

Raffinage séparé ou en mélange, quels outils à mettre en œuvre pour optimiser la composition fibreuse, réduire la consommation énergétique pour la régularité de la qualité

Jean-Claude ROUX, Georges JORIS, Guy CAUCAL

Introduction

Lorsqu'un industriel papetier se trouve confronté à l'opération de raffinage sur une installation industrielle existante, il doit souvent répondre simultanément aux questions suivantes : comment choisir la composition fibreuse de façon à optimiser les caractéristiques papetières au moindre coût ? Les pâtes rentrant dans la composition fibreuse doivent-elles être raffinées, séparément ou, au contraire, en mélange ? Comment optimiser le raffinage pour une pâte donnée ? Est-il possible de définir une stratégie, suffisamment générale, qui soit applicable à n'importe quel type de pâte ? Si la dernière réponse est affirmative, comment alors mettre en œuvre cette stratégie sur un exemple concret ?

Afin d'apporter des éléments de réponses, des outils et des méthodes pragmatiques et rigoureuses de résolution de ces problèmes, cette communication est proposée aux industriels papetiers concernés.

Pour une composition fibreuse donnée, la variation d'une caractéristique papetière obéit le plus généralement à une relation empirique de type puissance (1). Cette variation de propriété $\Delta(Pr op.)$ va ainsi dépendre de l'énergie massique nette de raffinage (E), de la longueur moyenne pondérée des fibres (\bar{L}_f), du degré de résistance à l'égouttage de la pâte ($^{\circ}SR$), chacune des grandeurs précédentes étant affectée d'un exposant qui lui est propre comme l'indique l'expression suivante :

$$\Delta(Pr op.) = k (E)^{\alpha} \cdot (\bar{L}_f)^{\beta} \cdot (^{\circ}SR)^{\gamma} \quad (1)$$

Si cette relation est intéressante au plan industriel, elle possède en fait un inconvénient, au plan statistique, car la longueur moyenne pondérée des fibres (\bar{L}_f), tout comme le degré de résistance à l'égouttage de la pâte ($^{\circ}SR$), sont des fonctions de l'énergie massique nette de raffinage (E). Les 3 grandeurs précédentes sont donc dépendantes entre elles. Dans ces conditions, l'optimisation des caractéris-

AUTEURS :

Jean-Claude ROUX, Guy CAUCAL, Laboratoire de Génie des Procédés Papetiers
Ecole Française de Papeterie et des Industries Graphiques - UMR 5518 au CNRS/INPG/CTP/EFPG
BP n°65 - 38402 Saint-Martin d'Hères - France - Jean-Claude.Roux@efbg.inpg.fr

Georges JORIS, MATECH EUROPE - 20 Impasse de l'azérolier - 30900 Nîmes - matech@abtel.fr

tiques papetières est rendue plus délicate et doit, de fait, être abordée en deux temps. Il est d'abord nécessaire de connaître les lois qui régissent la variation :

- de la longueur moyenne pondérée des fibres
- du degré de résistance à l'égouttage de la pâte en fonction de l'énergie massique nette de raffinage, puis dans un second temps, d'injecter ces lois dans la relation générale précédente, pour chacune des propriétés étudiées ; l'optimisation devenant possible à l'issue de ces 2 étapes.

Le premier problème consiste à étudier la cinétique de raccourcissement des fibres lors du raffinage d'une pâte, en se basant sur l'évolution d'une grandeur moyenne en fonction du temps : la longueur moyenne pondérée des fibres.

Cette étude peut être conduite sur une installation semi-industrielle de raffinage comme illustré sur la figure 1. De telles installations existent dans des laboratoires universitaires de recherche papetière (GP2 de l'EPFG), dans des centres de recherches publics (CTP) ou privés, etc. Dans une telle installation, dite en hydracycle, les essais de raffinage sont souvent menés en maintenant constants 2 variables du procédé : la vitesse de rotation du raffineur d'une part, sa puissance nette consommée d'autre part. On peut alors montrer (annexe) que l'énergie massique nette consommée, lors du raffinage, est distribuée de façon identique, par passage, et qu'elle est proportionnelle au temps. Suivre ainsi l'évolution de la longueur moyenne pondérée des fibres en fonction de l'énergie massique nette de raffinage revient alors à caractériser la cinétique de raccourcissement des fibres.

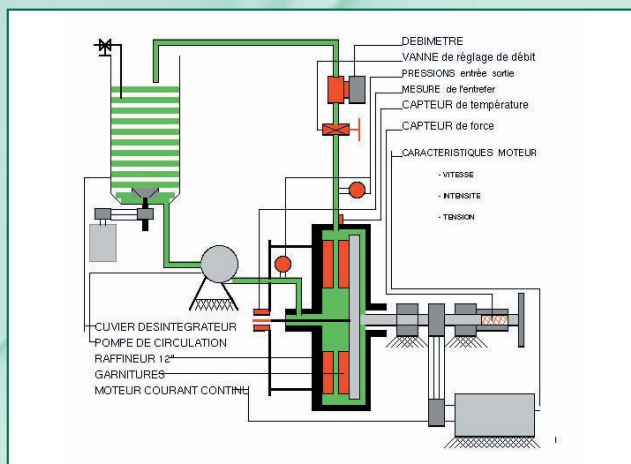


Figure 1 - schéma d'une installation en hydracycle

Optimisation de la cinétique de raccourcissement des fibres

L'étude préalable de la cinétique de raccourcissement des fibres, lors du raffinage d'une pâte en basse concentration,

implique de préciser le rôle d'un certain nombre de paramètres d'ingénierie du raffineur.

Une description globale de ces grandeurs d'influence est rendue possible grâce à un indicateur de raccourcissement (coupe) des fibres, appelé « charge spécifique d'arête de référence ».

Les auteurs de cette communication ont déjà publié, dans un autre contexte, une étude relative à la justification théorique et pratique de cette grandeur quantitative [1], [2], [3]. Si le raffineur étudié possède, par exemple, une seule paire de disques, la charge spécifique d'arête de référence s'écrit ainsi :

$$C_s^0 = \frac{3(a_s + b_s)(a_r + b_r)}{2\pi V_p (l \cdot k^3)} \cdot \frac{P_{nette}}{\rho_e^2} \quad (2)$$

Dans cette expression, pour un raffineur donné, les grandeurs suivantes sont fixes ; le rayon interne ($k \cdot \rho_e$), le rayon externe (ρ_e) et la vitesse tangentielle périphérique (V_p). Les autres paramètres comme les largeurs de lames (a_r, a_s), les largeurs de rainures (b_r, b_s), au rotor et au stator, et la puissance nette consommée de raffinage (P_{nette}) sont variables d'un essai à l'autre.

Nous allons donner l'exemple de l'optimisation de la cinétique de raccourcissement de fibres d'une pâte de résineux au bisulfite. Une expérimentation préalable a été effectuée sur l'installation hydracycle.

Elle a permis de caractériser l'évolution de la longueur moyenne pondérée des fibres en fonction de 4 valeurs de l'énergie massique nette de raffinage et ce, pour 4 charges spécifiques d'arête de référence.

Ces dernières ont été obtenues en changeant, soit la largeur des lames (identique au rotor et au stator), soit la puissance nette de raffinage. Notons que les paramètres géométriques (angle de taillage des lames, angle de sectorisation) ont été maintenus invariants dans ces séries d'expériences. Les résultats sont précisés dans les tableaux suivants :

$$C_s^0 = 9.70 \text{ J/m}$$

E (kWh/t)	36	80	124	168
$\bar{L}f$ (mm)	1.81	1.54	1.31	1.08

$$C_s^0 = 1.00 \text{ J/m}$$

E (kWh/t)	40	80	120	160
$\bar{L}f$ (mm)	1.70	1.39	1.13	1.01

$$C_s^0 = 1.60 \text{ J/m}$$

E (kWh/t)	38	80	122	164
$\bar{L}f$ (mm)	1.82	1.36	1.18	1.01

$$C_s^0 = 2.10 \text{ J/m}$$

E (kWh/t)	45	95	145	195
$\bar{L}f$ (mm)	1.73	1.39	1.13	0.98

L'évolution de la longueur moyenne pondérée des fibres en fonction de l'énergie massique nette de raffinage peut être représentée, pour chacune des 4 séries envisagées, par une expression du type cinétique du 1^{er} ordre [4] :

$$(\bar{L}f) = Lf_0 \cdot \exp(-\lambda \cdot E)$$

La longueur moyenne pondérée initiale des fibres $\bar{L}f_0$ (correspondant à une énergie massique nette de raffinage nulle) et le coefficient λ , se calculent à partir de l'ordonnée à l'origine et de la pente des droites d'après la relation déduite de (3) comme le montre la figure 2 :

$$\ln(\bar{L}f) = \ln(Lf_0) - \lambda E \quad (4)$$

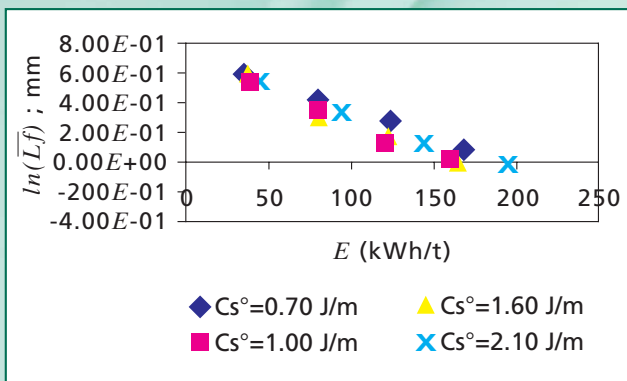


Figure 2 - Evolution de la longueur moyenne pondérée des fibres en fonction de l'énergie massique nette de raffinage.

Appliquée aux données précédentes, nous obtenons :

C_s^0 (J/m)	0.70	1.0	1.6	2.1
Lf_0 (mm)	2.09	1.99	2.07	2.02
$10^3 \lambda$ (t/kWh)	3.89	4.42	4.54	3.82

Les valeurs calculées pour la longueur moyenne pondérée initiale des fibres sont très voisines de la valeur mesurée,

connue, à 2.02 mm (écart relatif toujours inférieur à 3.5 % entre les calculs et les mesures). Le coefficient λ , qui caractérise la constante de vitesse de la cinétique du 1^{er} ordre, passe par un maximum en fonction de la charge spécifique d'arête de référence C_s^0 . D'après la figure 3, le maximum de raccourcissement des fibres est obtenu lorsque la charge spécifique d'arête de référence C_s^0 est comprise entre 1.0 et 1.6 J/m.

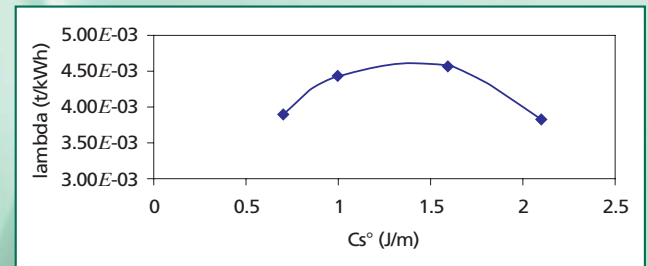


Figure 3 - Constante lambda en fonction de la charge spécifique d'arête de référence.

On peut montrer [4] que cette dépendance obéit à l'expression suivante, qui rend compte de l'évolution expérimentale obtenue :

$$\lambda(C_s^0) = \frac{\mu}{2 \cdot C_s^0} \exp\left(-\frac{\xi}{C_s^0}\right) \quad (5)$$

Dans cette expression, μ désigne la masse de fibres collectées par unité de longueur d'arête de lame et ξ est précisément la charge spécifique d'arête de référence optimale. Cette charge conduit à la vitesse de raccourcissement des fibres la plus grande. De la même façon que précédemment, ces grandeurs peuvent aisément être déduites de la relation suivante :

$$\ln[C_s^0 \cdot \lambda(C_s^0)] = \ln(\mu/2) - \xi \cdot \left(\frac{1}{C_s^0}\right) \quad (6)$$

Dans la représentation graphique de $\ln[C_s^0 \cdot \lambda(C_s^0)]$ en fonction de $\left(\frac{1}{C_s^0}\right)$, l'ordonnée à l'origine conduit à la dé-

termination de la masse de fibres collectées μ par unité de longueur d'arête de lames et la valeur absolue de la pente de la droite fournit la charge spécifique d'arête optimale recherchée ξ .

Appliquée aux données précédentes, nous obtenons :

$1/C_s^0$ (n/J)	0.476	0.625	1.00	1.43
$\ln[C_s^0 \cdot \lambda(C_s^0)]$ (t/kWh) (J/m)	-4.825	-4.924	-5.421	-5.907

$$\mu = 0.0289 \text{ (t/kWh).(J/m)} = 8.03 \text{ mg/m}$$

$$\xi = C_s^0 \text{ optimale} = 1.169 \text{ J/m}$$

Pour cette pâte de résineux au bisulfite, l'évolution de la longueur moyenne pondérée des fibres, en fonction de l'énergie massique nette de raffinage, se présente alors sous la forme suivante :

$$(Lf) = (Lf_0) \cdot \exp[-\lambda \cdot E] \quad (7)$$

$$\lambda(C_s^0) = \frac{0.01445}{C_s^0} \cdot \exp\left(\frac{1.159}{C_s^0}\right)$$

Le modèle complet inclut la valeur de la charge spécifique d'arête de référence comme paramètre. Ce modèle est aussi satisfaisant que possible puisqu'il rend compte des valeurs expérimentales avec une précision relative, en valeur absolue, inférieure à 3 % en moyenne. La droite de régression tracée entre les longueurs de fibres calculées et celles mesurées confirme la validité du modèle proposé dans cette approche des phénomènes.

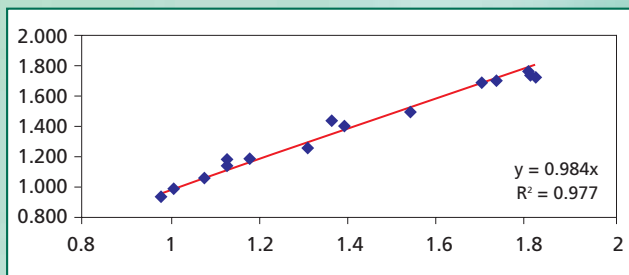


Figure 4 - Longueurs calculées des fibres L_f en fonction des longueurs L_f mesurées.

Détermination pratique des conditions optimales sur l'installation de raffinage

Les données techniques relatives à l'installation pilote de raffinage sont les suivantes :

$$k = 0.493 \quad \rho_e = 0.152 \text{ m} \quad V_p = 26.18 \text{ m/s}$$

une paire de disques

$$20 < Q < 40 \text{ m}^3/\text{h} \quad C = 34 \text{ kg/m}^3 \quad E = 160 \text{ kWh/t}$$

Nous proposons maintenant de déterminer pratiquement comment mettre en œuvre les conditions optimales pour cette installation avec la pâte de bisulfite de résineux ainsi caractérisée. La charge spécifique d'arête de référence étant connue (1.169 J/m), l'expression (2) permet alors de calculer successivement :

- la puissance nette à appliquer au raffineur avec les données numériques précisées ci-dessus :

$$P_{\text{nette}} = \frac{2\pi V_p \cdot (1-k^3) \cdot \rho_e^2 \cdot \xi}{3 \cdot (a+b)^2} \cdot \frac{l \cdot 303}{(a-b)^2} \quad (8)$$

- l'énergie e par cycle ainsi que le nombre n de cycles (voir annexe) :

$$E = n \cdot e = n \cdot \frac{P_{\text{nette}}}{Q \cdot C} \quad 9$$

Le choix du code de taillage, commun au rotor et au stator, est donc déterminant pour définir la puissance nette de consigne du raffineur. De même, le nombre de cycles (passages) à effectuer va dépendre du débit massique choisi ; ces deux grandeurs intervenant dans le choix de l'énergie massique nette de raffinage à appliquer, par cycle de travail, à la matière première fibreuse.

Les exemples suivants du code de taillage et du débit massique permettent de simuler, sur l'installation proposée, les conditions optimales de raffinage. Nous choisissons par exemple :

$$a = b = 4.0 \text{ mm} \quad Q \cdot C = 20 \times 34 = 680 \text{ kg/h}$$

$$P_{\text{nette}} = 20.4 \text{ kW} \quad e = 30.0 \text{ kWh/(t.cycle)}$$

$$n = 6 \text{ cycles nécessaires}$$

Dans cet exemple, nous avons suivi l'optimisation de la cinétique de raccourcissement des fibres d'une pâte de résineux au bisulfite. Ceci nous a conduit à déterminer la charge spécifique d'arête de référence. Cette grandeur est proportionnelle à la force tangentielle nette de frottement, nécessaire pour obtenir l'effet de coupe le plus efficace sur les fibres de la pâte analysée [2]. Chaque pâte possède une signature, en termes de charge spécifique d'arête de référence optimale, qui lui est propre, pour un effet de raffinage donné.

Nous aurions pu, tout aussi bien, rechercher pour cette même pâte, l'optimum de la charge spécifique d'arête de référence, correspondant à la résistance à l'égouttage ($^{\circ}SR$). Les 2 optima n'ont aucune raison d'avoir la même valeur numérique ; leur différence, en valeur absolue, traduit en réalité, la plus ou moins grande proportion de fines dans la pâte analysée.

Chaque pâte, rentrant dans une composition fibreuse donnée, peut ainsi être caractérisée par sa signature, compte tenu de l'effet étudié (raccourcissement \bar{L}_f , résistance à l'égouttage $^{\circ}SR$, proportion de fines), en termes de charges spécifiques d'arête de référence optimales. D'une manière équivalente, le mélange de tout ou partie de chacune des pâtes peut également faire l'objet d'étude particulière afin de déterminer la signature globale d'un tel mélange.

Dans un cas (étude séparée de chacune des pâtes) comme dans l'autre (étude globale du mélange), l'optimisation des caractéristiques papetières recherchées peut alors s'envisager à partir du tracé graphique des iso-propriétés. Elles sont, par exemple, fonction de la charge spécifique d'arête de référence et de l'énergie massique nette appliquée à la pâte. Tout ce qui vient d'être développé jusqu'à présent fait l'objet d'un logiciel nommé FIBROLOGIC, commercialisé

par la société MATECH à l'intention des industriels papetiers.

La méthode précédente a été appliquée, avec succès, dans plus d'une centaine d'études, avec essais réalisés sur la station expérimentale de raffinage de l'Ecole Française de Papeterie et des Industries Graphiques (EFIG). Par exemple, des entreprises comme METSO (ex-VALMET), nous ont confié des études spécifiques dans ce cadre.

A l'heure actuelle, l'émergence sur le marché de nouveaux analyseurs de fibres, en ligne, rend possible la caractérisation fine des distributions des grandeurs dignes d'intérêt et non plus seulement de leurs valeurs moyennes. Il en est ainsi de la longueur pondérée des fibres. L'optimisation d'une composition fibreuse est alors entreprise par une méthodologie quelque peu différente et, encore plus performante.

Optimisation d'une composition fibreuse

L'optimisation des conditions de raffinage d'une composition fibreuse, en basse concentration, permet souvent, pour les caractéristiques papetières concernées, de trouver des compromis acceptables. Toutefois, si les proportions massiques de chacune des pâtes ont été choisies empiriquement, il est parfois difficile d'atteindre les objectifs à un coût raisonnable. Cette situation demeure identique même si les pâtes sont raffinées séparément.

L'optimisation des proportions massiques de chaque pâte, dans une composition fibreuse, est donc étroitement liée :

- aux conditions de raffinage de ces pâtes
- aux propriétés des papiers à fabriquer
- aux aspects financiers tels que les coûts des matières premières et les coûts énergétiques.

Comment déterminer simultanément les proportions de chacune des pâtes ainsi que leurs meilleures conditions de raffinage pour l'obtention d'un papier à moindre coût : tel est l'objectif du logiciel PULPDIA. Ce programme fonctionne à partir des données expérimentales (issues des analyses effectuées sur les pâtes de la composition fibreuse étudiée) et des interprétations théoriques de ces données. Revenons à l'équation (1) que nous allons écrire sous la forme simplifiée suivante :

$$\Delta(Prop.) = k' (\bar{L}_f)^\alpha (\text{°SR})^\beta \quad (10)$$

expression dans laquelle le facteur énergie E , qui dépend à la fois du °SR et des longueurs des fibres, a été omis. La seule connaissance du °SR et de la longueur moyenne pondérée des fibres n'est pas suffisante pour appréhender les caractéristiques papetières avec une précision acceptable. Toutefois, comme nous allons le développer brièvement (sous des conditions de raffinage préalablement définies par le logiciel FIBROLOGIC), il s'avère possible de prédé-

terminer les caractéristiques papetières en fonction des pourcentages massiques de chacune des pâtes rentrant dans la composition fibreuse étudiée. Pour atteindre cet objectif, il faut établir les lois physiques et/ou empiriques de l'évolution du °SR, de \bar{L}_f , de α et de β en fonction de la proportion pondérale q de chacune des pâtes. Nous illustrerons le cas simplifié d'une composition fibreuse constituée de deux pâtes à papier A et B de proportion massique respective, q et $(1-q)$.

Comment, par exemple, établir la loi donnant la longueur moyenne des fibres du mélange en fonction des longueurs moyennes des fibres de chacune des pâtes ? Pour des longueurs arithmétiques de fibres, les valeurs moyennes des longueurs par pâte sont données par les expressions suivantes, à partir du comptage des nombres n_i^A et n_i^B de fibres de longueur arithmétique l_i :

$$\bar{L}_A = \frac{\sum n_i^A l_i}{\sum n_i^A} \quad (11)$$

$$\bar{L}_B = \frac{\sum n_i^B l_i}{\sum n_i^B} \quad (12)$$

De même, la longueur moyenne arithmétique des fibres du mélange est définie ainsi :

$$\bar{L} = \frac{\sum (n_i^A + n_i^B) \cdot l_i}{\sum (n_i^A + n_i^B)} \quad (13)$$

Il est aisé de démontrer qu'il existe une relation liant les 3 grandeurs précédentes et faisant intervenir la proportion en nombre y ; $(1-y)$ de chacune des 2 pâtes (termes entre grandes parenthèses) :

$$\bar{L} = \left(\frac{\sum n_i^A}{\sum (n_i^A + n_i^B)} \right) \bar{L}_A + \left(\frac{\sum n_i^B}{\sum (n_i^A + n_i^B)} \right) \bar{L}_B \quad (14)$$

Cependant, c'est la longueur moyenne pondérée des fibres notée \bar{L}_f , et non la longueur moyenne arithmétique des fibres, qui se trouve dans la relation de départ (10). Aussi, des calculs analogues conduisent-ils à l'expression donnant la longueur moyenne pondérée des fibres du mélange en fonction de celle de chacun des constituants. Ces expressions font de plus intervenir les masses linéiques de chacune des pâtes, notées w_A et w_B :

$$\bar{L}_f = \frac{\sum (n_i^A + n_i^B) \cdot l_i^2}{\sum (n_i^A + n_i^B) \cdot l_i} = \left(\frac{q}{w_A} + \frac{1-q}{w_B} \right) I_{fA} + \left(\frac{q}{w_A} + \frac{1-q}{w_B} \right) I_{fB} \quad (15)$$

Nous savons également que la longueur moyenne pondérée au carré, notée $\overline{L_w}$, est également disponible sur certains appareils de mesure de type analyseur. Les expressions correspondantes pour le mélange, en fonction de chacun des constituants, peuvent devenir vite très compliquées.

Utilisation des statistiques pour résoudre la difficulté posée

Si nous repartons de la définition même de la longueur moyenne arithmétique des fibres du mélange, nous pouvons mettre en évidence les fréquences d'apparition p_i des différentes classes de longueurs de fibres :

$$\overline{L} = \frac{\sum n_i \cdot l_i}{\sum n_i} = \sum \left(\frac{n_i}{\sum n_i} \right) l_i = \sum p_i l_i = E(X) \quad (16)$$

La longueur moyenne arithmétique des fibres du mélange peut ainsi s'écrire sous la forme de l'espérance mathématique, notée $E(X)$, de la variable aléatoire X . Les réalisations de cette variable aléatoire X sont les valeurs distinctes l_i des longueurs avec leurs probabilités respectives p_i . On a alors successivement :

$$E(X) = \frac{\sum n_i l_i}{\sum n_i} = \sum p_i \cdot l_i \quad (17)$$

$$E(X^2) = \frac{\sum n_i l_i^2}{\sum n_i} = \sum p_i \cdot l_i^2 \quad (18)$$

$$E(X^3) = \frac{\sum n_i l_i^3}{\sum n_i} = \sum p_i \cdot l_i^3 \quad (19)$$

d'où il vient les expressions de la longueur moyenne des fibres, pondérée (simple) et pondérée au carré, à partir des espérances mathématiques précédentes :

$$L_f = \frac{\sum n_i l_i^2}{\sum n_i l_i} = \frac{E(X^2)}{E(X)} \quad (20)$$

$$\overline{L_w} = \frac{\sum n_i l_i^3}{\sum n_i l_i^2} = \frac{E(X^3)}{E(X^2)} \quad (21)$$

La variance (ou moment centré d'ordre 2) de la distribution des longueurs de fibres dans le mélange est donnée par la relation suivante :

$$V(X) = \mu_2 = E(X^2) - E(X)^2 \quad (22)$$

De même, le moment d'ordre 3 s'écrit :

$$\mu_3 = E(X^3) - 3 E(X) \cdot E(X^2) + 4 E(X)^3 \quad (23)$$

A partir de ces relations, la fonction caractéristique approchée de la distribution des longueurs de fibres du mélange peut être calculée. En fin de compte, la distribution des longueurs de fibres du mélange s'en déduit et est alors parfaitement prédéterminée.

Nous nous sommes intéressés aux longueurs dans un premier temps mais qu'en est-il des résistances à l'égouttage ? Est-il judicieux d'écrire la résistance à l'égouttage du mélange de la forme :

$$^{\circ}SR = q (^{\circ}SR_A) + (1 - q) \cdot (^{\circ}SR_B) ? \quad (24)$$

Cette loi très simple pourrait s'appliquer dans tous les cas où le $^{\circ}SR$ reste inférieur à son seuil de saturation en pratique $50^{\circ}SR$. Afin de pouvoir appréhender le $^{\circ}SR$ d'un mélange de pâte dont l'une au moins est raffinée à $50^{\circ}SR$ ou plus, il convient de rechercher une approche plus rigoureuse. Une telle méthode consiste à transformer le $^{\circ}SR$ en une résistance spécifique à la filtration RSF (m/kg) qui permet de valider l'équation :

$$RSF = q RSF_A + (1 - q) \cdot RSF_B \quad (25)$$

jusqu'aux environs de $80^{\circ}SR$. Au delà de cette valeur, il convient de recourir à des méthodes de pondération spécifiques.

Restent à présent à déterminer les lois $k(q)$, $\alpha(q)$ et $\beta(q)$. Il n'y a aucune raison pour que ces lois soient nécessairement monotones croissantes ou décroissantes.

Par exemple, l'équation simplifiée suivante :

$\alpha(q) = q \cdot \alpha_A + (1 - q) \cdot \alpha_B$ ou sa forme logarithmique (puisque α apparaît sous forme d'un exposant), peut conduire à des aberrations. Il convient, par conséquent, de rechercher les fonctions mathématiques $k'(q)$, $\alpha(q)$ et $\beta(q)$ à partir d'un protocole d'essais et de mesures sur des échantillons de pâtes raffinées.

Il paraissait évident que la seule connaissance des longueurs moyennes (arithmétiques, pondérées et pondérées au carré) des fibres ainsi que celle du $^{\circ}SR$ du mélange ne pouvaient suffire à déterminer, avec précision, les caractéristiques du papier.

L'extension de la mesure du $^{\circ}SR$ à la détermination de l'évolution dans le temps de la courbe d'égouttage d'une pâte, en cours de tests, représente une avancée importante. Ainsi, l'appareil DFT3000 est-il en mesure de caractériser l'égouttage dynamique d'une pâte en mélange ou non. Les résultats obtenus avec cet appareil sont destinés, à par-

tir d'un protocole d'essais, à alimenter le logiciel PULP-DIAG.

D'autres caractéristiques morphologiques des fibres devraient être prises en compte, à court terme, afin de réduire au maximum le nombre d'essais à réaliser ainsi que les mesures physiques nécessaires à l'établissement de diagrammes fiables.

Nous tenons, à la demande des papetiers intéressés par ce sujet, un exemple industriel concret des possibilités offertes par PULPDIAG.

Conclusion

L'optimisation des caractéristiques papetières des pâtes et des papiers fait souvent référence aux opérations de consolidation de la matière première fibreuse (pressage, raffinage). Parmi ces opérations, le raffinage des fibres de différents constituants en suspension aqueuse joue un très grand rôle. Cette communication a proposé deux approches pour envisager le double problème industriel de l'optimisation de la composition fibreuse et des conditions de raffinage des pâtes rentrant dans cette composition.

Une première, classique, s'appuie sur l'évolution de grandeurs moyennes (longueurs pondérées des fibres \bar{L}_f , résistance à l'égouttage de la pâte $^{\circ}SR$) en fonction de l'énergie massique nette E appliquée au cours du raffinage. A partir de modèles physiques descriptifs, chaque effet étudié de raffinage (coupe, fibrillation, hydratation, etc.) conduit à une charge spécifique d'arête de référence optimale qui rend possible la maîtrise du raffineur et de ses effets sur la pâte. Appliquée à une seule pâte ou à un mélange (dans une composition fibreuse notamment), cette méthodologie conduit à la solution du problème posé sur des bases rationnelles.

Une deuxième approche s'appuie sur des moyens de mesures plus fins comme la distribution des longueurs de fibres et la courbe d'égouttage dynamique d'une pâte (innovation technique). Elle s'appuie également sur des outils mathématiques élaborés à partir de la théorie des probabilités et à partir de lois physiques (génie papetier). L'ensemble de ces techniques permet d'optimiser individuellement les conditions de raffinage pour chaque pâte entrant dans une composition fibreuse, mais également les pourcentages pondéraux de ces pâtes sur la base de critères financiers.

Bref, produire mieux et à moindre coût est un problème d'actualité pour lequel des approches rigoureuses existent en dépit du nombre relativement important de paramètres à prendre en considération. Une telle stratégie a été présentée dans cette communication. Elle repose sur des programmes informatiques généraux, développés à cet effet. FIBROLOGIC est un logiciel qui optimise les conditions de raffinage pour un objectif donné (première partie de cette

communication), CHECKDIAG permet le transfert des résultats à l'unité industrielle tandis que PULPDIAG détermine l'optimum de composition fibreuse suivant des critères qualitatifs (caractéristiques papetières) et financiers (coût de la matière première et de l'énergie).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] ROUX, J.C., JORIS, G., CAUCAL, G.,
« Quelques écueils de la charge spécifique d'arêtes dans le raffinage à basse concentration »
Revue A.T.I.P., 53, (1), pp 3-9, janvier-mars 1999.
- [2] ROUX, J.C., CHU, J., JORIS, G., CAUCAL, G.,
« Théorie hydro-mécanique du fonctionnement d'un raffineur à basse concentration »
Revue A.T.I.P., 53, (4-5), pp 106-116, septembre-octobre 1999.
- [3] ROUX, J.C., JORIS, G., CAUCAL, G.,
6th Pira International Refining Conference, Toronto, Canada, 28-30 mars 2001
« Angular parameters beyond specific edge load ».
- [4] ROUX, J.C., MAYADE, T.,
« Modeling of the particle breakage kinetics in the wet mills for the paper industry »
Powder Technology, 105, (1-3), pp 237-242, novembre 1999.

Annexe

En hydracycle ou mode discontinu (batch), l'énergie massique nette de raffinage s'écrit à partir de la masse m_s de pâte dans le cuvier (quantité comptée en matières sèches) :

$$E = \int_0^t \frac{P_{nette}(t')}{m_s} dt' \quad 26)$$

Si la puissance nette est maintenue constante pendant un essai, l'énergie massique nette de raffinage est alors proportionnelle à la durée de l'essai :

$$E = \frac{P_{nette} \cdot t}{m_s} \quad 27)$$

En tenant maintenant compte du volume V de suspension dans le cuvier, du débit volumique Q circulant, de la durée Δt d'un cycle, de la concentration C , il est possible d'écrire les égalités suivantes :

$$E = \frac{P_{nette} \cdot n \cdot \Delta t}{C \cdot V} = \frac{P_{nette} \cdot n \cdot V}{C \cdot V \cdot Q} = n \cdot \left(\frac{P_{nette}}{Q \cdot C} \right) = n \cdot e \quad (28)$$

qui démontrent le résultat attendu. L'énergie massique nette de raffinage est distribuée, de façon identique, par passage ou cycle, à la pâte au cours d'un essai de raffinage en hydracycle.