

Optimiser la formation de feuille grâce à une forte rétention des charges et des fines

Patrick HUBER *, Bruno CARRÉ *, Evelyne MAURET # et Jean-Claude ROUX #

Résumé

On connaît peu l'effet des éléments fins sur la floculation des fibres, et par conséquent sur la formation de feuille. A l'aide du capteur de floculation du CTP, nous avons mesuré la tendance à floculer de suspensions fibreuses avec des taux d'éléments fins variables, en présence d'un système de rétention composé d'amidon cationique et de polyacrylamide anionique. Il apparaît qu'un taux d'éléments fins ajouté de 40% provoque une augmentation de la floculation fibreuse de 18%, dans des conditions de rétention usuelles. Nous avons estimé qu'une telle fraction d'éléments fins pouvait être observée en caisse de tête pour une rétention totale de 63%. Il est donc probable que l'effet néfaste des éléments fins sur la floculation soit amplifié sur machine à papier. Ainsi, il semble souhaitable de maintenir un bon niveau de rétention des éléments fins pour optimiser la formation de feuille.

Remarque : ces résultats ont été présentés en partie au 5th International Paper and Coating Chemistry Symposium, Montreal, 16-19 June (2003). PAPTAC.

Introduction

Formation et rétention sont des objectifs antagonistes dans le circuit court, dont le compromis dépend des priorités de la production. Les rares études consacrées au compromis formation/rétention font état d'une relation à peu près linéaire^[1,2] : un gain de rétention entraîne une détérioration proportionnelle de la qualité de formation. Dans certaines usines, la rétention est délibérément sacrifiée au profit de la formation de feuille. Lorsqu'on teste les performances d'un système de rétention, il est donc primordial de mesurer les conséquences sur la floculation des fibres dans le même temps.

Il est largement admis que la rétention sur l'unité de formation contrôle l'accumulation des éléments fins dans la boucle courte, par l'intermédiaire de la recirculation des eaux blanches^[3]. Ainsi, il y a de nombreux avantages à maintenir un niveau de rétention élevé. Selon Britt^[4], un taux de charge important peut être appliqué en caisse de tête sans saturer les eaux blanches, la charge du clarificateur d'eaux blanches peut être réduite, l'égouttage est amélioré et l'effet d'envers sur la feuille peut être minimisé. En outre, une

AUTEURS : Patrick HUBER *, Bruno CARRÉ *, Evelyne MAURET # et Jean-Claude ROUX #

* Centre Technique du Papier - BP 251 - 38044 Grenoble - France - tel : 04.76.15.40.51 fax : 04.76.15.40.16
Patrick.Huber@webctp.com

Ecole Française de Papeterie, BP 65 - 38402 St-Martin d'Hères - France

faible concentration de charge minérale en caisse de tête limite les phénomènes d'abrasion et prolonge la durée de vie des toiles et des instrumentations dans la boucle. Enfin, on connaît peu l'effet du taux d'éléments fins sur la floculation des fibres (et par conséquent sur la formation de feuille ^[5,6]).

Beghello ^[7] a étudié l'influence des éléments fins sur la floculation des fibres en l'absence d'agents de rétention, au laboratoire. Il a montré que dans ce cas, les éléments fins n'influencent pas la floculation des fibres, jusqu'à un taux correspondant à 20% du poids de fibres. Son explication est que des petits éléments n'interfèrent pas mécaniquement avec des floccs de fibres de taille largement supérieure. Peu d'études ont été consacrées à l'influence des éléments fins sur la floculation des fibres en présence d'agents de rétention. King & Williams ^[8] ont observé qu'un taux de fines de cellulose de 10% entraînait une floculation fibreuse plus importante qu'un taux de 1%, en présence d'un polymère cationique. Solberg & Wågberg ^[9] ont montré qu'une suspension fibreuse contenant 5 % de fines cellulosiques floculait plus fortement qu'une suspension classée sans fines, sous l'influence d'un polyacrylamide cationique. Il semble donc probable que les polyelectrolytes et/ou les éléments fins puissent affecter les interactions fibreuses dans une suspension papetière.

L'objectif de cette étude est d'estimer l'influence des éléments fins sur le compromis floculation/rétention en caisse de tête. Pour ce faire, des mesures de floculation des fibres avec taux d'éléments fins variables sont effectuées à l'aide du capteur de floculation du CTP, en présence d'un système de rétention composé d'un amidon cationique et d'un polyacrylamide anionique. Finalement l'influence de la rétention sur le taux d'éléments fins en caisse de tête est estimée par un modèle simple de la boucle courte. Le résultat est utilisé pour replacer les mesures de floculation des fibres en présence d'éléments fins dans un contexte industriel.

Méthodes expérimentales

Composition de la suspension

La composition préparée est typique d'une fabrication impression/écriture. Elle est constituée d'un mélange de fibres, de fines cellulosiques et de charges.

Fibres. La fraction fibreuse est un mélange 3/4 feuillus et 1/4 résineux. Elle contient déjà 20% de fines cellulosiques, définies comme les éléments passant à travers une toile de 200 mesh (vide de maille 75 µm) lors d'un "hyperlavage" avec agent dispersant tétrapy-

rophosphate de sodium, selon norme Tappi T261 cm94. **Fines.** La même composition fibreuse a été lavée sur le pilote fibres recyclées du CTP pour produire des fines de cellulose. Les fibres sont désintégrées dans un pulpeur hélico, puis raffinées à 34°SR sur un disperseur Sprout Waldron afin d'augmenter la proportion de fines dans la pâte. La pâte est ensuite classée sur une toile vibrante continue (laveur Classiflux, voir ^[10,11]). Un volume de filtrat d'environ 1 m³ est récupéré, puis décanté pendant 12 h. Une petite quantité de biocide a été ajoutée pour prévenir la dégradation bactérienne des fines. L'eau en excès est pompée et la pâte de fines restante est centrifugée à une concentration d'environ 20%. La pâte de fines est stockée en chambre froide et utilisée sous quelques jours. Cette pâte contient 90% de fines cellulosiques (mesuré par hyperlavage). Ainsi, 50 kg de pâte ont été nécessaires pour fabriquer 1 kg de fines de cellulose, en poids sec. Les fines sont désintégrées dans 5 L d'eau chaude, puis mélangées aux fibres dans la cuve du banc de floculation.

Charges. Les charges utilisées sont un slurry de carbonate de calcium (Hydrocarb HO 60, Omya).

Éléments fins. Les éléments fins ajoutés sont constitués d'un mélange d'un tiers de fines cellulosiques et deux tiers de charge minérale.

Mesure de la floculation

Les fibres, fines et charges sont mélangées dans la cuve du banc de floculation, où la température est régulée à 35±2°C (voir Fig. 1). La pâte est remontée vers la surverse dont la hauteur détermine la vitesse d'écoulement. Les agents de rétention sont injectés en continu par des seringues automatisées et mélangés à la suspension par des générateurs de turbulence. Chaque injection est suivie d'un cisaillement 0.5 s plus tard (Cisailleur 1: Giroflux, 4L, rota-

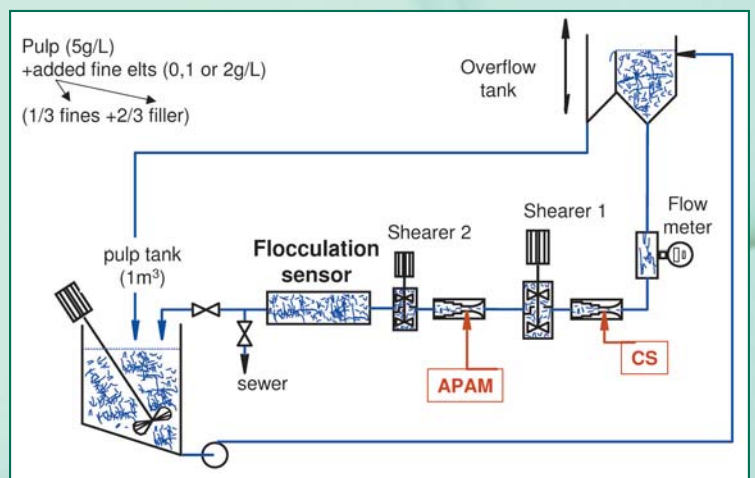


Figure 1. Schéma du circuit de pâte et situation du capteur de floculation.

tion 500 rpm; Cisailleur 2: Giroflux, 2L, rotation 350 rpm). Le gradient de vitesse produit par le cisailleur 1 est estimé à $G_1 = 1100 \text{ s}^{-1}$, et celui produit par le cisailleur 2 à $G_2 = 1800 \text{ s}^{-1}$. On mesure ensuite la tendance à la floculation de la suspension. La pâte circule en boucle fermée. Cependant, lorsque des agents de rétention sont injectés, la pâte est détournée vers la prise d'échantillon puis l'égoût car son état physico-chimique a été modifié.

Techniquement, il est difficile de mesurer la floculation de suspensions à fort taux de charge, car les éléments fins diffusent la lumière. Les méthodes conventionnelles qui analysent les fluctuations de lumière transmise (type RMS) sont inadaptées. La technique de morphologie mathématique développée par Pierre [12] et utilisée ici est bien moins sensible à la présence de charges : des flocs de fibres peuvent être détectés indépendamment du contraste de l'image.

La suspension en écoulement est observée en lumière transmise à travers une veine transparente d'épaisseur 5 mm. La vitesse d'écoulement dans la veine est réglée à 0.9 m/s. Le cisaillement induit par le passage dans la veine du capteur est évalué à $G_v = 360 \text{ s}^{-1}$. L'analyse d'image donne accès à la distribution de taille des flocs (histogramme de la surface totale de flocculation S_i dans chaque classe de taille équivalente D_i). Un indice de floculation I_f est calculé comme le moment d'ordre 2 de la distribution de taille des

$$I_f = \sum_i S_i D_i^2$$

flocs :

L'analyse d'image est effectuée sur 225 images de $60 \times 60 \text{ mm}^2$ par mesure. L'intervalle de confiance à 95% sur l'indice de floculation est de $\pm 5 \text{ pt}$.

Agents de rétention

L'amidon cationique (CS) est un amidon de pomme de terre (Hi-Cat 142, Roquette, DS=0.04, %N=0.37), cuit à l'eau déionisée pendant 30 min à 90-95°C, puis dilué à 10 g/L. Le polyacrylamide anionique (APAM) (Cartarétine 35AE, Clariant) est préparé à une concentration de 0.5 g/L en produit commercial. Le temps de réaction entre l'injection des agents de rétention et la mesure de la floculation est de 30 s pour le CS et 10 s pour l'APAM.

Mesure de la rétention

Un échantillon de volume 0.32 L est immédiatement prélevé après mesure de la floculation, et versé dans le bol de la formette de rétention 'FRET' afin de fabriquer une feuille. La 'FRET' permet de fabriquer une feuille au laboratoire à une concentration et un niveau de cisaillement comparables à ceux d'une caisse de tête industrielle. L'échantillon de pâte est agité dans le bol à 500 tr/min pen-

dant 4 s, l'agitation est coupée pendant 2 s, puis la suspension est égouttée sur une toile pendant 2 s sous un vide de 40 kPa. Les feuilles sont séchées sur un Rapid Köthen. La rétention globale $R_g = m_h/m_s$ est mesurée après séchage à 105°C, où m_h et m_s sont les poids sec de la feuille et de l'échantillon de pâte respectivement.

Plan d'expérience

La concentration initiale de la pâte est fixée à 5 g/L. Un plan d'expérience de Box-Behnken a été adopté [13]. Trois variables ont été étudiées sur trois niveaux : le taux d'éléments fins ajoutés (0, 20 et 40% du poids de pâte initial), le dosage de CS (1, 6 et 11 kg/t du poids sec total de la suspension) et le dosage d'APAM (0.1, 0.6 et 1.1 kg/t du poids sec total de la suspension). Les niveaux d'éléments fins sont exprimés par rapport au poids de pâte initial, par cohérence avec la notation de Beghelli [7]. Puisque la pâte contient déjà 20% de fines celluloses, les niveaux d'éléments fins ajoutés du plan d'expérience correspondent à des taux d'éléments fins en caisse de tête de 20, 33 et 43% respectivement. L'ensemble des essais est réparti en trois bacs, correspondant chacun à un niveau d'éléments fins ajoutés. Les bacs correspondant à 0 et 40% d'éléments fins ajoutés comprennent 4 essais. Le bac à 20% d'éléments fins ajoutés comprend 7 essais, dont 3 répétitions au centre du domaine expérimental. Comme il n'est pas possible techniquement de faire varier le taux de fines d'une mesure à l'autre, il n'y a malheureusement pas d'effet de blocage entre les bacs : ceci entraîne que des variations de niveaux de floculation de référence affecteront l'identification des coefficients du modèle. L'ordre des essais est tiré au hasard au sein de chacun des blocs afin de s'affranchir d'éventuels effets de dérive au cours du temps lors du déroulement des expériences. Un modèle quadratique est identifié, en l'absence d'information théorique sur la forme des surfaces de réponse.

Résultats et discussion

Influence des éléments fins sur la floculation des fibres en l'absence d'agents de rétention

Tout d'abord, nous mesurons la floculation des fibres en présence de fines celluloses. L'indice de floculation mesuré n'est pas affecté par la présence de fines celluloses jusqu'à un taux de fines ajoutées de 40/3=13% (voir Fig. 2). Lorsque le mélange d'éléments fins (1/3 fines+ 2/3 charges) est ajouté, la floculation des fibres est légèrement modifiée sur une plage de $\pm 7 \%$. Cependant, étant donné que la floculation augmente légèrement à 20% d'éléments fins ajoutés, puis diminue à 40% d'éléments fins ajoutés, cet effet est probablement dû à un artefact du capteur. Cette

hypothèse est confirmée par la forte réduction de contraste des images lorsque les charges sont ajoutées (voir Fig. 2). Rappelons que dans des conditions similaires, l'indice de floculation RMS serait divisé par 3 au moins [12]. Nous concluons que les éléments fins n'affectent pas la floculation des fibres jusqu'à un taux de 40% du poids de fibre. Ce résultat confirme et étend les observations de Beghello [7], bien que le mélange d'éléments fins employé

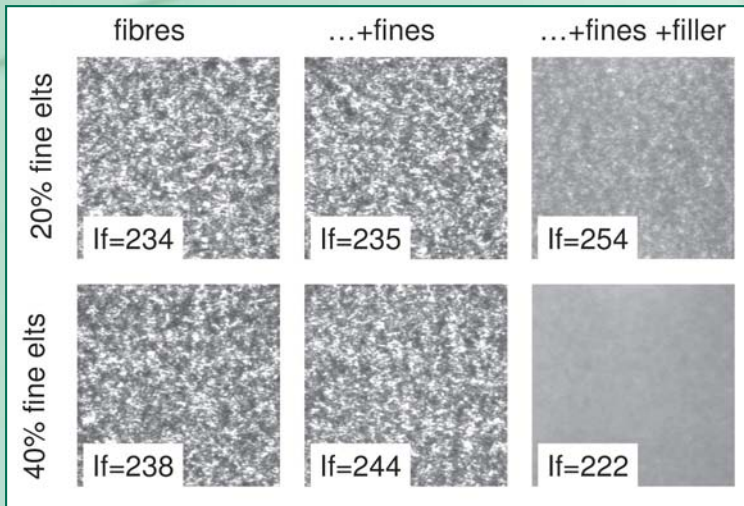


Figure 2. Influence des éléments fins ajoutés sur la floculation des fibres en l'absence d'agents de rétention.

soit différent i.e. 2/3 fines+ 1/3 charges.

Influence des agents de rétention

La floculation des fibres a été modifiée par ajout de CS et APAM en proportions définies par le plan d'expérience. Les mesures correspondant aux taux minimum et maxi-

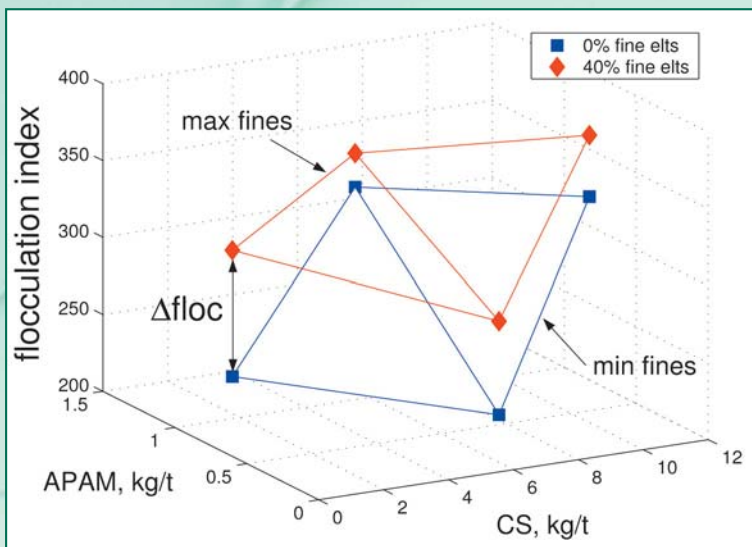


Figure 3. Influence des agents de rétention sur la floculation des fibres aux taux d'éléments fins minimum et maximum (1/3 fines + 2/3 charges).

um d'éléments fins peuvent être directement comparées, vu que les dosages d'agents de rétention étudiés sont identiques (voir Fig. 3). Il apparaît que les éléments fins favorisent la floculation des fibres quels que soient les dosages d'agents de rétention employés. L'augmentation de floculation (+50 points en moyenne) est significative par rapport à l'intervalle de confiance à 95% sur la mesure de floculation (± 5 points). Ce résultat est en accord avec les tendances suggérées en réfs. [8, 9]. Les mesures sont analysées par régression linéaire. La pertinence statistique des coefficients du modèle est évaluée par un test de Student. Le modèle est construit par une méthode d'élimination des variables à rebours (backward elimination, [14]), au niveau de confiance 95%. Les paramètres significatifs du modèle sont le taux d'éléments fins, (taux élts fins)² et le dosage d'APAM. Le dosage de CS n'est pas significatif : son effet est probablement masqué par l'injection ultérieure d'APAM. Le modèle de floculation fibreuse est représenté à la Figure 4. Sur l'ensemble des 3 bacs de pâte, la floculation de référence est de 240 ± 10 (sans agent de rétention ou éléments fins ajoutés).

Pour un taux d'éléments fins donné, la floculation des fibres augmente linéairement avec le dosage d'APAM. La floculation des fibres augmente de manière parabolique avec le taux d'éléments fins, à un niveau d'APAM fixé (voir Figure 4). Etant donné que la légère diminution observée à 20% d'éléments fins est faible devant la plus petite différence significative du modèle à 95% (LSD), elle n'est pas considérée comme significative. En conséquence, les éléments fins n'affectent pas la floculation des fibres jusqu'à un seuil de 20%, puis la favorisent fortement jusqu'à au moins 40%, en présence du système de rétention CS+APAM. Le centre du plan d'expérience correspond à des dosages typiquement utilisés sur machine à papier (dosage CS=6 kg/t, dosage APAM=0.55 kg/t). Dans ces conditions, les agents de rétention seuls augmentent la floculation fibreuse de 13%. L'ajout de 40% d'éléments fins provoque une augmentation de floculation supplémentaire de 18%.

En s'appuyant sur la théorie des collisions de Smoluchowski [15], plusieurs auteurs ont calculé des temps d'adsorption caractéristiques entre les différents éléments de la suspension. Ils montrent que l'adsorption des polymères sur les fibres est favorisée cinétiquement par rapport à l'adsorption sur les éléments fins, dans des conditions papetières standard comparables à celles de notre étude [16-18]. Il apparaît donc que les interactions les plus fréquentes au sein de la suspension ont lieu entre des fibres couvertes de polymère et des éléments fins portant de faibles doses de polymère adsorbés, bien que les éléments fins développent une surface plus importante que les fibres [16].

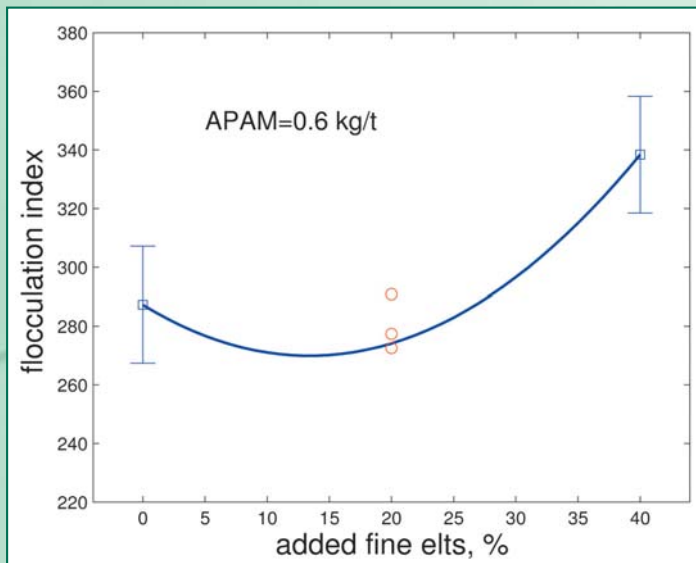


Figure 4. Flocculation des fibres modèle en fonction du taux d'éléments fins ajoutés, à un dosage d'APAM de 6 kg/t (les cercles représentent les mesures, les barres d'erreur représentent la plus petite différence significative à 95% LSD).

Dans un système polyélectrolyte dual tel que CS+APAM, le polymère cationique est ajouté en premier afin de flocculer les fibres et éléments fins anioniques. Après redispersion partielle des floccs sous l'effet du cisaillement, le polymère anionique consolide les fragments de floccs cationiques par pontage [19]. Comme nous avons vu que les éléments fins conservaient dans l'ensemble une charge négative, il est probable qu'ils jouent le rôle d'agent de pontage entre les fibres, d'une manière comparable à l'APAM. On constate à la Figure 3 que des niveaux de flocculation comparables sont obtenus avec CS+éléments fins ou bien CS+APAM sans éléments fins. On voit également à la Figure 3 que l'augmentation de flocculation due aux éléments fins est prépondérante aux faibles dosages d'agents de rétention, puis modeste à des dosages plus élevés : cette observation est cohérente avec un mécanisme de flocculation par pontage. La surface couverte de fibre augmente avec le taux de polymère adsorbé jusqu'à passer par un optimum (autour de 0.5) [17]. Dans ces conditions, les éléments fins entrent en compétition avec l'APAM pour le pontage des fibres et ne causent pas de flocculation fibreuse supplémentaire.

L'adsorption initiale des éléments fins sur la fibre est modifiée par le phénomène de transfert de polymère [20,21]. Sous l'effet du cisaillement, les éléments fins adsorbés peuvent se détacher des fibres, brisant ainsi les chaînes d'amidon : une partie de la chaîne de CS reste sur la fibre et l'autre sur l'élément fin détaché. Par conséquent une partie non négligeable des éléments fins porte en fait des chaînes d'amidon brisées et sont donc moins efficaces en tant qu'agent de pontage entre les fibres. Ceci pourrait expliquer pourquoi 20% d'éléments fins ajoutés ne suffisent pas à augmenter de manière significative la flocculation des

fibres. Un taux d'éléments fins plus important est apparemment nécessaire pour que le phénomène de pontage l'emporte sur le transfert de polymère.

Nous avons répété les expériences avec des éléments fins constitués de 100% de charges (voir Fig. 5). Les résultats et conclusions sont inchangés, à savoir : augmentation de la flocculation des fibres due à la présence d'éléments fins, avec effet prépondérant aux faibles dosages d'agents de rétention. Dans le cas de dosage maximal d'APAM et CS (environ le double des dosages appliqués en industrie), la présence de charges n'augmente pas la flocculation et aurait même un léger effet défloculant. Cette observation est compatible avec une hypothèse de pontage interfibres par les éléments fins : étant donné que les charges développent une surface plus importante que le mélange fines+charges, avec 40% de charges ajoutées, il semble que l'on dépasse l'optimum de surface

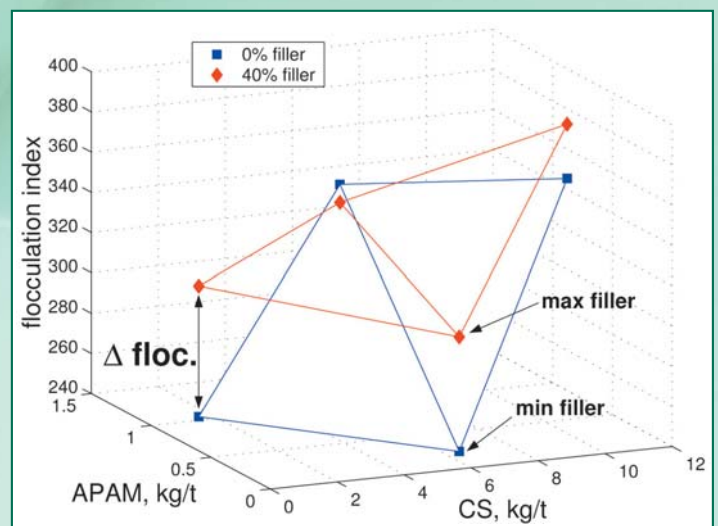


Figure 5. Influence des agents de rétention sur la flocculation des fibres avec des éléments fins ajoutés constitués de 100% de charges (la pâte contient initialement 20% de fines).

couverte pour le pontage [17].

Il est clair que le mécanisme de sur-flocculation des fibres dû aux éléments fins en présence du système de rétention CS+APAM n'est pas complètement éclairci pour autant. Il serait intéressant d'étendre ces résultats à d'autres systèmes de rétention, mettant en oeuvre des mécanismes de flocculation différents.

Application sur machine à papier

L'objectif de cette partie est d'estimer l'influence de la rétention sur le taux d'éléments fins en caisse de tête, dans le but de replacer les mesures de flocculation des fibres en présence d'élément fins dans un contexte industriel.

Afin de quantifier l'effet de la rétention sur la concentra-

tion en caisse de tête, un modèle simplifié de la boucle courte en circuit fermé est considéré (détaillé en réf. [22]). La circulation courte est représentée par un simple bouclage des eaux sous-toile. Le flux en caisse de tête est constitué de la pâte épaisse diluée par le retour des eaux sous-toile à la pompe de mélange. Au niveau de la toile, une partie de la suspension quitte le système avec la feuille, suivant le niveau de rétention et le reste est recyclé à travers les eaux blanches, sans perte de matière. Nous supposons que le régime permanent est établi dans la boucle. Les paramètres utilisés sont typiques de conditions industrielles. Le taux d'éléments fins cellulosiques dans la pâte épaisse est de 20% et le taux de charge ajouté est de 20%. On fixe la concentration fibreuse en caisse de tête à 4.0 g/L (correspondant à une suspension fibreuse à 5 g/L contenant 20% de fines). A partir du modèle, nous étudions l'incidence de la rétention sur le taux d'éléments fins en caisse de tête, à dilution de pâte épaisse constante (voir Fig. 6). Avec ces paramètres, le taux d'éléments fins maximal étudié durant les mesures (43 %) simule une rétention en éléments fins sur machine de $R_{fe} = 0.63$. Etant donné que les niveaux de rétention sur machine sont généralement inférieurs à 0.63 (typiquement autour de $R_{fe} = 0.5$ pour les fabrications impression/écriture, et inférieurs pour le papier journal), on peut supposer que l'effet des éléments fins sur la floculation des fibres mesuré dans

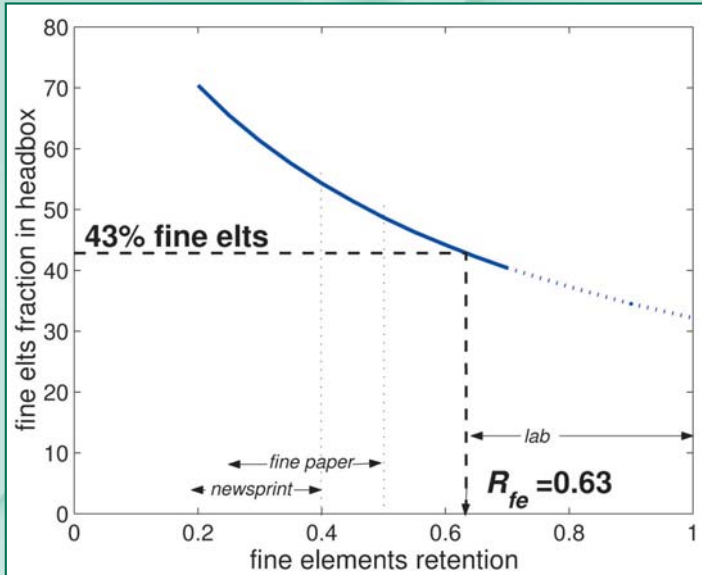


Figure 6. Taux d'éléments fins en caisse de tête en fonction de leur rétention R_{fe}

cette étude sera amplifié sur machine à papier.

Incidence sur le compromis floculation/rétention en caisse de tête

Les mesures de floculation fibreuse sont représentées en

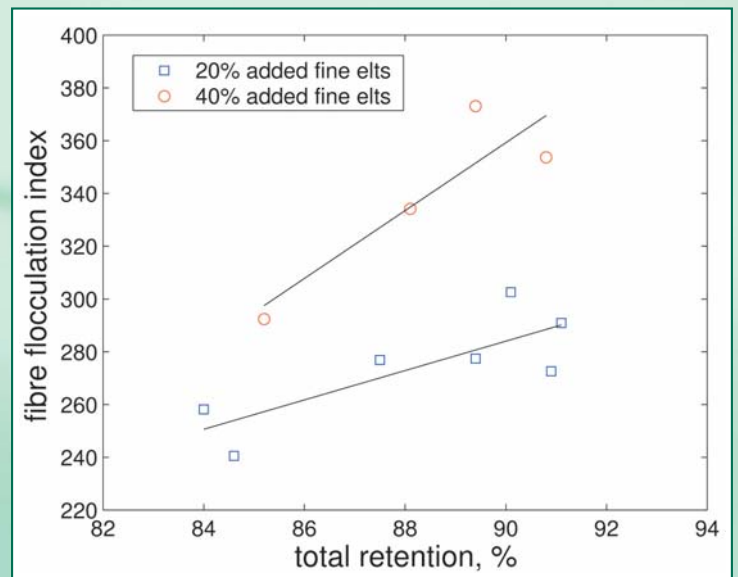


Figure 7. Indice de floculation fibreuse en fonction de la rétention totale, à 20 et 40 % d'éléments fins ajoutés (en trait plein : tendances qualitatives seulement).

fonction de la rétention totale, mesurée dans les mêmes conditions (voir Fig. 7). Signalons que les tendances de rétention mesurées sur la FRET sont représentatives de situations industrielles, bien que les valeurs absolues soient supérieures. On constate que la floculation augmente avec la rétention. Ceci est en accord avec les quelques études déjà évoquées [1,2]. De plus, il apparaît que la floculation est favorisée par le taux d'éléments fins ajoutés, à un niveau de rétention donné. Ce résultat montre que le taux d'éléments fins en caisse de tête est susceptible de modifier l'équilibre entre floculation des fibres et rétention.

Le banc de mesure de la floculation utilisé dans ce travail correspond à une caisse de tête en circuit ouvert (sans recirculation des eaux blanches). Supposons que la floculation augmente linéairement avec la rétention, lorsque les dosages de CS et d'APAM varient. En recirculant les eaux blanches, celles-ci se concentrent progressivement en éléments fins : d'après les résultats obtenus, ceci entraîne une amplification de la floculation des fibres. Plus précisément, l'augmentation de floculation sera plus importante dans la zone de faible rétention, puisqu'une fraction importante d'éléments fins est recirculée (par rapport à un circuit ouvert, sans recirculation) (voir Fig. 8). D'autre part, un circuit fermé bénéficiant d'une forte rétention ne devrait entraîner qu'une augmentation de floculation limitée par rapport à un circuit ouvert, étant donné que la concentration en éléments fins ne serait que légèrement supérieure (précisons que ce raisonnement ne tient pas compte de l'influence éventuelle d'autres particules et substances colloïdales qui s'accumulent dans la boucle). L'effet néfaste des éléments fins sur la floculation des fibres conforte la stratégie consistant à

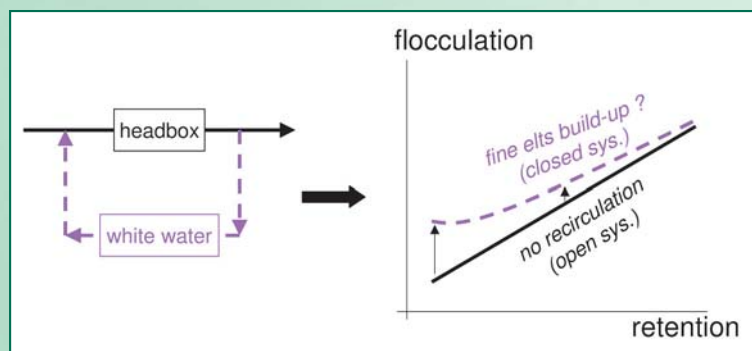


Figure 8. Effet proposé de l'accumulation des éléments fins sur le compromis floculation/rétention dans la circulation courte.

maintenir une rétention élevée sur l'unité de formation.

Conclusion

L'influence des éléments fins sur la floculation des fibres a été étudiée jusqu'à une fraction représentant 40% du poids de suspension initiale. Nous estimons à l'aide d'un modèle simple de la circulation courte, qu'un taux comparable d'éléments fins peut être observé en caisse de tête avec une rétention d'éléments fins de 63%. Les mesures de floculation fibreuse montrent que les éléments fins (constitués d'un mélange 1/3 fines de cellulose et 2/3 charge

minérale) n'interfèrent pas mécaniquement avec les fibres. Cependant, les éléments fins favorisent la floculation des fibres en présence d'un système de rétention constitué d'amidon cationique et de polyacrylamide anionique. D'après le modèle de floculation, on peut estimer qu'un taux d'éléments fins ajoutés de 40% entraîne une augmentation de floculation de 18% (avec un dosage d'amidon de 6 kg/t et d'APAM de 0.55 kg/t). Il est probable que les éléments fins jouent le rôle d'agent de pontage entre les fibres, de la même manière que l'APAM. Ces résultats suggèrent que la formation de feuille peut être détériorée par la concentration des éléments fins en caisse de tête. Ainsi, il apparaît souhaitable de maintenir une rétention élevée des éléments fins au premier passage pour optimiser la formation de feuille, dans un fonctionnement en régime permanent de l'unité de formation.

Remerciements

Nous remercions Christian Bermond pour ses conseils sur les plans d'expérience, Claude Guilmot pour la production des fines sur le pilote fibres recyclées et René Bernet pour

RÉFÉRENCES

- JOKINEN, O. and PALONEN, H., "Interdependence of retention and formation in the manufacture of SC paper", *Paperi ja Puu* 68(11): 801-808 (1986).
- ALBINSSON, C.-J., SWERIN, A. and ÖDBERG, L., "Formation and retention during twin-wire blade forming of a fine paper stock", *Tappi J.* 78(4): 121-128 (1995).
- HELLER, P., SCOTT, W.E. and SPRINGER, A.M., "Potential operational problems under conditions of complete water reuse : assessment using a model paper machine", *Tappi J.* 62(12):79-84 (1979).
- BRITT, K.W., "Retention of additives during sheet formation", *Tappi J.*, 56(3):83-86, (1973).
- KIVIRANTA, A.J., "Fiber and forming-related mechanisms affecting formation", In *Papermakers Conference*, Philadelphia, Tappi Press, p. 239-245 (1996).
- JOKINEN, O. and EBELING, K., "Flocculation tendency of papermaking fibres", *Paperi ja Puu*, 67(5):317-325, (1985).
- BEGHELLO, L., "Some factors that influence fiber flocculation", *Nord. Pulp Pap. Res. J.*, 13(4):274-279, (1998).
- KING, C.A. and WILLIAMS, D.G., "Cellulose fiber-to-fiber and fines-to-fiber flocculation: a dynamic comparison", *Tappi J.* 58(9):138-141 (1975).
- SOLBERG, D. and WÅGBERG, L., "On the mechanism of cationic polyacrylamide-induced flocculation and re-dispersion of a pulp fiber dispersion", *Nord. Pulp Pap. Res. J.*, 18(1):51-55, (2003).
- PERRIN, B., BIANCHIN, B. and SAURET, G., *Fr. Pat.* 8016756, July 25 (1980).
- JULIEN SAINT AMAND, F., BERNARD, E. and LEJEUNE, P., "Appareil de séparation et de récupération de particules en suspension : le Classiflux", *Conf. Filtra 84*, Paris (1984).
- PIERRE, C., "A new sensor for the measurement of fibre flocculation in the stock : a tool for the sheet formation control", *COST Action E14 Intl. Workshop*, Lisbon, (2000).
- BOX, G., DRAPER, N., "Empirical model building and response surfaces, *Probability and mathematical statistics*", John Wiley & Sons (1987).
- DRAPER, N. and SMITH, H., "Applied regression analysis, *Probability and mathematical statistics*", John Wiley & Sons (1966).
- SMOLUCHOWSKI, M., *J. Phys. Chem.*, 92(129), (1917).
- VAN DE VEN, T.G.M., "Physicochemical and hydrodynamic aspects of fines and fillers retention", *Fundamentals of Papermaking* 1:471-494, *Trans. 9th Fund. Res. Symp.*, Cambridge, Mechanical Engineering Publications (1989).
- SWERIN, A. and ÖDBERG, L., "Some aspects of retention aids", *Fundamentals of papermaking materials* 1:265-350 - 11th *Fund. Res. Symp.*, Cambridge, Fundamental Research Committee and Pira International; (1997).
- CHO, B.U., GARNIER, G., PARADIS, J. and PERRIER, M., "Filler retention with a CPAM/bentonite retention system - effect of collision efficiency", *Nord. Pulp Pap. Res. J.* 16(3):188-194 (2001).
- EKLUND, D. and LINDSTRÖM, T. *Paper chemistry : an introduction*. DT PaperScience Publ., Finland (1991).
- TANAKA, H., SWERIN, A. and ÖDBERG, L., "Transfer of cationic retention aid from fibers to fine particles and cleavage of polymer chains under wet-end papermaking conditions", *Tappi J.* 76(5):157-163 (1993).
- ASSELMAN, T. and GARNIER, G., "Mechanism of polyelectrolyte transfer during heteroflocculation", *Langmuir* 16(11):4871-4876 (2000).
- HUBER P., CARRE B., MAURET E., and ROUX J.C., "The influence of fine elements build-up in the short circulation on fibre flocculation". In 5th *International Paper and Coating Chemistry Symposium*, Montreal, PAPTAC. (2003).