathématique à partir de différentes entrées et sorties liées pour le procédé de raffinage. Donc, à partir des résultats obtenus, on utilise le module mathématique ARRAY TIME MATRIX AND OFFSET (se référer à la figure 2.1) qui utilise directement les coefficients obtenus à partir du PLS.

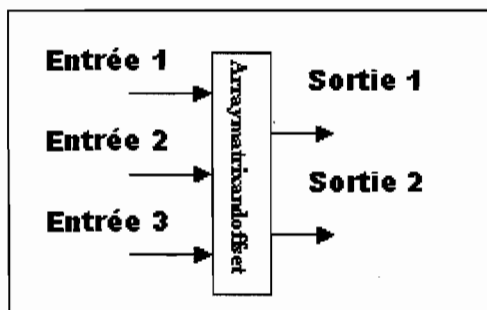


Figure 2.1 Module Array matrix and offset de Cadsim Plus. Entrée 1 à 3 : variables X du PLS; sorties 1 et 2 : variables Y du PLS

2.5.2 Module d'optimisation

Le module d'optimisation est utilisé afin d'obtenir la combinaison des valeurs indépendantes qui permet d'atteindre un minimum pour une variable dépendante. Il est possible d'utiliser plusieurs variables indépendantes. La fonction objective peut être linéaire ou non. Deux différents algorithmes d'optimisation peuvent être utilisés lorsqu'il y a optimisation dans CadsimPlusTM, soient la méthode du simplexe et sa version avec recuit (simulated annealing). Cette dernière est caractérisée par un temps de convergence plus long compensé par une plus grande probabilité de trouver un minimum global.

L'objectif de l'optimisation est de minimiser la différence (ou l'erreur) entre la valeur calculée par le modèle de mathématique et un point de consigne. Le module ne peut

optimiser qu'une seule variable dépendante. On doit donc faire la sommation des erreurs, c'est cette dernière qui sera minimisée. Préalablement, afin que toutes les variables aient la même importance dans l'optimisation (elles n'ont pas les mêmes unités d'ingénierie) les données devront être normalisées (ER pour erreur normalisée). L'erreur de la propriété_i est normalisée à l'aide de l'équation 2-3. Cette forme d'équation s'applique pour les cinq (5) propriétés le CSF, la rupture, la déchirure, le coefficient de diffusion de la lumière et la longueur de fibre qui sont présentes dans le modèle mathématique.

$$\left(\frac{\text{propriété}_{i,\text{prédite}} - \text{consigne propriété}_i}{\text{propriété}_{i,\text{maximum}} - \text{propriété}_{i,\text{minimum}}} \right) \quad \text{Équ. 2.3}$$

Par la suite, il faut assigner des poids (w_i) à chacune des propriétés afin de permettre à l'utilisateur de donner plus d'importance à une variable comparativement à une autre. Par exemple, si la rupture est plus importante que les autres propriétés, un facteur multiplicatif de 10 pourrait être appliqué à la valeur normalisée. Finalement, tous les résultats seront additionnés afin d'obtenir une seule variable d'entrée dans le module d'optimisation (voir la figure 2.2 et l'équation 2.4).

$$\Sigma \left(w_i \cdot \left(\frac{\text{propriété}_{i,\text{prédite}} - \text{consigne propriété}_i}{\text{propriété}_{i,\text{maximum}} - \text{propriété}_{i,\text{minimum}}} \right) \right) \quad \text{Équ. 2.4}$$

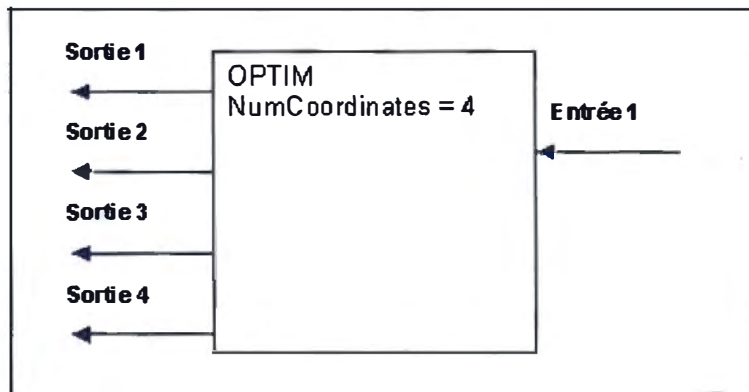


Figure 2.2 Module d'optimisation dans Cadsim Plus.

Entrée 1 : valeur de la fonction objective; Sorties 1 à 4 : variables manipulées par l'optimisateur.

Dans le module d'optimisation, plusieurs paramètres doivent être fixés (voir la figure 2.3).

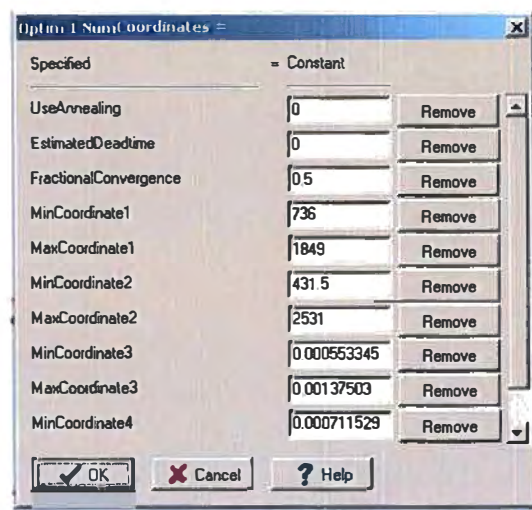


Figure 2.3 Spécification des paramètres dans le module d'optimisation

En voici une description sommaire :

Use annealing: Indique s'il y a utilisation du recuit. S'il est fixé à 0, l'optimisation utilise l'algorithme de la méthode du simplex. Inversement, s'il est fixé à 1, c'est la méthode du

simplex avec recuit qui est utilisée. Il est à noter qu'avec l'optimisation on obtient des relations multivariées complexes qui peuvent contenir plusieurs minimums locaux. Le minimum atteint dépend des valeurs de départ sélectionnées qui sont fixées aléatoirement (randomize) par le logiciel. Il est donc important d'exécuter plusieurs fois la simulation et de vérifier qu'un même minimum est plusieurs fois atteint (répétable). On remarque également que lorsqu'il y a utilisation du recuit l'atteinte du minimum est plus long, par contre il est plus consistant.

Estimated Deadtime: Lorsque la simulation est dynamique, cette valeur doit être égale au temps nécessaire afin que les variables dépendantes se stabilisent lorsqu'il y a modification des variables indépendantes. Pour le cadre de ce projet, il a été fixé à zéro puisque aucune dynamique n'a été modélisée entre les propriétés des pâtes et les paramètres d'opération des raffineurs. Tout changement des paramètres d'opération à une itération du logiciel produit un changement dans les propriétés de pâtes à l'itération suivante. Cette modélisation sans dynamique n'affecte pas les objectifs du projet.

Fractional Convergence : ce paramètre permet de fixer la vitesse de convergence de l'optimisation. Des valeurs faibles donnent lieu à une optimisation plus lente, donc à une recherche plus exhaustive du domaine à explorer.

Maximums et minimums: Les maximums et les minimums des quatre (4) sorties de l'optimisation sont fixées à partir des valeurs du tableau 2.4. Ceci assure que la solution trouvée est à l'intérieur des limites du domaine modélisé, en d'autres termes, la recherche de solution se fait à l'intérieur du domaine expérimental.

Chapitre 3 - Résultats des analyses multivariables

3.1 Construction des PLS global, premier et deuxième stades

Afin d'obtenir le modèle le plus représentatif (performant) possible, plusieurs combinaisons d'entrées-sorties ont été essayées.

Dans un premier temps, un modèle comprenant les données du premier et deuxième stade, PLS_GlobalVersion4 a été construit. Le modèle M1 (modèle 1) contient les variables pourcentage épinette, pourcentage sapin, pourcentage pin gris, pourcentage bouleau, l'énergie au premier et deuxième stade, l'intensité au premier et deuxième stade, CSF_2, LF (longueur de fibre), rupture, coefficient de diffusion de la lumière et déchirure. Le modèle M2 ne contient pas les variables intensité. Par la suite afin de mieux visualiser les données, elles ont été divisées selon le pourcentage d'essence. Le modèle M4 contient les mêmes données que M1 mais divisé selon cinq (5) classes. La classe 1 contient les données des essais effectués avec un mélange de copeaux, la classe 2 contient les données 100% épinette, la classe 3 contient les données 100% sapin, la classe 4 contient les données 100% pin gris et enfin la classe 5 contient les données 100% bouleau. Le modèle M5 contient les mêmes données que le modèle M2 mais toujours divisé selon les cinq classes décrites précédemment. Dans le modèle M6 un PCA-X a été construit afin de faire ressortir certaines informations. Dans le modèle M7, c'est un modèle PCA-Y qui est présenté.

Dans un deuxième temps, le modèle PLS_Stade1_Essai2 a été construit. Dans ce cas plusieurs combinaisons ont aussi été testées. Le modèle M1 contient les variables pourcentage épinette, pourcentage sapin, pourcentage pin gris, pourcentage bouleau, siccité, densité basale, température, dilution, entrefer au raffineur de premier stade, intensité moyenne primaire, énergie appliquée au premier stade (Ener_1) et CSF_1. Le modèle M2 contient les mêmes données mais divisées selon les classes décrites précédemment. Dans le modèle M3 la variable intensité primaire n'est pas présente, dans le modèle M4 la composition 100% bouleau n'est pas incluse. Le modèle M5 contient les sorties CSF_1 et Ener_1.

Dans un dernier temps, le modèle PLS_Stade2_Essai2 a été construit. Le modèle M1 contient les variables suivantes pourcentage épinette, pourcentage sapin, pourcentage pin gris, pourcentage bouleau, énergie au premier stade, CSF_1, intensité moyenne primaire, dilution, entrefer, énergie au deuxième stade, intensité moyenne secondaire, CSF_2, longueur de fibre (LF), rupture, coefficient de diffusion, déchirure. Les données du modèle M2 sont divisées en cinq (5) classes selon le pourcentage d'essence présent, dans le modèle M4 les variables intensité (primaire et secondaire) ne sont pas incluses. Le modèle M5 ne contient pas l'information sur le mélange des copeaux, le modèle M6 ne contient pas les données 100% bouleau. Enfin le dernier modèle M7, certaines données de l'entrefer ne sont pas incluses. Afin de mieux comprendre l'analyse des modèles la section suivante présente les différents graphiques utilisés.

3.2 Analyse des résultats du PLS Global

Le premier modèle PLS testé permet de déterminer s'il existe une relation entre huit (8) variables d'entrée et cinq (5) variables de sortie. Il est à noter que ce modèle englobe les variables du premier et deuxième stade (tableau ci-dessous).

Tableau 3.1 Description des variables du modèle PLS Global

Nom de la variable	Description	Entrée ou Sortie
PourcEP, PourSAP, PourcPG, PourcBOU	Pourcentage d'épinette, pourcentage sapin, pourcentage pin gris et pourcentage bouleau.	Entrée
Int e Moy Prim	Intensité moyenne primaire, premier stade.	Entrée
Int e Moy Sec	Intensité moyenne au deuxième stade	Entrée
Ener_1	Énergie spécifique au premier stade	Entrée
Ener_2	Énergie spécifique au deuxième stade.	Entrée
LF(lw)	Longueur de fibres	Sortie
Rupture	Rupture	Sortie
C_Diff	Coefficient de diffusion	Sortie
Tear	Déchirure	Sortie
CSF_2	Indice d'égouttage à la sortie du deuxième stade.	Sortie

3.2.1 Principales composantes

Le PLS Global compte six (6) composantes principales. Deux valeurs sont exprimées afin de quantifier la qualité du modèle, la première $R^2Y(\text{cum})$, est le pourcentage des réponses expliqué par le modèle, la seconde $Q^2(\text{cum})$ est le pourcentage des prédictions expliqué par le modèle. Dans ce cas, l'efficacité de reproduction des données de la base, pour ce modèle, est de 75,77%. L'efficacité à prédire d'autres données que celles de la base de données (interpolation) est de 73% (se référer la figure 3.1).

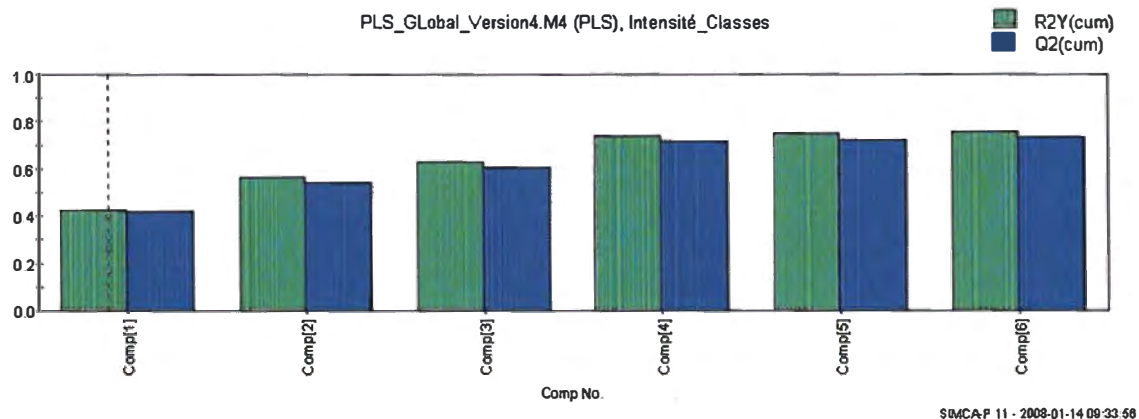


Figure 3.1 Composantes principales du modèle PLS Global

3.2.1.1 Répartition des valeurs de la base de données

Dans le cadre de ce projet, nous voulons obtenir un modèle qui englobe le plus d'espace possible. On ne veut pas seulement modéliser une portion de la plage d'opération du procédé de pâte thermomécanique mais bien la plus grande portion. Avant de poursuivre l'analyse du modèle obtenu, on doit donc s'assurer que les données utilisées englobent la plus grande plage possible. Pour les pourcentages des essences, on observe une variation entre 0 et 100% avec des valeurs intermédiaires de 20%, 40% et 60% (voir tableau 2.1) et ce pour les quatre (4) essences, la répartition est donc bonne pour ces variables.

L'analyse de la répartition des énergies et intensités est plus complexe, pour nous faciliter la tâche, les graphiques suivants seront utilisés. La figure 3.2 est un histogramme de l'énergie spécifique du premier stade pour chacun des essais.

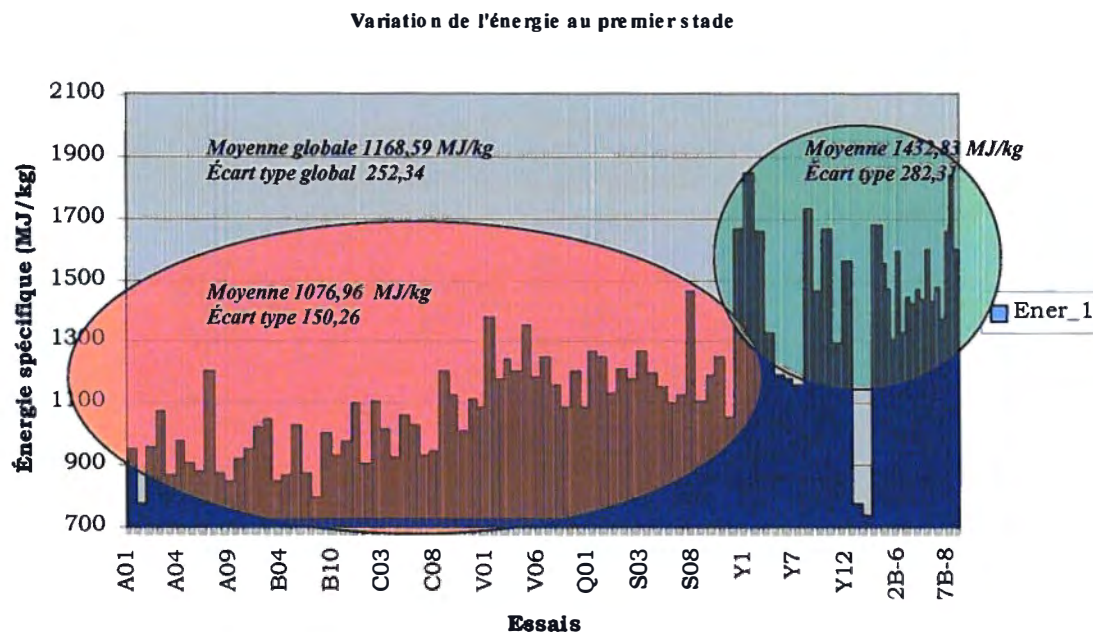


Figure 3.2 Répartition de l'énergie au premier stade de raffinage

On constate qu'il y a application d'une basse énergie pour les $\frac{3}{4}$ des essais (il s'agit des tests effectués au CIPP en partenariat avec le CRIQ) et une application d'une énergie plus élevée pour le dernier $\frac{1}{4}$ des essais (série de tests hiver 2005 et hiver 2006). La répartition est donc meilleure pour ces derniers essais. On peut donc conclure, que la répartition de l'énergie est acceptable pour le premier stade de raffinage.

De façon similaire, l'histogramme suivant (figure 3.3) montre l'intensité du premier stade pour chacun des essais.

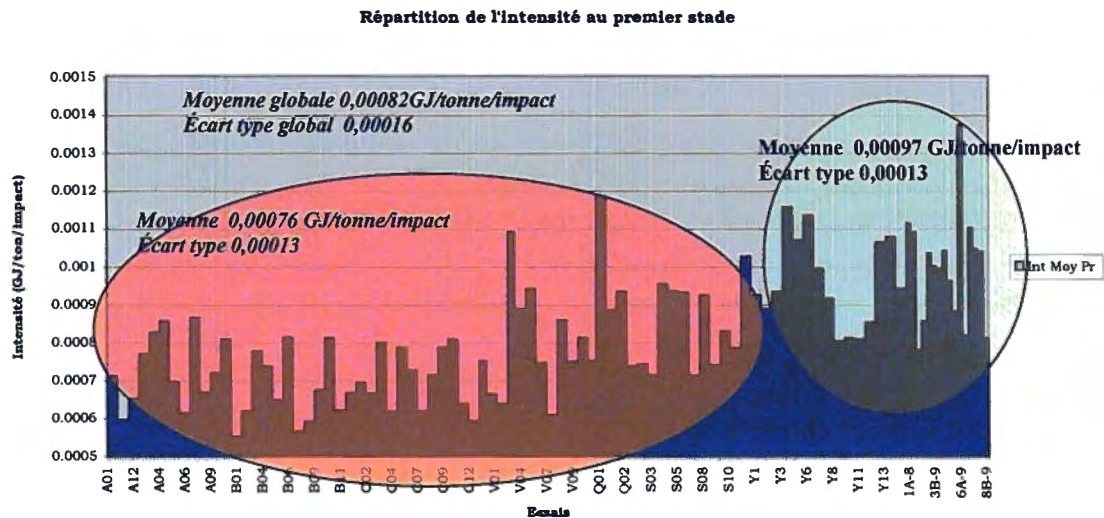


Figure 3.3 Répartition de l'intensité au premier stade

On remarque qu'il y a eu utilisation d'une faible intensité pour la première portion, mais pour la deuxième portion, on observe une meilleure répartition. Il est à noter qu'il y a moins de contrôle de l'intensité au premier stade puisque le raffineur est pressurisé et qu'il n'est pas possible de faire varier la vitesse de rotation des plaques. Encore ici, on peut conclure que la répartition est acceptable.

On doit également vérifier si, pour une même énergie, il y a application de différentes intensités, toujours afin d'obtenir un modèle ayant la plus grande plage d'opération. On présente à la figure 3.4, l'intensité du premier stade en fonction de l'énergie du premier stade. Pour une basse énergie, on observe un faible écart d'intensité. Pour des énergies moyennes, on observe une meilleure distribution. Pour des énergies plus élevées, on observe aussi un faible écart d'intensité. Lorsqu'on trace la courbe de tendance, on obtient une relation linéaire avec $r^2 = 0,2$. Ceci signifie qu'une relation linéaire ou polynomiale est difficilement applicable. On conclue que pour l'énergie et l'intensité du premier stade, la distribution n'est pas optimale, mais acceptable.

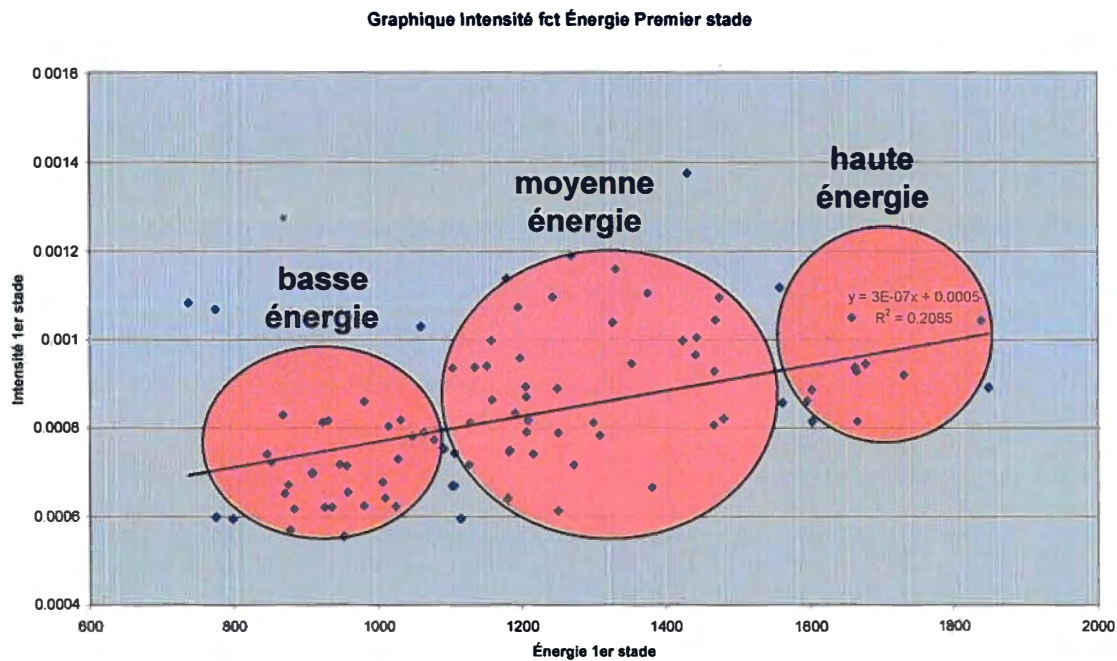


Figure 3.4 Intensité en fonction de l'énergie premier stade

Nous poursuivons l'analyse de la répartition des données mais cette fois-ci pour le deuxième stade. La figure 3.5 est un histogramme qui présente l'énergie du deuxième stade pour chacun des tests. On observe que la répartition de l'énergie est très bonne et ce pour l'ensemble des tests.

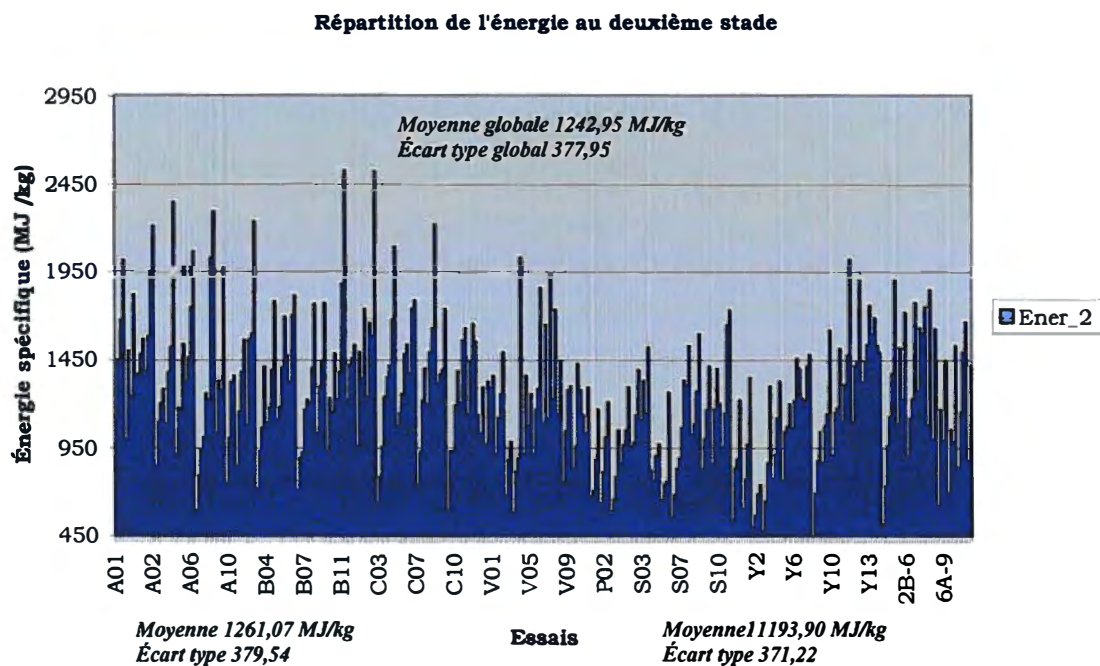


Figure 3.5 Répartition de l'énergie du deuxième stade

La figure suivante (3.6) présente l'intensité au second stade pour chacun des essais.

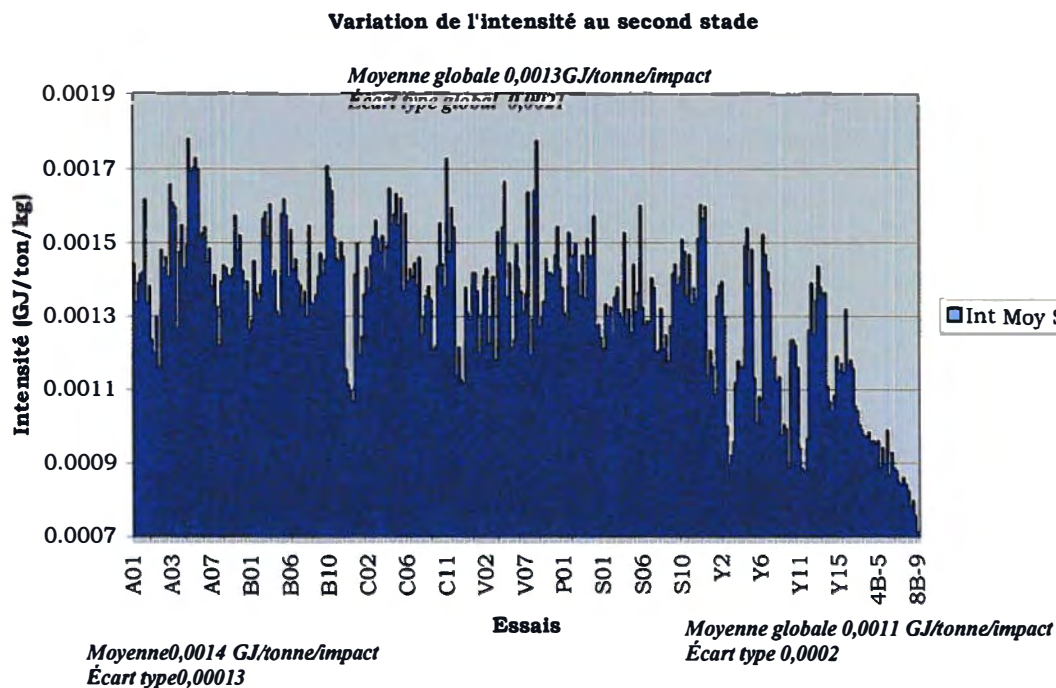


Figure 3.6 Répartition de l'intensité au deuxième stade de raffinage

Tout comme l'énergie, la distribution de l'intensité est très bonne et ce pour l'ensemble des tests. Pour ce stade, le raffineur n'est pas pressurisé. Il est donc possible de faire varier l'intensité par une variation d'eau de dilution ou encore un changement dans la vitesse de rotation des plaques.

Tout comme pour le premier stade, on doit également vérifier si pour une même énergie il y a application de différentes intensités, on trace donc un graphique intensité en fonction de l'énergie pour le deuxième stade (voir figure 3.7). Dans ce cas, on approche d'un $r^2 = 0$, la distribution s'approche donc d'un nuage de points, elle est donc presque idéale.

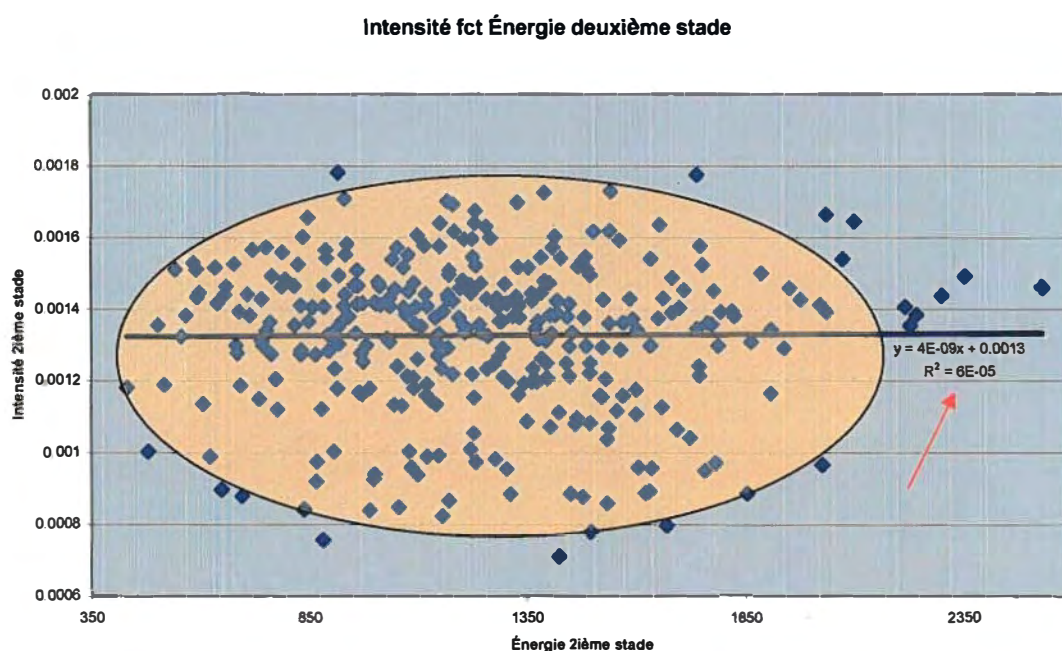


Figure 3.7 Intensité en fonction de l'énergie pour le deuxième stade

Donc pour les énergies et intensités du premier et second stade on conclue qu'il y a une bonne répartition des données. C'est donc dire que l'utilisation de ces données nous permet d'obtenir un modèle avec une large plage d'opération.

Pour l'indice d'égouttage (CSF), en usine on veut atteindre une valeur entre 150 et 200mL. En usine pilote, l'objectif était de 100 ml. Pour ce qui est des autres sorties,

soient la rupture, la déchirure, la longueur de fibre et le coefficient de diffusion de la lumière, nous n'avons pas vraiment de contrôle sur la répartition. Il est toutefois important d'obtenir des valeurs applicables en industrie permettant ainsi d'obtenir une pâte de bonne qualité.

3.2.1.2 Analyse des variations pour les composantes 5 et 6

En utilisant le logiciel d'analyse multivariable SIMCA, on obtient un nombre fixe de composantes. Les valeurs des composantes 5 et 6 sont similaires. On doit donc vérifier s'il y a amélioration du modèle avec ces deux dernières composantes ou encore s'il est préférable de les éliminer évitant ainsi au modèle un sur-apprentissage. Afin de pousser l'analyse, les diagrammes de charge pour les composantes 4-5 et pour les composantes 4-6 seront utilisés (voir figures 3.8 et 3.9).

La distance à l'origine : Plus une variable est éloignée de l'origine plus son effet est marqué sur le modèle.

Les flèches vertes : Les variables d'entrée intensité moyenne primaire, pourcentage pin gris, épinette et sapin varient dans la direction de la composante 5. La rupture est la propriété qui varie dans la direction de la composante 5. Ces flèches représentent les variations additionnelles du modèle que l'on peut obtenir avec la composante 5.

Les variables groupées : Ce sont des variables colinéaires. Elles donnent le même type d'information, elles suivent les mêmes tendances.

La flèche orange : L'intensité moyenne primaire et le pourcentage de pin gris sont un exemple de variables groupées

Les variables opposées : Elles donnent des réactions inverses.

Les flèches bleues : CSF__2 et Ener_2 qui varient inversement dans le sens de la composantes 4.

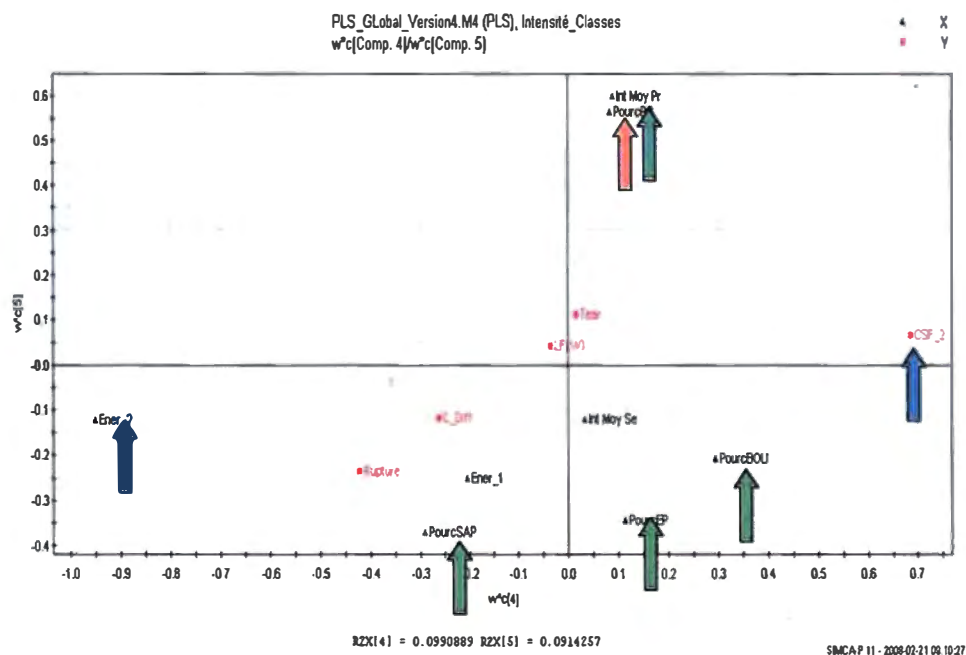


Figure 3.8 Diagramme de charge entre les composantes 4 et 5

Pour la composante 6, on obtient des variations additionnelles pour l'intensité primaire, l'énergie au premier stade (variables d'entrée) et le CSF_2 (variable de sortie). L'indice d'égouttage est difficile à modéliser, la moindre variation dans le modèle n'est donc pas négligeable et elle doit être conservée.

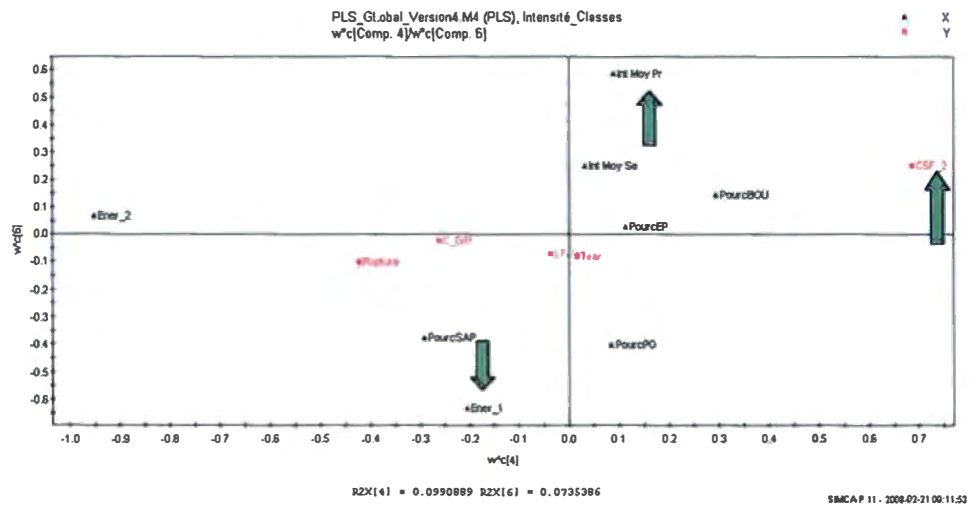


Figure 3.9 Digramme de charge entre les composantes 5 et 6

On peut donc conclure que des informations additionnelles sont obtenues en ajoutant les composantes 5 et 6 dans notre modèle, elles doivent donc être conservées.

3.2.2 Performance générale du modèle PLS Global

Le modèle réussit à reproduire et prédire la longueur de fibre (LF), la rupture, le coefficient de diffusion et la déchirure avec de bon pourcentage d'explication. Par contre, il est plus difficile d'obtenir un bon modèle pour le CSF_2. Cette situation est courante car il est habituellement difficile de prédire cette valeur. La figure 3.10 et le tableau 3-2 permettent de quantifier la performance du modèle sur les cinq (5) variables de sortie.

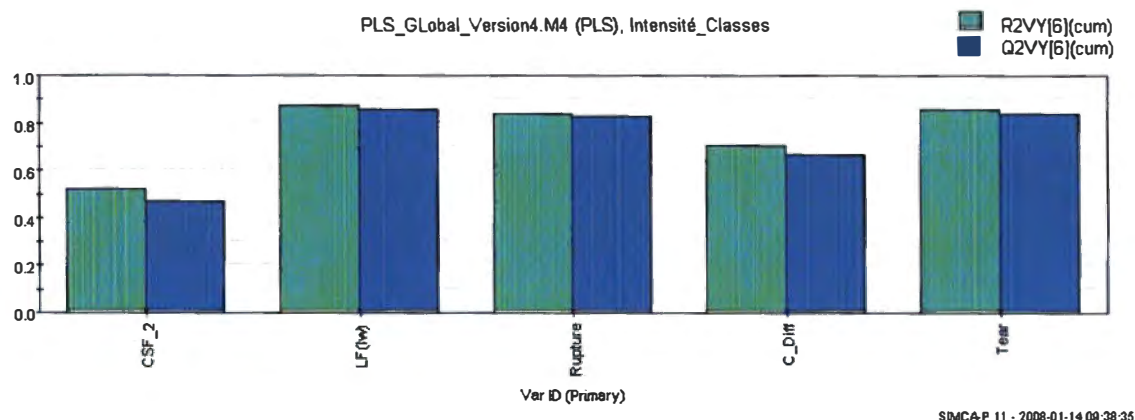


Figure 3.10 Performance générale du modèle PLS Global

Deux valeurs sont exprimées, la première (R2VY) est l'efficacité de reproduction des données de la base par le modèle. La seconde (Q2VY) est l'efficacité à prédire d'autres données que celles de la base en utilisant l'interpolation.

Tableau 3.2 Détails chiffrés du modèle PLS Global

	CSF_2	LF	Rupture	C_Diff	Tear
R2VY	0,52	0,87	0,84	0,71	0,85
Q2VY	0,47	0,86	0,83	0,67	0,84

3.2.3 Poids des variables d'entrée sur les sorties

Ces graphiques permettent de visualiser quelles sont les variables d'entrée qui influencent chacune des variables de sortie. La figure 3.11 présente l'influence de chacune des entrées sur la prédiction de la longueur de fibres. Les essences épinette et bouleau ont le plus d'influence sur cette propriété et elle est inverse. Ce résultat n'est pas surprenant puisque l'épinette a de longues fibres (3,4 mm en moyenne) et le bouleau, à l'inverse, a les fibres les plus courtes (1,4 mm en moyenne). Le pourcentage de sapin et de pin gris a une influence minime, on peut émettre comme hypothèse que les fibres de ces types de pâtes sont plus difficiles à développer, nous n'obtenons pas une pâte ayant de longues

fibres. L'intensité au deuxième stade, énergie au premier et deuxième stade ont également un impact mais avec un moindre degré.

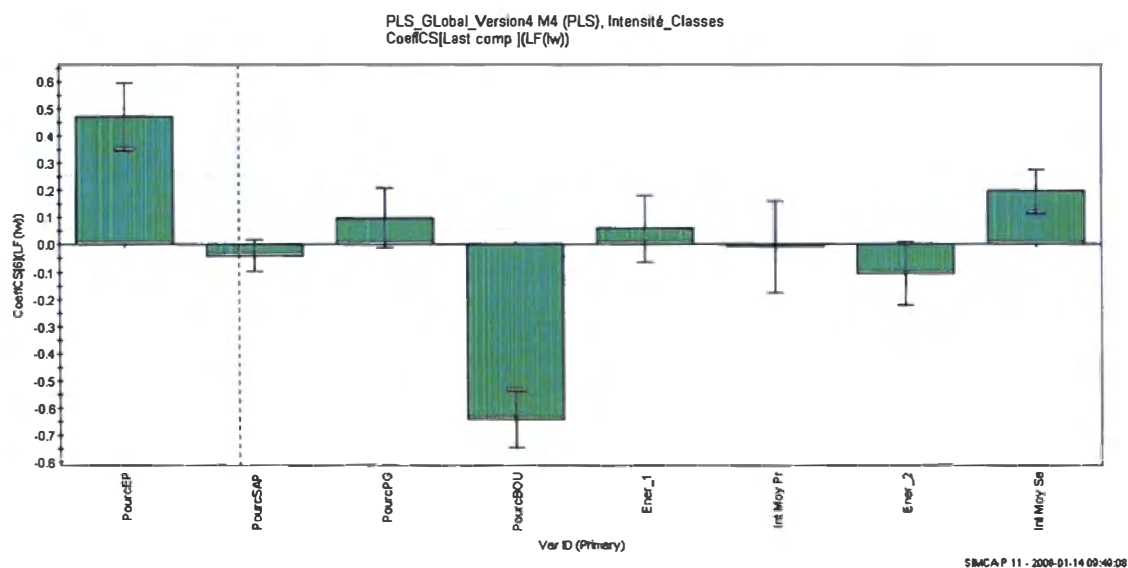


Figure 3.11 Influence des variables d'entrée sur la longueur de fibre

La figure 3.12 présente la réponse de chacune des variables d'entrée sur la rupture. On remarque que le pourcentage de bouleau influence fortement la rupture. La rupture augmente lorsqu'une pâte est composée principalement de fibres longues. Inversement, la rupture diminue lorsque les fibres sont courtes. Les deux variables énergie ont un impact sur la rupture. L'intensité du premier stade et celle du second stade ont un impact sur la rupture.

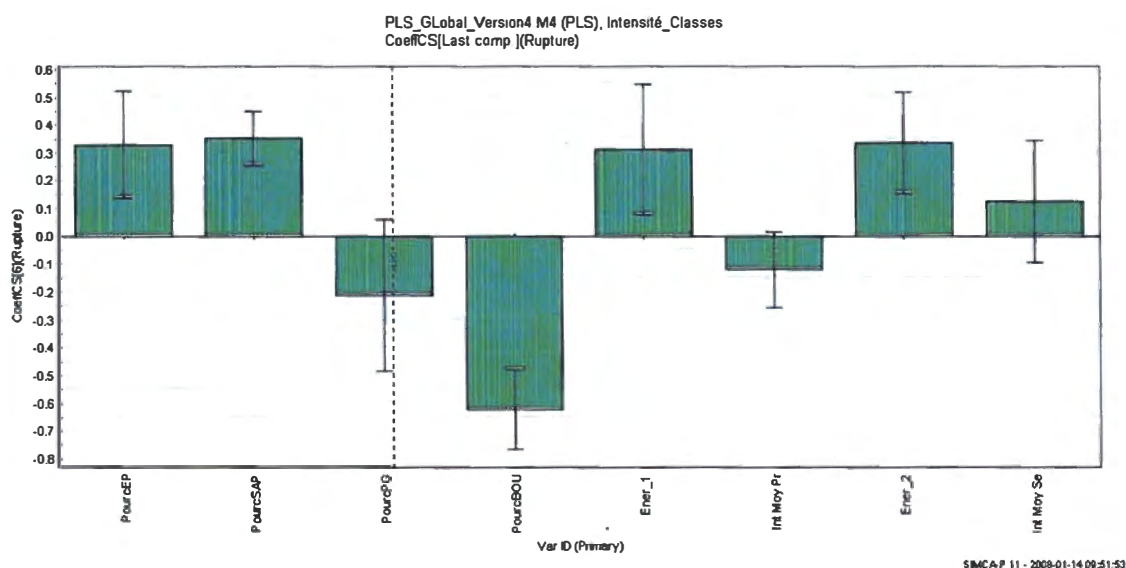


Figure 3.12 Influence des variables d'entrée sur la rupture

La figure 3.13 présente l'influence des variables d'entrée sur le coefficient de diffusion de la lumière. Ce coefficient est lié à la blancheur de la pâte et est influencé par deux facteurs soit le pourcentage de chacune des essences et la mise en pâte. On observe que toutes les essences ont un impact sur le coefficient de diffusion de la lumière particulièrement les pourcentages de sapin et d'épinette. Du point de vue raffinage, c'est le second stade qui a le plus d'impact, l'intensité moyenne secondaire et l'énergie spécifique appliquée au deuxième stade.

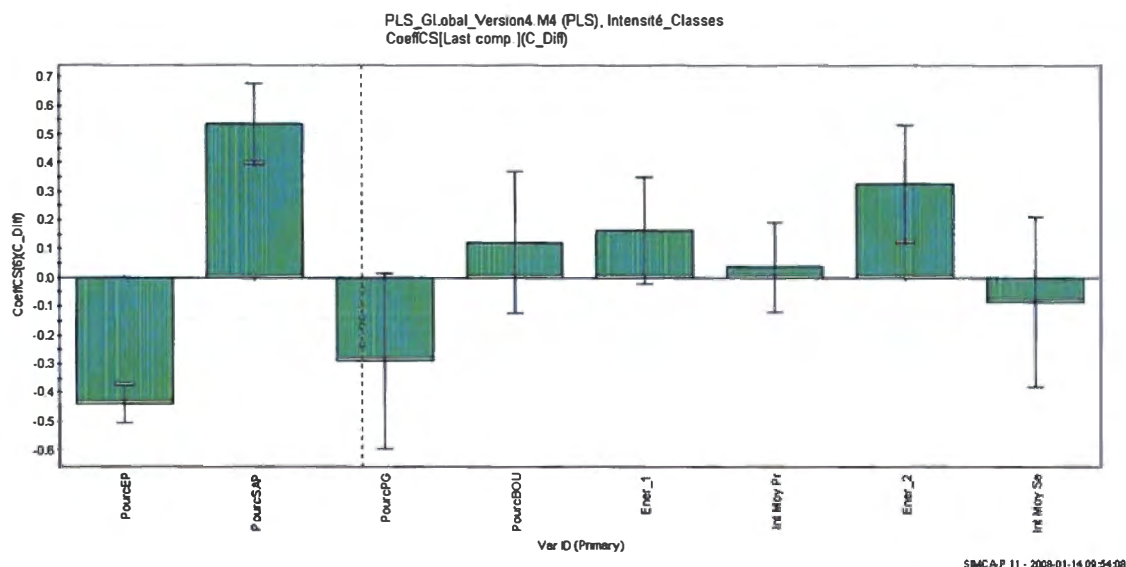


Figure 3.13 Influence des variables d'entrée sur le coefficient de diffusion

La figure 3.14 présente l'influence des variables d'entrée sur la déchirure. Pour cette propriété, le pourcentage des essences a encore beaucoup d'influence, en particulier les pourcentages d'épinette et de bouleau. L'énergie au premier stade et deuxième stade ont des effets mais dans le sens contraire. L'intensité primaire et celle du secondaire ont un impact.

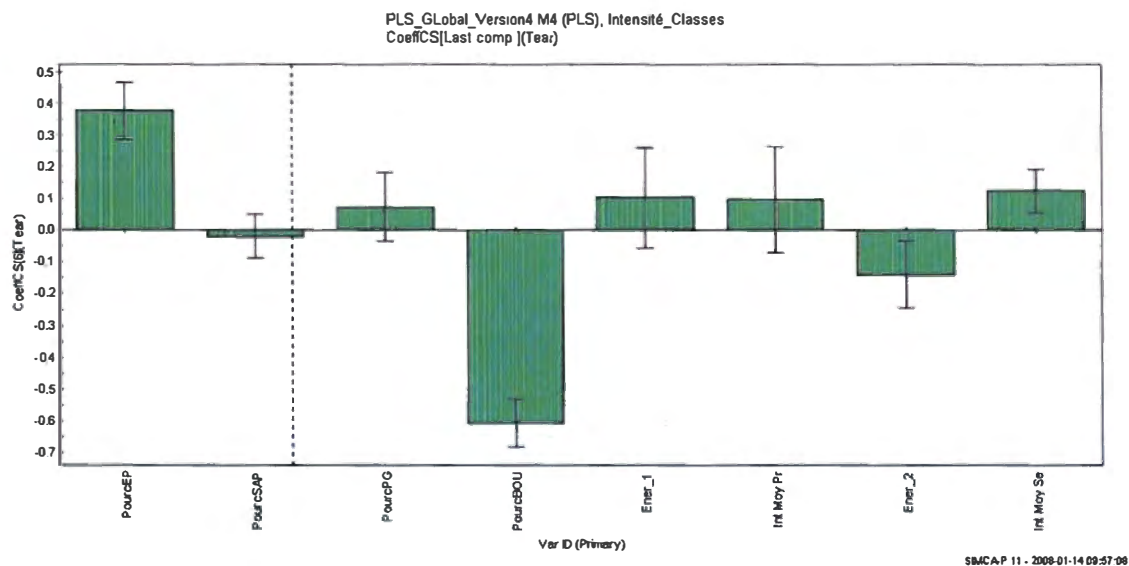


Figure 3.14 Influence des variables d'entrée sur la déchirure

La figure 3.15 présente l'influence des variables d'entrée sur le CSF_2. La composition du mélange de copeaux a un impact ainsi que l'application de l'énergie aux premier et deuxième stades et finalement l'intensité appliquée au deuxième stade.

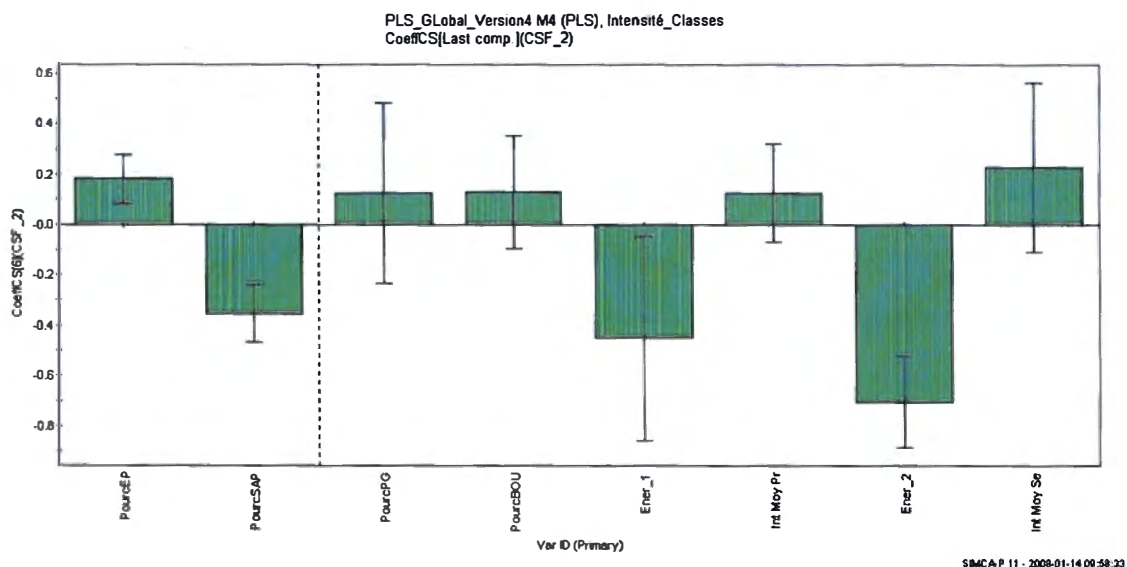


Figure 3.15 Influence des variables d'entrée sur le CSF_2

3.2.3.1 Comparaison entre les modèles avec intensité versus sans intensité du PLS Global

Tel que décrit précédemment, le modèle M4 inclut les données de l'intensité tandis que le modèle M5 n'inclut pas les données de l'intensité. Nous devons premièrement déterminer si l'utilisation de l'intensité sera bénéfique pour la construction de la simulation en comparant les deux modèles.

Dans un premier temps, on remarque que les prédictions du modèle PLS Global sont meilleures si on inclut les données liées à l'intensité, mais l'amélioration n'est pas marquée. Pour M4 (avec intensité) on obtient un modèle à six (6) composantes avec $R^2Y = 76\%$ et $Q^2 = 73\%$ tandis que pour M5 (sans intensité) on obtient un modèle à quatre (4) composantes avec $R^2Y = 75\%$ et $Q^2 = 72\%$. (voir les figures 3-2 et 3.16).

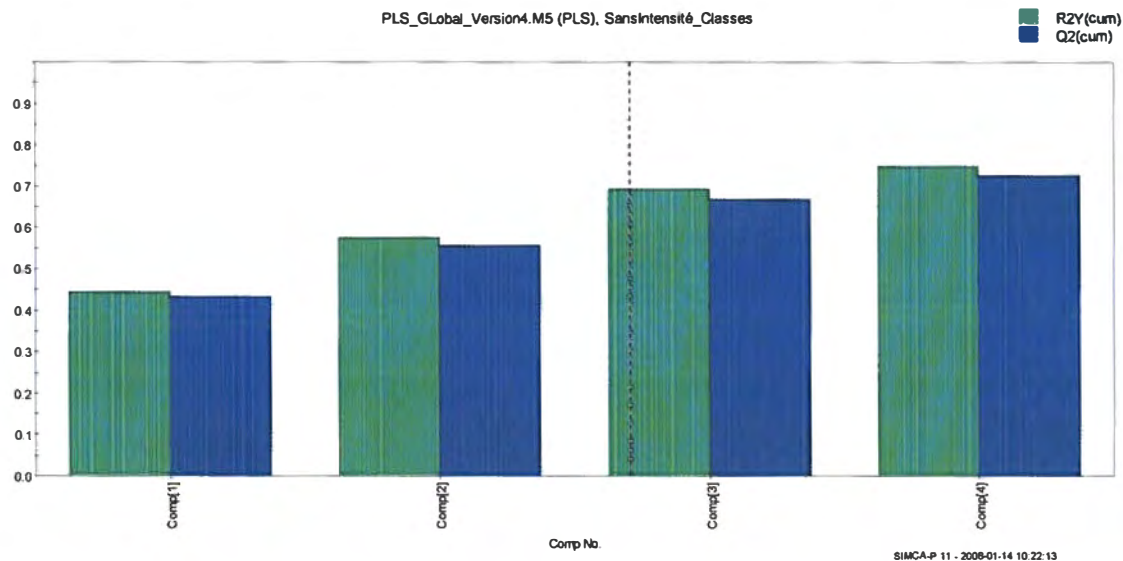


Figure 3.16 Composantes principales du modèle PLS Global

En résumé, voici ce que l'on observe :

Les essences influencent fortement toutes les réponses des variables de sortie, au cours des essais leur variation est grande, de 0 à 100% et ce pour les quatre (4) essences.

L'énergie influence trois sorties soit rupture, coefficient de diffusion et CSF_2. Lors des essais, l'énergie au deuxième stade subit les plus grandes variations.

Finalement l'intensité contrôle la longueur des fibres, la rupture, le coefficient de diffusion et le CSF_2. L'intensité au stade primaire est plus basse que l'intensité au stade secondaire.

3.2.3.2 Variables observées versus variables prédites

La figure 3.17 présente la valeur de la longueur de fibre en fonction des valeurs prédites par le modèle. Chacune des classes est regroupée par couleur classes. La classe 1 (points noirs) contient les données des essais effectués avec un mélange de copeaux, la classe 2 (points rouges) contient les données 100% épinette, la classe 3 (points bleus) contient les données 100% sapin, la classe 4 (points verts) contient les données 100% pin gris et enfin

la classe 5 (points oranges) contient les données 100% bouleau.. Lorsque les deux valeurs s'approchent on obtient une fonction linéaire. Donc pour la longueur de fibre on obtient une bonne prédiction avec un $RMSEE = 0,10$. Ainsi à partir des copeaux 100% bouleau on obtient une pâte à fibres courtes, viennent ensuite, dans l'ordre, les différents mélanges comprenant les quatre essences, les copeaux 100% sapin, les copeaux 100% pin gris et les copeaux 100% épinette. Il est à noter que pour les copeaux 100% épinette et 100% pin gris, même si la tendance est assez bonne, leur comportement est tout de même différent, on observe une plus grande variation. Pour les copeaux 100% épinette, elle est probablement due aux tests V et S dans lesquels les qualités physiques des copeaux ne sont pas les mêmes. La siccité est variable, ils sont soit verts ou secs, l'épaisseur n'est pas la même (soit 0-4 mm ou 4-8 mm) et finalement deux valeurs de densité basale, soit basse ou élevée, ont été utilisées.

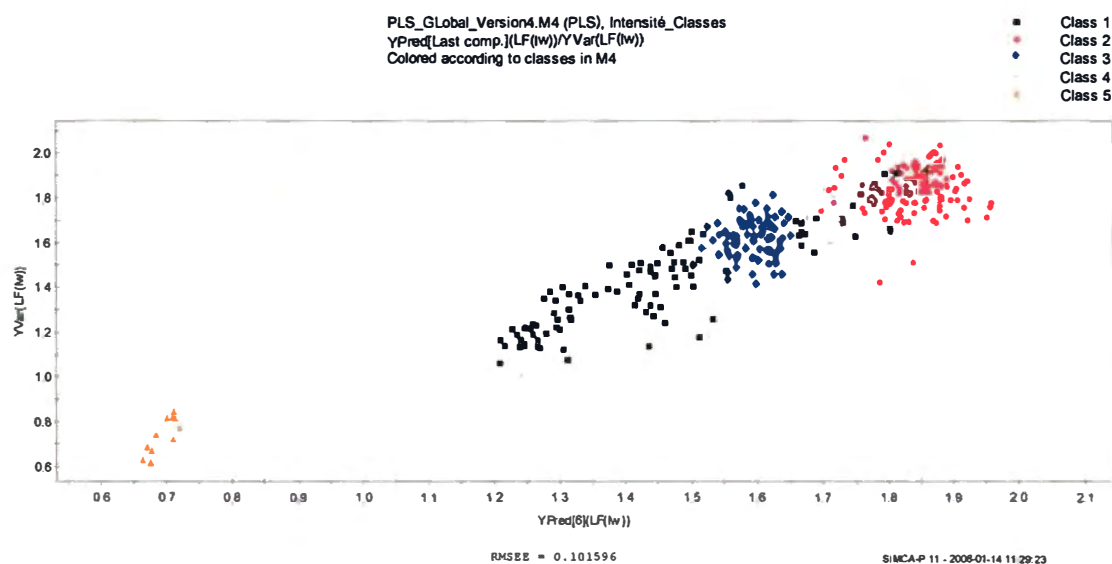


Figure 3.17 Valeurs de la longueur des fibres versus les valeurs prédites

La figure 3.18 est le graphique des valeurs de rupture en fonction des valeurs prédites. On obtient de bonnes valeurs de prédiction avec un $RMSEE = 3,43$. Pour cette propriété chacune des classes est regroupée. Ainsi on obtient une valeur de rupture plus basse pour les copeaux 100% bouleau, viennent ensuite le mélange composé des quatre essences et 100% pin gris et finalement la rupture est plus élevée pour le mélange 100% épinette et 100% sapin. On remarque par contre un comportement moins linéaire pour ces deux

dernières classes. Cette situation est encore une fois probablement due aux ajouts des tests S et V dans lesquels il y avait variation des propriétés des copeaux.

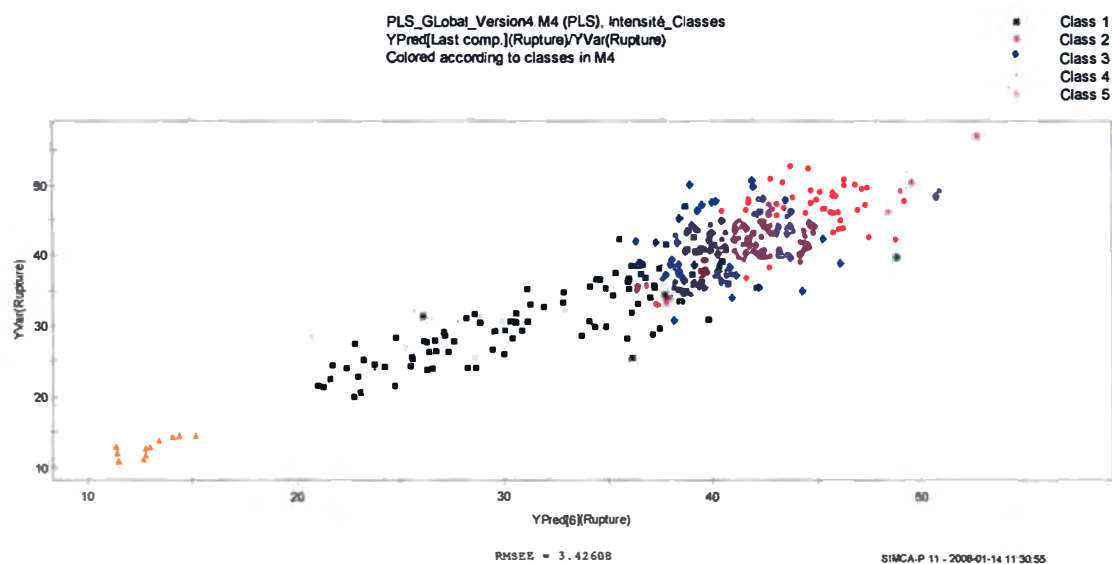


Figure 3.18 Valeurs de la rupture versus les valeurs prédites

La figure 3-19 présente les valeurs de prédiction du coefficient de diffusion de la lumière. Les valeurs sont prédites avec une bonne exactitude puisque que RMSEE = 2,37. Le coefficient de diffusion augmente selon l'ordre suivant : 100% pin gris, 100% épinette, mélange de copeaux et au même niveau 100% bouleau et 100% sapin.

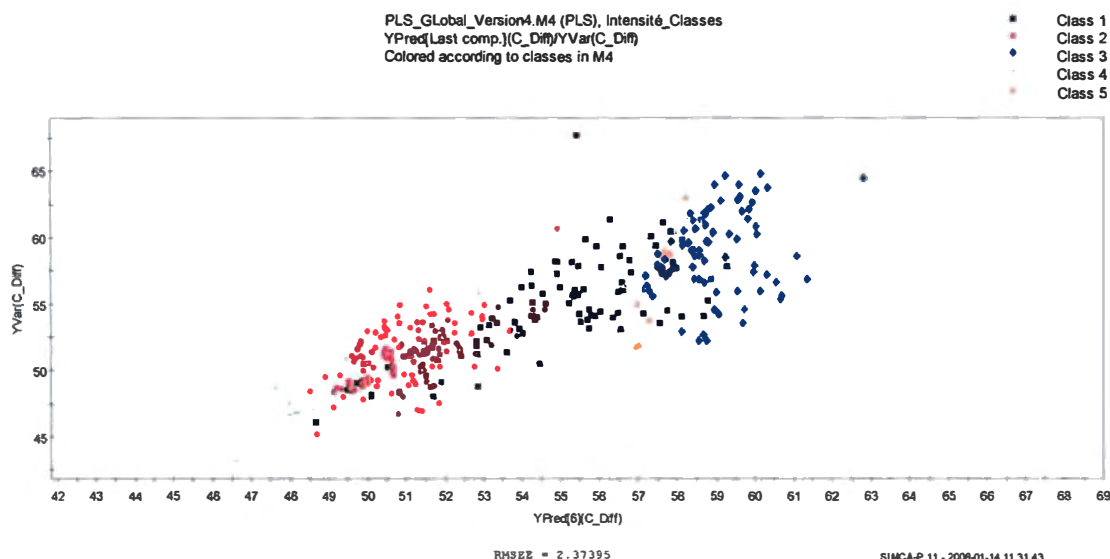


Figure 3.19 Valeurs du coefficient de diffusion versus les valeurs prédites

Les valeurs de la déchirure versus les valeurs prédites sont présentées à la figure 3.20. De bonnes prédictions sont obtenues avec un $RMSEE = 0,88$. Le graphique suit la même tendance que celui de la longueur des fibres. Avec le mélange 100% bouleau on obtient une déchirure moins élevée. Viennent ensuite le mélange de copeaux, 100% pin gris et 100% sapin et la valeur la plus élevée est obtenue avec des copeaux d'épinette. Là encore, la relation est moins linéaire, cette situation est toujours due au tests S et V dans lesquels les certaines propriétés physiques des copeaux étaient moins uniformes.

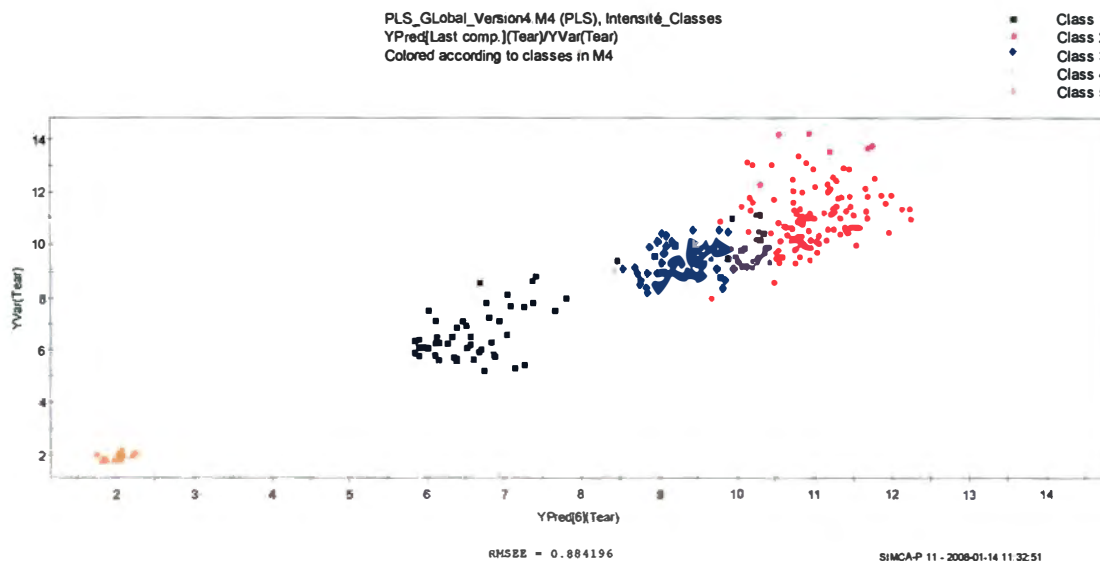


Figure 3.20 Valeurs de la déchirure versus les valeurs prédites

La dernière variable, pour laquelle il y a calcul de prédiction, est l'indice d'égouttage obtenu après le deuxième stade de raffinage (CSF_2). Le modèle obtenu est plus ou moins performant avec RMSEE = 32,0. Cette valeur est toujours difficile à prédire et ce pour tous les mélanges de copeaux (voir figure 3.21).

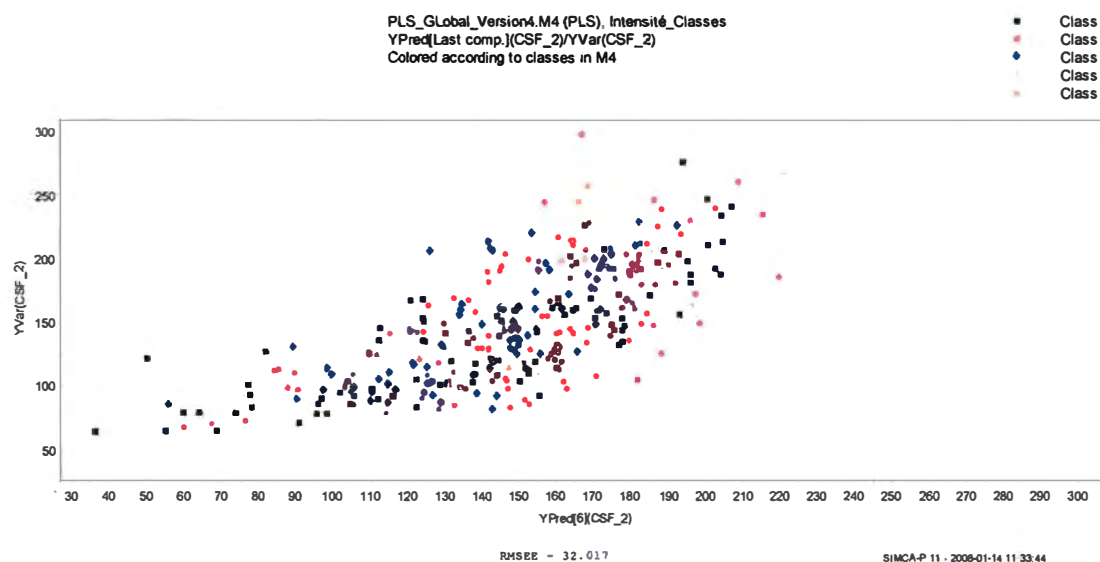


Figure 3.21 Valeurs du CSF_2 versus les valeurs prédites

À partir d'un PLS, il est possible de mettre de côté les variables de sortie Y et ainsi obtenir un PCA-X. La figure 3.22 présente le PCA-X du PLS Global, ce graphique permet d'évaluer les relations existantes entre les variables d'entrée. Plus les variables s'éloignent des axes plus elles ont un impact sur le modèle. Ainsi les pourcentages des quatre essences ont un impact sur le modèle, particulièrement le pourcentage d'épinette et de sapin. Les variables Ener_1 et Int e Moy Sec ont également un impact et ce dans des sens contraires. La même situation peut être observée pour les variables Ener_2 et Int e Moy Pr.

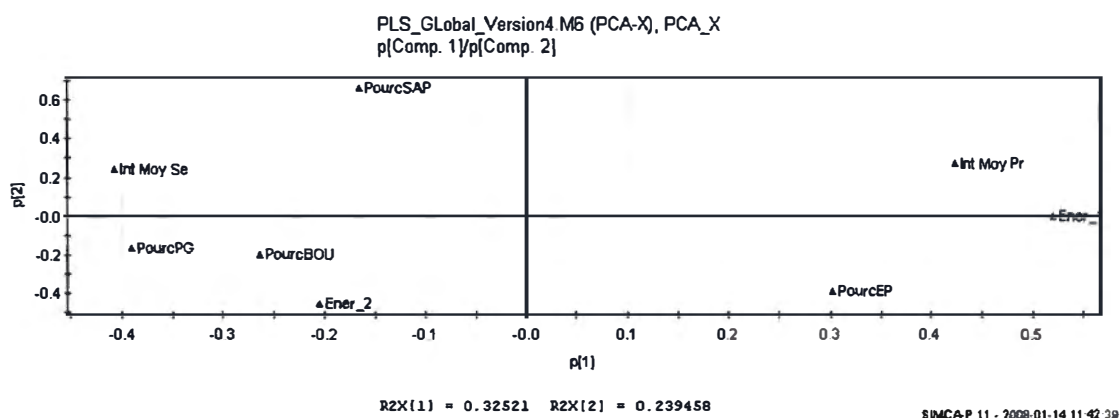


Figure 3.22 PCA-X du modèle PLS Global

De la même façon, il est possible de mettre de côté les variables d'entrée du modèle et ainsi obtenir un PCA-Y (voir la figure 3.23). Ainsi on observe que la déchirure et la longueur des fibres répondent de la même façon aux variations des variables d'entrée, la variation est marquée suivant la composante 1. Pour les trois dernières variables de sortie, soit le CSF, le coefficient de diffusion et la rupture, elles varient mais pas dans le même sens.

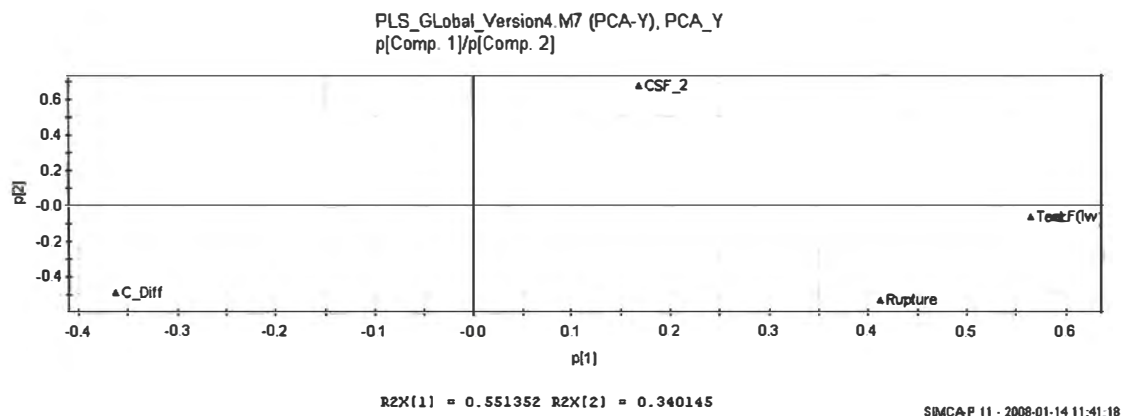


Figure 3.23 PCA_Y du modèle PLS Global

3.3 Construction du PLS Stade1 et PLS Stade2

Une fois le PLS Global construit et analysé, il est maintenant important de comparer les performances avec deux autres modèles utilisant les données du premier stade et deuxième stade séparément. C'est la combinaison la plus performante parmi les deux qui sera utilisée dans la simulation, soit un PLS pour les deux stades ou encore deux PLS séparés, un pour le premier et un pour le deuxième stade.

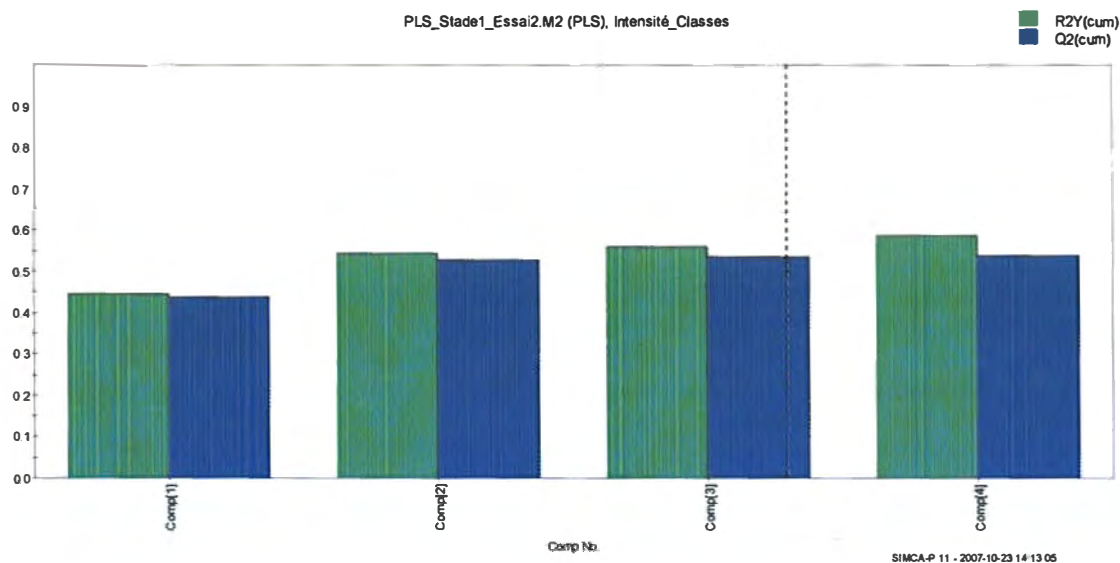
3.3.1 Analyse des résultats du PLS Stade1

Ce PLS permet de déterminer s'il existe une relation entre douze (12) variables dont onze (11) en entrées et une (1) en sortie.

Tableau 3.3 Variables contenues dans le modèle PLS Stadel

Nom de la variable	Description	Entrée ou Sortie
PourcEP, PourSAP, PourcPG, PourcBOU	Pourcentage d'épinette, pourcentage sapin, Pourcentage pin gris et pourcentage bouleau.	Entrées
Siccité	Inverse de l'humidité	Entrée
Densité basale	Masse volumique de la paroi de la fibre.	Entrée
Temp_1	Température d'opération au premier stade de raffinage.	Entrée
Dil_DP_1	Dilution au bâti du raffineur	Entrée
Ent_DP_1	Entrefer, distance des plaques pour le premier stade de raffinage.	Entrée
Ener_1	Énergie spécifique au premier stade	Entrée
Int e Moy Prim	Intensité moyenne primaire, premier stade.	Entrée
CSF_1	Indice d'égouttage du premier stade	Sortie

Le modèle mathématique PLS Stadel compte quatre (4) composantes, avec $R^2Y(\text{cum}) = 0,59$ et $Q^2Y(\text{cum}) = 0,54$ (voir la figure 3.24).

**Figure 3.24 Composantes principales du modèle PLS Stadel**

Il est difficile d'obtenir un bon modèle pour le CSF_1, cette situation est courante, il est habituellement difficile de prédire cette valeur.

Le graphique suivant (voir figure 3-24) permet de quantifier la performance du modèle sur la variable de sortie. Deux valeurs sont exprimées, la première (R2VY), le pourcentage des réponses expliquées par le modèle, la seconde (Q2VY) le pourcentage des prédictions expliquées par le modèle.

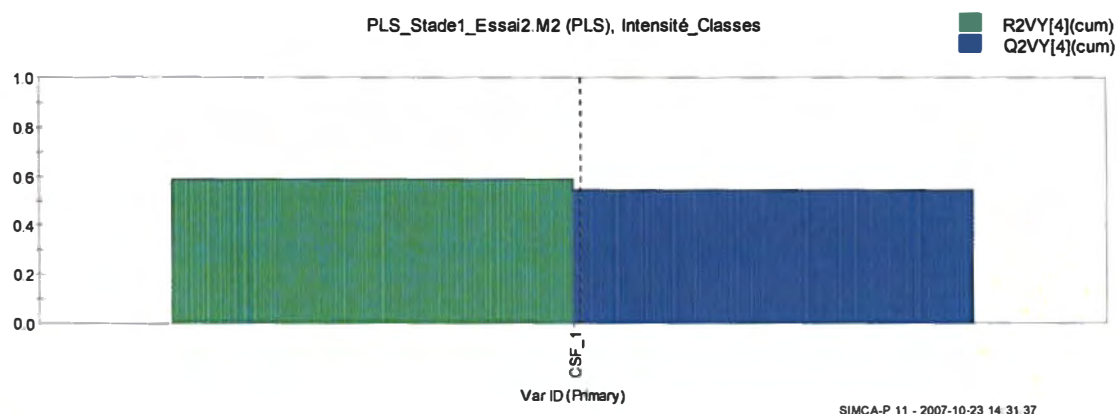


Figure 3.25 Performance générale du modèle sur la variable de sortie
CSF_1

Sous forme de tableau, voici ce que l'on obtient pour le premier stade.

Tableau 3.4 Prédictions de la variable de sortie du PLS Stade1

	CSF_1
R2VY	0,59
Q2VY	0,54

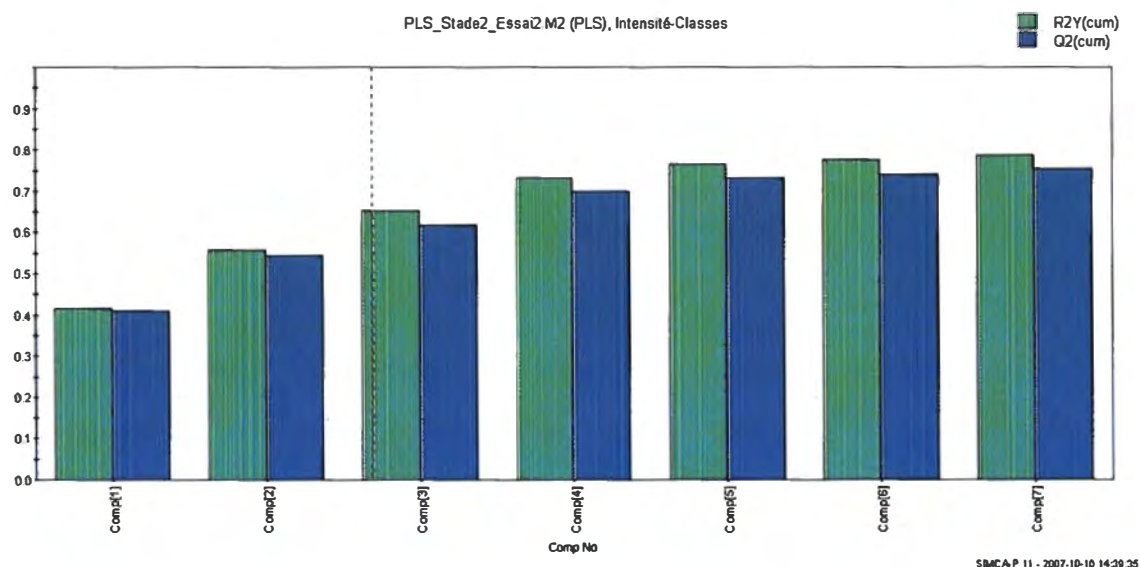
3.3.2 Analyse des résultats du PLS Stade2

Ce PLS permet de déterminer s'il existe une relation entre onze (11) variables d'entrée et cinq (5) variables de sortie.

Tableau 3.5 Variables contenues dans le modèle PLS Stade2

Nom de la variable	Description	Entrée ou Sortie
PourcEP, PourSap, PourcPG, PourcBoul	Pourcentage d'épinette, pourcentage sapin, Pourcentage pin gris et pourcentage bouleau.	Entrées
CSF_1	Indice d'égouttage	Entrée
Int e Moy Prim	Intensité moyenne primaire, premier stade.	Entrée
Dil_DP_2	Dilution, eau ajouté au bâti du raffineur	Entrée
Ent_DP_2	Ouverture des plaques au deuxième stade.	Entrée
Ener_1	Énergie spécifique au premier stade	Entrée
Ener_2	Énergie spécifique au deuxième stade.	Entrée
Int e Moy Sec	Intensité moyenne au deuxième stade	Entrée
CSF_2	Indice d'égouttage à la sortie du deuxième stade.	Sortie
LF(lw)	Longueur de fibres	Sortie
Rupture	Rupture	Sortie
C_Diff	Coefficient de diffusion	Sortie
Tear	Déchirure	Sortie

Le modèle mathématique PLS_Stade2 compte sept (7) composantes. Avec $R^2Y(\text{cum}) = 0,79$ et $Q^2Y(\text{cum}) = 0,75$ (voir la figure 3.26).

**Figure 3.26 Composantes principales du modèle PLS Stade2**

Le modèle réussit à reproduire et à prédire la longueur des fibres (LF), la rupture, le coefficient de diffusion et la déchirure correctement. Par contre il est plus difficile d'obtenir un bon modèle pour le CSF_2 bien que cette situation soit courante car il est habituellement difficile de prédire cette valeur.

Le graphique suivant (voir figure 3.27) permet de quantifier la performance du modèle sur les cinq (5) variables de sortie.

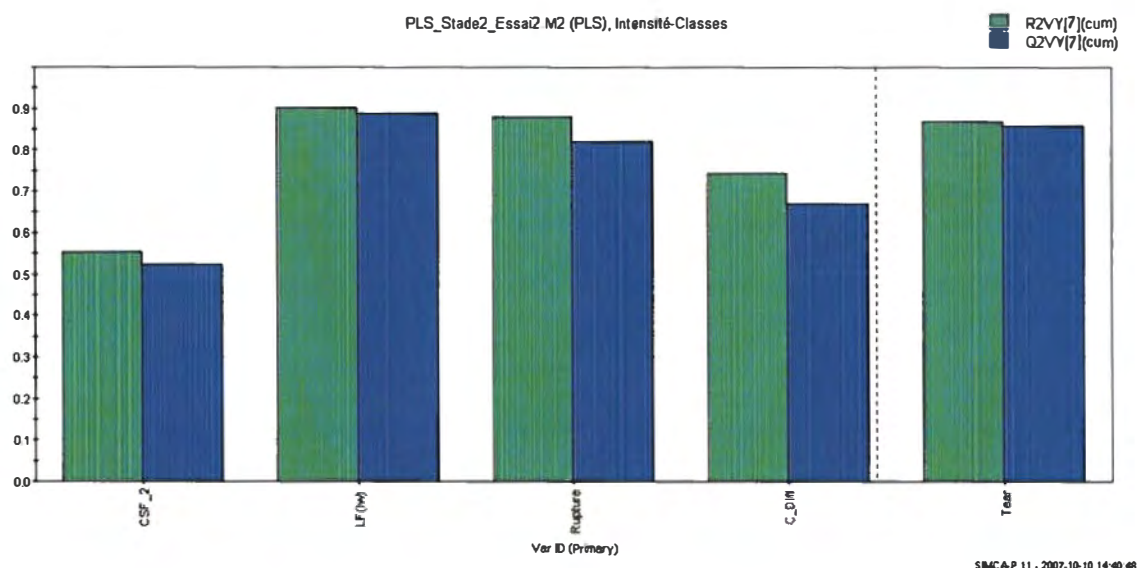


Figure 3.27 Performance du modèle sur les variables de sortie PLS Stade2

Sous forme de tableau voici ce que l'on obtient pour le deuxième stade.

Tableau 3.6 Prédictions des variables de sortie du PLS Stade2

	CSF_2	LF	Rupture	C_Diff	Tear
R2VY	0,55	0,90	0,88	0,74	0,87
Q2VY	0,52	0,89	0,82	0,67	0,86

3.4 Comparaison entre le modèle PLS Global et la combinaison des modèles PLS Stade 1 et PLS Stade2

Les erreurs absolues et les erreurs relatives ont été calculées entre les données obtenues et les valeurs prédites afin de quantifier l'efficacité de nos modèles de prédiction. La formule de l'erreur relative est la suivante :

$$\frac{\text{Valeur absolue}(\text{valeur prédite } Y - \text{valeur } Y)}{\text{Valeur } Y} \times 100 \quad \text{Équ. 3.1}$$

L'erreur absolue tient compte de l'écart qui existe entre la valeur maximum et la valeur minimum de la variable. Selon la plage des valeurs des données, l'erreur absolue n'est donc pas la même, la formule suivante est utilisée pour la calculer.

$$\frac{\text{Valeur absolue}(\text{valeur prédite } Y - \text{valeur } Y)}{(\text{max valeur } Y - \text{min valeur } Y)} \times 100 \quad \text{Équ. 3.2}$$

Voici sous forme de tableaux les résultats obtenus.

Tableau 3.7 Erreurs absolues et relatives du modèle PLS Global

Erreur (%)	Avec Intensité	Sans Intensité
CSF (erreur relative)	18,22	10,96
CSF (erreur absolue)	18,99	11,33
LF (erreur relative)	4,85	4,68
LF (erreur absolue)	5,14	4,89
Rupture (erreur relative)	6,67	6,99
Rupture (erreur absolue)	5,30	5,62
C_Diff (erreur relative)	3,16	3,19
C_Diff (erreur absolue)	6,99	7,05
Déchirure (erreur relative)	7,45	7,10
Déchirure (erreur absolue)	5,38	5,17

Plusieurs observations ressortent :

Les valeurs CSF sont difficiles à prédire.

Les valeurs prédites ne sont pas plus précises lorsqu'on utilise les données de l'intensité.

De bons résultats sont obtenus pour la longueur de fibre, la rupture et le coefficient de diffusion.

Pour sa part, le modèle PLS Stade1 ne comporte qu'une seule sortie, soit CSF1.

Tableau 3.8 Erreurs absolues et relatives du modèle PLS Stade1

Erreur (%)	Avec Intensité	Sans Intensité
CSF1 (erreur relative)	13,61	13,73
CSF1 (erreur absolue)	10,63	12,10

Dans un premier temps le modèle mathématique PLS Stade2 a été construit sans tenir compte du mélange des essences. On obtient un modèle peu performant où les valeurs prédites ne s'approchent pas des valeurs obtenues. Un deuxième modèle a donc été construit dans lequel les essences sont comprises dans les variables d'entrée, nous obtenons un meilleur modèle pour l'ensemble des variables mis à par le CSF_2 (tableau 3.9).

Tableau 3.9 Erreurs absolues et relative du modèle PLS Stade 2 avec et sans essence

Erreur (%)	Sans essence	Avec essence
CSF2 (erreur relative)	19,45	17,45
CSF 2 (erreur absolue)	11,64	10,42
LF (erreur relative)	12,55	4,43
LF (erreur absolue)	11,95	4,38
Rupture (erreur relative)	17,23	5,99
Rupture (erreur absolue)	11,17	4,84
C_Diff (erreur relative)	5,75	2,97
C_Diff (erreur absolue)	12,57	6,52
Déchirure (erreur relative)	23,43	7,01
Déchirure (erreur absolue)	11,34	6,89

Le modèle avec essences a ensuite fait l'objet d'une étude de l'effet d'inclure ou non l'intensité. Encore une fois, l'ajout de l'intensité comme variable d'entrée ne permet pas d'obtenir de meilleures prédictions (tableau 3.10).

Tableau 3.10 Erreurs absolues et relatives du modèle PLS Stade2 avec essences

Erreur (%)	Avec Intensité	Sans Intensité
CSF2 (erreur absolue)	17,45	17,87
CSF 2 (erreur relative)	10,42	10,74
LF (erreur absolue)	4,43	4,47
LF (erreur relative)	4,38	10,76
Rupture (erreur absolue)	5,99	7,35
Rupture (erreur relative)	4,84	5,84
C_Diff (erreur absolue)	2,97	3,05
C_Diff (erreur relative)	6,52	6,68
Déchirure (erreur absolue)	7,01	7,41
Déchirure (erreur relative)	6,89	5,47

Donc, le modèle PLS Global sera utilisé dans la construction de notre modèle prédictif puisque les résultats obtenus avec la combinaison PLS_Stade1 et PLS_Stade2 ne sont pas meilleurs. Jusqu'à maintenant il a été observé que les valeurs prédites ne sont pas plus précises lorsqu'on utilise les données de l'intensité. En fait, on obtient un moins bon résultat pour le CSF et des résultats équivalents pour les quatre (4) autres propriétés. Nous posons comme hypothèse que l'énergie spécifique joue le plus grand rôle dans l'atteinte des propriétés de la pâte. Par contre, l'ajout d'un contrôle de l'intensité pourrait peut-être agir à titre de calibrage fin. Nous conserverons donc les variables intensité pour la suite de l'étude en simulation.

Chapitre 4 - Résultats des simulations

4.1 Modèle avec l'intensité

Dans un premier temps, les variables intensité sont incluses dans la simulation. Le module mathématique comprendra huit (8) entrées et cinq sorties.

Entrées : Pourcentage d'épinette, pourcentage de sapin, pourcentage de pin gris, pourcentage de bouleau, énergie premier stade, énergie second stade, intensité premier stade et intensité second stade.

Sorties : Il s'agit de cinq propriétés de la pâte c'est à dire CSF, rupture, déchirure, coefficient de diffusion et longueur des fibres.

Le module mathématique doit donc résoudre une matrice 8×5 (huit entrées) multipliée par un vecteur contenant huit (8) coefficients pour ainsi obtenir les réponses des cinq (5) sorties. Les coefficients de la matrice doivent être spécifiés dans le module mathématique et ils sont en fait obtenus à partir du PLS construit préalablement dans SIMCA (voir tableau 4-1), les constantes correspondent aux valeurs des écarts (Offset).

Tableau 4.1 Coefficients du modèle mathématique PLS avec intensité

Variable	Coefficients CSF	Coefficients LF	Coefficients Rupture	Coefficients C_Diff	Coefficients Déchirure
Constante	251.786	1.24626	12.824	48.1759	6.02305
Pourcentage épinette	0.174606	0.00278411	0.0590708	-0.0403154	0.0181765
Pourcentage sapin	-0.389834	-0.00026557	0.0715021	0.0557509	-0.00103837
Pourcentage pin gris	0.256192	0.00124158	-0.0813051	-0.0567988	0.00757822
Pourcentage bouleau	0.264891	-0.00809878	-0.237813	0.0240738	-0.0627453
Énergie 1^{er} stade	-0.0821935	0.0000663	0.0105241	0.0028445	0.000933554
Intensité 1^{er} stade	36230.6	-11.3651	-6441.26	1005.57	1391.42
Énergie 2^{ième} stade	-0.0856102	-0.0000787	0.0075718	0.00376875	-0.00085064
Intensité 2^{ième} stade	50407.7	264.885	5091.11	-1754.93	1378.24

4.2 Modèle sans l'intensité

Dans un deuxième temps, une deuxième simulation est testée, elle n'inclue pas les variables liées à l'intensité. Le module mathématique comprendra donc six (6) entrées et cinq (5) sorties.

Entrées : Pourcentage d'épinette, pourcentage de sapin, pourcentage de pin gris, pourcentage de bouleau, énergie premier stade, énergie second stade.

Sorties : On utilise toujours les mêmes cinq (5) propriétés de la pâte c'est à dire CSF, rupture, déchirure, coefficient de diffusion et longueur des fibres.

Le module mathématique doit donc résoudre une matrice 6 x 5 (six entrées) multipliée par un vecteur contenant six (6) coefficients pour ainsi obtenir les réponses des cinq (5) sorties. Les coefficients de la matrice sont présentés au tableau suivant.

Tableau 4.2 Coefficients du modèle mathématique PLS sans intensité

Variable	Coefficients CSF	Coefficients LF	Coefficients Rupture	Coefficients C_Diff	Coefficients Déchirure
Constante	333.009	1.78481	21.1303	46.0729	10.1983
Pourcentage épinette	0.19845	0.00286751	0.0402083	-0.0454152	0.0207967
Pourcentage sapin	-0.232222	0.0000276	0.0533552	0.0491577	0.00215735
Pourcentage pin gris	0.578779	0.00169824	-0.0517935	-0.0626631	0.00509998
Pourcentage bouleau	0.146844	-0.00887104	-0.267835	0.0211604	-0.0684794
Énergie 1^{er} stade	-0.071766	-0.0000872	0.00699195	0.00377788	-0.0000907
Énergie 2^{ème} stade	-0.0889047	-0.0000995	0.00649628	0.00376479	-0.00096459

4.3 Résultats comparatifs sans optimisation de l'énergie spécifique

Les poids de chacune des propriétés, permettant à l'utilisateur de mettre plus d'importance à une variable comparativement à une autre, ont toujours été fixés à 1. La valeur à minimiser est toujours la même, soit la sommation normalisée des différences entre la valeur obtenue et le point de consigne pour les cinq (5) propriétés. La différence entre les deux simulations est que la première fixera les deux intensités en plus des deux

énergies. Les simulations complètes avec les variables intensité et sans les variables intensité sont présentées en annexe II.

Une fois la simulation construite, on doit vérifier les réponses que l'on obtient pour chaque combinaison d'essences des copeaux (4 variables à spécifier) et de consignes de pâtes désirées (5 variables à spécifier). Il est long d'effectuer ces essais, on doit donc restreindre le nombre. Trente (30) tests de la base de données ont donc été choisis judicieusement afin d'obtenir une bonne représentation, particulièrement au niveau du pourcentage de chacune des essences et des énergies spécifiques appliquées. En d'autres mots ces 30 essais couvrent des points représentatifs dans tout le domaine expérimental.

4.3.1 Répartition de l'énergie entre le premier stade et le deuxième stade

Lorsqu'on analyse les résultats de la simulation on observe que les résultats ne sont pas toujours les mêmes en ce qui attrait à la répartition des énergies entre le premier et le deuxième stade. Dans certains cas, l'énergie du premier stade est plus élevée, pour d'autres essais l'énergie du deuxième stade est plus élevée et finalement on obtient l'énergie du premier stade égale à l'énergie du deuxième stade. Afin de pousser l'analyse on calcule le ratio suivant qui sera utilisé à la figure 4.1.

$$\frac{\text{énergie spécifique 1er stade}}{\text{énergie totale}} \quad \text{Équ. 4.1}$$

Selon les données d'opération des usines, afin d'obtenir des propriétés de pâte maximales, les conditions d'opération du procédé de raffinage sont, soit une application d'énergie élevée au premier stade ou à l'inverse une application d'énergie élevée au deuxième stade.

Afin de connaître à quel endroit les conditions d'opérations se situent, on construit le graphique présenté à la figure 4.1.

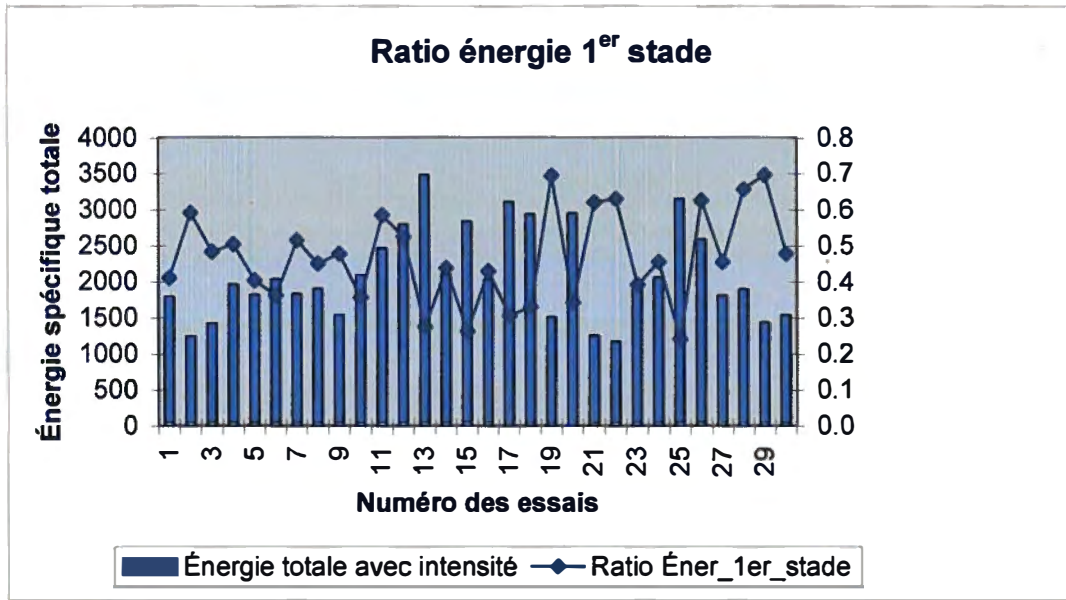


Figure 4.1 Ratio entre l'énergie du premier stade et l'énergie totale

On trace un histogramme et une courbe. Les colonnes bleues représentent l'énergie totale obtenue après simulation pour chacun des essais. La courbe bleue est le ratio entre l'énergie du premier stade et l'énergie totale (valeurs obtenues après simulation), une valeur de 0,5 indique que l'énergie du 1^{er} stade est égale à l'énergie du 2^{ième} stade. On obtient donc les résultats suivants :

Pour 8 essais, l'énergie du 1^{er} stade est plus élevée que l'énergie du 2^{ième} stade.

Pour 3 essais, l'énergie du 1^{er} stade est égale à l'énergie du 2^{ième} stade.

Pour 19 essais : l'énergie du 1^{er} stade est moins élevée que l'énergie du 2^{ième} stade.

On observe que l'on ne se situe pas d'un côté ou de l'autre de la courbe. Comme il y a une grande variation dans la composition du mélange des copeaux, il est normal que le ratio de l'énergie se déplace. Il est très intéressant que l'optimisation choisisse s'il doit y avoir application d'une énergie plus élevée au 1^{er} stade ou plutôt au 2^{ième} stade pour mieux atteindre les consignes de propriétés de pâtes.

4.3.2 Effet du contrôle de l'intensité sur l'énergie spécifique totale

Lors du déroulement des tests en laboratoire, il y a eu application d'énergie au premier et deuxième stade de raffinage. On obtient une énergie totale de raffinage à laquelle on donne le nom d'énergie totale de la base de données. Tel que décrit précédemment, le modèle mathématique calcule pour sa part de nouvelles énergies pour les deux stades de raffinage. On obtient donc une énergie totale avec intensité ou une énergie totale sans intensité selon qu'il y ait ou pas contrôle de cette variable.

La figure 4.2 présente un premier histogramme qui compare la valeur de l'énergie spécifique totale de la base de données et l'énergie spécifique totale avec intensité pour les trente (30) essais sélectionnés.

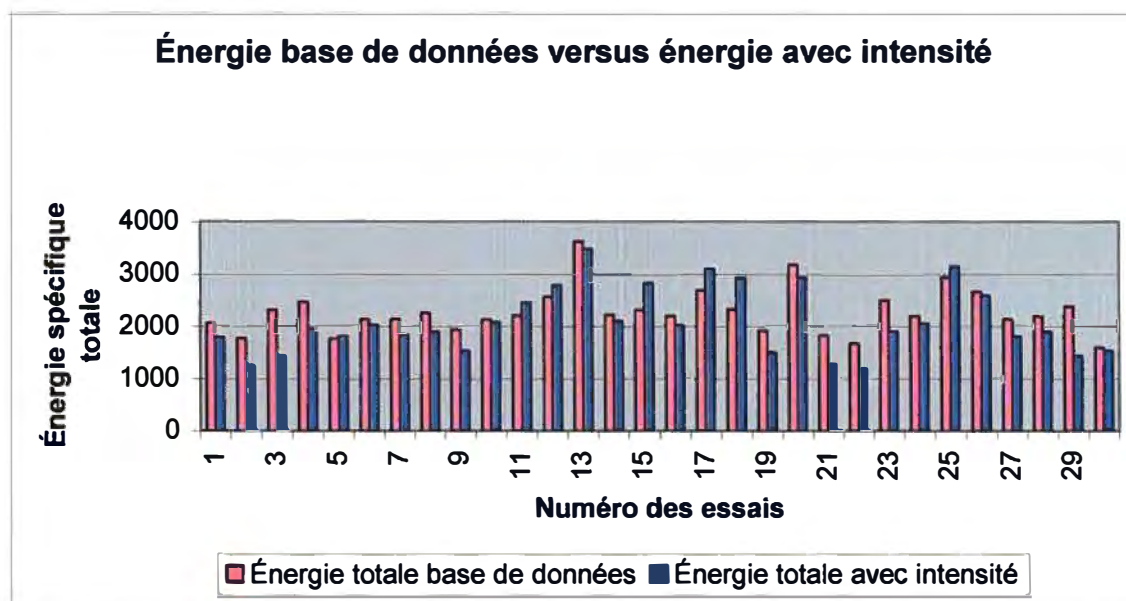


Figure 4.2 Énergie totale de la base de données versus énergie totale obtenue avec contrôle de l'intensité

Pour 23 des 30 essais on observe que les valeurs de l'énergie sont plus basses lorsqu'il y a utilisation du modèle prédictif avec contrôle de l'intensité. Ce résultat montre que selon le modèle, les mêmes pâtes auraient possiblement pu être produites avec moins d'énergie si on avait aussi contrôlé l'intensité dans les essais en laboratoire.

On compare ensuite les résultats de deux simulations, l'une qui contient les variables liées à l'intensité, l'autre pas. La figure 4.3 montre les résultats pour les trente (30) essais.

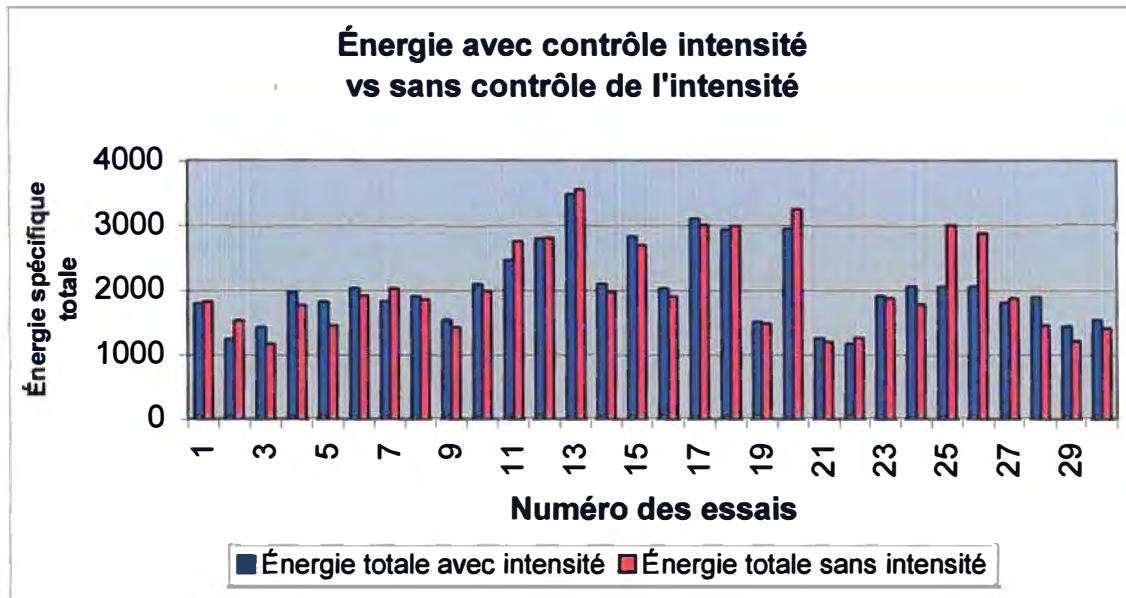


Figure 4.3 Énergie avec contrôle de l'intensité versus sans contrôle de l'intensité

Les colonnes bleues représentent l'énergie spécifique avec contrôle de l'intensité dans la simulation et les colonnes rouges sont les énergies sans contrôle de l'intensité. Les résultats obtenus sont les suivants :

Pour onze (11) essais, on obtient des énergies moins élevées avec contrôle de l'intensité.

Pour deux (2) essais, on obtient des énergies égales avec ou sans intensité.

Pour les dix-sept (17) autres essais, l'énergie est moindre lorsqu'il n'y a pas contrôle de l'intensité.

À prime abord, les essais ne sont donc pas concluants pour la diminution de l'énergie avec le contrôle de l'intensité. On pousse l'analyse en calculant le ratio suivant afin de déterminer les variations de l'énergie spécifique en pourcentage.

$$\frac{\text{énergie sans intensité} - \text{énergie avec intensité}}{\text{énergie sans intensité}}$$

Équ. 4.2

Les résultats obtenus sont présentés à la figure 4.4.

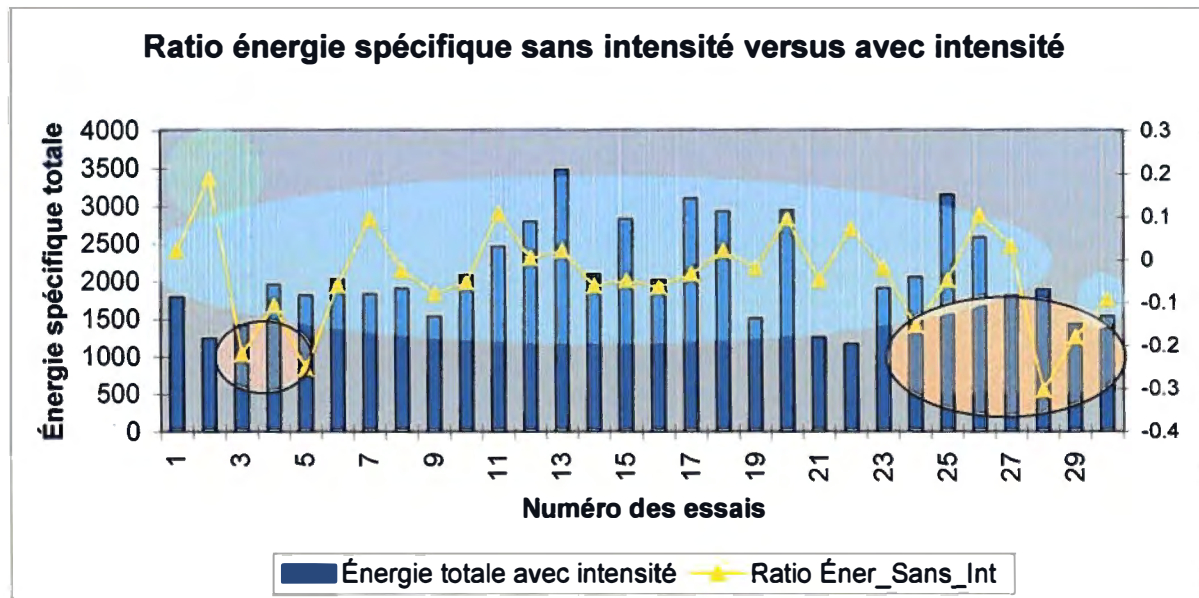


Figure 4.4 Ratio énergie spécifique sans intensité versus avec intensité

La courbe jaune présente le ratio suivant l'équation 3-5. Un ratio égal à zéro indique que l'énergie spécifique totale avec contrôle de l'intensité est égale à l'énergie spécifique totale sans contrôle de l'intensité. Les résultats sont les suivants :

Vingt-quatre (24) points se situent à $\pm 10\%$ de variations d'énergie (zone bleue).

Pour un (1) essai, on observe une diminution de 19% de l'énergie **lorsqu'il y a contrôle de l'intensité**.

Pour cinq (5) essais, on observe une diminution entre 15 et 30% de **l'énergie lorsqu'il n'y a pas contrôle de l'intensité** (zone rouge).

On ne peut donc pas conclure qu'il y a diminution de l'énergie spécifique totale lorsqu'il y a contrôle de l'intensité.

4.3.3 Effet du contrôle de l'intensité sur les propriétés de la pâte

À partir des trente (30) essais effectués sur la simulation, il est également possible d'analyser l'effet du contrôle de l'intensité sur les propriétés de la pâte. On calcule

l'erreur absolue entre le point de consigne et la valeur obtenue par le modèle prédictif. Les résultats sont présentés à la figure 4.5

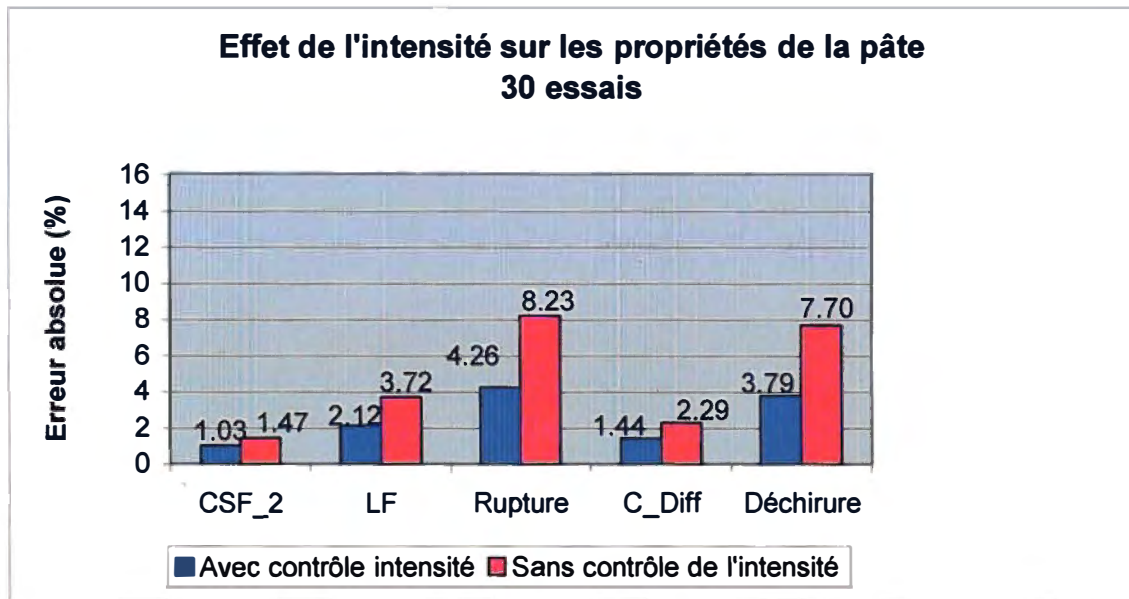


Figure 4.5 Effet du contrôle de l'intensité sur les propriétés de la pâte

Pour les 5 propriétés, on observe une diminution de l'erreur lorsqu'il y a contrôle de l'intensité. La diminution est encore plus marquée pour la rupture et la déchirure.

On peut donc conclure qu'avec un contrôle de l'intensité, il est plus facile d'atteindre les qualités de pâte qui sont fixées. Il est plus facile de contrôler en particulier la rupture et la déchirure.

4.4 Résultats comparatifs avec optimisation de l'énergie spécifique

4.4.1 Stratégie d'optimisation

Lorsque la fonction objective ne contient que les erreurs de consigne des propriétés de pâte, nous n'obtenons pas une diminution significative de l'énergie spécifique totale avec contrôle de l'intensité. Afin de forcer les énergies vers des minimums, des modifications sont apportées à la simulation.

Le module mathématique inclut toujours huit (8) entrées et cinq (5) sorties. Quatre entrées doivent être spécifiées, c'est à dire les quatre pourcentages des essences composant le mélange des copeaux. Les cinq sorties sont les propriétés de la pâte soit le CSF, rupture, déchirure, coefficient de diffusion de la lumière et longueur des fibres. Pour ces valeurs, on compare le résultat obtenu par le PLS et un point de consigne, on obtient donc cinq erreurs, comme préalablement. Cependant, à la somme d'erreurs dirigée vers le module d'optimisation, on en ajoute deux nouvelles, soit la différence entre l'énergie calculée par le module d'optimisation et le minimum obtenu dans la base de données, pour les deux stades de raffinage (figure 4.6). Tout comme les autres erreurs, celles sur l'énergie sont normalisées afin d'avoir la même importance indépendamment des unités d'ingénierie. Pour la nouvelle somme des erreurs, l'équation suivante est obtenue :

$$\sum \left(w_i \cdot \left(\frac{\text{propriété ,prédite} - \text{consigne propriété ,}}{\text{propriété ,maximum} - \text{propriété ,minimum}} \right) \right) \quad \text{Équ. 4.3}$$

où la variable i comprend

le CSF, la rupture, la déchirure, le coefficient de diffusion de la lumière, la longueur de fibre, l'énergie au premier stade et l'énergie au second stade.

Ceci revient à dire que le module d'optimisation tiendra maintenant compte de l'éloignement des énergies théoriques minimales dans sa recherche des énergies et intensités qui satisfont les propriétés de pâtes désirées.

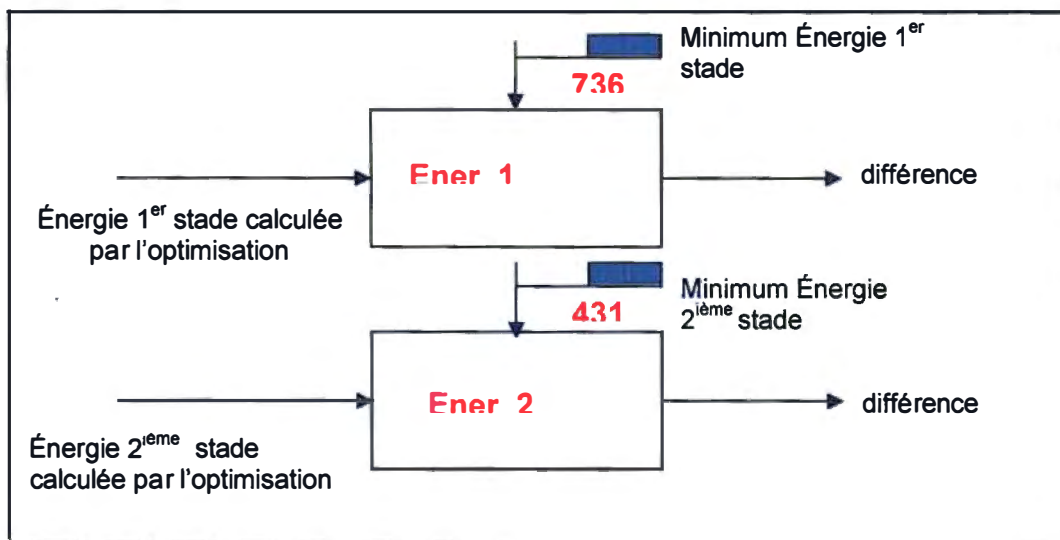


Figure 4.6 Inclusion des énergies dans la fonction objective

4.4.2 Effet de l'optimisation de l'énergie sur l'énergie spécifique totale

La figure 4.7 présente en partie les mêmes résultats qu'à la figure 4.2. Il s'agit de comparer trois résultats, l'énergie totale de la base de données, l'énergie obtenue avec contrôle de l'intensité et l'énergie obtenue avec optimisation de cette dernière.

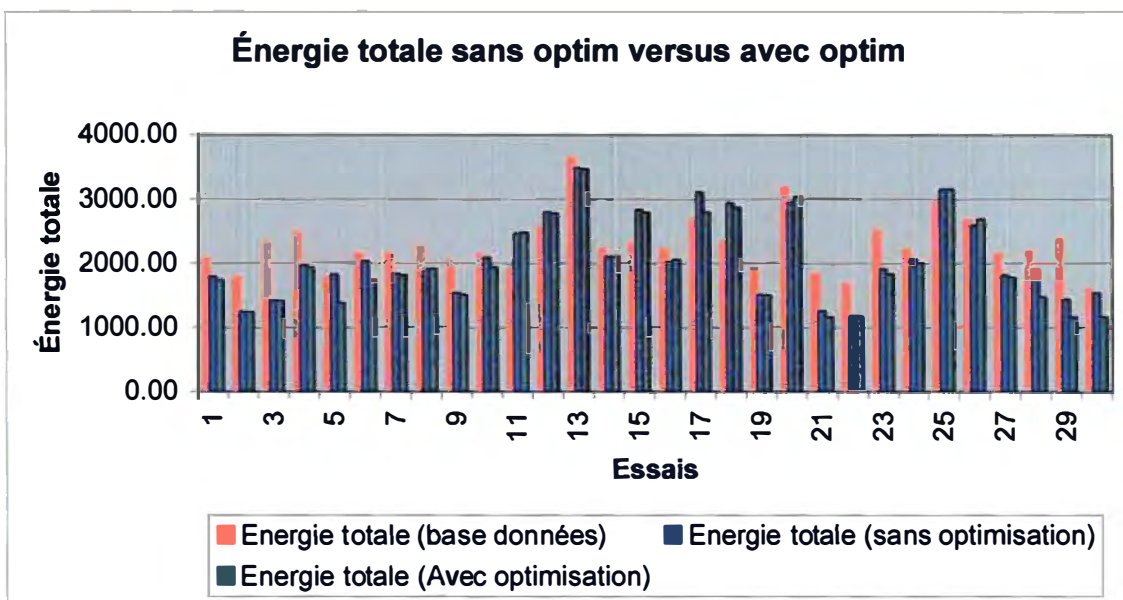


Figure 4.7 Comparaison entre les différentes énergies

On remarque premièrement que pour 23/30 essais, il y a diminution de l'énergie totale avec contrôle de l'intensité mais sans optimisation, comparativement à l'énergie totale obtenue dans la base de données. Ceci reproduit donc les résultats de la figure 4.2. Deuxièmement, si on compare l'énergie sans optimisation et l'énergie obtenue avec optimisation de cette dernière on observe une diminution pour 22/30 essais. On pousse l'analyse de ces diminutions en calculant des ratios. La figure suivante présente le ratio entre l'énergie totale de la base de données et l'énergie obtenue sans optimisation de cette dernière, obtenue par la relation suivante.

$$\frac{\text{énergie base données} - \text{énergie sans optimisation}}{\text{énergie base données}}$$

Équ. 4.4

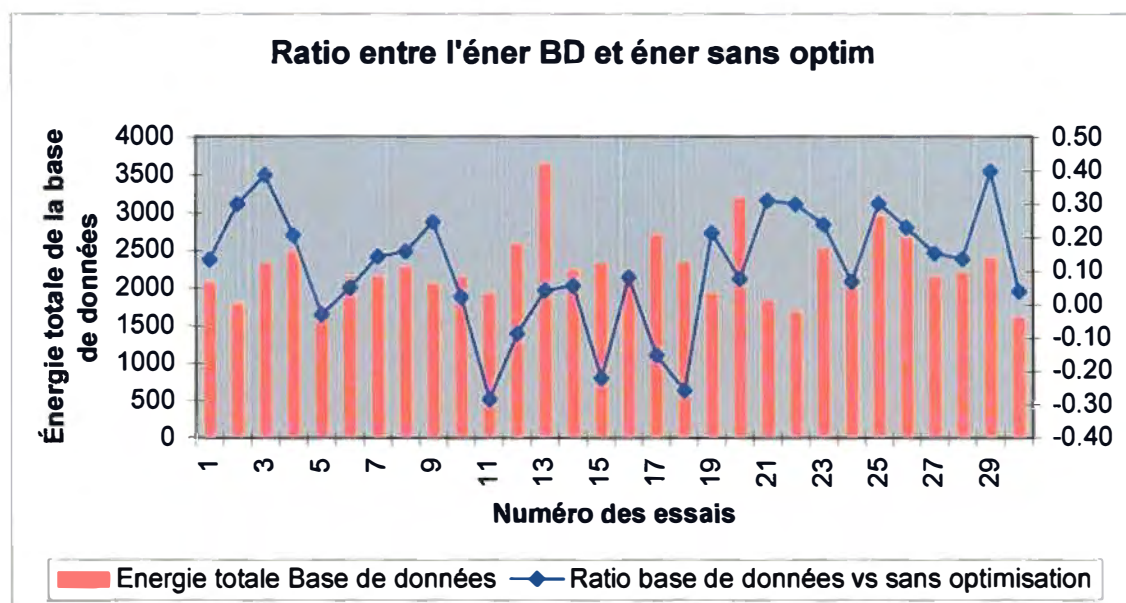


Figure 4.8 Ratio entre l'énergie de la base de données et l'énergie sans optimisation

Pour onze (11) essais, on obtient une diminution de l'application de l'énergie entre 40% et 20%.

Pour cinq (5) essais, on obtient une diminution entre 10% et 20%.

Pour huit (8) essais, on obtient une diminution entre 2% et 10%.

À l'inverse, pour les six (6) essais, on obtient une augmentation de l'énergie et ce malgré l'optimisation. Cette hausse se situe entre 15% et 30% pour quatre (4) essais et entre 1% et 10% pour deux (2) essais.

Si on poursuit l'analyse, on calcule ensuite un ratio entre l'énergie appliquée sans optimisation versus avec optimisation, toutes deux avec contrôle de l'intensité, selon l'équation suivante :

$$\frac{\text{énergie sans optimisation} - \text{énergie avec optimisation}}{\text{énergie sans optimisation}} \quad \text{Équ. 4.5}$$

On obtient les résultats qui sont présentés à la figure 4.9.

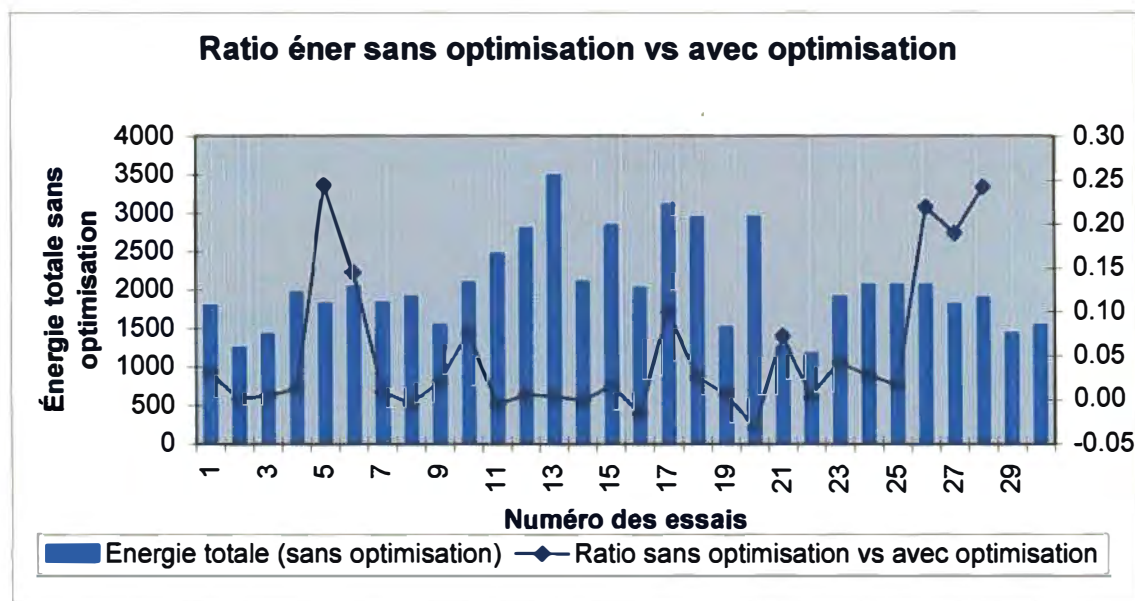


Figure 4.9 Ratio entre l'énergie sans optimisation et l'énergie avec optimisation, tous deux avec contrôle de l'intensité

Pour huit (8) essais, on observe une diminution significative de l'énergie entre 5% et 30% lorsqu'il y a optimisation de cette dernière.

Pour onze (11) essais, la diminution de l'énergie est moindre, elle se situe entre 1% et 5%. Pour sept (7) essais, il n'y a pas de diminution de l'énergie. Enfin pour quatre (4)

essais on observe une augmentation de l'énergie qui se situe entre 1% et 4%. Donc globalement, on obtient une diminution d'énergie additionnelle lorsqu'il y a optimisation de cette dernière

4.4.3 Effet de l'optimisation de l'énergie sur les propriétés de la pâte

On doit vérifier l'impact de cette diminution d'énergie sur les qualités de la pâte, il s'agit des résultats présentés à la figure 4.10.

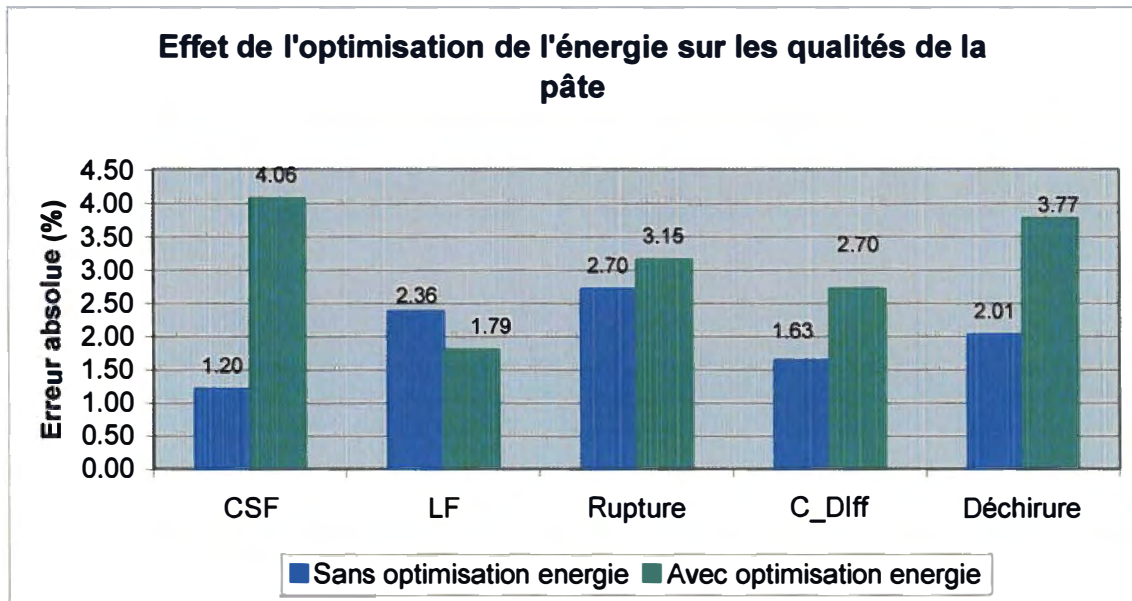


Figure 4.10 Effet de l'optimisation de l'énergie sur les qualités de la pâte

Si on calcule l'erreur absolue pour chacune des propriétés on observe :

On s'éloigne du point de consigne pour quatre (4) propriétés soit le CSF, la rupture, le coefficient de diffusion et la déchirure.

On s'approche du point de consigne pour une propriété c'est à dire la longueur de fibre.

Par la suite, on peut déterminer si la diminution de l'énergie observée par l'optimisation des énergies compense la diminution des propriétés, c'est ce qui est présenté au tableau 4.3.

Tableau 4.3 Impact de l'optimisation de l'énergie sur la qualité de pâte

	Énergie	CSF	LF	Rupture	C Diff	Déchirure
Moyenne	12.72	-3.60	1.21	3.13	-0.96	1.23
Minimum (augmentation)	-22.56	-36.73	-3.18	-0.26	-15.27	-18.10
Maximum (diminution)	51.13	6.64	9.95	18.90	15.28	11.76

Pour l'énergie totale consommée, on obtient en moyenne une **diminution de 12.72%** lorsque l'énergie est optimisée.

Pour le CSF, on observe une **augmentation moyenne de 3.60%** de sa valeur.

Pour la longueur de fibre, on obtient une **diminution moyenne de 1.21%**.

Pour la rupture, il y a une **diminution moyenne de 3.13%**.

Pour le coefficient de diffusion de la lumière, les résultats sont très variables puisqu'on remarque une augmentation maximale de 15.27% et une diminution maximale de la propriété de 15.28%.

Pour la déchirure, encore une fois les résultats sont très variables puisqu'on remarque une augmentation de 18.10% de la propriété et une diminution de 11.76%.

Il y a donc un potentiel pour insérer une optimisation des énergies, puisqu'il est possible d'obtenir une diminution. Par contre, la diminution se fait au détriment de certaines propriétés.

4.4.4 Effet de l'optimisation de l'énergie sur le ratio d'énergie

On constate enfin que l'optimisation a tendance à maintenir un ratio d'énergie au premier stade faible, donc qu'il faudrait appliquer légèrement plus d'énergie au secondaire qu'au primaire (figure 4-11).

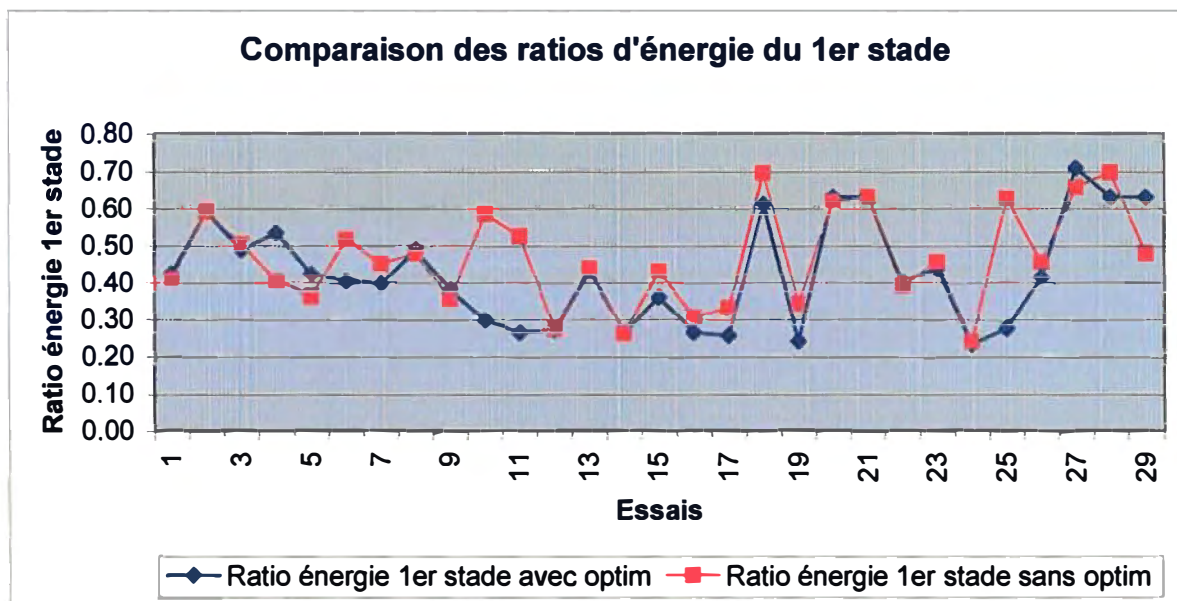


Figure 4.11 Comparaison des ratios d'énergie du premier stade

Conclusions

La théorie liée aux notions de l'intensité a été étudiée. L'intensité est une mesure de la façon dont l'énergie spécifique est appliquée. Son contrôle est donc complémentaire à l'énergie spécifique. Il est possible de faire varier l'intensité en modifiant le temps de résidence de la pâte dans le raffineur soit en utilisant un nouveau patron de plaques, en faisant varier la vitesse de rotation des disques ou encore en modifiant la consistance de la pâte. Il s'agit d'un contrôle qui n'est pas utilisé dans toutes les usines, mais qui, après analyse de la notion, devrait avoir la même importance que le contrôle de l'énergie spécifique.

À partir de la théorie de Miles et May [15] et des équations développées dans le mémoire de Lanouette [16], l'intensité de raffinage a été calculée pour l'ensemble des essais effectués au CIPP en collaboration avec le CRIQ et les tests qui se sont déroulés à l'hiver 2005 et l'hiver 2006.

À partir de la base de données, plusieurs combinaisons des variables liés au PTM ont été essayées afin de vérifier s'il est possible d'obtenir un modèle mathématique. Le PLS Global combine les variables du premier et deuxième stade, il y a eu division des données selon le pourcentage de chacune des essences afin de mieux visualiser les données, par la suite les données 100% bouleau ont été éliminées et enfin les variables intensité (1^{er} et 2^{ième} stades) ont été mises de côté. Les mêmes essais ont été effectués pour les données provenant exclusivement du 1^{er} stade et les données provenant du 2^{ième} stade. Le PLS Global s'est avéré être le meilleur modèle avec six (6) composantes, $R^2 = 76\%$ et $Q^2 = 73\%$.

Sans l'utilisation des variables intensité pour les 1^{er} et 2^{ième} stades, nous obtenons un modèle à quatre (4) composantes, $R^2 = 75\%$ et $Q^2 = 72\%$. Donc, malgré l'ajout de l'intensité le modèle PLS n'est pas plus performant de façon significative.

Les erreurs ont été calculées entre les données obtenues et les valeurs prédites afin de quantifier l'efficacité de notre modèle de prédiction PLS Global. On observe que les valeurs prédites ne sont pas plus précises lorsqu'on utilise les données de l'intensité. Malgré ce résultat, les variables intensité sont conservées dans le modèle. L'hypothèse suivante est posée : l'énergie spécifique joue un grand rôle dans l'atteinte des propriétés de la pâte tandis que le contrôle de l'intensité peut être comparé à un calibrage fin. Son utilisation aura donc un effet sur l'énergie spécifique consommée et sur les propriétés de la pâte.

Au départ, deux modèles prédictifs ont été construits. La valeur à minimiser est toujours la même, soit la sommation normalisée des différences entre la valeur prédite et le point de consigne spécifié pour les cinq (5) propriétés. La différence entre les deux simulations est que la première fixe quatre (4) variables à la sortie de l'optimisation, soit l'énergie et l'intensité aux 1^{er} et 2^{ième} stades. La deuxième optimisation ne comportera que deux valeurs à la sortie de l'optimisation, soit l'énergie aux 1^{er} et 2^{ième} stades.

Les résultats basés sur trente (30) essais montrent que pour vingt-trois (23) d'entre eux, les valeurs d'énergie sont plus basses lorsqu'il y a utilisation du modèle prédictif avec contrôle de l'intensité. Ceci suggère que les pâtes auraient pu être obtenues à énergie moindre si l'intensité avait fait l'objet d'un contrôle.

Par la suite, on compare les énergies totales obtenues avec le contrôle de l'intensité versus sans contrôle de l'intensité. En calculant leur ratio, on constate que pour vingt-quatre (24) essais il y a variation de $\pm 10\%$ de l'énergie. Pour un (1) essais, on observe une diminution de 19% lorsqu'il y a contrôle de l'énergie. Pour cinq (5) essais, on observe une diminution entre 15 et 30% de l'énergie lorsqu'il n'y a pas de contrôle de l'intensité. Donc à partir de ces résultats nous ne pouvons toujours pas conclure que le contrôle de l'intensité permet une diminution de l'énergie spécifique.

Une analyse de l'effet du contrôle de l'intensité sur les propriétés de la pâte a ensuite été réalisée. On calcule l'erreur absolue entre le point de consigne et la valeur obtenue par le

modèle prédictif. On conclut que le contrôle de l'intensité permet d'améliorer les propriétés de la pâte et ce pour les cinq (5) propriétés, en particulier la déchirure et la rupture.

Finalement, comme il n'y a pas eu de diminution significative de l'énergie spécifique avec contrôle de l'intensité, nous avons apporté des modifications au modèle prédictif. Deux nouvelles valeurs d'erreurs ont été ajoutées aux cinq (5) erreurs calculées. Il s'agit de la différence entre l'énergie calculée par le module d'optimisation et le minimum obtenu dans la base de données pour le premier et le deuxième stade de raffinage. Trente (30) nouveaux essais ont été analysés. Pour huit (8) essais, on observe une diminution significative de l'énergie entre 5% et 30% lorsqu'il y a optimisation de cette dernière. Pour onze (11) essais, la diminution de l'énergie est moindre, elle se situe entre 1% et 5%. Pour sept (7) essais, il n'y a pas de diminution de l'énergie. Enfin pour quatre (4) essais on observe une augmentation de l'énergie qui se situe entre 1% et 4%. Donc globalement, on obtient une diminution d'énergie additionnelle lorsqu'il y a optimisation de cette dernière.

Nous avons alors analysé les effets de cette optimisation de l'énergie sur les propriétés de la pâte. Si on calcule l'erreur absolue pour chacune des propriétés on observe que l'on s'éloigne du point de consigne pour quatre (4) propriétés soit le CSF, la rupture, le coefficient de diffusion et la déchirure. On s'approche du point de consigne pour une propriété c'est à dire la longueur de fibre. Si on pousse l'analyse, on observe qu'une diminution moyenne de 12,72 % de l'énergie totale de raffinage est possible. Cette variation affecte les propriétés de la façon suivante : pour le CSF une augmentation moyenne de 3,06%, pour la longueur de fibre une diminution de 1,21%, pour la rupture une diminution de 3,13%. Pour les deux propriétés restantes, les résultats sont très variables. Pour le coefficient de diffusion de la lumière, une augmentation de 15,27% et une diminution de 15,28%. Pour la déchirure, encore une fois les résultats sont très variables puisqu'on remarque une augmentation de 18,10% et une diminution de 11,76%.

À la lumière de ces résultats, l'optimisation des énergies du 1^{er} et 2^{ème} stade semble contenir un bon potentiel. Il serait intéressant de modifier les poids de chacune des valeurs dirigées vers le module d'optimisation, pour investiguer la préférence d'une diminution d'énergie au détriment de certaines propriétés de pâte. À l'utilisateur de fixer ses propres objectifs.

Est-il possible d'utiliser les conclusions de cette recherche en industrie? Tout dépend des contrôles utilisés dans chacune des usines. Premièrement, le contrôle de l'intensité doit être enseigné et implanté. Toutes les données sont disponibles, il ne reste qu'à les colliger, programmer le calcul et rendre disponible le résultat. Deuxièmement, il est nécessaire d'obtenir l'information liée à la qualité des copeaux, là encore la disponibilité des données varie d'un endroit à l'autre. Finalement, il faut construire un PLS afin de reproduire spécifiquement ce qui se produit à l'usine, les ingénieurs de procédé des usines utilisent déjà cet outil mathématique, on peut également faire appel à un consultant. Donc en résumé, il est possible d'utiliser les conclusions de cette recherche de en industrie mais la faisabilité d'implantation dépendra des contrôles qui sont déjà en place.

Bibliographie

1. Stationwala, M. *Theory of Refining*. in *Mechanical pulping course*. 1996. Crowne Plaza Château Lacombe, Edmonton (AB).
2. Sundholm, J., *Mechanical pulping*. Papermaking Science and Technology, ed. J.P. Gullichsen, Hannu. Vol. 5. 1999, Helsinki: Fapet Oy. 427.
3. Karnis, A., et al., *What Happens in Refining*. (2). Pulp and Paper Canada, 1986. **87**(11): p. 54-59, 61-62 T416-423.
4. Sabourin, M. and G. Harris, *Energy efficiency and long fibre quality play an important role in the growth of RTS capacity*. International Mechanical Pulping Conference, Proceedings, Oslo, Norway: p. 202-208 (2005).
5. Bedard, P., F. Ding, and M. Benaoudia, *Improvement of the management of the wood yard by online wood chips characterization*. Les Papetières du Québec, 2003. **14**(5): p. 25-28.
6. Sundstrom, L., R. Tonneson, and L. Nilsson, *Multivariate monitoring of a chip feeding process*. Process Control News Pulp Paper Indus., 2001. **21**(8): p. 7-8.
7. Lanouette, R., M. Benaoudia, and P. Bédard, *Amélioration de la stabilité des raffineurs et de la qualité de la pâte par un suivi des copeaux*, Congrès Francophone du Papier, Proceedings, 14-16 mai, Québec, 7 pages, (2003).
8. Fuhr, B.J., et al., *Wood species for advanced process control*. International Mechanical Pulping Conference, Proceedings, Québec, Canada, 6 pages, (2003).
9. Lanouette, R., K.-C. Yang, and K.-N. Law. *A new approach to mechanical pulping - Pretreatment of chips by normal-to-grain compression prior to refining*. International Mechanical Pulping Conference, Proceedings: p 229-233 (1999).
10. Danforth, D.W., *Effect of Refining Parameters on Paper Properties*. Paper Technol. Ind., 1987. **28**(5): p. 547-548, 550, 553.
11. Poirier, D.M., W.D., *The measurement of pulp distribution and residence time in a chip refiner*. PPR 799, June 1990.
12. Miles, K.B. and A. Karnis, *Response of Mechanical and Chemical Pulps to Refining*. Tappi J., 1991. **74**(1): p. 157-164.

13. Miles, K.B. and W.D. May. *Flow of Pulp in Chip Refiners*. J. Pulp and Pap. Sci., 1990. 16(2): p. J63-72.
14. Miles, K.B. and W.D. May, *Predicting the Performance of a Chip Refiner; a Constitutive Approach*. J. Pulp and Pap. Sci., 1993. 19(6): p. J268-274.
15. Miles, K.B., *Simplified Method for Calculating the Residence Time and Refining Intensity in a Chip Refiner*. Pap. Puu, 1991. 73(9): p. 852-857.
16. Lanouette, R., *Raffinage de copeaux provenant de cuissons au bisulfite (procédé à très haut rendement): optimisation et modélisation*. UQTR - Université du Québec à Trois-Rivières, 1993: p. 156
17. Harkonen, E., et al., *A theoretical model for a TMP-refiner*. International Mechanical Pulping Conference, Proceedings, Stockholm, Sweden: p. 95-102 (1997).
18. Harkonen, E., et al. *Fiber development in TMP main line*. International Mechanical Pulping Conference, Proceedings, Québec, Canada: p. 171-178 (2003).
19. Alami, R., et al., *Impact of Refining Intensity on Energy Reduction in Commercial Refiners; Effect of Primary-Stage Consistency*. Tappi J., 1997. 80(1): p. 159, 166, 173, 185-193.
20. Sabourin, M., S. MacKenzie, and N. Urquhart, *Evaluation of two-stage and three-stage refining processes for production of TMP pulp for SCA+ paper - Similar total specific energy give similar characteristics*. Pulp and Paper Canada, 1997. 98(12): p. 130-134.
21. Miles, K.B., W.D. May, and A. Karnis. *Refining Intensity, Energy Consumption, and Pulp Quality in Two-Stage Chip Refining*. TAPPI Pulping Conf. (Toronto) Proc. (Book 2): p. 681-690 (1990).
22. Sabourin, M. and R. Musselman, *Pushing the limits of thermomechanical efficiency in each refining stage - A combination of process and refiner plate development*. Annu. Meet. Tech. Sect. Can. Pulp. Pap. Assoc., Prepr. C, 86th Annual Meeting., Montréal, Québec, Canada: p. C1-C10 (2000).

23. Sabourin, M., L. Robertsen, and S. Liukkonen. *TMP from compressed pine and spruce chips*. International Mechanical Pulping Conference, Proceedings, Helsinki, Finland: p. 353-360 (2001).
24. Sabourin, M., J. Aichinger, and N. Wiseman. *Effect of increasing wood chip defibration on thermomechanical and chemi-thermomechanical refining efficiency*. International Mechanical Pulping Conference, Proceedings, Quebec, Canada: p.163-170 (2003).
25. Miles, K.B. and I. Omholt, *Improving the strength properties of TMP*. Pulp and Paper Can., 2004. **105**(5): p. 46-51.
26. Cannell, E., *Mechanical pulping technologies focus on reducing refining energy*. Pulp and Paper, 1999. **73**(5): p. 63-70.
27. Ouellet, D., et al. *Comparison of slotted screen and hydrocyclone fractionation systems for the manufacture of newsprint TMP*. International Mechanical Pulping Conference, Quebec, Canada: p. 21-32, (2003).
28. Shagaev, O. and B. Bergström, *Advanced process for production of high quality mechanical pulps for value-added paper grades*. International Mechanical Pulping Conference: 11 pages, (2005).
29. Fostokjian, R., J. Aird, and P. Vuorio, *Development results in reducing refining energy consumption at Tembec paper group - Spruce Falls operations*. International Mechanical Pulping Conference: 4 pages, (2006).
30. Lawton, T. *Innovative technology advances TMP energy savings*. International Mechanical Pulping Conference, Québec, Canada: p. 449-453, (2003).
31. Vuorio, P. and P. Bergquist, *Session 6: Advancements in refining and grinding processes. Technology of new refiner segments for optimizing the fiber quality and energy consumption in production of refined wood Pulps*. Wochenbl Papierfabr, 2002. **130**(7): p. 419.
32. Strand, B.C. *View on control development*. International Mechanical Pulping Conference, Proceedings, Helsinki, Finland: p.477-480 (2001).
33. Sidhu, M.S., et al. *Advanced control and sensor technology in mechanical pulping*. 59th Appita Annual Conference and Exhibition, incorporating the 13th

- ISWFPC: International Symposium on Wood, Fibre and Pulping Chemistry, Proceedings, Auckland, New Zealand: p. 45-48 (2005).
34. Laperriere, L. and L. Wasik, *Modeling and simulation of pulp and paper quality characteristics using neural networks*. Tappi peer-reviewed paper, 2001. **84**(10): p. 1-15.
 35. Puolakka, H.-M. and U. Kortela. *Applicability of the chip compaction model in the controlling of the digester*. Control Systems 2004 Conference, June 14-18 2004, Quebec City, Quebec, Canada: p. 13-16 (2004).
 36. Lama, I., M. Perrier, and P. Stuart, *Controllability analysis of a TMP-newsprint refining process*. Pulp and Paper Canada, 2006. **107**(10): p. 44-48.
 37. Kortelainen, J., A. Salopuro, and J. Halttunen, *Prediction of TMP quality properties with on-line measurements*. Process Control News Pulp Paper Indus., 2001. **21**(8): p. 505-512.
 38. Ding, F., et al., *Wood chip physical quality definition and measurement*. Pulp and Paper Canada, 2005. **106**(2): p. 27-32.
 39. Lanouette, R., P. Bedard, and M. Benaoudia. *Effect of woodchips characteristics on the pulp and paper properties by the use of pls analysis*. Annu. Meet. Tech. Sect. Can. Pulp Pap. Assoc., Prepr. B, 90th Annual meeting - Pulp and Paper Technical Association of Canada, 5 pages, (2004).
 40. Li, Y., L. Laperriere, and R. Lanouette. *Including chip quality parameters for model predictive control of TMP pulp properties*. TAPPI Fall Technical Conference: Engineering and Pulping, Proceeding, Atlanta, GA, United States: p.315-324 (2004).
 41. Laperriere, L., et al., *Chip properties analysis for predicting bleaching agent requirements for TMP pulps*. Tappi Journal, 2004. **3**(12): p. 23-27.
 42. Retsina, T., and P. Patrionis, *Neural network model-based paper machine marginal cost curves*. Compte-rendu de Tappi Fall Technical Conference: Engineering and Pulping, Environmental. Chicago, Michigan, United States: (2005).

43. Retsina, T., M. Broussard et al, *Energy monitoring keeps cost down in Louisiana Mill*. Compte rendu de Tappi Fall Technical Conference: Engineering and Pulping, Proceeding, Atlanta, GA, United States: (2004).

Annexe I

Base de données complète contenant les résultats des essais de raffinage effectués en usine pilote.

Données du premier stade

CopeauxID	PourcEP	PourcSAP	PourcPG	PourcBOU	Siccite	Dens_Bas
A01	0	20	40	40	52,14	0,45
A01	0	20	40	40	52,14	0,45
A01	0	20	40	40	52,14	0,45
A01	0	20	40	40	52,14	0,45
A11	0	0	100	0	51,87	0,44
A11	0	0	100	0	51,87	0,44
A11	0	0	100	0	51,87	0,44
A11	0	0	100	0	51,87	0,44
A12	0	0	0	100	58,43	0,51
A12	0	0	0	100	58,43	0,51
A12	0	0	0	100	58,43	0,51
A12	0	0	0	100	58,43	0,51
A02	100	0	0	0	47,08	0,38
A02	100	0	0	0	47,08	0,38
A02	100	0	0	0	47,08	0,38
A02	100	0	0	0	47,08	0,38
A03	0	100	0	0	45,17	0,33
A03	0	100	0	0	45,17	0,33
A03	0	100	0	0	45,17	0,33
A03	0	100	0	0	45,17	0,33
A04	60	0	0	40	49,54	0,43
A04	60	0	0	40	49,54	0,43
A04	60	0	0	40	49,54	0,43
A04	60	0	0	40	49,54	0,43
A05	0	60	40	0	44,81	0,38
A05	0	60	40	0	44,81	0,38
A05	0	60	40	0	44,81	0,38
A05	0	60	40	0	44,81	0,38
A06	60	0	40	0	46,92	0,41
A06	60	0	40	0	46,92	0,41
A06	60	0	40	0	46,92	0,41
A06	60	0	40	0	46,92	0,41
A07	0	60	0	40	47,43	0,40
A07	0	60	0	40	47,43	0,40
A07	0	60	0	40	47,43	0,40
A07	0	60	0	40	47,43	0,40
A08	20	0	40	40	52,85	0,46
A08	20	0	40	40	52,85	0,46
A08	20	0	40	40	52,85	0,46
A08	20	0	40	40	52,85	0,46
A09	100	0	0	0	43,62	0,38
A09	100	0	0	0	43,62	0,38
A09	100	0	0	0	43,62	0,38
A09	100	0	0	0	43,62	0,38
A10	0	100	0	0	40,10	0,33
A10	0	100	0	0	40,10	0,33
A10	0	100	0	0	40,10	0,33

Données du premier stade

A10	0	100	0	0	40,10	0,33
B01	0	20	40	40	46,14	0,45
B01	0	20	40	40	46,14	0,45
B01	0	20	40	40	46,14	0,45
B01	0	20	40	40	46,14	0,45
B02	100	0	0	0	40,16	0,38
B02	100	0	0	0	40,16	0,38
B02	100	0	0	0	40,16	0,38
B02	100	0	0	0	40,16	0,38
B03	0	100	0	0	35,04	0,33
B03	0	100	0	0	35,04	0,33
B03	0	100	0	0	35,04	0,33
B03	0	100	0	0	35,04	0,33
B04	60	0	0	40	45,64	0,43
B04	60	0	0	40	45,64	0,43
B04	60	0	0	40	45,64	0,43
B04	60	0	0	40	45,64	0,43
B05	0	60	40	0	38,61	0,38
B05	0	60	40	0	38,61	0,38
B05	0	60	40	0	38,61	0,38
B05	0	60	40	0	38,61	0,38
B06	60	0	40	0	41,69	0,41
B06	60	0	40	0	41,69	0,41
B06	60	0	40	0	41,69	0,41
B06	60	0	40	0	41,69	0,41
B07	0	60	0	40	42,57	0,40
B07	0	60	0	40	42,57	0,40
B07	0	60	0	40	42,57	0,40
B07	0	60	0	40	42,57	0,40
B08	20	0	40	40	47,17	0,46
B08	20	0	40	40	47,17	0,46
B08	20	0	40	40	47,17	0,46
B08	20	0	40	40	47,17	0,46
B09	100	0	0	0	40,16	0,38
B09	100	0	0	0	40,16	0,38
B09	100	0	0	0	40,16	0,38
B09	100	0	0	0	40,16	0,38
B10	0	100	0	0	35,04	0,33
B10	0	100	0	0	35,04	0,33
B10	0	100	0	0	35,04	0,33
B10	0	100	0	0	35,04	0,33
B11	0	0	100	0	43,98	0,44
B11	0	0	100	0	43,98	0,44
B11	0	0	100	0	43,98	0,44
B11	0	0	100	0	43,98	0,44
B12	0	0	0	100	53,87	0,51
B12	0	0	0	100	53,87	0,51
B12	0	0	0	100	53,87	0,51
B12	0	0	0	100	53,87	0,51

Données du premier stade

C01	0	20	40	40	42,90	0,45
C01	0	20	40	40	42,90	0,45
C01	0	20	40	40	42,90	0,45
C01	0	20	40	40	42,90	0,45
C02	100	0	0	0	38,29	0,38
C02	100	0	0	0	38,29	0,38
C02	100	0	0	0	38,29	0,38
C02	100	0	0	0	38,29	0,38
C03	0	100	0	0	33,23	0,33
C03	0	100	0	0	33,23	0,33
C03	0	100	0	0	33,23	0,33
C03	0	100	0	0	33,23	0,33
C04	60	0	0	40	42,36	0,43
C04	60	0	0	40	42,36	0,43
C04	60	0	0	40	42,36	0,43
C04	60	0	0	40	42,36	0,43
C05	0	60	40	0	36,81	0,38
C05	0	60	40	0	36,81	0,38
C05	0	60	40	0	36,81	0,38
C05	0	60	40	0	36,81	0,38
C06	60	0	40	0	39,84	0,41
C06	60	0	40	0	39,84	0,41
C06	60	0	40	0	39,84	0,41
C06	60	0	40	0	39,84	0,41
C07	0	60	0	40	39,33	0,40
C07	0	60	0	40	39,33	0,40
C07	0	60	0	40	39,33	0,40
C07	0	60	0	40	39,33	0,40
C08	20	0	40	40	43,91	0,46
C08	20	0	40	40	43,91	0,46
C08	20	0	40	40	43,91	0,46
C08	20	0	40	40	43,91	0,46
C09	100	0	0	0	38,29	0,38
C09	100	0	0	0	38,29	0,38
C09	100	0	0	0	38,29	0,38
C09	100	0	0	0	38,29	0,38
C10	0	100	0	0	33,23	0,33
C10	0	100	0	0	33,23	0,33
C10	0	100	0	0	33,23	0,33
C10	0	100	0	0	33,23	0,33
C11	0	0	100	0	42,17	0,44
C11	0	0	100	0	42,17	0,44
C11	0	0	100	0	42,17	0,44
C11	0	0	100	0	42,17	0,44
C12	0	0	0	100	48,47	0,51
C12	0	0	0	100	48,47	0,51
C12	0	0	0	100	48,47	0,51
C12	0	0	0	100	48,47	0,51
P01	100	0	0	0	52,29	0,40

Données du premier stade

P01	100	0	0	0	52,29	0,40
P01	100	0	0	0	52,29	0,40
V01	100	0	0	0	52,29	0,40
V01	100	0	0	0	52,29	0,40
V01	100	0	0	0	52,29	0,40
V01	100	0	0	0	52,29	0,40
V01	100	0	0	0	52,29	0,40
V02	100	0	0	0	52,29	0,40
V02	100	0	0	0	52,29	0,40
V02	100	0	0	0	52,29	0,40
V02	100	0	0	0	52,29	0,40
V03	0	100	0	0	50,57	0,32
V03	0	100	0	0	50,57	0,32
V03	0	100	0	0	50,57	0,32
V04	0	100	0	0	50,57	0,32
V04	0	100	0	0	50,57	0,32
V04	0	100	0	0	50,57	0,32
V04	0	100	0	0	50,57	0,32
V05	100	0	0	0	63,33	0,43
V05	100	0	0	0	63,33	0,43
V05	100	0	0	0	63,33	0,43
V05	100	0	0	0	63,33	0,43
V06	100	0	0	0	63,33	0,43
V06	100	0	0	0	63,33	0,43
V06	100	0	0	0	63,33	0,43
V06	100	0	0	0	63,33	0,43
V07	100	0	0	0	63,33	0,43
V07	100	0	0	0	63,33	0,43
V07	100	0	0	0	63,33	0,43
V07	100	0	0	0	63,33	0,43
V08	0	100	0	0	56,30	0,35
V08	0	100	0	0	56,30	0,35
V08	0	100	0	0	56,30	0,35
V08	0	100	0	0	56,30	0,35
V09	0	100	0	0	56,30	0,35
V09	0	100	0	0	56,30	0,35
V09	0	100	0	0	56,30	0,35
V09	0	100	0	0	56,30	0,35
V10	0	100	0	0	56,30	0,35
V10	0	100	0	0	56,30	0,35
V10	0	100	0	0	56,30	0,35
V10	0	100	0	0	56,30	0,35
P01	100	0	0	0	52,29	0,40
P01	100	0	0	0	52,29	0,40
P01	100	0	0	0	52,29	0,40
Q01	0	100	0	0	50,57	0,32
Q01	0	100	0	0	50,57	0,32
Q01	0	100	0	0	50,57	0,32
Q01	0	100	0	0	50,57	0,32
P02	100	0	0	0	58,18	0,40

Données du premier stade

P02	100	0	0	0	58,18	0,40
P02	100	0	0	0	58,18	0,40
P02	100	0	0	0	58,18	0,40
Q02	0	100	0	0	44,85	0,32
Q02	0	100	0	0	44,85	0,32
Q02	0	100	0	0	44,85	0,32
Q02	0	100	0	0	44,85	0,32
S01	100	0	0	0	85,80	0,40
S01	100	0	0	0	85,80	0,40
S01	100	0	0	0	85,80	0,40
S01	100	0	0	0	85,80	0,40
S02	100	0	0	0	78,10	0,40
S02	100	0	0	0	78,10	0,40
S02	100	0	0	0	78,10	0,40
S02	100	0	0	0	78,10	0,40
S03	100	0	0	0	76,70	0,40
S03	100	0	0	0	76,70	0,40
S03	100	0	0	0	76,70	0,40
S03	100	0	0	0	76,70	0,40
S04	0	100	0	0	80,90	0,32
S04	0	100	0	0	80,90	0,32
S04	0	100	0	0	80,90	0,32
S04	0	100	0	0	80,90	0,32
S05	0	100	0	0	86,90	0,32
S05	0	100	0	0	86,90	0,32
S05	0	100	0	0	86,90	0,32
S05	0	100	0	0	86,90	0,32
S06	0	100	0	0	78,60	0,32
S06	0	100	0	0	78,60	0,32
S06	0	100	0	0	78,60	0,32
S06	0	100	0	0	78,60	0,32
S07	100	0	0	0	80,90	0,43
S07	100	0	0	0	80,90	0,43
S07	100	0	0	0	80,90	0,43
S07	100	0	0	0	80,90	0,43
S08	100	0	0	0	78,60	0,43
S08	100	0	0	0	78,60	0,43
S08	100	0	0	0	78,60	0,43
S08	100	0	0	0	78,60	0,43
S09	0	100	0	0	85,50	0,35
S09	0	100	0	0	85,50	0,35
S09	0	100	0	0	85,50	0,35
S09	0	100	0	0	85,50	0,35
S10	0	100	0	0	83,80	0,35
S10	0	100	0	0	83,80	0,35
S10	0	100	0	0	83,80	0,35
S10	0	100	0	0	83,80	0,35
P03	100	0	0	0	52,63	0,40
P03	100	0	0	0	52,63	0,40

Données du premier stade

P03	100	0	0	0	52,63	0,40
P03	100	0	0	0	52,63	0,40
Q03	0	100	0	0	37,84	0,32
Q03	0	100	0	0	37,84	0,32
Q03	0	100	0	0	37,84	0,32
Q03	0	100	0	0	37,84	0,32
Y1	100	0	0	0	40,01	
Y1	100	0	0	0	40,01	
Y1	100	0	0	0	40,01	
Y1	100	0	0	0	40,01	
Y2	100	0	0	0	40,01	
Y2	100	0	0	0	40,01	
Y2	100	0	0	0	40,01	
Y2	100	0	0	0	40,01	
Y3	100	0	0	0	40,01	
Y3	100	0	0	0	40,01	
Y3	100	0	0	0	40,01	
Y3	100	0	0	0	40,01	
Y4	100	0	0	0	40,01	
Y4	100	0	0	0	40,01	
Y4	100	0	0	0	40,01	
Y4	100	0	0	0	40,01	
Y5	100	0	0	0	40,01	
Y5	100	0	0	0	40,01	
Y5	100	0	0	0	40,01	
Y5	100	0	0	0	40,01	
Y6	100	0	0	0	40,01	
Y6	100	0	0	0	40,01	
Y6	100	0	0	0	40,01	
Y6	100	0	0	0	40,01	
Y7	100	0	0	0	40,01	
Y7	100	0	0	0	40,01	
Y7	100	0	0	0	40,01	
Y7	100	0	0	0	40,01	
Y8	100	0	0	0	40,01	
Y8	100	0	0	0	40,01	
Y8	100	0	0	0	40,01	
Y8	100	0	0	0	40,01	
Y9	100	0	0	0	40,01	
Y9	100	0	0	0	40,01	
Y9	100	0	0	0	40,01	
Y9	100	0	0	0	40,01	
Y10	100	0	0	0	40,01	
Y10	100	0	0	0	40,01	
Y10	100	0	0	0	40,01	
Y10	100	0	0	0	40,01	
Y11	100	0	0	0	40,01	
Y11	100	0	0	0	40,01	
Y11	100	0	0	0	40,01	

Données du premier stade

Y11	100	0	0	0	40,01	
Y12	100	0	0	0	40,01	
Y12	100	0	0	0	40,01	
Y12	100	0	0	0	40,01	
Y12	100	0	0	0	40,01	
Y13	100	0	0	0	40,01	
Y13	100	0	0	0	40,01	
Y13	100	0	0	0	40,01	
Y13	100	0	0	0	40,01	
Y14	100	0	0	0	40,01	
Y14	100	0	0	0	40,01	
Y14	100	0	0	0	40,01	
Y14	100	0	0	0	40,01	
Y15	100	0	0	0	40,01	
Y15	100	0	0	0	40,01	
Y15	100	0	0	0	40,01	
Y15	100	0	0	0	40,01	
1A-6	50	25	25	0	4545,00	0,39825
1A-8	50	25	25	0	4545,00	0,39825
1B-6	50	25	25	0	4545,00	0,39825
1B-8	50	25	25	0	4545,00	0,39825
2A-7	25	25	0	50	4598,75	0,44
2A-9	25	25	0	50	4598,75	0,44
2B-6	25	25	0	50	4598,75	0,44
2B-9	25	25	0	50	4598,75	0,44
3A-7	25	25	25	25	4633,75	0,4195
3A-9	25	25	25	25	4633,75	0,4195
3B-7	25	25	25	25	4633,75	0,4195
3B-9	25	25	25	25	4633,75	0,4195
4A-9	70	0	15	15	4462,50	0,4192
4A-10	70	0	15	15	4462,50	0,4192
4B-5	70	0	15	15	4462,50	0,4192
4B-8	70	0	15	15	4462,50	0,4192
5A-6	35	35	0	25	4327,75	0,39505
5A-9	35	35	0	25	4327,75	0,39505
5B-1	35	35	0	25	4327,75	0,39505
5B-6	35	35	0	25	4327,75	0,39505
6A-6	50	25	0	25	4510,00	0,41875
6A-9	50	25	0	25	4510,00	0,41875
6B-1	50	25	0	25	4510,00	0,41875
6B-6	50	25	0	25	4510,00	0,41875
7A-6	35	35	15	15	4583,25	0,4073
7A-9	35	35	15	15	4583,25	0,4073
7B-4	35	35	15	15	4583,25	0,4073
7B-8	35	35	15	15	4583,25	0,4073
8A-7	50	0	25	25	4547,50	0,428
8A-9	50	0	25	25	4547,50	0,428
8B-4	50	0	25	25	4547,50	0,428

Données du premier stade

Temp_1	Dil_DP_1	Ent_DP_1	Ener_1	CSF_1	Int_Moy_Prim	Prod_1	Prod_M_1
140	0,3	0,55	956	413,00	0,000713108	0,548	0,552
140	0,3	0,55	956	413,00	0,000713108	0,548	0,552
140	0,3	0,55	956	413,00	0,000713108	0,548	0,552
140	0,3	0,55	956	413,00	0,000713108	0,548	0,552
140	0,3	0,6	775	606,00	0,000597117	0,632	0,621
140	0,3	0,6	775	606,00	0,000597117	0,632	0,621
140	0,3	0,6	775	606,00	0,000597117	0,632	0,621
140	0,3	0,6	775	606,00	0,000597117	0,632	0,621
140	0,38	0,5	957	447,75	0,000652898	0,635	0,598
140	0,38	0,5	957	447,75	0,000652898	0,635	0,598
140	0,38	0,5	957	447,75	0,000652898	0,635	0,598
140	0,38	0,5	957	447,75	0,000652898	0,635	0,598
140	0,25	0,8	1078	582,75	0,000771134	0,391	0,437
140	0,25	0,8	1078	582,75	0,000771134	0,391	0,437
140	0,25	0,8	1078	582,75	0,000771134	0,391	0,437
140	0,25	0,8	1078	582,75	0,000771134	0,391	0,437
140	0,35	0,8	868	465,50	0,000827639	0,507	0,494
140	0,35	0,8	868	465,50	0,000827639	0,507	0,494
140	0,35	0,8	868	465,50	0,000827639	0,507	0,494
140	0,35	0,8	868	465,50	0,000827639	0,507	0,494
140	0,25	0,6	980	566,75	0,000858169	0,473	0,468
140	0,25	0,6	980	566,75	0,000858169	0,473	0,468
140	0,25	0,6	980	566,75	0,000858169	0,473	0,468
140	0,25	0,6	980	566,75	0,000858169	0,473	0,468
140	0,25	0,65	908	570,25	0,000696816	0,556	0,523
140	0,25	0,65	908	570,25	0,000696816	0,556	0,523
140	0,25	0,65	908	570,25	0,000696816	0,556	0,523
140	0,25	0,65	908	570,25	0,000696816	0,556	0,523
140	0,25	0,7	883	618,25	0,000615038	0,476	0,492
140	0,25	0,7	883	618,25	0,000615038	0,476	0,492
140	0,25	0,7	883	618,25	0,000615038	0,476	0,492
140	0,25	0,7	883	618,25	0,000615038	0,476	0,492
140	0,4	0,55	1206	335,25	0,000867498	0,475	0,484
140	0,4	0,55	1206	335,25	0,000867498	0,475	0,484
140	0,4	0,55	1206	335,25	0,000867498	0,475	0,484
140	0,4	0,55	1206	335,25	0,000867498	0,475	0,484
140	0,25	0,6	875	533,75	0,000669774	0,536	0,536
140	0,25	0,6	875	533,75	0,000669774	0,536	0,536
140	0,25	0,6	875	533,75	0,000669774	0,536	0,536
140	0,25	0,6	875	533,75	0,000669774	0,536	0,536
140	0,3	0,8	852	522,00	0,000720739	0,591	0,572
140	0,3	0,8	852	522,00	0,000720739	0,591	0,572
140	0,3	0,8	852	522,00	0,000720739	0,591	0,572
140	0,3	0,8	852	522,00	0,000720739	0,591	0,572
140	0,3	0,8	922	400,50	0,000810636	0,457	0,433
140	0,3	0,8	922	400,50	0,000810636	0,457	0,433

Données du premier stade

140	0,3	0,8	922	400,50	0,000810636	0,457	0,433
140	0,3	0,8	922	400,50	0,000810636	0,457	0,433
140	0,26	0,6	951	395,25	0,000553345	0,589	0,578
140	0,26	0,6	951	395,25	0,000553345	0,589	0,578
140	0,26	0,6	951	395,25	0,000553345	0,589	0,578
140	0,26	0,6	951	395,25	0,000553345	0,589	0,578
140	0,22	0,8	1024	521,50	0,00062061	0,421	0,442
140	0,22	0,8	1024	521,50	0,00062061	0,421	0,442
140	0,22	0,8	1024	521,50	0,00062061	0,421	0,442
140	0,22	0,8	1024	521,50	0,00062061	0,421	0,442
140	0,2	0,8	1048	335,50	0,000779229	0,436	0,388
140	0,2	0,8	1048	335,50	0,000779229	0,436	0,388
140	0,2	0,8	1048	335,50	0,000779229	0,436	0,388
140	0,2	0,8	1048	335,50	0,000779229	0,436	0,388
140	0,24	0,8	846	557,00	0,000738746	0,520	0,513
140	0,24	0,8	846	557,00	0,000738746	0,520	0,513
140	0,24	0,8	846	557,00	0,000738746	0,520	0,513
140	0,24	0,8	846	557,00	0,000738746	0,520	0,513
140	0,27	0,8	870	553,50	0,00064947	0,478	0,472
140	0,27	0,8	870	553,50	0,00064947	0,478	0,472
140	0,27	0,8	870	553,50	0,00064947	0,478	0,472
140	0,27	0,8	870	553,50	0,00064947	0,478	0,472
140	0,28	0,8	1031	593,75	0,000815887	0,511	0,483
140	0,28	0,8	1031	593,75	0,000815887	0,511	0,483
140	0,28	0,8	1031	593,75	0,000815887	0,511	0,483
140	0,28	0,8	1031	593,75	0,000815887	0,511	0,483
140	0,22	0,7	878	456,75	0,000567221	0,545	0,493
140	0,22	0,7	878	456,75	0,000567221	0,545	0,493
140	0,22	0,7	878	456,75	0,000567221	0,545	0,493
140	0,22	0,7	878	456,75	0,000567221	0,545	0,493
140	0,25	0,8	799	515,25	0,000592586	0,615	0,646
140	0,25	0,8	799	515,25	0,000592586	0,615	0,646
140	0,25	0,8	799	515,25	0,000592586	0,615	0,646
140	0,25	0,8	799	515,25	0,000592586	0,615	0,646
140	0,22	0,8	1006	515,50	0,000675923	0,507	0,454
140	0,22	0,8	1006	515,50	0,000675923	0,507	0,454
140	0,22	0,8	1006	515,50	0,000675923	0,507	0,454
140	0,22	0,8	1006	515,50	0,000675923	0,507	0,454
140	0,24	0,8	930	423,00	0,000813634	0,400	0,401
140	0,24	0,8	930	423,00	0,000813634	0,400	0,401
140	0,24	0,8	930	423,00	0,000813634	0,400	0,401
140	0,24	0,8	930	423,00	0,000813634	0,400	0,401
140	0,25	0,8	980	605,50	0,000621985	0,537	0,541
140	0,25	0,8	980	605,50	0,000621985	0,537	0,541
140	0,25	0,8	980	605,50	0,000621985	0,537	0,541
140	0,25	0,8	980	605,50	0,000621985	0,537	0,541
140	0,32	0,5	1103	424,50	0,00066751	0,800	0,647
140	0,32	0,5	1103	424,50	0,00066751	0,800	0,647
140	0,32	0,5	1103	424,50	0,00066751	0,800	0,647

Données du premier stade

140	0,32	0,5	1103	424,50	0,00066751	0,800	0,647
140	0,22	0,6	910	467,75	0,000695563	0,526	0,558
140	0,22	0,6	910	467,75	0,000695563	0,526	0,558
140	0,22	0,6	910	467,75	0,000695563	0,526	0,558
140	0,22	0,6	910	467,75	0,000695563	0,526	0,558
140	0,2	0,8	1106	580,75	0,000667424	0,438	0,453
140	0,2	0,8	1106	580,75	0,000667424	0,438	0,453
140	0,2	0,8	1106	580,75	0,000667424	0,438	0,453
140	0,2	0,8	1106	580,75	0,000667424	0,438	0,453
140	0,2	0,8	1015	417,75	0,000801355	0,424	0,400
140	0,2	0,8	1015	417,75	0,000801355	0,424	0,400
140	0,2	0,8	1015	417,75	0,000801355	0,424	0,400
140	0,2	0,8	1015	417,75	0,000801355	0,424	0,400
140	0,2	0,8	925	593,00	0,000619144	0,577	0,561
140	0,2	0,8	925	593,00	0,000619144	0,577	0,561
140	0,2	0,8	925	593,00	0,000619144	0,577	0,561
140	0,2	0,8	925	593,00	0,000619144	0,577	0,561
140	0,24	0,8	1064	443,75	0,000788349	0,426	0,418
140	0,24	0,8	1064	443,75	0,000788349	0,426	0,418
140	0,24	0,8	1064	443,75	0,000788349	0,426	0,418
140	0,24	0,8	1064	443,75	0,000788349	0,426	0,418
140	0,2	0,8	1028	573,33	0,000727793	0,351	0,514
140	0,2	0,8	1028	573,33	0,000727793	0,351	0,514
140	0,2	0,8	1028	573,33	0,000727793	0,351	0,514
140	0,2	0,8	1028	573,33	0,000727793	0,351	0,514
140	0,25	0,7	935	465,00	0,000619768	0,529	0,497
140	0,25	0,7	935	465,00	0,000619768	0,529	0,497
140	0,25	0,7	935	465,00	0,000619768	0,529	0,497
140	0,25	0,7	935	465,00	0,000619768	0,529	0,497
140	0,2	0,8	946	574,75	0,000715526	0,558	0,490
140	0,2	0,8	946	574,75	0,000715526	0,558	0,490
140	0,2	0,8	946	574,75	0,000715526	0,558	0,490
140	0,2	0,8	946	574,75	0,000715526	0,558	0,490
140	0,22	0,8	1206	482,00	0,000788859	0,338	0,412
140	0,22	0,8	1206	482,00	0,000788859	0,338	0,412
140	0,22	0,8	1206	482,00	0,000788859	0,338	0,412
140	0,22	0,8	1206	482,00	0,000788859	0,338	0,412
140	0,2	0,8	1128	391,75	0,000810017	0,371	0,412
140	0,2	0,8	1128	391,75	0,000810017	0,371	0,412
140	0,2	0,8	1128	391,75	0,000810017	0,371	0,412
140	0,2	0,8	1128	391,75	0,000810017	0,371	0,412
140	0,2	0,8	1010	616,50	0,000639645	0,553	0,496
140	0,2	0,8	1010	616,50	0,000639645	0,553	0,496
140	0,2	0,8	1010	616,50	0,000639645	0,553	0,496
140	0,2	0,8	1010	616,50	0,000639645	0,553	0,496
140	0,28	0,5	1115	481,50	0,000593473	0,576	0,611
140	0,28	0,5	1115	481,50	0,000593473	0,576	0,611
140	0,28	0,5	1115	481,50	0,000593473	0,576	0,611
140	0,28	0,5	1115	481,50	0,000593473	0,576	0,611

Données du premier stade

140	0,2	0,8	1090	550,75	0,000752965	0,508	0,555
140	0,2	0,8	1090	550,75	0,000752965	0,508	0,555
140	0,2	0,8	1090	550,75	0,000752965	0,508	0,555
140	0,25	0,75	1381	458,50	0,00066444	0,548	0,503
140	0,25	0,75	1381	458,50	0,00066444	0,548	0,503
140	0,25	0,75	1381	458,50	0,00066444	0,548	0,503
140	0,25	0,75	1381	458,50	0,00066444	0,548	0,503
140	0,25	0,8	1180	521,75	0,000639072	0,609	0,554
140	0,25	0,8	1180	521,75	0,000639072	0,609	0,554
140	0,25	0,8	1180	521,75	0,000639072	0,609	0,554
140	0,25	0,8	1180	521,75	0,000639072	0,609	0,554
140	0,25	1	1242	379,25	0,001094122	0,383	0,411
140	0,25	1	1242	379,25	0,001094122	0,383	0,411
140	0,25	1	1242	379,25	0,001094122	0,383	0,411
140	0,27	1	1205	363,50	0,000890878	0,472	0,420
140	0,27	1	1205	363,50	0,000890878	0,472	0,420
140	0,27	1	1205	363,50	0,000890878	0,472	0,420
140	0,27	1	1205	363,50	0,000890878	0,472	0,420
140	0,25	0,75	1352	404,25	0,000943892	0,518	0,498
140	0,25	0,75	1352	404,25	0,000943892	0,518	0,498
140	0,25	0,75	1352	404,25	0,000943892	0,518	0,498
140	0,25	0,75	1352	404,25	0,000943892	0,518	0,498
140	0,25	0,75	1183	469,25	0,000747465	0,556	0,527
140	0,25	0,75	1183	469,25	0,000747465	0,556	0,527
140	0,25	0,75	1183	469,25	0,000747465	0,556	0,527
140	0,25	0,75	1183	469,25	0,000747465	0,556	0,527
140	0,22	0,75	1250	519,00	0,000610855	0,519	0,524
140	0,22	0,75	1250	519,00	0,000610855	0,519	0,524
140	0,22	0,75	1250	519,00	0,000610855	0,519	0,524
140	0,22	0,75	1250	519,00	0,000610855	0,519	0,524
140	0,25	1	1159	526,50	0,000861337	0,499	0,499
140	0,25	1	1159	526,50	0,000861337	0,499	0,499
140	0,25	1	1159	526,50	0,000861337	0,499	0,499
140	0,25	1	1159	526,50	0,000861337	0,499	0,499
140	0,2	1	1092	476,00	0,000750838	0,458	0,520
140	0,2	1	1092	476,00	0,000750838	0,458	0,520
140	0,2	1	1092	476,00	0,000750838	0,458	0,520
140	0,2	1	1092	476,00	0,000750838	0,458	0,520
140	0,2	1	1208	488,75	0,000814557	0,459	0,443
140	0,2	1	1208	488,75	0,000814557	0,459	0,443
140	0,2	1	1208	488,75	0,000814557	0,459	0,443
140	0,2	1	1208	488,75	0,000814557	0,459	0,443
140	0,2	0,8	1090	550,75	0,000752965	0,508	0,555
140	0,2	0,8	1090	550,75	0,000752965	0,508	0,555
140	0,2	0,8	1090	550,75	0,000752965	0,508	0,555
140	0,2	1	1268	339,25	0,001186733	0,374	0,395
140	0,2	1	1268	339,25	0,001186733	0,374	0,395
140	0,2	1	1268	339,25	0,001186733	0,374	0,395
140	0,2	1	1268	339,25	0,001186733	0,374	0,395

Données du premier stade

140	0,28	0,8	1249	352,50	0,000886146	0,567	0,522
140	0,28	0,8	1249	352,50	0,000886146	0,567	0,522
140	0,28	0,8	1249	352,50	0,000886146	0,567	0,522
140	0,28	0,8	1249	352,50	0,000886146	0,567	0,522
140	0,28	1	1135	285,25	0,000935747	0,470	0,461
140	0,28	1	1135	285,25	0,000935747	0,470	0,461
140	0,28	1	1135	285,25	0,000935747	0,470	0,461
140	0,28	1	1135	285,25	0,000935747	0,470	0,461
140	0,28	0,8	1215	471,25	0,000739403	0,588	0,542
140	0,28	0,8	1215	471,25	0,000739403	0,588	0,542
140	0,28	0,8	1215	471,25	0,000739403	0,588	0,542
140	0,28	0,8	1215	471,25	0,000739403	0,588	0,542
140	0,27	0,8	1182	479,50	0,000743927	0,531	0,560
140	0,27	0,8	1182	479,50	0,000743927	0,531	0,560
140	0,27	0,8	1182	479,50	0,000743927	0,531	0,560
140	0,27	0,8	1182	479,50	0,000743927	0,531	0,560
140	0,27	0,8	1271	461,50	0,000715444	0,604	0,528
140	0,27	0,8	1271	461,50	0,000715444	0,604	0,528
140	0,27	0,8	1271	461,50	0,000715444	0,604	0,528
140	0,27	0,8	1271	461,50	0,000715444	0,604	0,528
140	0,25	1,2	1197	300,25	0,000955941	0,392	0,417
140	0,25	1,2	1197	300,25	0,000955941	0,392	0,417
140	0,25	1,2	1197	300,25	0,000955941	0,392	0,417
140	0,25	1,2	1197	300,25	0,000955941	0,392	0,417
140	0,25	1,2	1152	345,00	0,000938226	0,406	0,432
140	0,25	1,2	1152	345,00	0,000938226	0,406	0,432
140	0,25	1,2	1152	345,00	0,000938226	0,406	0,432
140	0,25	1,2	1152	345,00	0,000938226	0,406	0,432
140	0,25	1,2	1105	333,00	0,000933663	0,464	0,425
140	0,25	1,2	1105	333,00	0,000933663	0,464	0,425
140	0,25	1,2	1105	333,00	0,000933663	0,464	0,425
140	0,25	1,2	1105	333,00	0,000933663	0,464	0,425
140	0,25	0,8	1127	519,50	0,000714702	0,540	0,585
140	0,25	0,8	1127	519,50	0,000714702	0,540	0,585
140	0,25	0,8	1127	519,50	0,000714702	0,540	0,585
140	0,25	0,8	1127	519,50	0,000714702	0,540	0,585
140	0,2	0,8	1467	521,00	0,000926536	0,338	0,473
140	0,2	0,8	1467	521,00	0,000926536	0,338	0,473
140	0,2	0,8	1467	521,00	0,000926536	0,338	0,473
140	0,2	0,8	1467	521,00	0,000926536	0,338	0,473
140	0,2	1	1107	497,50	0,000741917	0,436	0,517
140	0,2	1	1107	497,50	0,000741917	0,436	0,517
140	0,2	1	1107	497,50	0,000741917	0,436	0,517
140	0,2	1	1107	497,50	0,000741917	0,436	0,517
140	0,18	1	1190	430,50	0,000831643	0,509	0,508
140	0,18	1	1190	430,50	0,000831643	0,509	0,508
140	0,18	1	1190	430,50	0,000831643	0,509	0,508
140	0,18	1	1190	430,50	0,000831643	0,509	0,508
140	0,25	0,6	1250	452,50	0,000786806	0,538	0,501

Données du premier stade

140	0,25	0,6	1250	452,50	0,000786806	0,538	0,501
140	0,25	0,6	1250	452,50	0,000786806	0,538	0,501
140	0,25	0,6	1250	452,50	0,000786806	0,538	0,501
140	0,26	1,2	1060	336,25	0,001028006	0,490	0,460
140	0,26	1,2	1060	336,25	0,001028006	0,490	0,460
140	0,26	1,2	1060	336,25	0,001028006	0,490	0,460
140	0,26	1,2	1060	336,25	0,001028006	0,490	0,460
132	0,55	1,30	1664	232	0,00092622	0,531	0,531
132	0,55	1,30	1664	232	0,00092622	0,531	0,531
132	0,55	1,30	1664	232	0,00092622	0,531	0,531
132	0,55	1,30	1664	232	0,00092622	0,531	0,531
124	0,5	1,20	1848	157	0,000889793	0,475	0,475
124	0,5	1,20	1848	157	0,000889793	0,475	0,475
124	0,5	1,20	1848	157	0,000889793	0,475	0,475
124	0,5	1,20	1848	157	0,000889793	0,475	0,475
124	0,5	1,40	1661	248	0,000934981	0,504	0,504
124	0,5	1,40	1661	248	0,000934981	0,504	0,504
124	0,5	1,40	1661	248	0,000934981	0,504	0,504
124	0,5	1,40	1661	248	0,000934981	0,504	0,504
124	0,6	1,20	1330	502	0,001157823	0,521	0,521
124	0,6	1,20	1330	502	0,001157823	0,521	0,521
124	0,6	1,20	1330	502	0,001157823	0,521	0,521
124	0,6	1,20	1330	502	0,001157823	0,521	0,521
124	0,6	1,20	1194	374	0,00107087	0,579	0,579
124	0,6	1,20	1194	374	0,00107087	0,579	0,579
124	0,6	1,20	1194	374	0,00107087	0,579	0,579
124	0,6	1,20	1194	374	0,00107087	0,579	0,579
124	0,6	1,40	1179	515	0,001136704	0,541	0,541
124	0,6	1,40	1179	515	0,001136704	0,541	0,541
124	0,6	1,40	1179	515	0,001136704	0,541	0,541
124	0,6	1,40	1179	515	0,001136704	0,541	0,541
124	0,6	1,40	1158	365	0,000995785	0,549	0,549
124	0,6	1,40	1158	365	0,000995785	0,549	0,549
124	0,6	1,40	1158	365	0,000995785	0,549	0,549
124	0,6	1,40	1158	365	0,000995785	0,549	0,549
132	0,55	1,30	1730	278	0,000917707	0,548	0,548
132	0,55	1,30	1730	278	0,000917707	0,548	0,548
132	0,55	1,30	1730	278	0,000917707	0,548	0,548
132	0,55	1,30	1730	278	0,000917707	0,548	0,548
140	0,5	1,20	1467	333	0,000805031	0,556	0,556
140	0,5	1,20	1467	333	0,000805031	0,556	0,556
140	0,5	1,20	1467	333	0,000805031	0,556	0,556
140	0,5	1,20	1467	333	0,000805031	0,556	0,556
140	0,5	1,20	1665	375	0,000812969	0,551	0,551
140	0,5	1,20	1665	375	0,000812969	0,551	0,551
140	0,5	1,20	1665	375	0,000812969	0,551	0,551
140	0,5	1,20	1665	375	0,000812969	0,551	0,551
140	0,5	1,40	1299	466	0,00080977	0,584	0,584
140	0,5	1,40	1299	466	0,00080977	0,584	0,584

Données du premier stade

140	0,5	1,40	1299	466	0,00080977	0,584	0,584
140	0,5	1,40	1299	466	0,00080977	0,584	0,584
140	0,5	1,40	1561	427	0,000854824	0,539	0,539
140	0,5	1,40	1561	427	0,000854824	0,539	0,539
140	0,5	1,40	1561	427	0,000854824	0,539	0,539
140	0,5	1,40	1561	427	0,000854824	0,539	0,539
140	0,6	1,20	775	325	0,001065635	0,591	0,591
140	0,6	1,20	775	325	0,001065635	0,591	0,591
140	0,6	1,20	775	325	0,001065635	0,591	0,591
140	0,6	1,20	775	325	0,001065635	0,591	0,591
140	0,6	1,40	737	174	0,001080515	0,598	0,598
140	0,6	1,40	737	174	0,001080515	0,598	0,598
140	0,6	1,40	737	174	0,001080515	0,598	0,598
140	0,6	1,40	737	174	0,001080515	0,598	0,598
132	0,55	1,30	1676	331	0,000943283	0,544	0,544
132	0,55	1,30	1676	331	0,000943283	0,544	0,544
132	0,55	1,30	1676	331	0,000943283	0,544	0,544
132	0,55	1,30	1676	331	0,000943283	0,544	0,544
140	0,45	1,4	1557	570	0,001116178		
140	0,45	1,4	1557	570	0,001116178		
140	0,48	1,0	1474	325	0,001093311		
140	0,48	1,0	1474	325	0,001093311		
140	0,5	1,4	1308	439	0,000781371		
140	0,5	1,4	1308	439	0,000781371		
140	0,5	1,0	1595	329	0,000858449		
140	0,5	1,0	1595	329	0,000858449		
140	0,45	1,4	1326	445	0,001036668		
140	0,45	1,4	1326	445	0,001036668		
140	0,5	1,0	1443	350	0,001002915		
140	0,5	1,0	1443	350	0,001002915		
140	0,45	1,4	1424	543	0,000995807		
140	0,45	1,4	1424	543	0,000995807		
140	0,55	1,0	1469	368	0,001042688		
140	0,55	1,0	1469	368	0,001042688		
140	0,45	1,4	1441	385	0,000963747		
140	0,45	1,4	1441	385	0,000963747		
140	0,5	1,0	1601	275	0,000883636		
140	0,5	1,0	1601	275	0,000883636		
140	0,38	1,4	1430	380	0,00137503		
140	0,38	1,4	1430	380	0,00137503		
140	0,4	1,0	1480	255	0,000819329		
140	0,4	1,0	1480	255	0,000819329		
140	0,4	1,4	1375	375	0,001103398		
140	0,4	1,4	1375	375	0,001103398		
140	0,45	1,0	1657	282	0,001047328		
140	0,45	1,0	1657	282	0,001047328		
140	0,38	1,4	1838	425	0,001040736		
140	0,38	1,4	1838	425	0,001040736		
140	0,43	1,0	1602	250	0,000812623		

Données du premier stade

140	0,43	1,0	1602	250	0,000812623
-----	------	-----	------	-----	-------------

Données du deuxième stade

CopeauxID	PourcEP	PourcSAP	PourcPG	PourcBOU	Ener_1	CSF_1
A01	0	20	40	40	956	413,00
A01	0	20	40	40	956	413,00
A01	0	20	40	40	956	413,00
A01	0	20	40	40	956	413,00
A11	0	0	100	0	775	606,00
A11	0	0	100	0	775	606,00
A11	0	0	100	0	775	606,00
A11	0	0	100	0	775	606,00
A12	0	0	0	100	957	447,75
A12	0	0	0	100	957	447,75
A12	0	0	0	100	957	447,75
A12	0	0	0	100	957	447,75
A02	100	0	0	0	1078	582,75
A02	100	0	0	0	1078	582,75
A02	100	0	0	0	1078	582,75
A02	100	0	0	0	1078	582,75
A03	0	100	0	0	868	465,50
A03	0	100	0	0	868	465,50
A03	0	100	0	0	868	465,50
A03	0	100	0	0	868	465,50
A04	60	0	0	40	980	566,75
A04	60	0	0	40	980	566,75
A04	60	0	0	40	980	566,75
A04	60	0	0	40	980	566,75
A05	0	60	40	0	908	570,25
A05	0	60	40	0	908	570,25
A05	0	60	40	0	908	570,25
A05	0	60	40	0	908	570,25
A06	60	0	40	0	883	618,25
A06	60	0	40	0	883	618,25
A06	60	0	40	0	883	618,25
A06	60	0	40	0	883	618,25
A07	0	60	0	40	1206	335,25
A07	0	60	0	40	1206	335,25
A07	0	60	0	40	1206	335,25
A07	0	60	0	40	1206	335,25
A08	20	0	40	40	875	533,75
A08	20	0	40	40	875	533,75
A08	20	0	40	40	875	533,75
A08	20	0	40	40	875	533,75
A09	100	0	0	0	852	522,00
A09	100	0	0	0	852	522,00
A09	100	0	0	0	852	522,00
A09	100	0	0	0	852	522,00
A10	0	100	0	0	922	400,50
A10	0	100	0	0	922	400,50
A10	0	100	0	0	922	400,50
A10	0	100	0	0	922	400,50

Données du deuxième stade

B01	0	20	40	40	951	395,25
B01	0	20	40	40	951	395,25
B01	0	20	40	40	951	395,25
B01	0	20	40	40	951	395,25
B02	100	0	0	0	1024	521,50
B02	100	0	0	0	1024	521,50
B02	100	0	0	0	1024	521,50
B02	100	0	0	0	1024	521,50
B03	0	100	0	0	1048	335,50
B03	0	100	0	0	1048	335,50
B03	0	100	0	0	1048	335,50
B03	0	100	0	0	1048	335,50
B04	60	0	0	40	846	557,00
B04	60	0	0	40	846	557,00
B04	60	0	0	40	846	557,00
B04	60	0	0	40	846	557,00
B05	0	60	40	0	870	553,50
B05	0	60	40	0	870	553,50
B05	0	60	40	0	870	553,50
B05	0	60	40	0	870	553,50
B06	60	0	40	0	1031	593,75
B06	60	0	40	0	1031	593,75
B06	60	0	40	0	1031	593,75
B06	60	0	40	0	1031	593,75
B07	0	60	0	40	878	456,75
B07	0	60	0	40	878	456,75
B07	0	60	0	40	878	456,75
B07	0	60	0	40	878	456,75
B08	20	0	40	40	799	515,25
B08	20	0	40	40	799	515,25
B08	20	0	40	40	799	515,25
B08	20	0	40	40	799	515,25
B09	100	0	0	0	1006	515,50
B09	100	0	0	0	1006	515,50
B09	100	0	0	0	1006	515,50
B09	100	0	0	0	1006	515,50
B10	0	100	0	0	930	423,00
B10	0	100	0	0	930	423,00
B10	0	100	0	0	930	423,00
B10	0	100	0	0	930	423,00
B11	0	0	100	0	980	605,50
B11	0	0	100	0	980	605,50
B11	0	0	100	0	980	605,50
B11	0	0	100	0	980	605,50
B12	0	0	0	100	1103	424,50
B12	0	0	0	100	1103	424,50
B12	0	0	0	100	1103	424,50
B12	0	0	0	100	1103	424,50
C01	0	20	40	40	910	467,75

Données du deuxième stade

C01	0	20	40	40	910	467,75
C01	0	20	40	40	910	467,75
C01	0	20	40	40	910	467,75
C02	100	0	0	0	1106	580,75
C02	100	0	0	0	1106	580,75
C02	100	0	0	0	1106	580,75
C02	100	0	0	0	1106	580,75
C03	0	100	0	0	1015	417,75
C03	0	100	0	0	1015	417,75
C03	0	100	0	0	1015	417,75
C03	0	100	0	0	1015	417,75
C04	60	0	0	40	925	593,00
C04	60	0	0	40	925	593,00
C04	60	0	0	40	925	593,00
C04	60	0	0	40	925	593,00
C05	0	60	40	0	1064	443,75
C05	0	60	40	0	1064	443,75
C05	0	60	40	0	1064	443,75
C05	0	60	40	0	1064	443,75
C06	60	0	40	0	1028	573,33
C06	60	0	40	0	1028	573,33
C06	60	0	40	0	1028	573,33
C06	60	0	40	0	1028	573,33
C07	0	60	0	40	935	465,00
C07	0	60	0	40	935	465,00
C07	0	60	0	40	935	465,00
C07	0	60	0	40	935	465,00
C08	20	0	40	40	946	574,75
C08	20	0	40	40	946	574,75
C08	20	0	40	40	946	574,75
C08	20	0	40	40	946	574,75
C09	100	0	0	0	1206	482,00
C09	100	0	0	0	1206	482,00
C09	100	0	0	0	1206	482,00
C09	100	0	0	0	1206	482,00
C10	0	100	0	0	1128	391,75
C10	0	100	0	0	1128	391,75
C10	0	100	0	0	1128	391,75
C10	0	100	0	0	1128	391,75
C11	0	0	100	0	1010	616,50
C11	0	0	100	0	1010	616,50
C11	0	0	100	0	1010	616,50
C11	0	0	100	0	1010	616,50
C12	0	0	0	100	1115	481,50
C12	0	0	0	100	1115	481,50
C12	0	0	0	100	1115	481,50
C12	0	0	0	100	1115	481,50
P01	100	0	0	0	1090	550,75
P01	100	0	0	0	1090	550,75

Données du deuxième stade

P01	100	0	0	0	1090	550,75
V01	100	0	0	0	1381	458,50
V01	100	0	0	0	1381	458,50
V01	100	0	0	0	1381	458,50
V01	100	0	0	0	1381	458,50
V02	100	0	0	0	1180	521,75
V02	100	0	0	0	1180	521,75
V02	100	0	0	0	1180	521,75
V02	100	0	0	0	1180	521,75
V03	0	100	0	0	1242	379,25
V03	0	100	0	0	1242	379,25
V03	0	100	0	0	1242	379,25
V04	0	100	0	0	1205	363,50
V04	0	100	0	0	1205	363,50
V04	0	100	0	0	1205	363,50
V04	0	100	0	0	1205	363,50
V05	100	0	0	0	1352	404,25
V05	100	0	0	0	1352	404,25
V05	100	0	0	0	1352	404,25
V05	100	0	0	0	1352	404,25
V06	100	0	0	0	1183	469,25
V06	100	0	0	0	1183	469,25
V06	100	0	0	0	1183	469,25
V06	100	0	0	0	1183	469,25
V07	100	0	0	0	1250	519,00
V07	100	0	0	0	1250	519,00
V07	100	0	0	0	1250	519,00
V07	100	0	0	0	1250	519,00
V08	0	100	0	0	1159	526,50
V08	0	100	0	0	1159	526,50
V08	0	100	0	0	1159	526,50
V08	0	100	0	0	1159	526,50
V09	0	100	0	0	1092	476,00
V09	0	100	0	0	1092	476,00
V09	0	100	0	0	1092	476,00
V09	0	100	0	0	1092	476,00
V10	0	100	0	0	1208	488,75
V10	0	100	0	0	1208	488,75
V10	0	100	0	0	1208	488,75
V10	0	100	0	0	1208	488,75
P01	100	0	0	0	1090	550,75
P01	100	0	0	0	1090	550,75
P01	100	0	0	0	1090	550,75
Q01	0	100	0	0	1268	339,25
Q01	0	100	0	0	1268	339,25
Q01	0	100	0	0	1268	339,25
Q01	0	100	0	0	1268	339,25
P02	100	0	0	0	1249	352,50
P02	100	0	0	0	1249	352,50

Données du deuxième stade

P02	100	0	0	0	1249	352,50
P02	100	0	0	0	1249	352,50
Q02	0	100	0	0	1135	285,25
Q02	0	100	0	0	1135	285,25
Q02	0	100	0	0	1135	285,25
Q02	0	100	0	0	1135	285,25
S01	100	0	0	0	1215	471,25
S01	100	0	0	0	1215	471,25
S01	100	0	0	0	1215	471,25
S01	100	0	0	0	1215	471,25
S02	100	0	0	0	1182	479,50
S02	100	0	0	0	1182	479,50
S02	100	0	0	0	1182	479,50
S02	100	0	0	0	1182	479,50
S03	100	0	0	0	1271	461,50
S03	100	0	0	0	1271	461,50
S03	100	0	0	0	1271	461,50
S03	100	0	0	0	1271	461,50
S04	0	100	0	0	1197	300,25
S04	0	100	0	0	1197	300,25
S04	0	100	0	0	1197	300,25
S04	0	100	0	0	1197	300,25
S05	0	100	0	0	1152	345,00
S05	0	100	0	0	1152	345,00
S05	0	100	0	0	1152	345,00
S05	0	100	0	0	1152	345,00
S06	0	100	0	0	1105	333,00
S06	0	100	0	0	1105	333,00
S06	0	100	0	0	1105	333,00
S06	0	100	0	0	1105	333,00
S07	100	0	0	0	1127	519,50
S07	100	0	0	0	1127	519,50
S07	100	0	0	0	1127	519,50
S07	100	0	0	0	1127	519,50
S08	100	0	0	0	1467	521,00
S08	100	0	0	0	1467	521,00
S08	100	0	0	0	1467	521,00
S08	100	0	0	0	1467	521,00
S09	0	100	0	0	1107	497,50
S09	0	100	0	0	1107	497,50
S09	0	100	0	0	1107	497,50
S09	0	100	0	0	1107	497,50
S10	0	100	0	0	1190	430,50
S10	0	100	0	0	1190	430,50
S10	0	100	0	0	1190	430,50
S10	0	100	0	0	1190	430,50
P03	100	0	0	0	1250	452,50
P03	100	0	0	0	1250	452,50
P03	100	0	0	0	1250	452,50

Données du deuxième stade

P03	100	0	0	0	1250	452,50
Q03	0	100	0	0	1060	336,25
Q03	0	100	0	0	1060	336,25
Q03	0	100	0	0	1060	336,25
Q03	0	100	0	0	1060	336,25
Y1	100	0	0	0	1664	232
Y1	100	0	0	0	1664	232
Y1	100	0	0	0	1664	232
Y1	100	0	0	0	1664	232
Y2	100	0	0	0	1848	157
Y2	100	0	0	0	1848	157
Y2	100	0	0	0	1848	157
Y2	100	0	0	0	1848	157
Y3	100	0	0	0	1661	248
Y3	100	0	0	0	1661	248
Y3	100	0	0	0	1661	248
Y3	100	0	0	0	1661	248
Y4	100	0	0	0	1330	502
Y4	100	0	0	0	1330	502
Y4	100	0	0	0	1330	502
Y4	100	0	0	0	1330	502
Y5	100	0	0	0	1194	374
Y5	100	0	0	0	1194	374
Y5	100	0	0	0	1194	374
Y5	100	0	0	0	1194	374
Y6	100	0	0	0	1179	515
Y6	100	0	0	0	1179	515
Y6	100	0	0	0	1179	515
Y6	100	0	0	0	1179	515
Y7	100	0	0	0	1158	365
Y7	100	0	0	0	1158	365
Y7	100	0	0	0	1158	365
Y7	100	0	0	0	1158	365
Y8	100	0	0	0	1730	278
Y8	100	0	0	0	1730	278
Y8	100	0	0	0	1730	278
Y8	100	0	0	0	1730	278
Y9	100	0	0	0	1467	333
Y9	100	0	0	0	1467	333
Y9	100	0	0	0	1467	333
Y9	100	0	0	0	1467	333
Y10	100	0	0	0	1665	375
Y10	100	0	0	0	1665	375
Y10	100	0	0	0	1665	375
Y10	100	0	0	0	1665	375
Y11	100	0	0	0	1299	466
Y11	100	0	0	0	1299	466
Y11	100	0	0	0	1299	466
Y11	100	0	0	0	1299	466

Données du deuxième stade

Y12	100	0	0	0	1561	427
Y12	100	0	0	0	1561	427
Y12	100	0	0	0	1561	427
Y12	100	0	0	0	1561	427
Y13	100	0	0	0	775	325
Y13	100	0	0	0	775	325
Y13	100	0	0	0	775	325
Y13	100	0	0	0	775	325
Y14	100	0	0	0	737	174
Y14	100	0	0	0	737	174
Y14	100	0	0	0	737	174
Y14	100	0	0	0	737	174
Y15	100	0	0	0	1676	331
Y15	100	0	0	0	1676	331
Y15	100	0	0	0	1676	331
Y15	100	0	0	0	1676	331
1A-6	50	25	25	0	1557	570
1A-8	50	25	25	0	1557	570
1B-6	50	25	25	0	1474	325
1B-8	50	25	25	0	1474	325
2A-7	25	25	0	50	1308	439
2A-9	25	25	0	50	1308	439
2B-6	25	25	0	50	1595	329
2B-9	25	25	0	50	1595	329
3A-7	25	25	25	25	1326	445
3A-9	25	25	25	25	1326	445
3B-7	25	25	25	25	1443	350
3B-9	25	25	25	25	1443	350
4A-9	70	0	15	15	1424	543
4A-10	70	0	15	15	1424	543
4B-5	70	0	15	15	1469	368
4B-8	70	0	15	15	1469	368
5A-6	35	35	0	25	1441	385
5A-9	35	35	0	25	1441	385
5B-1	35	35	0	25	1601	275
5B-6	35	35	0	25	1601	275
6A-6	50	25	0	25	1430	380
6A-9	50	25	0	25	1430	380
6B-1	50	25	0	25	1480	255
6B-6	50	25	0	25	1480	255
7A-6	35	35	15	15	1375	375
7A-9	35	35	15	15	1375	375
7B-4	35	35	15	15	1657	282
7B-8	35	35	15	15	1657	282
8A-7	50	0	25	25	1838	425
8A-9	50	0	25	25	1838	425
8B-4	50	0	25	25	1602	250
8B-9	50	0	25	25	1602	250

Données du deuxième stade

Int Moy Pr	Dil_DP_2	Ent_DP_2	Ener_2	CSF_2	LF(lw)	Rupture
0,000713108	1516	0,5	1116	207	1,30	19,97
0,000713108	1516	0,45	1453	143	1,23	21,62
0,000713108	1516	0,42	1681	118	1,22	26,56
0,000713108	1516	0,4	2020	98	1,19	26,71
0,000597117	1819	0,5	1000	267	1,76	23,85
0,000597117	1819	0,48	1502	193	1,69	25,43
0,000597117	1819	0,45	1244	164	1,68	26,90
0,000597117	1819	0,42	1824	144	1,63	30,47
0,000652898	1971	0,38	1363	258	0,84	10,62
0,000652898	1971	0,35	1373	246	0,81	11,81
0,000652898	1971	0,32	1485	200	0,77	11,59
0,000652898	1971	0,3	1569	115	0,62	11,08
0,000771134	1668	0,48	1390	214	2,00	43,86
0,000771134	1668	0,42	1585	191	1,93	41,63
0,000771134	1668	0,4	1950	141	1,91	47,09
0,000771134	1668	0,38	2216	110	1,83	49,03
0,000827639	1516	0,8	847	229	1,62	36,17
0,000827639	1516	0,55	1098	191	1,63	39,94
0,000827639	1516	0,5	1205	150	1,60	43,27
0,000827639	1516	0,48	1285	115	1,50	47,35
0,000858169	1706	0,48	1088	234	1,51	26,26
0,000858169	1706	0,45	1382	193	1,46	26,05
0,000858169	1706	0,42	1524	160	1,45	28,22
0,000858169	1706	0,4	2352	91	1,37	34,20
0,000696816	1895	0,7	916	248	1,69	29,82
0,000696816	1895	0,55	1178	157	1,56	33,22
0,000696816	1895	0,5	1166	148	1,71	35,42
0,000696816	1895	0,48	1542	108	1,59	40,55
0,000615038	1895	0,48	1328	277	1,93	28,80
0,000615038	1895	0,45	1467	208	1,84	35,38
0,000615038	1895	0,42	1751	160	1,86	37,66
0,000615038	1895	0,4	2072	105	1,81	43,14
0,000867498	1516	2	597	157	1,08	23,91
0,000867498	1516	0,8	795	135	1,12	24,11
0,000867498	1516	0,6	940	115	1,13	30,41
0,000867498	1516	0,5	1012	92	1,13	29,25
0,000669774	1819	0,45	1259	197	1,36	23,97
0,000669774	1819	0,42	1223	171	1,40	22,56
0,000669774	1819	0,4	2035	154	1,38	24,17
0,000669774	1819	0,38	2298	103	1,35	29,30
0,000720739	1819	0,5	1034	261	2,00	35,24
0,000720739	1819	0,48	1331	204	1,96	38,20
0,000720739	1819	0,45	1281	179	1,94	40,96
0,000720739	1819	0,42	1975	118	1,78	46,44
0,000810636	1706	0,5	751	210	1,52	30,64
0,000810636	1706	0,48	1007	174	1,57	35,25
0,000810636	1706	0,45	1328	132	1,52	39,91

Données du deuxième stade

0,000810636	1706	0,42	1361	116	1,54	41,18
0,000553345	1706	0,5	848	193	1,25	21,40
0,000553345	1706	0,48	1156	144	1,21	24,65
0,000553345	1706	0,4	1384	115	1,22	28,40
0,000553345	1706	0,38	1565	103	1,16	27,68
0,00062061	1895	0,48	1077	239	1,97	40,60
0,00062061	1895	0,45	1570	182	1,94	43,42
0,00062061	1895	0,42	1601	158	1,94	45,95
0,00062061	1895	0,4	2241	113	1,85	50,45
0,000779229	1971	2	720	193	1,45	35,39
0,000779229	1971	0,6	937	161	1,46	37,02
0,000779229	1971	0,5	1065	148	1,41	41,12
0,000779229	1971	0,45	1414	101	1,45	43,94
0,000738746	1819	0,48	1094	241	1,51	26,29
0,000738746	1706	0,45	1179	211	1,48	28,77
0,000738746	1592	0,42	1393	172	1,50	31,15
0,000738746	1516	0,4	1786	121	1,41	35,26
0,00064947	1895	0,55	1113	193	1,70	34,26
0,00064947	1895	0,52	1182	154	1,63	35,47
0,00064947	1895	0,5	1408	138	1,60	38,18
0,00064947	1895	0,45	1697	92	1,61	43,58
0,000815887	1895	0,48	1476	226	1,91	34,45
0,000815887	1895	0,42	1324	193	1,91	36,37
0,000815887	1895	0,4	1708	155	1,79	37,31
0,000815887	1895	0,38	1820	120	1,77	40,89
0,000567221	1895	2	713	187	1,17	25,41
0,000567221	1895	0,8	893	154	1,13	27,95
0,000567221	1895	0,6	925	132	1,14	29,21
0,000567221	1895	0,5	1166	110	1,07	31,77
0,000592586	1895	0,48	1225	214	1,38	22,84
0,000592586	1895	0,45	1205	181	1,33	24,48
0,000592586	1895	0,42	1405	147	1,37	25,28
0,000592586	1895	0,4	1772	129	1,29	27,78
0,000675923	1819	0,48	1034	219	2,00	40,57
0,000675923	1819	0,45	1299	194	1,94	40,42
0,000675923	1819	0,42	1447	167	1,94	43,64
0,000675923	1819	0,4	1776	110	1,88	45,78
0,000813634	1895	0,6	931	195	1,63	37,43
0,000813634	1895	0,52	1232	162	1,50	39,81
0,000813634	1895	0,5	1150	136	1,56	43,62
0,000813634	1895	0,45	1487	87	1,43	47,63
0,000621985	1819	0,45	1228	209	1,80	27,63
0,000621985	1819	0,42	1382	193	1,84	31,11
0,000621985	1819	0,4	1886	122	1,71	32,11
0,000621985	1819	0,38	2531	92	1,62	38,32
0,00066751	1971	0,38	1227	215	0,82	10,65
0,00066751	1971	0,3	1422	147	0,74	12,61
0,00066751	1971	0,28	1464	129	0,67	12,77
0,00066751	1971	0,25	1536	99	0,62	13,80

Données du deuxième stade

0,000695563	1819	0,5	959	188	1,26	21,49
0,000695563	1819	0,45	1495	156	1,22	24,38
0,000695563	1819	0,38	1343	132	1,21	27,50
0,000695563	1819	0,35	1742	100	1,16	31,50
0,000667424	1895	0,45	1240	210	1,87	44,27
0,000667424	1895	0,42	1661	169	1,95	48,38
0,000667424	1895	0,4	1591	98	1,93	48,74
0,000667424	1895	0,38	2527	68	1,77	56,87
0,000801355	1971	1	634	195	1,51	38,42
0,000801355	1971	0,6	788	177	1,54	40,66
0,000801355	1971	0,55	959	139	1,52	44,59
0,000801355	1971	0,5	1243	102	1,48	47,80
0,000619144	1971	0,45	1353	190	1,49	31,69
0,000619144	1706	0,42	1419	169	1,50	30,54
0,000619144	1592	0,38	1681	104	1,41	34,77
0,000619144	1516	0,35	2098	84	1,32	36,90
0,000788349	1895	0,52	1076	197	1,69	36,70
0,000788349	1895	0,5	1148	170	1,65	38,64
0,000788349	1895	0,48	1256	119	1,64	41,55
0,000788349	1895	0,45	1484	101	1,57	42,66
0,000727793	1895	0,48	1539	202	1,83	35,92
0,000727793	1895	0,42	1374	162	1,85	37,40
0,000727793	1895	0,4	1745	120	1,66	39,15
0,000727793	1895	0,38	1793	103	1,63	43,05
0,000619768	1895	0,55	740	204	1,19	23,79
0,000619768	1895	0,48	928	144	1,19	28,00
0,000619768	1895	0,45	1221	113	1,14	29,31
0,000619768	1895	0,42	1402	99	1,14	30,58
0,000715526	1971	0,45	1196	198	1,39	20,60
0,000715526	1971	0,4	1495	162	1,34	24,07
0,000715526	1971	0,38	1631	132	1,26	25,69
0,000715526	1971	0,35	2227	94	1,23	30,59
0,000788859	2009	0,45	1318	198	1,90	39,87
0,000788859	2009	0,42	1368	162	1,90	43,46
0,000788859	2009	0,4	1396	130	1,88	45,52
0,000788859	2009	0,39	1743	98	1,78	48,89
0,000810017	1895	3	592	184	1,56	37,44
0,000810017	1895	0,6	933	136	1,56	39,97
0,000810017	1895	0,52	931	114	1,53	41,94
0,000810017	1895	0,48	1193	97	1,46	45,58
0,000639645	1819	0,45	1389	207	1,77	28,10
0,000639645	1819	0,42	1207	175	1,72	30,44
0,000639645	1819	0,4	1561	158	1,67	30,33
0,000639645	1819	0,38	1632	110	1,60	33,12
0,000593473	1971	0,35	1140	201	0,81	12,77
0,000593473	1971	0,3	1447	165	0,72	14,15
0,000593473	1971	0,28	1657	123	0,68	14,45
0,000593473	1971	0,25	1555	100	0,61	14,34
0,000752965	948	0,45	1138	203	1,98	40,38

Données du deuxième stade

0,000752965	948	0,45	1033	157	1,92	42,82
0,000752965	948	0,4	1294	131	1,85	47,81
0,00066444	948	0,45	970	207	1,79	40,07
0,00066444	948	0,42	1328	138	1,75	43,74
0,00066444	948	0,4	1292	109	1,69	43,04
0,00066444	948	0,38	1361	90	1,71	46,46
0,000639072	948	0,48	917	212	1,86	40,45
0,000639072	948	0,45	1120	176	1,80	43,92
0,000639072	948	0,4	1257	121	1,82	48,17
0,000639072	948	0,38	1494	87	1,80	52,10
0,001094122	948	0,7	680	196	1,68	36,95
0,001094122	948	0,5	883	161	1,69	40,54
0,001094122	0	0,42	986	101	1,67	46,97
0,000890878	948	1	584	200	1,71	38,37
0,000890878	948	0,5	816	162	1,68	40,96
0,000890878	948	0,42	890	130	1,66	43,80
0,000890878	948	0,38	2034	85	1,54	48,00
0,000943892	948	0,48	915	202	1,86	37,67
0,000943892	948	0,45	1361	138	1,76	41,42
0,000943892	948	0,4	1074	119	1,73	42,30
0,000943892	948	0,38	1257	98	1,69	43,04
0,000747465	948	0,48	918	230	1,86	37,24
0,000747465	948	0,42	1167	159	1,85	39,55
0,000747465	948	0,4	1287	122	1,84	47,18
0,000747465	948	0,38	1863	85	1,70	49,23
0,000610855	948	0,45	1091	185	1,85	39,92
0,000610855	948	0,42	1652	148	1,83	42,19
0,000610855	948	0,4	1119	129	1,78	43,72
0,000610855	948	0,35	1939	99	1,74	47,54
0,000861337	948	0,5	1230	206	1,80	34,76
0,000861337	948	0,45	1738	131	1,66	39,50
0,000861337	948	0,42	1144	110	1,61	42,02
0,000861337	948	0,42	1446	90	1,58	39,86
0,000750838	948	0,5	751	220	1,66	35,85
0,000750838	948	0,48	1046	156	1,63	40,18
0,000750838	948	0,4	1280	105	1,54	42,86
0,000750838	948	0,35	1303	88	1,56	44,05
0,000814557	948	0,5	830	206	1,77	33,89
0,000814557	948	0,48	961	164	1,69	35,34
0,000814557	948	0,45	1428	114	1,68	38,59
0,000814557	948	0,38	1280	99	1,62	40,66
0,000752965	948	0,45	1138	203	1,98	40,38
0,000752965	948	0,45	1033	157	1,92	42,82
0,000752965	948	0,4	1294	131	1,85	47,81
0,001186733	948	0,8	677	200	1,69	36,61
0,001186733	948	0,55	708	172	1,71	37,14
0,001186733	948	0,5	884	145	1,67	41,97
0,001186733	948	0,45	1170	92	1,66	45,56
0,000886146	948	0,6	638	235	1,87	37,96

Données du deuxième stade

0,000886146	948	0,5	817	173	1,85	43,39
0,000886146	948	0,48	1011	147	1,84	44,66
0,000886146	948	0,45	1212	98	1,79	47,91
0,000935747	948	0	591	168	1,74	39,08
0,000935747	948	0	658	148	1,68	41,62
0,000935747	948	0	788	128	1,65	46,15
0,000935747	948	0	1051	82	1,61	50,18
0,000739403	948	0,5	864	247	1,91	37,26
0,000739403	948	0,45	967	162	1,88	43,11
0,000739403	948	0,42	1051	146	1,86	44,19
0,000739403	948	0,38	1295	106	1,85	50,72
0,000743927	948	0,5	957	212	1,86	42,10
0,000743927	948	0,48	980	165	1,83	46,13
0,000743927	948	0,42	1138	134	1,83	47,40
0,000743927	948	0,38	1394	104	1,82	50,28
0,000715444	948	0,5	1105	194	1,87	39,80
0,000715444	948	0,48	1332	143	1,83	40,93
0,000715444	948	0,42	1141	125	1,78	42,74
0,000715444	948	0,38	1524	108	1,78	45,87
0,000955941	948	0,7	824	191	1,71	35,99
0,000955941	948	0,5	762	144	1,63	40,44
0,000955941	948	0,45	907	108	1,60	42,88
0,000955941	948	0,42	972	87	1,64	47,62
0,000938226	948	0,8	655	187	1,75	38,43
0,000938226	948	0,5	741	145	1,69	41,79
0,000938226	948	0,48	759	125	1,67	43,12
0,000938226	948	0,45	1266	94	1,66	45,91
0,000933663	948	1	555	203	1,71	38,74
0,000933663	948	0,55	684	161	1,62	41,63
0,000933663	948	0,5	831	125	1,63	45,00
0,000933663	948	0,48	894	92	1,65	49,71
0,000714702	948	0,48	1065	198	1,91	39,77
0,000714702	948	0	1332	155	1,89	44,11
0,000714702	948	0	1305	119	1,84	45,60
0,000714702	948	0	1530	85	1,82	52,52
0,000926536	948	0,48	1027	217	1,86	38,13
0,000926536	948	0	1088	163	1,83	43,25
0,000926536	948	0	1274	143	1,77	41,85
0,000926536	948	0	1598	95	1,76	50,63
0,000741917	948	0,5	830	213	1,82	37,17
0,000741917	948	0,48	1001	160	1,74	41,89
0,000741917	948	0	1166	118	1,74	42,96
0,000741917	948	0	1415	97	1,69	44,40
0,000831643	948	0,5	857	208	1,67	38,15
0,000831643	948	0,48	1171	143	1,63	39,59
0,000831643	948	0,45	1401	108	1,59	42,18
0,000831643	948	0	1202	95	1,59	40,29
0,000786806	948	0,5	953	225	1,90	39,18
0,000786806	758	0,45	1147	145	1,85	45,88

Données du deuxième stade

0,000786806	569	0,4	1650	121	1,81	49,75
0,000786806	569	0,15	1737	79	1,83	49,90
0,001028006	948	0,8	541	225	1,57	41,88
0,001028006	948	0,55	836	160	1,61	44,02
0,001028006	948	0,22	888	127	1,62	43,60
0,001028006	948	0,15	1224	94	1,57	49,43
0,00092622	1400	1,00	605	192	1,96	37,01
0,00092622	1400	0,60	772	165	1,94	39,65
0,00092622	1400	0,58	969	139	1,90	43,71
0,00092622	1400	0,50	1349	108	1,79	45,97
0,000889793	1500	1,00	502	139	1,76	40,69
0,000889793	1500	0,80	567	108	1,77	43,42
0,000889793	1500	0,60	688	113	1,71	43,15
0,000889793	1500	0,52	742	90	1,70	43,97
0,000934981	1300	4,00	479	185	1,83	34,27
0,000934981	1300	0,80	646	155	1,86	37,75
0,000934981	1300	0,52	864	130	1,81	41,33
0,000934981	1300	0,52	1302	99	1,80	47,90
0,001157823	1500	0,60	776	181	1,82	35,56
0,001157823	1500	0,58	914	149	1,77	35,98
0,001157823	1500	0,55	1118	141	1,75	39,11
0,001157823	1500	0,52	1329	104	1,77	43,94
0,00107087	1300	0,60	764	186	1,79	33,25
0,00107087	1300	0,48	1040	150	1,76	36,87
0,00107087	1300	0,45	1071	126	1,68	39,11
0,00107087	1300	0,42	1201	106	1,72	41,75
0,001136704	1500	0,55	1061	186	1,92	36,58
0,001136704	1500	0,50	1218	141	1,85	42,70
0,001136704	1500	0,48	1459	118	1,75	40,84
0,001136704	1500	0,45	1402	84	1,73	44,26
0,000995785	1300	0,45	1232	191	1,79	36,61
0,000995785	1300	0,42	1220	136	1,79	39,51
0,000995785	1300	0,42	1417	126	1,76	40,54
0,000995785	1300	0,42	1482	86	1,50	44,07
0,000917707	1300	0,70	431	180	1,94	40,57
0,000917707	1300	0,58	691	142	1,89	42,42
0,000917707	1300	0,48	877	130	1,87	46,60
0,000917707	1300	0,42	1043	82	1,83	49,19
0,000805031	1500	0,58	866	200	2,04	40,59
0,000805031	1500	0,55	1077	168	2,00	44,58
0,000805031	1500	0,52	1144	131	1,97	47,02
0,000805031	1500	0,48	1619	112	1,93	48,26
0,000812969	1300	0,58	908	203	2,03	38,90
0,000812969	1300	0,52	1152	163	1,94	43,50
0,000812969	1300	0,50	1177	142	1,85	44,86
0,000812969	1300	0,48	1516	97	1,70	46,05
0,00080977	1500	0,60	1096	194	2,07	40,75
0,00080977	1500	0,55	1310	142	1,97	46,34
0,00080977	1500	0,52	1476	124	1,84	46,46

Données du deuxième stade

0,00080977	1500	0,50	2025	70	1,74	49,43
0,000854824	1300	0,58	1098	190	1,99	42,61
0,000854824	1300	0,55	1418	145	1,95	42,50
0,000854824	1300	0,52	1440	124	1,89	46,30
0,000854824	1300	0,50	1908	73	1,69	49,03
0,001065635	1500	0,52	1326	240	1,88	32,85
0,001065635	1500	0,50	1443	195	1,73	34,00
0,001065635	1500	0,48	1538	161	1,64	33,39
0,001065635	1500	0,45	1762	104	1,42	38,45
0,001080515	1300	0,60	1599	298	1,89	33,01
0,001080515	1300	0,58	1691	245	1,83	33,86
0,001080515	1300	0,55	1533	228	1,77	35,46
0,001080515	1300	0,52	1493	208	1,71	34,74
0,000943283	1400	4,00	516	194	1,89	36,84
0,000943283	1400	0,60	734	165	1,93	42,17
0,000943283	1400	0,55	963	122	1,85	45,33
0,000943283	1400	0,50	1128	103	1,77	47,32
0,001116178	1514	0,48	1375	146	1,85	40,50
0,001116178	1514	0,42	1907	80	1,61	44,60
0,001093311	1514	0,52	1089	143	1,80	42,20
0,001093311	1514	0,42	1521	79	1,64	46,90
0,000781371	1514	0,45	1226	168	1,40	25,60
0,000781371	1514	0,40	1721	93	1,24	30,90
0,000858449	1514	0,50	905	135	1,26	28,20
0,000858449	1514	0,42	1119	92	1,18	29,70
0,001036668	1514	0,45	1231	169	1,59	29,90
0,001036668	1514	0,40	1779	101	1,47	33,50
0,001002915	1514	0,48	1275	126	1,51	31,90
0,001002915	1514	0,42	1633	84	1,31	34,90
0,000995807	1514	0,42	1603	127	1,58	35,10
0,000995807	1514	0,38	1754	65	1,27	36,60
0,001042688	1514	0,50	1082	151	1,65	36,50
0,001042688	1514	0,42	1852	65	1,37	41,50
0,000963747	1514	0,48	998	141	1,45	30,70
0,000963747	1514	0,40	1628	79	1,32	34,60
0,000883636	1514	2,00	621	149	1,47	28,60
0,000883636	1514	0,42	1169	79	1,40	35,80
0,00137503	1514	0,45	996	152	1,48	33,10
0,00137503	1514	0,38	1448	86	1,37	36,60
0,000819329	1514	1,00	694	139	1,52	33,40
0,000819329	1514	0,42	1054	90	1,44	37,50
0,001103398	1514	0,42	987	134	1,55	32,70
0,001103398	1514	0,35	1532	72	1,29	38,50
0,001047328	1514	0,50	837	136	1,61	35,50
0,001047328	1514	0,38	1153	86	1,48	38,40
0,001040736	1514	0,42	1495	123	1,45	35,90
0,001040736	1514	0,38	1667	65	1,14	35,40
0,000812623	1514	2,00	880	136	1,51	35,30
0,000812623	1514	0,38	1420	80	1,35	40,80

Données du deuxième stade

C_Diff	Tear	Int Moy Sec
52,33	6,05	0,001441426
55,79	6,25	0,001334866
58,22	5,59	0,001389968
58,64	5,73	0,001412632
43,07	9,25	0,001418839
46,72	8,76	0,001616778
48,60	8,64	0,001334608
51,70	8,91	0,00137997
51,77	1,96	0,001234062
51,91	2,05	0,001198811
53,78	2,17	0,001297887
58,72	1,77	0,001159539
48,23	11,13	0,001478932
50,02	10,80	0,001429414
50,27	10,45	0,001458286
52,61	9,50	0,001406385
55,57	10,51	0,00165584
58,97	10,06	0,001605441
59,67	9,62	0,001595145
61,95	9,02	0,001266867
49,14	7,96	0,001472709
51,25	7,50	0,00154527
51,37	7,77	0,001427218
56,09	7,77	0,001491889
48,79	10,01	0,001780465
52,87	9,97	0,001692058
53,17	9,82	0,001701082
55,72	9,28	0,001728322
46,12	11,07	0,001698661
48,59	10,97	0,001518852
50,26	9,92	0,001524241
52,24	9,56	0,001539922
55,95	5,44	0,001445194
56,19	5,28	0,001482025
58,21	5,77	0,001378635
59,87	5,84	0,001410913
48,83	5,95	0,001325135
48,16	6,20	0,001219221
50,49	6,26	0,001392183
55,68	6,06	0,001437073
45,14	12,39	0,001430467
48,94	12,97	0,001408527
48,50	11,63	0,001405566
52,88	9,82	0,001427538
56,00	9,43	0,001572124
57,67	9,87	0,001474974
59,83	9,83	0,001518198

Données du deuxième stade

61,39	8,86	0,001423071
52,26	5,67	0,001365923
53,43	5,65	0,001393337
57,42	6,05	0,001261989
58,29	6,06	0,001286867
48,67	11,26	0,001449352
50,65	11,55	0,001361914
51,13	10,45	0,001341917
53,02	9,42	0,001384103
58,73	9,17	0,001564594
59,58	8,93	0,001580865
62,24	8,90	0,001515473
63,50	8,38	0,001602675
49,69	8,75	0,001405855
50,84	8,59	0,001422068
51,92	8,07	0,001312023
53,82	8,60	0,00129827
53,71	9,97	0,001576257
56,30	9,91	0,001616728
57,25	9,56	0,001571298
61,49	9,39	0,001404587
48,09	9,86	0,001532832
49,09	10,41	0,001425037
51,22	9,75	0,001453677
51,82	9,47	0,001393796
54,22	5,68	0,001382782
56,64	6,47	0,001327693
59,35	6,26	0,001365921
61,16	6,33	0,001292339
48,38	6,28	0,001544812
51,37	6,50	0,001334367
52,50	6,83	0,001331952
53,96	7,12	0,00135728
48,29	10,84	0,001407107
49,46	10,60	0,001469078
49,74	10,40	0,001413883
51,68	9,33	0,001451451
57,13	9,18	0,001706584
60,34	9,32	0,001673595
61,80	8,86	0,001639304
64,74	8,43	0,001511752
46,54	9,79	0,001455229
47,00	9,90	0,001445648
51,48	9,50	0,001499657
55,66	9,01	0,0014605
55,00	2,09	0,001154616
58,81	1,90	0,001112347
60,34	1,78	0,001097373
61,47	1,79	0,001068663

Données du deuxième stade

51,54	5,23	0,001412766
55,14	5,57	0,001494615
56,46	5,79	0,001193522
59,91	5,86	0,001242127
48,81	10,64	0,001357741
48,82	9,63	0,001429981
51,32	9,56	0,001371851
60,68	7,90	0,001462417
57,12	9,76	0,001515221
58,27	8,77	0,001557746
58,99	8,85	0,001507691
62,83	8,43	0,001470629
51,09	7,64	0,001516787
52,20	7,66	0,001424142
55,27	7,10	0,001488399
56,36	7,24	0,001645397
54,07	9,30	0,001550896
55,04	9,60	0,001574838
58,26	8,89	0,001629954
59,43	9,35	0,001545422
48,26	10,16	0,001618261
50,52	9,86	0,001366444
51,07	9,17	0,00157691
52,13	8,78	0,001392507
54,46	6,07	0,001427334
58,40	6,52	0,001406376
60,52	6,32	0,001442982
61,36	6,38	0,001383263
50,05	6,60	0,001458411
53,26	6,93	0,001249955
53,57	7,10	0,001298337
57,84	7,48	0,001354276
47,97	10,73	0,001379929
49,25	9,77	0,001344587
49,18	9,75	0,00120824
51,19	9,29	0,001215608
57,90	8,79	0,001433733
58,96	8,84	0,001551406
62,07	9,19	0,001439568
62,13	8,22	0,001376329
46,81	9,58	0,001725927
47,49	10,11	0,001473956
48,52	9,99	0,001592254
50,77	8,58	0,001540486
56,40	1,95	0,001134433
58,96	1,80	0,00121454
61,25	2,00	0,001127311
63,01	1,82	0,001116522
49,21	11,05	0,001376408

Données du deuxième stade

51,03	9,99	0,001307842
51,41	9,51	0,001290474
47,79	12,23	0,001416498
51,47	9,94	0,001416208
51,68	10,28	0,001367322
52,92	9,28	0,001197804
48,61	11,94	0,001302531
50,96	11,32	0,001407467
52,51	10,20	0,001428474
54,16	9,28	0,001222762
56,60	9,83	0,001297855
58,49	9,61	0,001406296
60,87	8,78	0,00117974
57,72	10,38	0,00152776
58,62	9,91	0,001464436
60,92	9,75	0,001541209
64,43	8,88	0,001664051
48,98	10,60	0,001349914
51,61	10,54	0,001443345
54,90	10,54	0,001212983
54,78	9,68	0,001233824
47,23	11,19	0,001492876
50,20	9,84	0,001428366
52,29	10,14	0,001365397
54,05	9,07	0,0013092
49,27	10,85	0,001359298
50,24	10,59	0,00163512
53,71	9,50	0,001190913
50,08	9,50	0,001290724
53,52	10,06	0,001640092
56,82	9,21	0,001774453
57,85	8,86	0,001271176
58,55	8,58	0,001295769
52,87	9,11	0,001339874
55,84	8,68	0,001454773
57,36	8,14	0,001417115
60,29	8,31	0,001416596
52,58	9,25	0,00140871
54,20	9,54	0,001464109
55,59	8,89	0,001542378
57,18	8,47	0,001429698
49,21	11,05	0,001376408
51,03	9,99	0,001307842
51,41	9,51	0,001290474
56,82	9,41	0,001525595
58,22	9,11	0,00144119
60,29	9,30	0,001465089
63,72	8,31	0,001494407
48,41	12,09	0,00141613

Données du deuxième stade

49,56	11,19	0,001354721
51,05	10,63	0,001463282
54,02	10,03	0,001346537
57,84	9,78	0,001509377
59,62	10,05	0,001462739
61,80	9,62	0,001461608
62,72	9,10	0,001570674
47,97	12,14	0,001272049
51,52	10,96	0,001276434
51,41	10,92	0,001240261
53,20	10,11	0,001210163
49,04	10,98	0,0013318
50,61	10,50	0,001298938
51,73	10,06	0,001322277
52,31	9,68	0,001248991
49,22	11,13	0,001351365
51,03	10,27	0,001377453
51,45	10,00	0,001305861
52,60	9,45	0,001292926
56,84	10,47	0,001524057
59,76	9,35	0,001274191
64,60	9,61	0,001316861
63,89	8,72	0,001253308
57,67	9,65	0,001439443
58,55	9,70	0,001310146
60,56	9,25	0,001362741
62,67	8,90	0,001598323
57,34	9,94	0,001322381
60,51	9,37	0,001275995
61,72	8,75	0,001285309
63,90	8,76	0,001282809
48,41	11,05	0,001402884
49,62	10,31	0,001376644
51,90	9,84	0,001198576
54,17	10,14	0,001206237
46,68	11,79	0,001318974
49,02	11,28	0,001208773
50,24	11,18	0,00124665
51,93	9,25	0,001175836
52,19	10,36	0,001273119
54,57	10,28	0,001414162
56,02	10,05	0,001439569
56,55	9,07	0,001383859
52,15	9,80	0,001404751
54,54	9,39	0,001507176
55,33	8,86	0,001472896
55,91	9,23	0,001353865
49,19	11,66	0,001465658
52,54	10,16	0,001330782

Données du deuxième stade

51,98	9,51	0,001374887
54,27	8,51	0,001345491
56,31	9,05	0,001509216
59,39	8,59	0,001601738
61,24	9,02	0,001563263
63,05	8,67	0,001595534
49,3	13,76	0,001135595
50,9	13,65	0,001205213
51,5	11,39	0,00116359
53,8	10,11	0,00108729
51,9	10,93	0,001354181
53,0	11,31	0,001382659
53,3	11,32	0,001392535
53,5	10,43	0,001297277
48,7	11,21	0,001001915
50,2	12,86	0,000896678
52,2	11,07	0,000920063
54,9	9,88	0,000955868
50,5	10,61	0,001119996
51,6	9,93	0,001177759
51,4	10,35	0,001159772
53,8	10,10	0,001162242
49,5	11,83	0,001490693
52,1	10,96	0,00153789
52,8	10,39	0,001384364
53,0	10,63	0,001479796
50,4	11,96	0,001131389
51,2	10,92	0,001008776
53,5	9,80	0,001079782
54,9	9,49	0,001072486
51,2	11,74	0,001520835
53,1	11,38	0,001466467
53,6	10,32	0,001420942
56,1	9,39	0,001375882
48,7	11,80	0,001180864
50,9	12,46	0,001187262
53,0	10,61	0,001121332
53,0	10,47	0,001133654
49,7	14,19	0,000974016
50,5	13,32	0,001004086
50,9	11,57	0,000991978
52,9	11,25	0,000888327
49,7	12,78	0,00123391
51,2	12,51	0,001234681
52,0	12,07	0,001219375
54,7	10,89	0,001159435
49,7	14,16	0,000939584
51,3	12,28	0,000885058
52,7	13,07	0,000877457

Données du deuxième stade

54,6	10,84	0,000965735
50,3	12,36	0,001260248
51,7	13,51	0,001389042
52,7	12,81	0,001248221
54,5	10,11	0,001342728
49,9	13,04	0,001434151
51,0	11,99	0,001378019
51,7	10,66	0,001360537
53,4	9,29	0,001362127
47,0	12,95	0,001108123
47,5	11,40	0,001065989
47,1	11,74	0,001039088
48,9	11,04	0,00108308
50,9	11,51	0,001189455
50,7	11,77	0,001149968
53,6	11,10	0,001168982
54,6	10,96	0,001144935
53,10		0,001316614
56,90		0,001165843
54,30		0,001179546
54,40		0,001155889
55,70		0,001054759
60,20		0,001041745
55,10		0,001003247
57,90		0,000989396
54,10		0,000974905
57,80		0,000971904
54,00		0,000982743
54,50		0,000957752
53,60		0,000959449
54,10		0,000950686
53,20		0,000959671
55,30		0,00088656
56,10		0,000940297
57,40		0,000893337
54,10		0,000988247
54,40		0,000866188
54,60		0,000926924
57,80		0,000886018
54,10		0,000879012
53,90		0,000847482
67,80		0,000838454
59,50		0,000860013
56,20		0,000841512
57,40		0,000823941
54,10		0,0007802
57,90		0,000796768
53,70		0,000756517
57,70		0,000711529

Annexe II

Simulations dans Cadsim Plus™

