
Etude du contact rouleau – papier lors du calandrage

4. - Etude du contact rouleau – papier lors du calandrage	139
4.1. - Etude de l'adhésion rouleau – papier	139
4.1.1. - Essai de roulement sur le plan incliné.....	139
4.1.1.1. - Description et Principe.....	139
4.1.1.2. - Analyse de l'essai.....	142
4.1.1.3. - Influence de la température du papier.....	145
4.1.1.4. - Influence de la température du cylindre	145
4.1.1.5. - Influence de la couche et de l'état de surface du cylindre.....	146
4.1.2. - Essai de calandrage.....	150
4.1.2.1. - Description et Principe.....	150
4.1.2.2. - Résultats.....	151
4.1.3. - Conclusions sur l'étude d'adhésion rouleau / papier.....	153
4.2. - Optimisation des conditions de calandrage pour un meilleur compromis qualité de surface / compression du papier	154
4.2.1. - Description de l'étude.....	154
4.2.1.1. - Présentation du papier utilisé	154
4.2.1.2. - Objectif	155
4.2.1.3. - Conditions expérimentales	155
4.2.2. - Influence du nombre de nips	155
4.2.3. - Influence de la force linéique	158
4.2.4. - Influence de la température du rouleau métallique	160
4.2.5. - Condition la plus critique	161
4.2.6. - Conclusions sur l'optimisation des conditions de calandrage	162
4.3. - Transfert de l'état de surface des rouleaux au papier.....	165
4.3.1. - Description de l'étude.....	166
4.3.2. - Etude de la topographie des papiers calandrés.....	168
4.3.3. - Influence des conditions de calandrage sur le brillant Gardner des papiers..	171
4.3.3.1. - Influence de la température du rouleau métallique	171
4.3.3.2. - Influence de la vitesse de calandrage	172
4.3.3.3. - Influence de la force linéique.....	173
4.3.3.4. - Influence de l'état de densification du papier	174
4.3.4. - Conclusions sur le transfert de rugosité.....	176

4. - Etude du contact rouleau – papier lors du calandrage

La quatrième partie de la thèse porte sur le contact rouleau – papier. Lors du calandrage, des interactions se produisent entre la surface des papiers et les rouleaux pouvant ainsi conduire à un encrassement de la calandre et donc nuire à l'état de surface du papier. Nous verrons dans cette partie, une étude de l'adhésion rouleau – papier, puis une optimisation des conditions de calandrage dans le but améliorer la qualité du papier. Enfin, une étude du transfert de l'état de surface du rouleau au papier sera présentée.

4.1. - Etude de l'adhésion rouleau – papier

Nous avons présenté dans la partie 1.4.2, le travail de Carlsson ([Carlsson et al, 2002]) qui a mis en évidence deux types de dépôt sur les rouleaux et proposé deux mécanismes de formation :

- Les dépôts de type poussière qui pourraient provenir d'un détachement des pigments de la couche,
- Les dépôts de type collant qui apparaissent lorsque les forces d'adhésion de la couche sur le rouleau sont plus fortes que les forces de cohésion de la couche.

Carlsson ([Carlsson et al, 2002]) a également montré que le comportement viscoélastique du liant de la couche a une influence sur le dépôt de type collant. Nous nous sommes donc intéressés à la génération de ce type de défaut et à l'influence du liant. Pour cela, un essai de laboratoire de roulement sur un plan incliné a été développé et des essais sur la calandre pilote ont été réalisés.

4.1.1. - Essai de roulement sur le plan incliné

L'essai de laboratoire de roulement sur le plan incliné consiste à faire rouler un cylindre sur une feuille de papier et à caractériser l'adhésion entre les deux matériaux par la force de roulement. Après avoir expliqué le principe et l'analyse des essais, des résultats sur plusieurs papiers seront présentés.

4.1.1.1. - Description et Principe

Principe

L'essai consiste à mesurer la résistance au roulement du cylindre (F) sur la feuille de papier. A l'instant initial ($t = 0$), on libère sans vitesse initiale un cylindre, de masse m_c , en haut du plan (abscisse $x = 0$), (Figure 4. 1). Ainsi, pour différentes valeurs d'angle du plan incliné (α), on mesure les temps t_i ($i = 1-N$) nécessaires au rouleau pour atteindre les abscisses $x_i = iL/N$ le long du plan incliné de longueur totale $L = x_N$. La détermination des temps de passage du cylindre (t_i) s'effectue par l'interruption d'un faisceau infra-rouge entre des capteurs disposés de part et d'autre du plan incliné (10 capteurs émetteurs – récepteurs SPX1189).

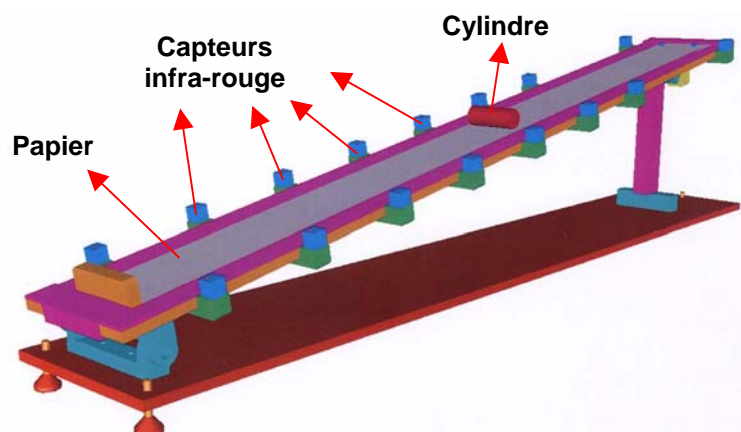


Figure 4. 1 : Schéma de l'essai de roulement sur le plan incliné

Bibliographie

Tabor ([Tabor, 1955]) a montré que la force de frottement de roulement, c'est à dire la résistance à l'avancement d'un cylindre roulant sur un massif élastique ou faiblement viscoélastique, résulte presque exclusivement des pertes par hystérésis au sein du matériau. Cependant, dans certains cas comme le roulement sur un massif de caoutchouc, les forces enregistrées sont beaucoup trop importantes pour être dues aux pertes par hystérésis. C'est la raison pour laquelle, Kendall ([Kendall, 1975]) a attribué ces forces de résistance au roulement à l'adhérence caoutchouc – rouleau. Cela l'a amené à considérer l'aire de contact entre le cylindre rigide et le matériau élastique comme un joint adhésif. Le roulement résulte alors de la double propagation de fissures : propagation par fermeture à l'avant et propagation par ouverture à l'arrière. Après avoir vérifié que les pertes viscoélastiques lors de fermetures de fissures sont faibles, Barquins ([Barquins, 1980]) a montré que la résistance de roulement correspondait quasiment à la force de pelage à 90° du matériau à la limite arrière. La résistance au roulement étant assez forte et augmentant avec la vitesse, le cylindre acquiert assez rapidement un mouvement uniforme. La résistance au roulement est alors égale à $m_c g \sin \alpha$ (Figure 4. 2). Il a ainsi relié le taux de restitution d'énergie $G = F/b$ aux forces de résistance au roulement (b étant la largeur du rouleau). L'auteur a étudié l'influence de différents paramètres tels que l'humidité, à partir des courbes reliant le taux critique de restitution d'énergie et la vitesse de propagation de fissure.

Le plan est incliné à l'aide de cales, ainsi par trigonométrie, l'angle α peut être déterminé. Les angles utilisés au cours des essais sont compris entre $1,4^\circ$ et $4,4^\circ$. La longueur maximale du plan est de 900 mm.

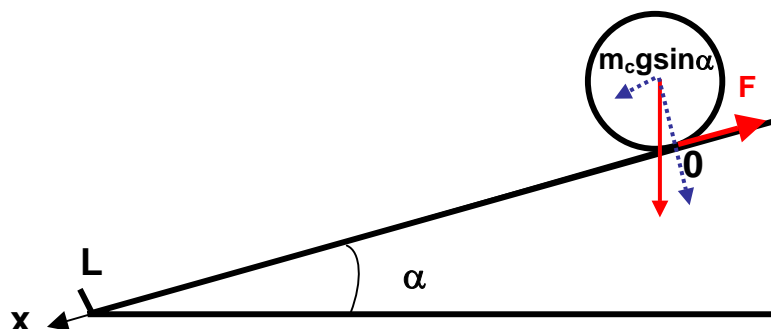


Figure 4. 2 : Bilan des forces sur l'essai de roulement sur le plan incliné

Interprétation mécanique de l'essai

Soit F la force de résistance au roulement du cylindre sur le plan incliné (Figure 4. 2). Le mouvement le long du plan incliné obéit à l'équation fondamentale de la dynamique avec les conditions initiales suivantes :

$$\begin{cases} \mathbf{V} = \frac{d\mathbf{x}}{dt} \\ m_c \frac{d\mathbf{V}}{dt} = m_c g \sin \alpha - F \end{cases} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \mathbf{x}(t=0) = 0 \\ \mathbf{V}(t=0) = 0 \end{cases} \quad \text{Équation 4. 1}$$

L'exploitation expérimentale de l'Équation 4. 1 est aisée si les $x_i(t_i)$ sont mesurés avec une précision suffisante. On peut alors effectuer une représentation polynomiale par moindres carrés de la loi $x(t)$ et ainsi estimer avec précision la vitesse $\mathbf{V}(t) = \mathbf{x}'(t)$ et l'accélération $\gamma(t) = \mathbf{x}''(t)$. Ceci permet de déduire la résistance au roulement $F = m_c (g \sin \alpha - \gamma(t))$ à chaque instant et observer ses évolutions avec la vitesse V . Si F est constante, indépendante de la vitesse et inférieure à $m_c g \sin \alpha$, le mouvement est uniformément accéléré, d'accélération γ : la vitesse augmente linéairement avec le temps et les t_i sont en progression géométrique. Le temps t_N nécessaire pour atteindre le bas du plan ($x = L$, $i = N$) et la vitesse finale V_N vérifient :

$$\begin{cases} x = \frac{\gamma}{2} t^2 \\ \gamma = \frac{2L}{t_N^2} \end{cases} \rightarrow F = m_c (g \sin \alpha - \gamma) \quad V_N = \sqrt{2\gamma L} \quad \text{Équation 4. 2}$$

Conditions expérimentales

Les essais ont été réalisés dans une enceinte climatique régulée en température, avec trois cylindres en acier inoxydable. Les diamètres et les largeurs des cylindres sont respectivement de 12 mm et 50 mm. Le poids et les états de surface des cylindres diffèrent. Le Tableau 4. 1 présente les caractéristiques des trois cylindres.

Cylindre	Poids (g)	Etat de surface
Cylindre 1	13,5	Lisse ($R_a \approx 1,2 \mu\text{m}$)
Cylindre 2	44	Lisse ($R_a \approx 1,2 \mu\text{m}$)
Cylindre 3	44	Sablé ($R_a \approx 2,7 \mu\text{m}$)

Tableau 4. 1 : Caractéristiques des cylindres utilisés dans l'essai de roulement sur le plan incliné

L'état de surface du cylindre lisse correspond à une rugosité moyenne de l'ordre de $1,2 \mu\text{m}$. Le cylindre 3 avec un état de surface « sablé » a été obtenu en projetant des microbilles de sable sur la surface initialement lisse. Suite à cette opération, la rugosité moyenne du cylindre est de l'ordre de $2,7 \mu\text{m}$. Les valeurs de rugosité ont été obtenues à partir d'empreinte silicone de la surface des cylindres et d'une analyse à l'aide du Topo3D. Trois acquisitions de la surface des empreintes ont été effectuées, puis les images ont été filtrées avec une gaussienne de longueur d'onde de coupe de $1000 \mu\text{m}$ afin d'obtenir la rugosité

moyenne des cylindres. Une des contraintes de l'essai de roulement est d'utiliser un cylindre suffisamment léger dans le but d'une part, d'éviter les effets de viscoélasticité de la couche et d'autre part de séparer les phénomènes de surface (adhésion), des phénomènes de dissipation dans l'épaisseur du papier.

Papiers testés

Les essais de roulement sur le plan incliné ont porté initialement sur deux papiers : un papier support H et un papier couché I. La dépose de la couche sur le papier I a été réalisée par un système de lame réservoir. Le Tableau 4. 2 présente les caractéristiques de ces deux papiers.

Papier	Papier support H	Papier couché I
Epaisseur (μm)	127	126
Grammage (g/m^2)	77	95
Poids de couche ($\text{g}/\text{m}^2/\text{face}$)	0	18,5
Masse volumique ρ_0 (kg/m^3)	606	751

Tableau 4. 2 : Caractéristiques du papier support H et du papier couché I

Nous pouvons constater que l'épaisseur du papier couché I est identique à celle du papier support H malgré un poids de couche de $18,5 \text{ g}/\text{m}^2/\text{face}$. La sauce de couchage a donc certainement pénétré dans le papier support, ce qui n'est pas l'objectif recherché lors de l'opération de couchage. D'autre part, le papier a probablement subi une compression. Les papiers B, C, D et E présentés dans le Tableau 2.6 ont également été testés pour étudier l'influence de la composition de la couche.

4.1.1.2. - Analyse de l'essai

Les résultats expérimentaux de roulement du cylindre sur le plan incliné montrent que les $x_i(t_i)$ peuvent être décrits par un polynôme de degré deux. Il est ainsi possible de supposer en première approximation que le mouvement est uniformément accéléré. Une série de 5 expériences montre la répétabilité des résultats (Figure 4. 3).

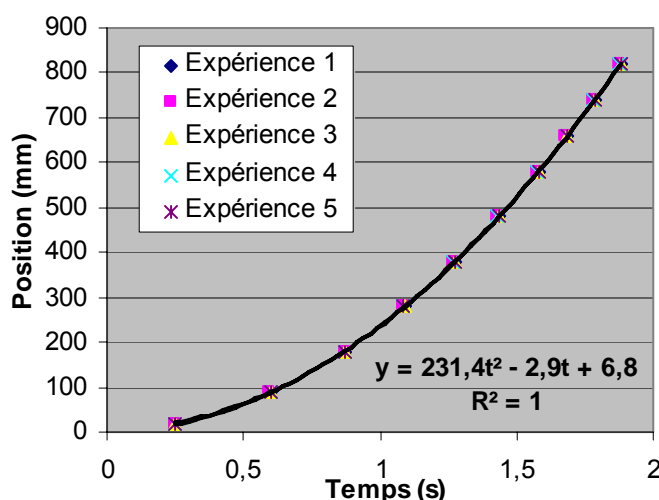


Figure 4. 3 : Trajectoire du cylindre dans l'essai de roulement – Papier support H (Tableau 4. 2) – Cylindre 2 (Tableau 4. 1) – angle $\alpha = 4,4^\circ$

Nous pouvons ainsi déterminer une accélération moyenne sur une certaine gamme de vitesse et de distance. Cette gamme est fixée par l'inclinaison et la longueur du plan ($L = 824$ mm pour ces essais). Le Tableau 4. 3 résume les valeurs obtenues qui sont une moyenne des 5 expériences effectuées pour chaque condition d'essai.

Cylindre	Masse m_c (g)	Angle α (deg)	$g \sin\alpha$ (mm/s ²)	γ (mm/s ²)	F (mN)	F/mg (10 ⁻³)	Ecart type sur F/mg	V_N (mm/s)
1	13,5	1,4	240	101	1,9	14,0	0,2	408
1	13,5	4,4	752	349	4,3	39,9	0,5	758
2	44	1,4	240	143	5,4	9,7	0,1	485
2	44	4,4	752	461	12,9	29,2	0,2	872

Tableau 4. 3 : Détermination de la force de résistance au roulement F – Papier support H
(Tableau 4. 2)

Nous constatons une augmentation de la force de résistance au roulement F avec la masse du cylindre. En effet, il n'est pas exclu que F soit sensible à la pression de contact, donc à la force normale. Même si les cylindres utilisés sont de faible masse et qu'aucune déformation plastique n'est mesurable sur les feuilles de papier après l'essai de roulement, il est possible qu'une déformation élastique du papier ait lieu. Ceci suggère que l'aire de contact entre le papier et le cylindre, et la déformation du papier au passage du cylindre puissent intervenir dans la résistance au roulement. Par la suite, nous exprimerons le rapport F/mg assimilable à un coefficient de frottement au sens de Coulomb (puisque la composante normale est $mg\cos\alpha \sim mg$).

Les résultats montrent une augmentation de F avec l'angle. La vitesse du rouleau augmentant avec l'angle du plan alors que la force normale est sensiblement constante, l'explication la plus élémentaire est d'attribuer cette augmentation à une augmentation de la résistance au roulement avec la vitesse. Cette interprétation est toutefois contradictoire avec le fait que nous observons un mouvement uniformément accéléré, à angle donné. En particulier, si F était fonction croissante de la vitesse, le cylindre devrait tendre vers une vitesse limite. Or, ce phénomène n'est pas observé au cours de nos essais (Figure 4. 4). Ce point n'a pu être actuellement éclairci de manière satisfaisante.

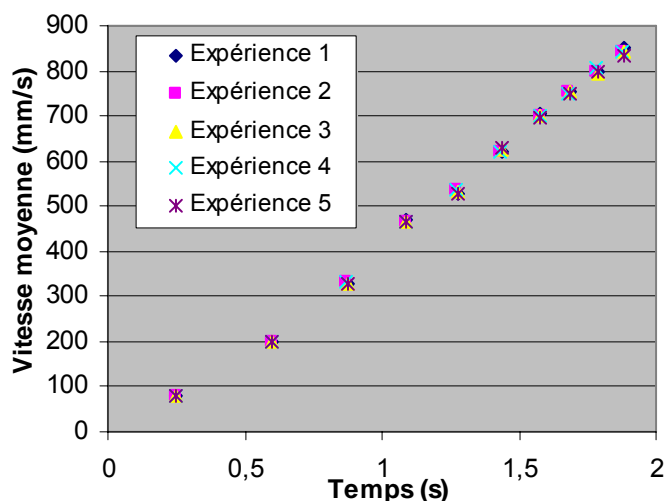


Figure 4. 4 : Courbes de la vitesse moyenne du cylindre 2 (Tableau 4. 1) en fonction du temps – Papier support H (Tableau 4. 2) – angle $\alpha = 4,4^\circ$

La Figure 4. 5 présente les coefficients de frottement obtenus pour le papier support H et le papier couché I (Tableau 4. 2), lors des essais de roulement avec les cylindres 1 et 2 (Tableau 4. 1) et des angles d'inclinaison de $1,4^\circ$ et $4,4^\circ$.

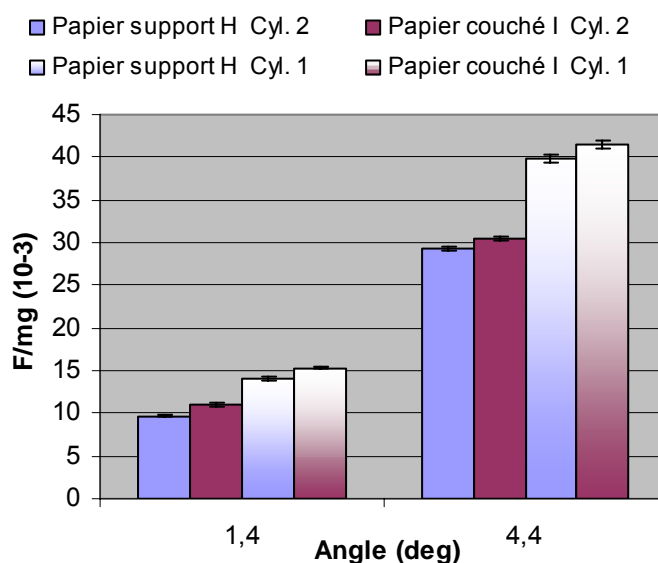


Figure 4. 5 : Coefficients de frottement pour le papier support H et le papier couché I (Tableau 4. 2) – Cylindre 1 et 2 (Tableau 4. 1) – Angle $\alpha : 1,4^\circ$ et $4,4^\circ$ – Température : 20°C

Les résultats montrent que :

- La force normale appliquée par le cylindre sur le papier a une influence sur le coefficient de frottement : Plus le cylindre a une masse importante, plus le coefficient F/mg est faible.
- La vitesse de roulement du cylindre influe également sur le coefficient de frottement : Plus l'angle d'inclinaison est grand, plus la vitesse du cylindre est grande et plus le coefficient F/mg est important.

- Pour chaque condition d'essai (cylindre, angle), le coefficient de frottement est plus important sur le papier couché I que sur le papier support H.

Ce dernier point peut être expliqué par deux hypothèses, à priori, non exclusives l'une de l'autre :

- L'adhésion entre la surface du papier couché et le cylindre est plus importante que celle entre la surface du papier support et le cylindre.
- L'aire de contact entre le cylindre et le papier couché est plus grande que celle entre le cylindre et le papier support. En effet, la rugosité du papier couché est plus faible.

Nous reviendrons sur ces résultats dans la partie 4.1.1.5. -.

4.1.1.3. - Influence de la température du papier

Des essais de roulement sur le plan incliné ont été réalisés avec les papiers H et I dans une enceinte climatique à 20 et 50°C. Le cylindre 2 et un angle d'inclinaison de 4,4° ont été choisis pour ces essais (Figure 4. 6).

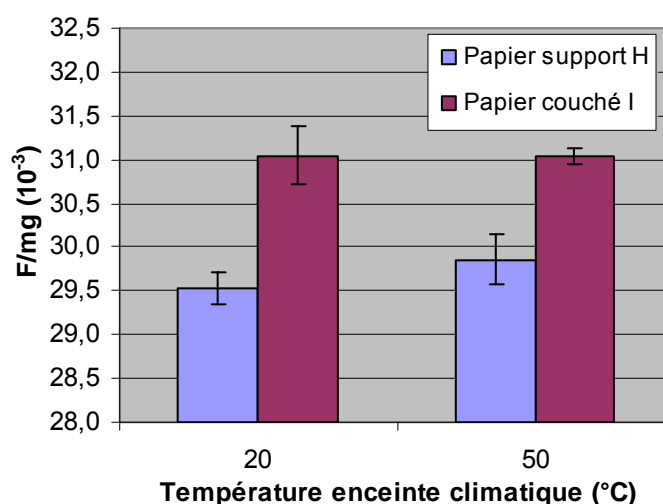


Figure 4. 6 : Coefficients de frottement en fonction de la température des papiers H et I

(Tableau 4. 2) – Cylindre 2 (Tableau 4. 1) – Angle α : 4,4°

Les résultats ne montrent pas une réelle variation du coefficient de frottement en fonction de la température du papier (même ordre de grandeur que l'écart type). Les essais ont été limités à une température de 50°C en raison des capteurs infra-rouges. Il aurait été intéressant d'avoir des capteurs dont la plage d'utilisation en température est plus importante afin de se rapprocher des températures usuelles du papier sur une calandre industrielle (environ 50 - 80°C).

4.1.1.4. - Influence de la température du cylindre

Lors d'un essai de calandrage, la température du papier est importante pour connaître le comportement mécanique du papier dans le nip. Par contre, pour une problématique d'adhésion entre le rouleau et la surface du papier, la température de surface du rouleau est fondamentale. Des essais de roulement sur le plan incliné ont alors été réalisés à température ambiante et en chauffant les cylindres dans l'enceinte climatique à des températures de 100 et 150°C. Les températures données correspondent à la température

de l'enceinte climatique. Lorsque le cylindre est sorti de l'enceinte pour réaliser l'essai, sa température est égale à celle indiquée ; par contre, au contact du papier, le cylindre se refroidit et sa température en fin d'essai est nettement moindre. Des mesures, à l'aide d'un thermocouple, ont montré une perte de la température du cylindre entre 35 à 50%. La Figure 4. 7 présente les coefficients de frottement obtenus avec le cylindre 2 (Tableau 4. 1) et un angle de $4,4^\circ$ pour les papiers H et I (Tableau 4. 2).

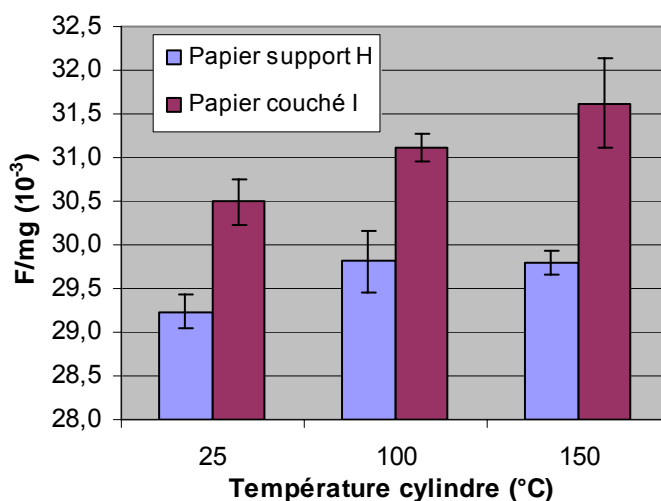


Figure 4. 7 : Coefficients de frottement en fonction de la température des cylindres – Papier H et I (Tableau 4. 2) – Cylindre 2 (Tableau 4. 1) – Angle $\alpha : 4,4^\circ$ – Température : 20°C

Les résultats montrent une augmentation du coefficient de frottement avec la température du cylindre. Par ailleurs, il semble que la température du cylindre ait une influence plus importante sur le papier couché I que sur le papier support H. En effet, la couche est composée d'éléments qui sont sensibles à la température (les liants).

4.1.1.5. - Influence de la couche et de l'état de surface du cylindre

Les essais présentés dans la partie 4.1.1.2. - montraient un coefficient de frottement plus important sur le papier couché I que sur le papier support H. Des essais de roulement ont alors été effectués sur le papier pré-couché et les papiers B, C, D et E (Tableau 2.6) afin de déterminer l'influence de la couche et plus particulièrement du latex (nature et quantité) sur le coefficient de frottement. La Figure 4. 8 présente les résultats obtenus lors des essais avec les cylindres 2 et 3 (Tableau 4. 1), à un angle de $4,4^\circ$ et une température de 20°C .

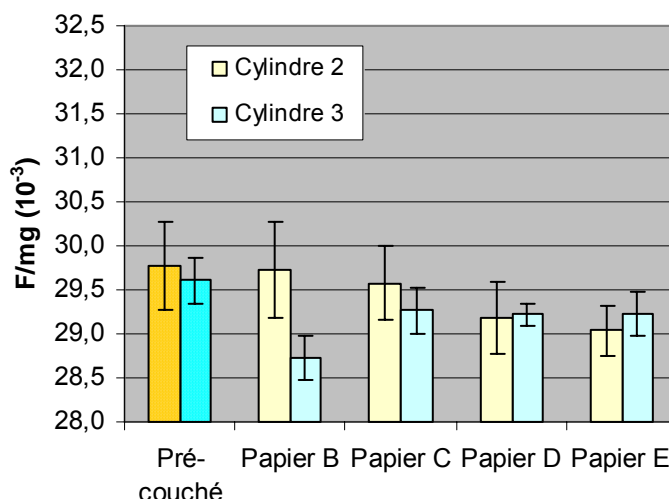


Figure 4. 8 : Coefficients de frottement pour différents papiers et leur papier pré-couché (Tableau 2.6) – Cylindre 2 et 3 (Tableau 4. 1) – Angle α : 4,4° – Température : 20°C

A partir des résultats obtenus, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- Nous n’observons pas une influence significative de la composition de la couche sur le coefficient de frottement. Il semble en outre que les coefficients de frottement des papiers couchés soient légèrement inférieurs à celui du papier pré-couché. Cependant, cette remarque est à prendre avec des précautions pour les deux raisons suivantes :
 - Le coefficient de frottement correspond à une moyenne des expériences réalisées par papier et condition. Or, les écarts entre les valeurs moyennes obtenues pour le papier pré-couché et les papiers couchés (B, C, D et E) restent dans la marge d’incertitude de l’essai.
 - Une couche de 6 g/m²/face a été enduite sur le papier pré-couché afin de préparer le papier à l’opération de couchage, notamment dans le but de fermer la porosité de surface du papier et d’éviter que la sauce pénètre dans le matelas fibreux. La présence de cet enduit pourrait peut être entraîner des interactions de surface avec le cylindre et donc expliquer les résultats obtenus.
- La couche des papiers B et D contient deux latex dont les propriétés viscoélastiques diffèrent : La température de transition vitreuse du latex contenu dans le papier B est de 22°C alors que celle du latex présent dans le papier D est de 0°C. Les différents comportements mécaniques des liants testés n’ont donc pas montré d’influence sur le coefficient de frottement. Il serait intéressant de poursuivre cette étude avec d’autres types de liant (amidon, styrène-butadiène, acrylique, acétate de vinyle par exemple).
- La couche du papier E contient une quantité de liant plus importante (20 parts) que celle présente dans les autres papiers couchés (10 parts). Cependant, la répartition du liant dans la couche n’est pas connue : L’ajout de liant dans la sauce a-t-il entraîné une concentration plus importante en surface ou est-il réparti uniformément dans toute l’épaisseur de la couche ? Une technique d’analyse de surface telle que la

microscopie à force atomique pourrait apporter des informations sur la localisation du liant ([Vyorykka *et al.*, 2006]).

- Concernant la rugosité du cylindre, certains coefficients de frottement ont des valeurs plus importantes avec le cylindre lisse qu'avec le cylindre sablé (par exemple avec le papier B). Par contre, d'autres valeurs montrent un comportement opposé (par exemple avec le papier E). D'autre part, pour un même papier, les écarts observés entre les coefficients de frottement obtenus avec les deux cylindres sont, d'une manière générale, dans la marge d'incertitude de l'essai. Il est donc difficile de conclure sur l'influence de la rugosité du cylindre sur le coefficient de frottement, dans la gamme utilisée (R_a : 1,2 à 2,7 μm). Par contre, sachant que les effets d'adhésion entre deux corps solides ont tendance à augmenter quand la rugosité diminue ([Maugis, 2000]), des résultats plus concluants auraient, peut être, pu être obtenus avec des rouleaux polis miroir.
- Enfin, nous pouvons également ajouter que les essais de roulement ont été réalisés à une température du cylindre de 20°C. En comparaison des résultats obtenus avec le papier couché I (cf partie 4.1.1.4. -), une température du cylindre plus importante entraînerait peut être des comportements différents pour certains papiers.

La Figure 4. 9 présente la rugosité moyenne des différents papiers utilisés dans l'essai de roulement sur le plan incliné, avant calandrage. Les valeurs ont été obtenues en analysant la surface des papiers à l'aide du Topo3D. La méthode de mesure est la même que celle décrite dans la partie 4.1.1.1. - (conditions expérimentales). Sur la Figure 4. 9, nous distinguons deux séries qui ont été définies à partir des deux papiers ayant servi de support aux différentes formulations de couche : La série 1 correspond au papier support H et au papier couché I ; la série 2 au papier pré-couché et aux papiers couchés B, C, D et E.

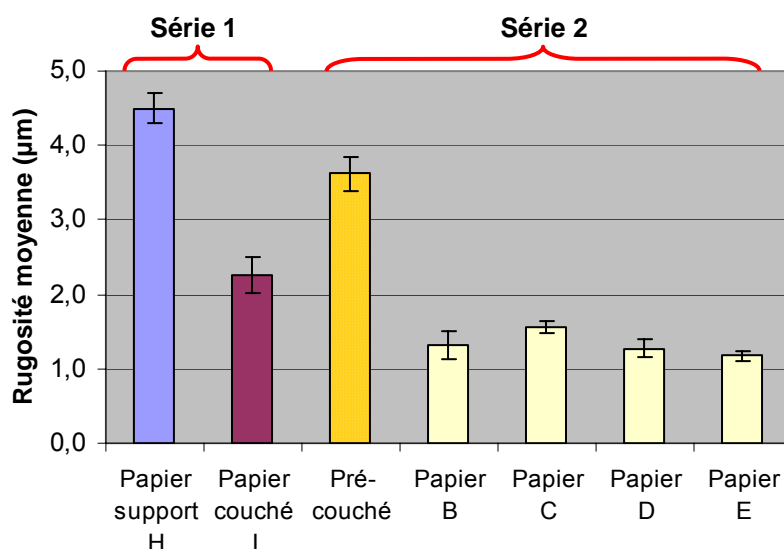


Figure 4. 9 : Rugosité moyenne des papiers avant calandrage

Les résultats montrent que le papier support H et le papier pré-couché ont une rugosité moyenne plus importante que les papiers couchés (I, B, C, D et E). Par ailleurs, les papiers de la série 1 ont des rugosités plus grandes que ceux de la série 2. Toutefois, comme l'écart

de rugosité entre les papiers couchés et ceux non couchés pour les deux séries est équivalent (environ $2,2 \mu\text{m}$), la différence d'aire de contact papier / cylindre entre le papier support et les papiers couchés est probablement comparable pour les deux séries. La différence de rugosité entre les papiers non couchés et les papiers couchés ne semble donc pas pouvoir expliquer pourquoi les résultats de la série 1 montrent une différence du coefficient de frottement entre les papiers mais pas ceux de la série 2 (Figure 4. 10).

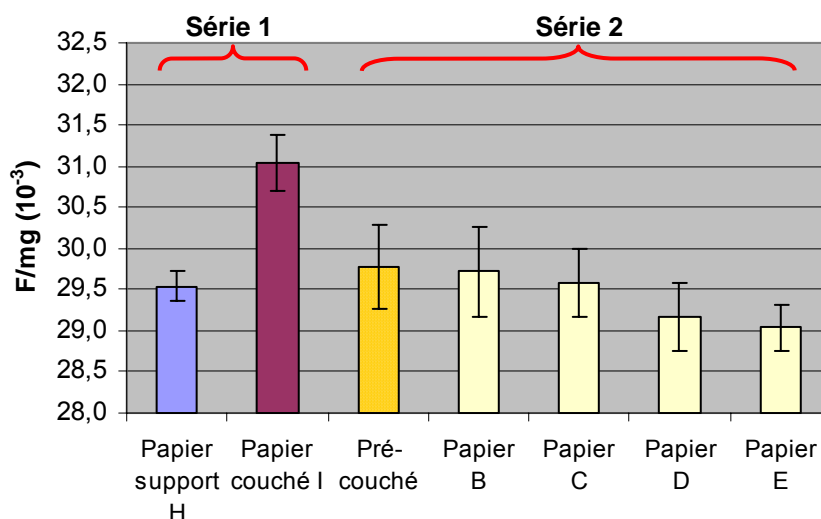


Figure 4. 10 : Coefficient de frottement des séries 1 et 2 – Cylindre 2 (Tableau 4. 1) –
Angle α : $4,4^\circ$ – Température : 20°C

La seconde explication possible porte sur la force normale appliquée par le cylindre sur le papier. Les essais de compression de laboratoire (en statique : Figure 4. 11 et en dynamique : Figure 4. 12) ont en effet montré que les papiers de la série 1 se déforment plus que les papiers de la série 2 pour une même contrainte. Cependant, en prenant la masse du cylindre 2 (44,2 g), un angle d'inclinaison de $4,4^\circ$ et une largeur de contact entre le cylindre et le papier de 0,5 mm (à titre indicatif), la contrainte appliquée par le cylindre sur le papier est d'environ 17 kPa. Cette valeur est tellement faible que la déformation du papier est inférieure à 1%. Le poids du cylindre n'entraîne donc pas de compression du papier dans le sens de l'épaisseur. Par contre, nous ne connaissons pas l'influence de cette pression sur la rugosité du papier et donc sur l'aire de contact réelle entre le cylindre et la surface du papier.

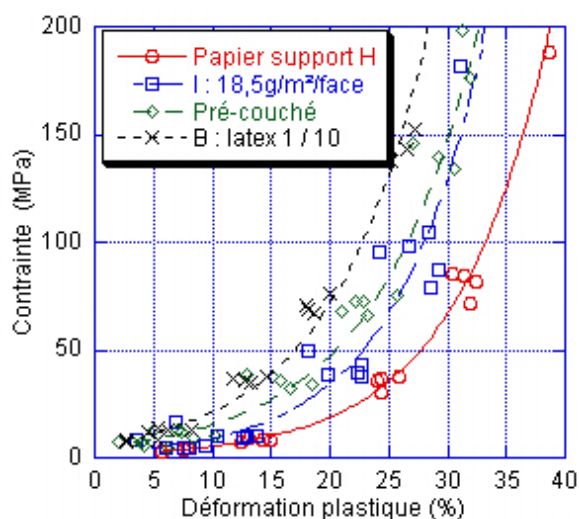


Figure 4. 11 : Essai de compression quasi-statique sur une feuille (M10)

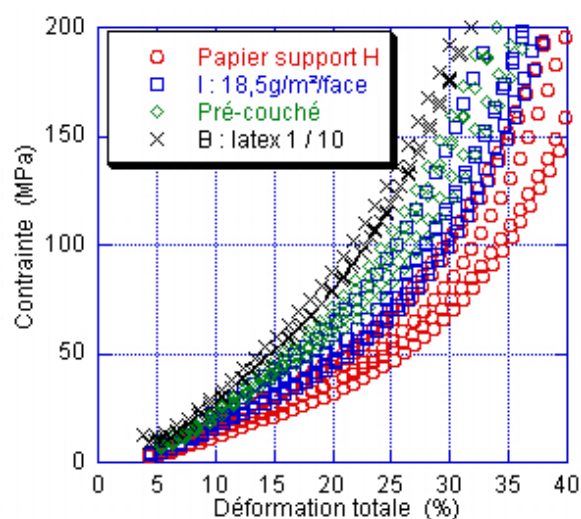


Figure 4. 12 : Essai de chute de bille sur une feuille (H1=10 cm M6 mm)

La dernière hypothèse possible pour expliquer les résultats des coefficients de frottement obtenus pour les deux séries porte sur les interactions physico-chimiques entre le cylindre et la surface des papiers. En effet, les forces d'adhésion entre la couche du papier I et le cylindre peuvent être plus importantes que celle entre les autres papiers et le cylindre. Il serait donc intéressant d'effectuer une analyse plus poussée des interactions de surface entre le papier I et le cylindre.

4.1.2. - Essai de calandrage

Dans le but d'établir une comparaison avec l'essai de roulement sur le plan incliné, les bobines des papiers B, D et E (Tableau 2.6) ont été calandrées.

4.1.2.1. - Description et Principe

Les objectifs de ces essais de calandrage sont de trois ordres :

- Générer des dépôts sur les rouleaux de la calandre,
- Quantifier les dépôts et définir leur nature,
- Etudier les cinétiques de dépôts.

Les paramètres de calandrage ont été les suivants :

- Une température du rouleau métallique de 100, 200 et 260°C ; le rouleau métallique utilisé, est revêtu d'une fine couche de chrome et sa rugosité moyenne est de 0,3 μm ,
- Une vitesse de calandrage de 80, 200 et 400 tr/min,
- Un ajout d'eau sous forme de spray sur le papier juste avant son entrée dans le nip,
- Une température du papier de 25 et 100°C.

La vitesse de calandrage joue sur deux points : le temps de contact entre le papier et le rouleau et donc le transfert de chaleur entre le rouleau et le papier ; et la vitesse de séparation d'un dépôt adhérent sur le rouleau.

La caractérisation des dépôts sur les rouleaux a été réalisée dans un premier temps visuellement, puis dans un second temps à l'aide d'un capteur appelé Encrascal. Le principe du capteur consiste à mesurer la diffusion angulaire d'une lumière monochromatique de longueur d'onde 635 nm par la surface du rouleau. Ensuite, un traitement d'image permet de relier l'indicatrice de diffusion mesurée à l'état de surface du rouleau. Le capteur a été utilisé pour étudier l'encrassement du rouleau métallique. Il est situé à 10 cm de ce dernier (Figure 4. 13).

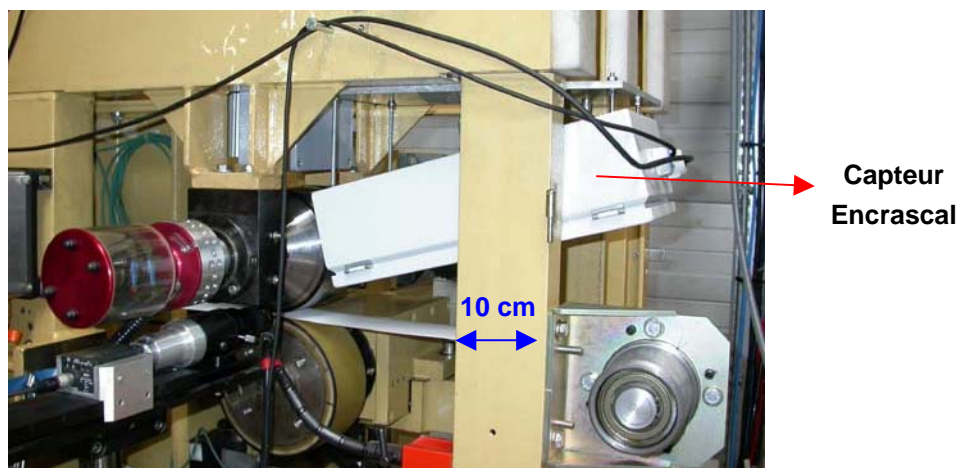


Figure 4. 13 : Position du capteur Encrascal sur la calandre pilote

4.1.2.2. - Résultats

Quelles que soient les conditions de calandrage et le papier couché, les essais se sont conclus par un échec dans la génération de dépôt de type collant au fur et à mesure du calandrage. Ce résultat est en concordance à ceux des essais de roulements sur le plan inclinée où aucune différence au niveau du coefficient de frottement entre les papiers testés (B, D et E) n'a été mise en évidence. La température du rouleau métallique ou l'ajout d'eau sur le papier juste avant son entrée dans le nip sont deux facteurs qui tendent à ramollir les éléments présents dans la couche. Par ailleurs, Carlsson ([Carlsson *et al.*, 2002]) a montré que l'augmentation de la température du rouleau favorise les dépôts de type collant. Cependant, cela n'a pas suffi pour générer des dépôts uniformément répartis sur les rouleaux et donc étudier les cinétiques avec les papiers testés. Les seuls dépôts observés au cours des essais de calandrage se situent sur le bord des rouleaux, à la limite de la feuille dans le sens de la laize (Figure 4. 14). Ce type de dépôts apparaît et s'accumule au fur et à mesure de l'essai. Des prélèvements ont été effectués puis observés au microscope électronique à balayage. L'analyse chimique élémentaire a montré la présence de particules de calcium, aluminium et silicium pouvant être associées à des charges présentes en masse dans le papier ou à des pigments de la couche telles que des carbonates de calcium et des kaolins. Ces dépôts pourraient être assimilés à des dépôts de type poussière définis par Carlsson ([Carlsson *et al.*, 2002]) mais ils ne sont probablement pas dus à un détachement de particules de la surface de la couche. En effet, le découpage des bobines à la laize de la calandre pilote a été réalisé de manière industrielle à l'aide de couteaux. Nous pouvons alors supposer que cette opération a pu désolidariser des charges du papier ou des pigments de la couche et qu'au fur et à mesure du calandrage, ces éléments se soient déposés sur les rouleaux.

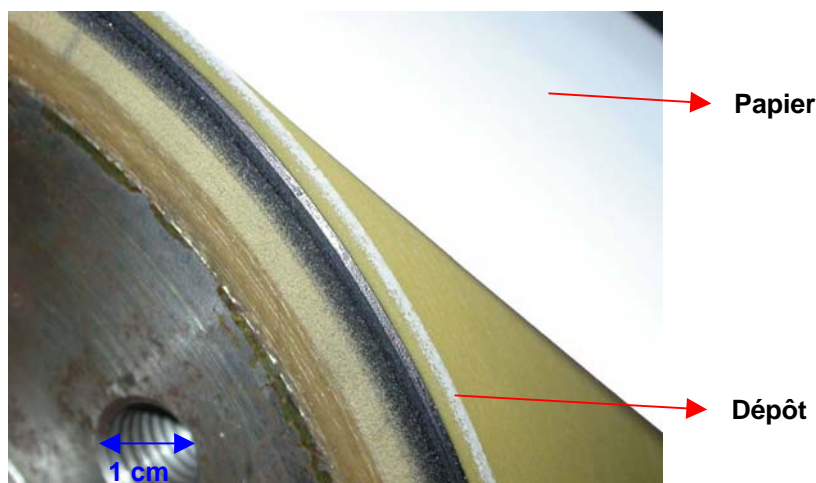


Figure 4. 14 : Dépôt observé sur le bord du rouleau polymère

D'une manière générale, les dépôts sont présents sur le rouleau polymère, sauf dans le cas des essais avec l'ajout d'eau sous forme de spray où les dépôts sont apparus sur le rouleau métallique (Figure 4. 15). La présence d'eau supplémentaire a certainement modifié les interactions physico-chimiques ce qui a conduit à créer des dépôts sur le rouleau métallique ([Ceretti, 2003]).



Figure 4. 15 : Dépôt observé sur le bord du rouleau métallique lors des essais avec l'ajout d'eau sous forme de spray

Des phénomènes de type collage sur le rouleau polymère sont également apparus au démarrage de la calandre lors des essais à une température du rouleau métallique de 260°C. En effet, le temps écoulé entre la mise en contact des rouleaux et leur rotation a permis de générer une adhésion du papier au rouleau suffisante pour provoquer soit un dépôt de type collant et une délamination du papier (Figure 4. 16), soit un cloquage de la couche (Figure 4. 17).

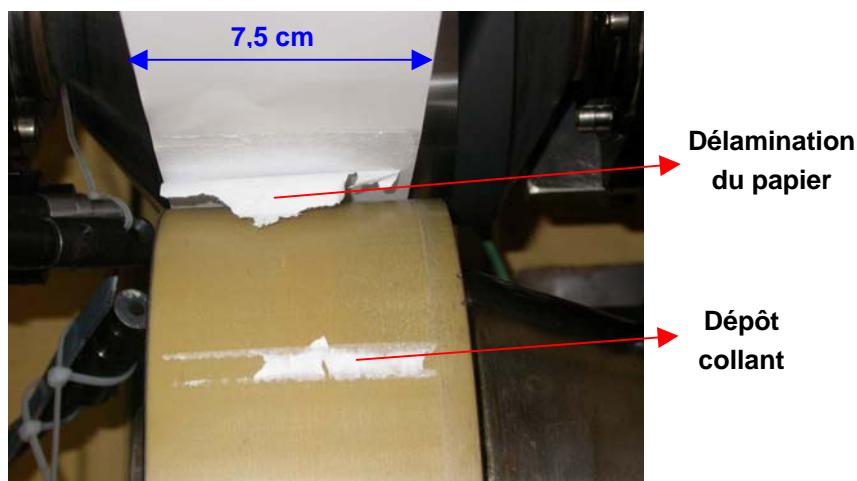


Figure 4. 16 : Dépôt de type collant sur le rouleau polymère et délamination du papier au démarrage de la bobine lors d'essai à une température du rouleau métallique de 260°C



Figure 4. 17 : Cloquage de la couche au démarrage de la bobine lors d'un essai à une température du rouleau métallique de 260°C

4.1.3. - Conclusions sur l'étude d'adhésion rouleau / papier

L'étude sur l'adhésion rouleau / papier a donc porté sur

- Le développement d'un essai de laboratoire (essai de roulement sur un plan incliné) qui a permis de caractériser les interactions de surface entre un cylindre et un papier par un coefficient de frottement ;
- Des essais sur la calandre pilote dans des conditions variables afin d'établir d'une part, une corrélation avec l'essai de laboratoire et d'autre part, générer et quantifier (visuellement ou à l'aide du capteur Encrascal) des dépôts sur les rouleaux.

Différents papiers couchés et non couchés ont été testés et les principaux résultats obtenus sont :

- Aucune variation significative n'a été mise en évidence au niveau du coefficient de frottement et aucun dépôt n'a été généré lors des essais de calandrage pour les papiers B, D et E (Tableau 2.6),

- L'augmentation de la température du papier (passage de 20 à 50°C) n'a pas entraîné de variation du coefficient de frottement. Par contre, les résultats de la partie 4.1.1.4. - ont montré une augmentation du coefficient de frottement avec la température du cylindre sur le papier couché I (Tableau 4. 2).

Il serait intéressant de poursuivre ce travail :

- Pour les essais de roulement : en utilisant des cylindres réalisés avec des matériaux différents (chrome ou fonte par exemple), avec des rugosités plus faibles (poli miroir), et en chauffant les cylindres ; une pré-humidification du papier pourrait être envisagée.
- Pour les essais de calandrage : tester un papier dont la composition de couche est équivalente à celle du papier I (Tableau 4. 2) et également d'autres compositions de couche ; une meilleure maîtrise de la ré-humidification de la surface du papier juste avant son entrée dans le nip à l'aide de boîte vapeur par exemple pourrait également être envisagée.

Nous nous rapprocherions ainsi dans les deux types d'essais des conditions industrielles de calandrage et nous aurions peut être des possibilités de recoupement entre les deux types d'essais.

4.2. - Optimisation des conditions de calandrage pour un meilleur compromis qualité de surface / compression du papier

L'influence des paramètres de calandrage concernant l'amélioration de l'état de surface du papier est d'une manière générale connue. Les principaux résultats, présentés dans la partie 1.2.4, montrent que l'amélioration du brillant ou du lissé par exemple se produit au détriment de l'épaisseur et donc de la main du papier. Cependant, les papetiers recherchent souvent par le calandrage ces deux caractéristiques qui sont antagonistes. Les conditions de calandrage doivent donc être ajustées afin de trouver le meilleur compromis possible. Cette partie va donc traiter de l'optimisation des conditions de calandrage pour mettre en relation les propriétés de surface et de volume du papier.

4.2.1. - Description de l'étude

4.2.1.1. - Présentation du papier utilisé

Un papier couché une face de grammage 50 g/m² a été utilisé dans cette étude. Il s'agit d'un papier d'impression écriture destiné à l'étiquetage de produit (papier étiquette). La face couchée est donc la face sur laquelle le papetier va rechercher des bonnes qualités d'impression. Le papier a été récupéré avant l'étape de calandrage chez le papetier afin de pouvoir faire varier les conditions d'essai sur la calandre pilote. Le poids de couche est de 8 g/m² et l'épaisseur du papier avant calandrage de 57 µm. Des feuilles calandrées ont également été fournies afin de pouvoir comparer les caractéristiques des papiers calandrés par le papetier et celles obtenues à partir de la calandre pilote. Le papetier a utilisé une supercalandre à 11 nips dont 10 nips associant un rouleau métallique et un rouleau polymère et un nip de changement de face associant deux rouleaux polymères.

4.2.1.2. - Objectif

L'objectif de l'étude est d'optimiser les conditions de calandrage afin d'obtenir les meilleures caractéristiques possibles sur la face couchée. Une bonne compréhension du développement du brillant et du lissé par rapport à la compression du papier est alors nécessaire.

4.2.1.3. - Conditions expérimentales

Des essais de calandrage ont été réalisés en mode bobine et en mode feuille à feuille. Les conditions de calandrage suivantes ont été utilisées :

- Température du papier : 30°C en mode feuille à feuille et température ambiante (environ 22°C) en mode bobine
- Vitesse de rotation : 550 tr/min
- Force linéique : 100, 175 et 250 kN/m
- Température du rouleau métallique : 100, 130 et 160°C
- Nombre de nip : 1 à 9 en mode feuille à feuille et 1 à 6 en mode bobine
- Soft nip avec un rouleau polymère de dureté 91ShD.

La face couchée du papier a été mise en contact avec le rouleau métallique dans toutes les conditions d'essai. Par ailleurs, au minimum cinq feuilles « bonnes » ont été calandrées pour chaque condition en mode feuille à feuille. Le brillant Gardner, le lissé Bekk et l'épaisseur des papiers ont ensuite été mesurés. Dans les paragraphes suivants, les caractéristiques des papiers seront données en fonction des conditions de calandrage. A titre indicatif, les caractéristiques du papier avant calandrage et celui calandré par le papetier seront également présentées (Non calandré en vert et Papetier en rouge).

4.2.2. - Influence du nombre de nips

Les essais concernant l'influence du nombre de nips ont été effectués avec une force linéique de 100 kN/m et une température du rouleau métallique de 100°C. Il s'agit de réglages proches de ceux utilisés sur une calandre industrielle pour ce type de papier. La Figure 4. 18, la Figure 4. 19 et la Figure 4. 20 présentent respectivement, le brillant Gardner, le lissé Bekk et l'épaisseur du papier en fonction du nombre de nips pour les essais de calandrage en mode feuille à feuille et bobine. L'allure générale des résultats est semblable pour les deux modes de calandrage dans les premiers nips :

- Augmentation rapide du brillant
- Augmentation plus graduelle du lissé
- Diminution, rapide également, de l'épaisseur

Cependant, l'évolution des différentes caractéristiques se produit de manière plus régulière en fonction du nombre de nips pour les papiers issus de la bobine que pour ceux issus des feuilles. En effet, les résultats obtenus en mode feuille à feuille montrent une stabilisation du brillant, du lissé et de l'épaisseur à partir du 3^{ème} ou 4^{ème} nip alors que les valeurs obtenues en mode bobine continuent d'être croissantes ou décroissantes (suivant la caractéristique suivie) en fonction du nombre de nips jusqu'à se rapprocher des caractéristiques obtenues par le papetier. Par ailleurs, nous pouvons souligner que la température des feuilles de papier est de 30°C pour tous les nips successifs, alors que la température de la bobine est de 22°C dans le premier nip mais, le transfert de chaleur entre le rouleau métallique et le papier produit une élévation de la température de la bobine au fur et à mesure des passages

du papier dans le nip. Une mesure de la température du papier aurait permis de confirmer cette tendance qui est observée en milieu industriel.

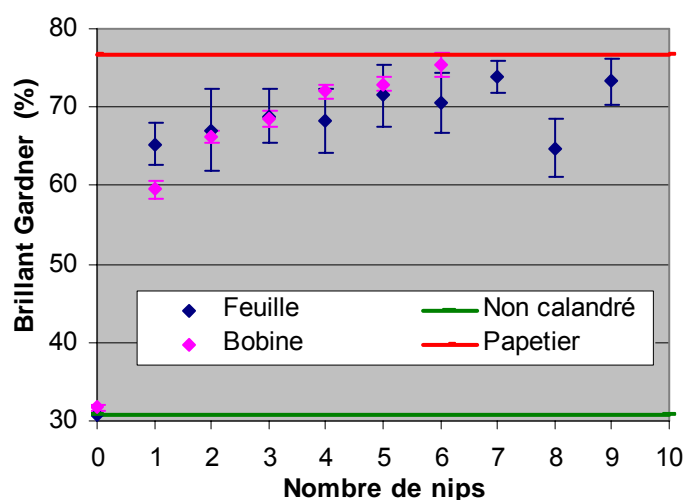


Figure 4. 18 : Mesure de brillant Gardner – Influence du nombre de nips – Force linéique : 100 kN/m – Température du rouleau métallique : 100°C

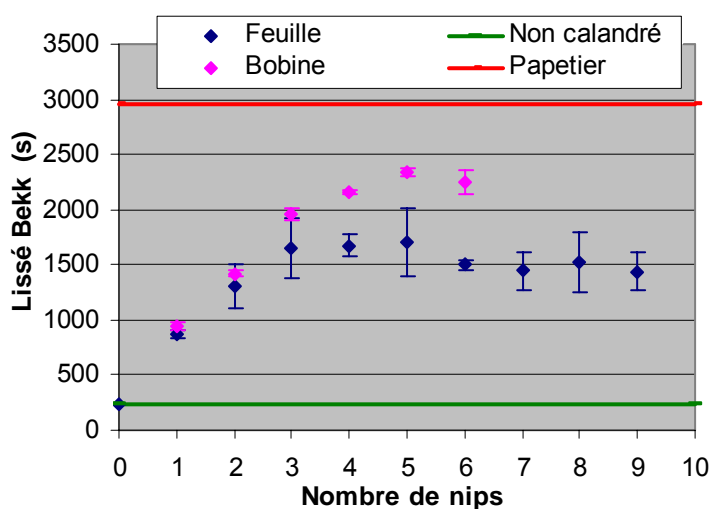


Figure 4. 19 : Mesure du lissé Bekk – Influence du nombre de nips – Force linéique : 100 kN/m – Température du rouleau métallique : 100°C

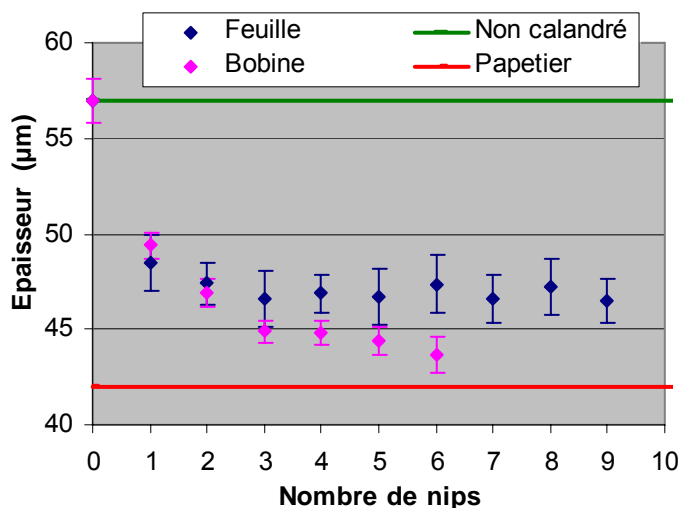


Figure 4. 20 : Mesure de l'épaisseur – Influence du nombre de nips – Force linéique : 100 kN/m – Température du rouleau métallique : 100°C

Concernant les deux modes de calandrage (feuille ou bobine), nous pouvons noter les points suivants :

- Des écart types plus importants en mode feuille à feuille qu'en mode bobine ont été calculés au niveau des caractéristiques déterminées. En effet, passer la feuille 6, 7, 8 ou 9 fois dans le nip est quelque chose de difficile : plus le nombre de passage de la feuille dans le nip augmente, plus la feuille s'endommage et la partie « bonne » calandrée se réduit. Ceci peut expliquer la faible valeur de brillant obtenue pour le papier calandré dans 8 nips et la stabilisation des résultats pour l'épaisseur et le lissé au delà 4^{ème} nip. Les caractéristiques obtenues en mode feuille à feuille sont donc peut être sous-évaluées en raison des difficultés d'essai.
- Au contraire, les résultats concernant les essais en mode bobine sont peut être sur-évalués pour les derniers nips (5 et 6) : lors du calandrage de bobine, un capteur (FIFE) permet de réguler latéralement le passage de la feuille dans le nip, mais nous n'avons pas de capteur permettant la même régulation à l'enroulage. Ainsi, au fur et à mesure des déroulages – enroulages de la bande de papier (7,5 cm de laize), les spires de la bobine ne s'alignent plus parfaitement les unes sur les autres et le capteur FIFE a de plus en plus de mal à réguler le passage de la feuille dans le nip. Les variations dans le sens de la laize de la bobine entrent en résonance avec l'actionneur et le capteur FIFE, entraînant ainsi une amplification des variations latérales. La force n'est alors plus appliquée constamment sur toute la laize. C'est la raison pour laquelle le calandrage en mode bobine n'a pas excédé 6 passages dans le nip.

Ainsi, malgré certaines précautions au niveau des valeurs obtenues à partir des papiers calandrés en mode feuille à feuille et en mode bobine, les résultats montrent que la compression supplémentaire du papier en mode bobine a permis d'atteindre des niveaux de lissé plus importants. Il semble donc que l'amélioration du lissé nécessite une compression du papier dans toute son épaisseur ; contrairement au brillant où peu de différence est observé entre les deux modes de calandrage. Par la suite, l'influence des conditions de calandrage sur les caractéristiques du papier sera présentée. Les essais ont été réalisés en

mode feuille à feuille pour 1, 2 et 3 nips. Nous pouvons donc penser que les tendances observées pourraient être un peu plus marquées en fonction du nombre de nips pour un calandrage en mode bobine.

4.2.3. - Influence de la force linéique

Les essais concernant l'influence de la force linéique ont été réalisés avec une température du rouleau métallique de 100°C. La Figure 4. 21, la Figure 4. 22 et la Figure 4. 23 présentent respectivement, le brillant Gardner, le lissé Bekk et l'épaisseur des papiers calandrés à des forces linéiques de 100, 175 et 250 kN/m en fonction du nombre de nips.

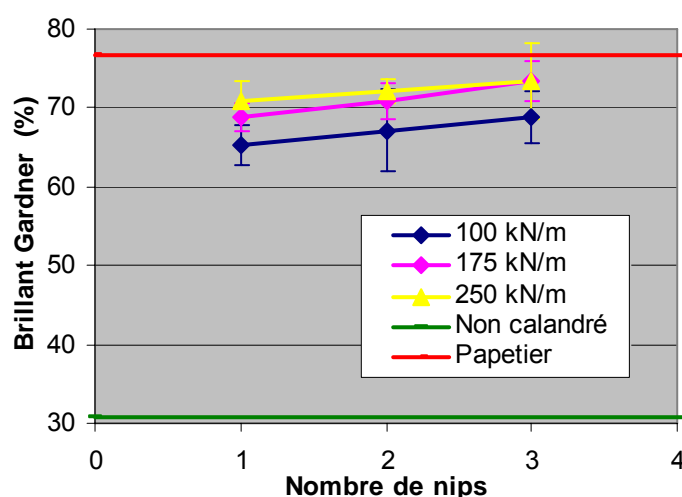


Figure 4. 21 : Mesure de brillant Gardner – Influence de la force linéique – Température du rouleau métallique : 100°C

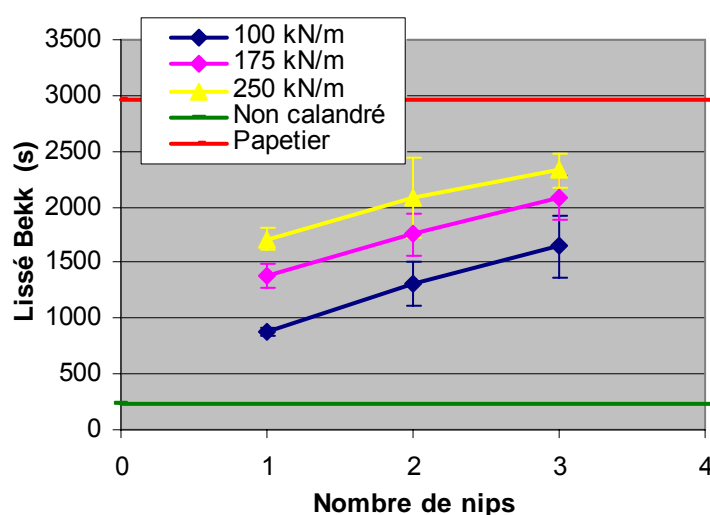


Figure 4. 22 : Mesure du lissé Bekk – Influence de la force linéique – Température du rouleau métallique : 100°C

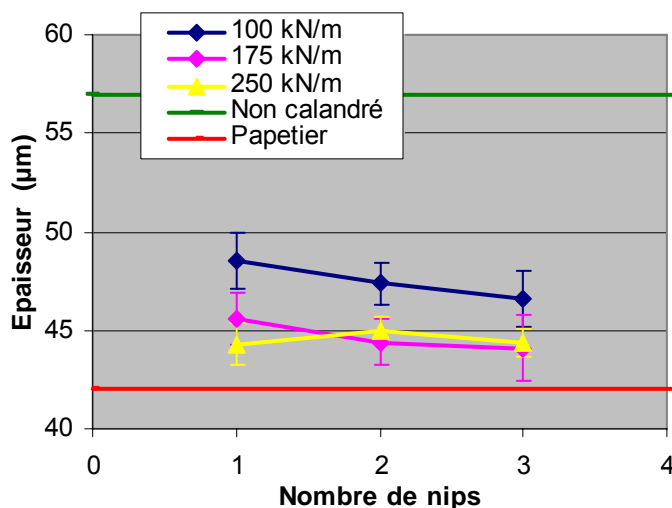


Figure 4. 23 : Mesure de l'épaisseur – Influence de la force linéique – Température du rouleau métallique : 100°C

Les résultats montrent d'une manière générale, que l'augmentation de la force linéique entraîne une amélioration du brillant (Figure 4. 21) et du lissé (Figure 4. 22) associée à une diminution de l'épaisseur (Figure 4. 23). Nous pouvons noter que le comportement en fonction de la force linéique est analogue à celui induit par l'augmentation du nombre de nips : Augmenter la force linéique ou passer dans des nips successifs engendrent une compression supplémentaire, caractérisée par une diminution plus importante de l'épaisseur et une augmentation du brillant et du lissé de la surface du papier. Cependant, nous pouvons constater que l'augmentation de la force linéique de 175 à 250 kN/m n'a quasiment pas entraîné de déformation supplémentaire et que l'amélioration du brillant est nettement moins importante que celle du lissé. Ce comportement est différent de celui observé lors de l'augmentation de la force linéique de 100 à 175 kN/m pour le brillant et l'épaisseur des papiers. Les résultats montrent donc que dans un premier temps, l'augmentation de la force linéique permet une amélioration du brillant et du lissé. Puis, à partir d'un certain niveau de compression du papier, l'augmentation de la force linéique entraîne principalement une amélioration du lissé sans pour autant engendrer une réduction supplémentaire de l'épaisseur du papier.

D'autre part, nous pouvons également remarquer qu'à une force linéique de 250 kN/m, l'augmentation ou la diminution (suivant le paramètre observé) est tellement importante lors du 1^{er} nip que les passages dans les nips suivants n'entraînent qu'une faible variation supplémentaire : la pente des droites entre le 1^{er}, le 2^{ème} et le 3^{ème} nip est plus faible à 250 kN/m qu'à 100 kN/m. Cette constatation est fonction du paramètre observé avec la graduation suivante du moins influencé au plus influencé : lissé < brillant < épaisseur. Ceci aurait tendance à montrer les points suivants :

- Un passage dans le nip avec une force linéique de 250 kN/m entraînerait une déformation plastique maximale et que toute action mécanique supplémentaire n'engendrerait pas de déformation plastique supplémentaire.
- Concernant le brillant, l'amélioration obtenue en un passage est quasiment maximale. Ainsi, toute autre action mécanique supplémentaire n'entraînerait qu'une légère amélioration supplémentaire.

- L'influence sur le lissé est différente. L'action mécanique répétée continue d'améliorer le lissé même si cela n'est pas associé à une déformation plastique supplémentaire.

4.2.4. - Influence de la température du rouleau métallique

Les essais concernant la température du rouleau métallique ont été effectués avec une force linéique de 100 kN/m. La Figure 4. 24, la Figure 4. 25 et la Figure 4. 26 présentent respectivement, le brillant Gardner, le lissé Bekk et l'épaisseur des papiers calandrés à des températures du rouleau métallique de 100, 130 et 160°C en fonction du nombre de nips.

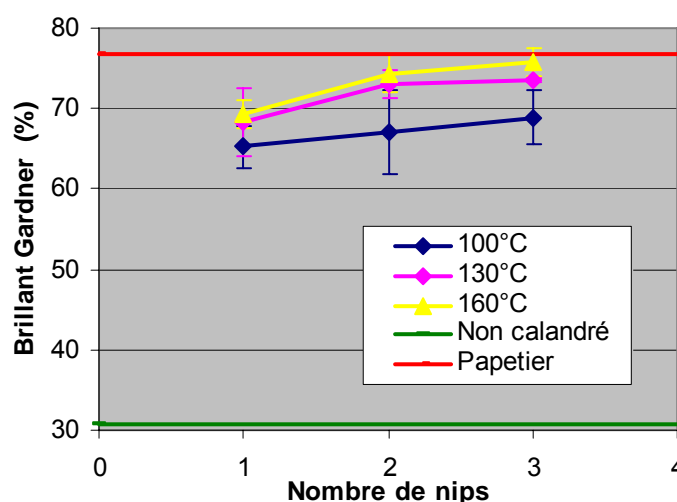


Figure 4. 24 : Mesure de brillant Gardner – Influence de la température du rouleau métallique
– Force linéique : 100 kN/m

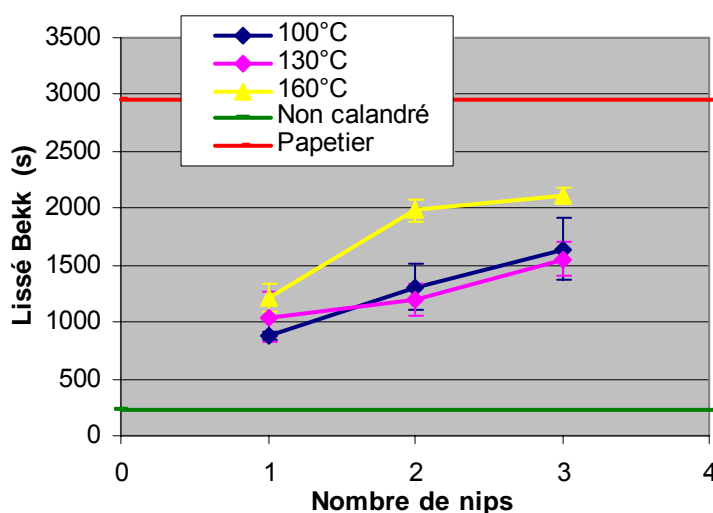


Figure 4. 25 : Mesure du lissé Bekk – Influence de la température du rouleau métallique –
Force linéique : 100 kN/m

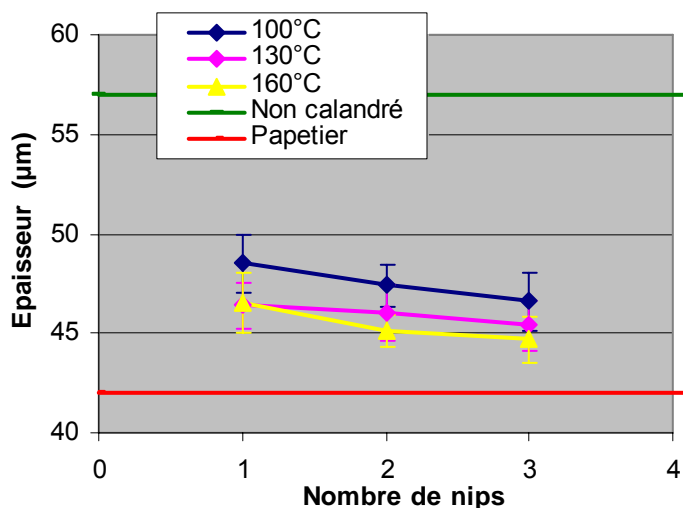


Figure 4.26 : Mesure de l'épaisseur – Influence de la température du rouleau métallique – Force linéique : 100 kN/m

D'une manière générale, nous constatons une augmentation du brillant (Figure 4.24) et du lissé (Figure 4.25) associée à une diminution de l'épaisseur (Figure 4.26) en augmentant la température du rouleau. Plus le rouleau métallique est chaud, plus la température de surface du papier est importante, ce qui permet d'améliorer les caractéristiques de surface (brillant et lissé). Par ailleurs, l'augmentation de la température du rouleau entraîne une élévation de la température au cœur du papier qui favorise sa compression.

4.2.5. - Condition la plus critique

Dans cette dernière campagne d'essai, les conditions de température et de force linéique les plus critiques ont été appliquées : 160°C et 250 kN/m. La Figure 4.27, la Figure 4.28 et la Figure 4.29 présentent le brillant Gardner, le lissé Bekk et l'épaisseur des papiers calandrés dans la condition la plus critique en fonction du nombre de nips. Les différentes caractéristiques ont été comparées aux valeurs obtenues lors du calandrage à une force linéique de 100 kN/m et une température du rouleau métallique de 100°C.

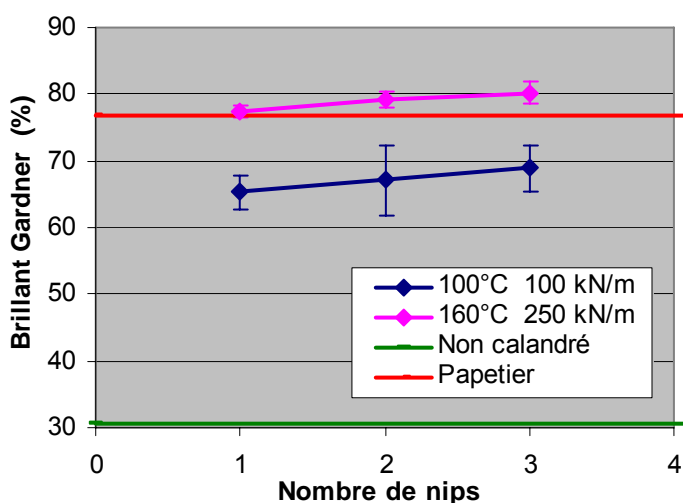


Figure 4.27 : Mesure de brillant Gardner – Condition la plus critique

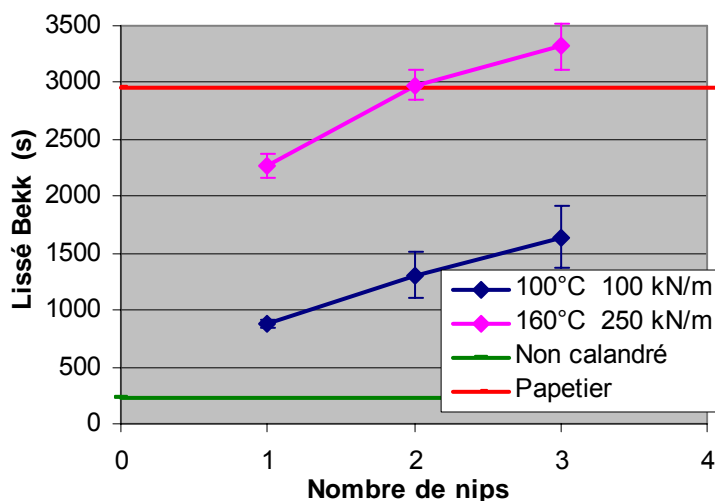


Figure 4. 28 : Mesure du lissé Bekk – Condition la plus critique

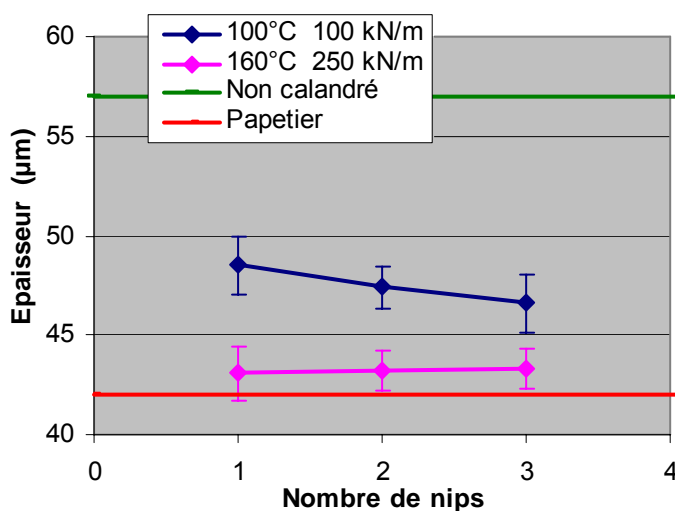


Figure 4. 29 : Mesure de l'épaisseur – Condition la plus critique

Les résultats montrent une amélioration du brillant et du lissé nettement supérieure à celle obtenue en ne faisant varier qu'un seul paramètre. Nous pouvons remarquer également que les valeurs de brillant et de lissé dépassent, dès le second nip, celles obtenues à partir du papier calandré par le papetier. Par contre, l'épaisseur du papier diminue fortement dès le premier nip puis ne varie quasiment pas par la suite.

4.2.6. - Conclusions sur l'optimisation des conditions de calandrage

L'étude sur l'optimisation des conditions de calandrage a confirmé des comportements connus : Une augmentation du nombre de nips, de la force linéique et de la température du rouleau métallique entraînent une amélioration du brillant et du lissé au détriment de l'épaisseur et donc la main du papier. Par ailleurs, nous avons mis en relation des caractéristiques de surface (brillant et lissé) à des caractéristiques de volume et de compression du papier. La Figure 4. 30 montre que le brillant du papier s'améliore davantage en augmentant la température du rouleau qu'en augmentant la force linéique, alors que la Figure 4. 31 présente un comportement opposé pour le lissé. La Figure 4. 32

montre que pour le premier nip, l'augmentation de la force linéique a un effet plus influençant l'épaisseur du papier que la température du rouleau. A partir du second nip, le papier a quasiment atteint son épaisseur minimale correspondant alors à sa compressibilité maximale.

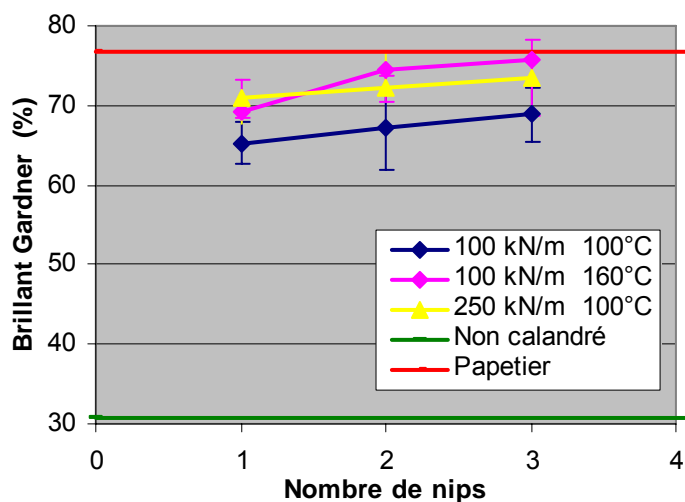


Figure 4. 30 : Influence de la force linéique et de la température du rouleau métallique sur le brillant Gardner

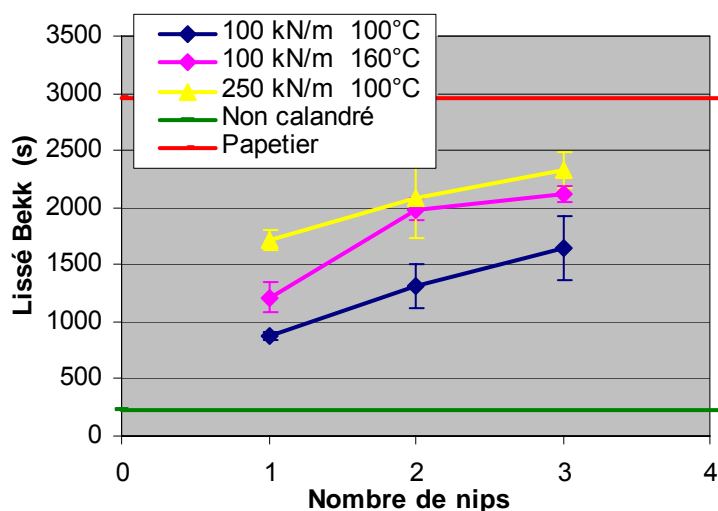


Figure 4. 31 : Influence de la force linéique et de la température du rouleau métallique sur le lissé Bekk

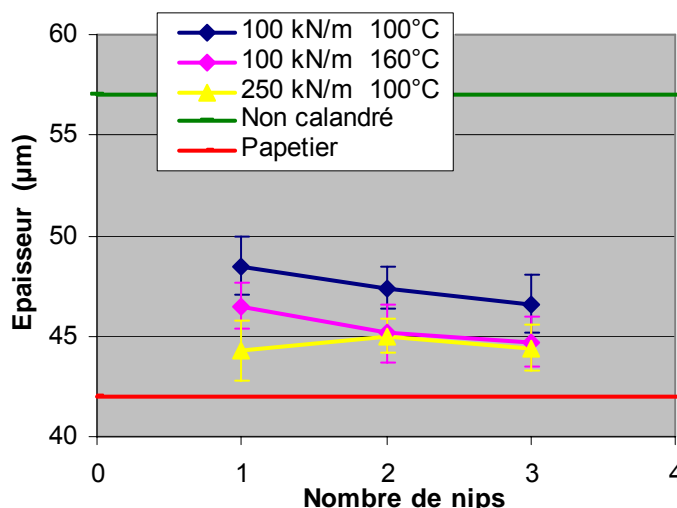


Figure 4. 32 : Influence de la force linéique et de la température du rouleau métallique sur l'épaisseur

A partir des comparaisons, nous pouvons penser que :

- L'augmentation de la température du rouleau entraîne préférentiellement une déformation de la surface du papier. Le brillant est la caractéristique la plus influencée par ce paramètre.
- L'augmentation de la charge linéique ou du nombre de nips engendrent une déformation du papier dans toute son épaisseur jusqu'à un niveau de déformation plastique maximal. Nous pouvons toutefois noter que l'augmentation de la charge linéique (100 à 250 kN/m) a un effet plus important que l'augmentation du nombre de nip (1, 2 ou 3). La température du rouleau est un paramètre secondaire par rapport à la charge linéique car son augmentation (100 à 160°C) ne permet pas d'atteindre la même déformation en un seul passage.
- L'action mécanique (nombre de nips ou force linéique) est un facteur de premier ordre pour améliorer le lissé d'un papier. Même si le papier a atteint sa déformation plastique maximale, l'augmentation de ces deux paramètres continue d'améliorer le lissé des papiers. La formation de la feuille, l'humidité et la température des fibres cellulosiques pourraient être alors, des paramètres importants pour améliorer le lissé, car ils jouent sur la compressibilité des papiers (cf partie 3.4.1).

Enfin, la dernière campagne d'essai qui cumule l'augmentation de la force linéique et la température du rouleau métallique permet d'élargir ce travail de recherche vers des stratégies que les papetiers et les fabricants de calandre pourraient donner au calandrage. Les résultats ont montré qu'une augmentation conjointe de la force linéique et la température du rouleau permet d'obtenir des caractéristiques de brillant et de lissé en 1 ou 2 nips équivalentes à celles obtenues par le papetier à partir de la supercalandre (11 nips). A l'heure actuelle, de nombreuses thématiques de recherche portent sur la réduction des coûts, l'utilisation de quantité minimale d'énergie pour développer les propriétés requises en fonction de l'utilisation finale du papier. Il serait donc intéressant, dans un premier temps, d'appliquer les conditions de calandrage utilisées sur la calandre pilote à une soft calandre industrielle, afin de vérifier que la modification des paramètres (force linéique, température)

n'engendrent pas de problèmes techniques ; puis dans un second temps, d'effectuer un bilan énergétique et financier dans les deux configurations de calandrage.

En effet, il semble que le passage d'une supercalandre à 11 nips à une soft calandre à 2 ou 3 nips engendre une réduction des coûts, car cette modification implique :

- Un gain de productivité (moins de rouleau à changer, par exemple),
- Une réduction d'énergie consommée (chauffer 2 rouleaux au lieu de 6, même si la température doit être plus élevée)
- Et également une possibilité d'ajustement plus grande (calandrage en ligne ou ajustement des conditions de calandrage au papier final, par exemple).

Ainsi, une étude technico-économique sur l'investissement d'une nouvelle soft calandre peut être intéressante pour un industriel papetier.

4.3. - Transfert de l'état de surface des rouleaux au papier

En fonction du type de papier et des conditions de calandrage, l'état de surface des rouleaux d'une calandre évolue dans le temps. Par exemple, pour un papier très chargé et abrasif, la surface du rouleau polymère se polie et sa rugosité diminue. Par contre, si les conditions de calandrage de ce même papier sont sévères (température et pression élevées), le rouleau polymère peut se déformer en créant un bombé par exemple, ou alors localement se fissurer ce qui peut entraîner une destruction du revêtement polymère. La rugosité moyenne d'un rouleau polymère est comprise entre 0,3 et 0,6 μm ([Jokio, 1999]). Les rouleaux métalliques sont généralement en fonte et leur rugosité est plus faible, entre 0,1 et 0,2 μm . Les caractéristiques de surface de ces rouleaux peuvent être améliorées en déposant une fine couche de chrome ou de carbure de tungstène pouvant ainsi diminuer la rugosité jusqu'à 0,02 μm ([donnée fournisseur]). Cependant, l'état de surface des rouleaux métalliques s'endommage également au cours du temps. Des micro fissures, des zones effritées ou écaillées apparaissent sur les rouleaux.

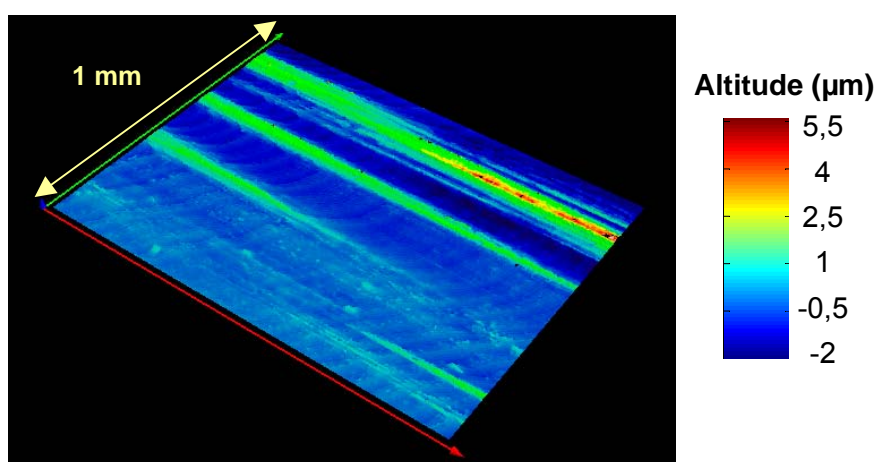


Figure 4. 33 : Topographie d'une empreinte silicone de la surface d'un rouleau métallique, endommagé, de la calandre pilote (Topo3D) – Dimension : 1,4 x 1 mm

La Figure 4. 33 présente le négatif de l'état de surface d'un vieux rouleau de la calandre pilote (empreinte silicone). Des stries apparaissent dans le sens de rotation du rouleau à une altitude plus importante que le reste de la surface. Elles sont très

probablement engendrées par des particules qui ont été arrachées de la surface du rouleau. La topographie du rouleau endommagé a été obtenue à partir du Topo3D. Un filtre gaussien de longueur d'onde de coupure à 1000 μm a été appliqué afin de remettre l'échantillon à plat. La rugosité réelle de l'empreinte est ainsi caractérisée sans prendre en compte le rayon de courbure du rouleau. Toutes les images topographiques présentées dans la partie 4.3. -, ont subi le même traitement. L'état de surface des rouleaux de la calandre a un effet immédiat sur les caractéristiques des papiers car la surface des rouleaux se transfère sur le papier (partie 1.3.2.1). Cette partie va donc porter sur l'influence de l'état de surface du rouleau métallique et des conditions de calandrage sur le développement, notamment, du brillant des papiers.

4.3.1. - Description de l'étude

Présentation du rouleau

Dans cette étude, un rouleau métallique en fonte a été utilisé. La surface de ce rouleau est divisé dans le sens axial en trois zones de rugosité moyenne : 0,1 ; 0,2 et 0,4 μm . Les deux zones de plus forte rugosité ont subi une attaque chimique.

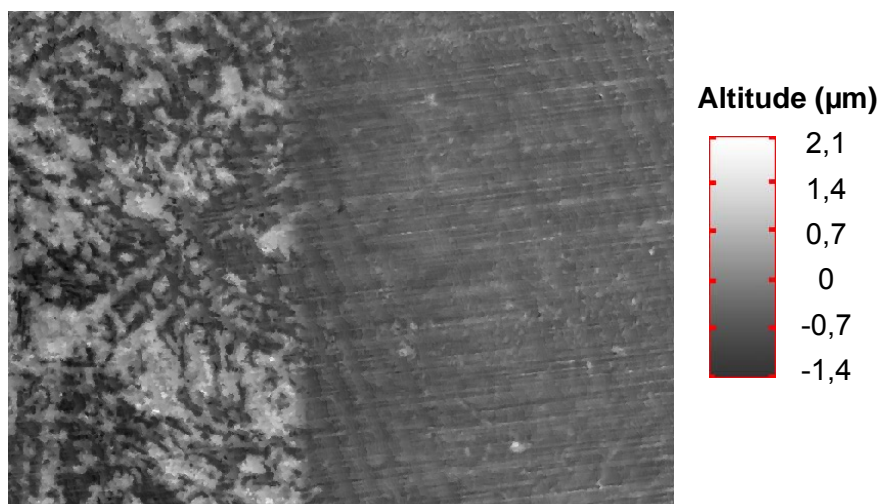


Figure 4. 34 : Topographie d'une empreinte de la surface du rouleau avec les trois rugosités
– Zone de rugosité 0,1 μm (à droite) et 0,4 μm (à gauche) – Dimension : 1,3 x 1 mm

La Figure 4. 34 présente la topographie d'une empreinte silicone du rouleau, à la charnière entre la zone de rugosité moyenne 0,1 μm et celle de rugosité 0,4 μm . La Figure 4. 35, la Figure 4. 36 et la Figure 4. 37 présentent les topographies obtenues comme la précédente, à partir du Topo3D, des empreintes silicones des trois zones de rugosités différentes.

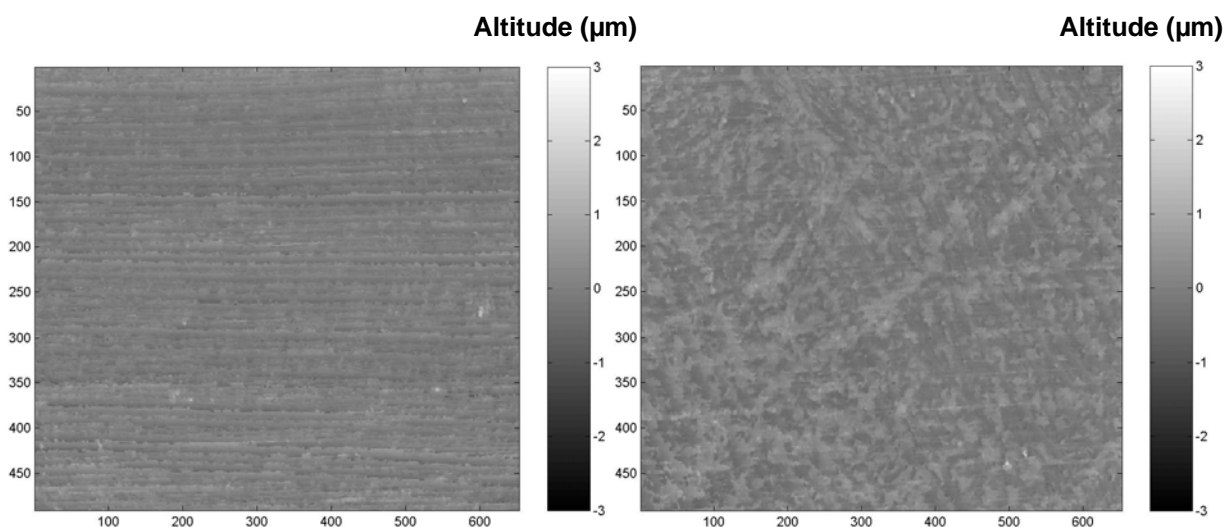


Figure 4. 35 : Topographie de l'empreinte silicone dans une zone de rugosité moyenne de $0,1 \mu\text{m}$ – Dimension : $1,3 \times 1 \text{ mm}$

Figure 4. 36 : Topographie de l'empreinte silicone dans une zone de rugosité moyenne de $0,2 \mu\text{m}$ – Dimension : $1,3 \times 1 \text{ mm}$

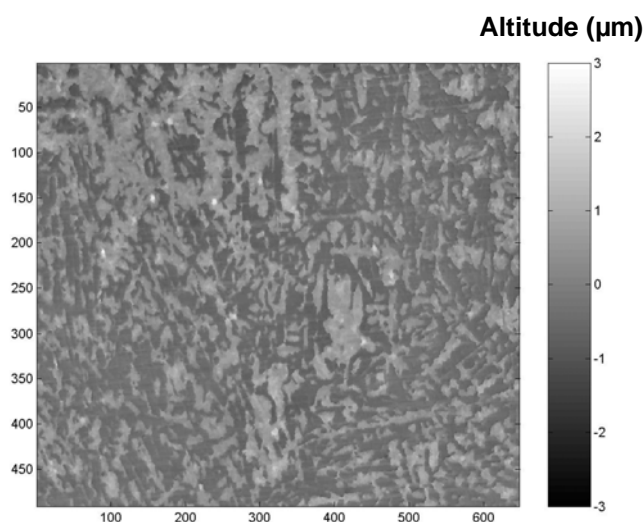


Figure 4. 37 : Topographie de l'empreinte silicone dans une zone de rugosité moyenne de $0,4 \mu\text{m}$ – Dimension : $1,3 \times 1 \text{ mm}$

Contexte et objectif

L'objectif principal de cette étude est de déterminer l'influence de l'état de surface du rouleau métallique sur les caractéristiques du papier. Les essais avec le rouleau ayant des formes géométriques a mis en évidence un transfert des stries du rouleau sur la surface du papier (cf partie 3.5.2), mais l'objectif principal des essais avec ce rouleau portait sur le comportement mécanique du papier dans toute son épaisseur. Le transfert géométrique d'une forme (cercle, quadrillage) sur le papier a permis de montrer qu'il n'y a pas de glissement dans le nip à une grande échelle (diamètre des cercles 20 mm). L'utilisation du rouleau avec les différentes rugosités a pour but de mettre en évidence ce comportement à

une échelle beaucoup plus locale. Par ailleurs, la pression appliquée dans le nip est la même quelle que soit la zone en contact avec le papier. La caractérisation des phénomènes de surface (transfert de l'état de surface du rouleau au papier) est donc réalisée pour les mêmes phénomènes de volume (compression du papier). Le second objectif de cette étude est d'étudier l'influence des conditions de calandrage (température, pression, vitesse) et de l'état de densification initial du papier sur le transfert de l'état de surface du rouleau au papier.

Conditions expérimentales

Le papier couché F (Tableau 2.6) a été utilisé dans cette étude. Les essais de calandrage ont été réalisés en mode feuille à feuille dans les conditions suivantes :

- Température du papier : 25°C
- Vitesse de rotation : 400 ; 800 ; 1200 tr/min
- Force linéique : 130 ; 200 ; 260 kN/m
- Température du rouleau métallique : 90 ; 130 ; 180°C
- Soft nip avec un rouleau composite à base de polyuréthane de dureté 91ShD
- 1 nip

Pour chaque condition de calandrage, au minimum dix feuilles ont été calandrées.

4.3.2. - Etude de la topographie des papiers calandrés

Dans le but d'étudier le transfert de l'état de surface du rouleau au papier à une échelle locale (inférieur au millimètre), plusieurs zones ont été repérées sur le papier puis caractérisées à partir du Topo3D avant et après calandrage. La Figure 4. 38 présente l'analyse locale du transfert d'état de surface à partir de la topographie du rouleau et de celles d'un des repères sur le papier avant et après calandrage. Dans le cas présenté, le papier a été calandré à une vitesse de 800 tr/min, avec une force linéique de 200 kN/m et une température du rouleau métallique de 130°C. La surface repérée du papier a été en contact avec une zone du rouleau de rugosité 0,4 µm.

Les images décrivant la topographie du papier avant et après calandrage montrent une ligne verticale entre 200 et 300 (pixel) sur l'axe des abscisses ce qui confirme que la zone analysée est identique. Par ailleurs, les zones d'hétérogénéité importantes dues à la formation de la feuille (zones très blanches ou très noires sur l'image avant calandrage) apparaissent également sur l'image après calandrage avec des niveaux de gris plus intermédiaires. Le calandrage a permis de réduire la rugosité globale du papier. Ainsi, les niveaux d'altitude (niveau de gris) qui s'épalaient entre -3 et 3 µm avant calandrage, ne s'épalaient plus qu'entre -1,5 et 1,5 µm après calandrage.

L'image décrivant la topographie du rouleau correspond à une zone de rugosité 0,4 µm. Par ailleurs, l'image du rouleau n'est probablement pas celle qui a été en contact avec la zone analysée du papier. Par contre, quelle que soit la zone de rugosité 0,4 µm, nous observons sur le rouleau, des formes qui pourraient être assimilées à des dendrites en métallurgie.

Rappelons nous que la topographie du rouleau, observée, a été obtenue à partir d'une empreinte silicone et que ces formes « dendritiques » se sont formées suite à une attaque chimique. Elles apparaissent donc à des niveaux d'altitude positifs sur l'image (entre 1 et 1,5 µm), mais sont réellement en négatif sur la surface du rouleau.

La Figure 4. 38 présente le résultat topographique de la mise en contact d'un rouleau de rugosité $0,4 \mu\text{m}$ avec un papier. En effet, outre que l'état de surface du papier après calandrage soit plus lisse, les formes « dendritiques » du rouleau apparaissent sur le papier calandré, à des niveaux d'altitude positifs comme pour l'empreinte silicone. L'observation des images met en évidence le transfert de l'état de surface du rouleau au papier à une échelle inférieure au millimètre.

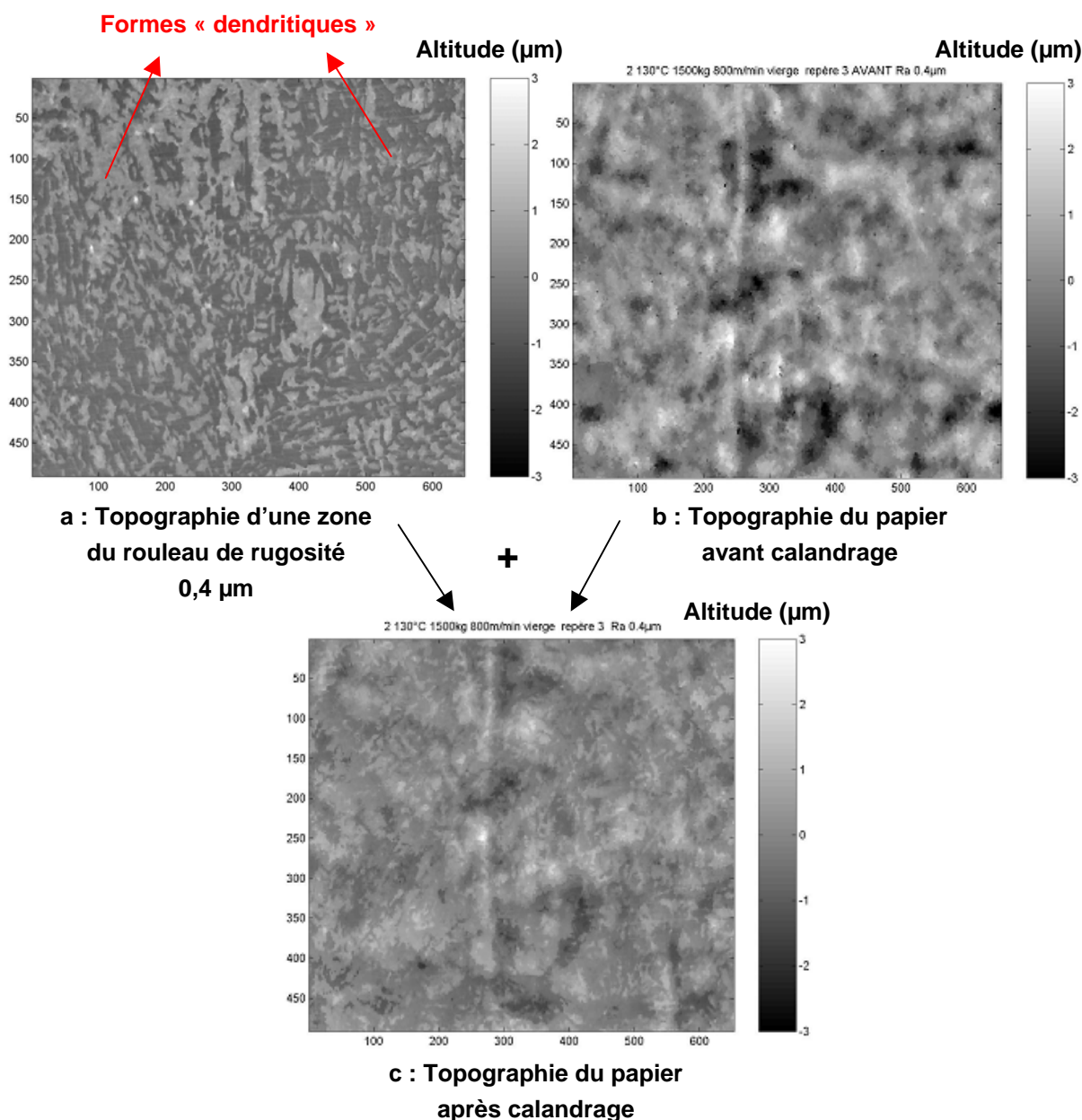


Figure 4. 38 : Analyse locale du transfert de l'état de surface du rouleau au papier : a : Topographie du rouleau ; b : Topographie du papier avant calandrage ; c : Topographie du papier après calandrage – Dimension : $1,3 \times 1 \text{ mm}$

La Figure 4. 39 présente la topographie d'une zone d'un papier, repérée avant calandrage et la Figure 4. 40 celle de la même zone après avoir été mise en contact dans le nip avec une zone du rouleau de rugosité $0,1 \mu\text{m}$. Les conditions de calandrage sont les

mêmes que celles présentées pour la Figure 4. 38. Nous pouvons remarquer sur l'image après calandrage (Figure 4. 40), des lignes apparaître. Elles correspondent aux stries observables sur le rouleau (Figure 4. 35). Cet exemple met également en évidence le transfert de l'état de surface du rouleau au papier à une échelle locale.

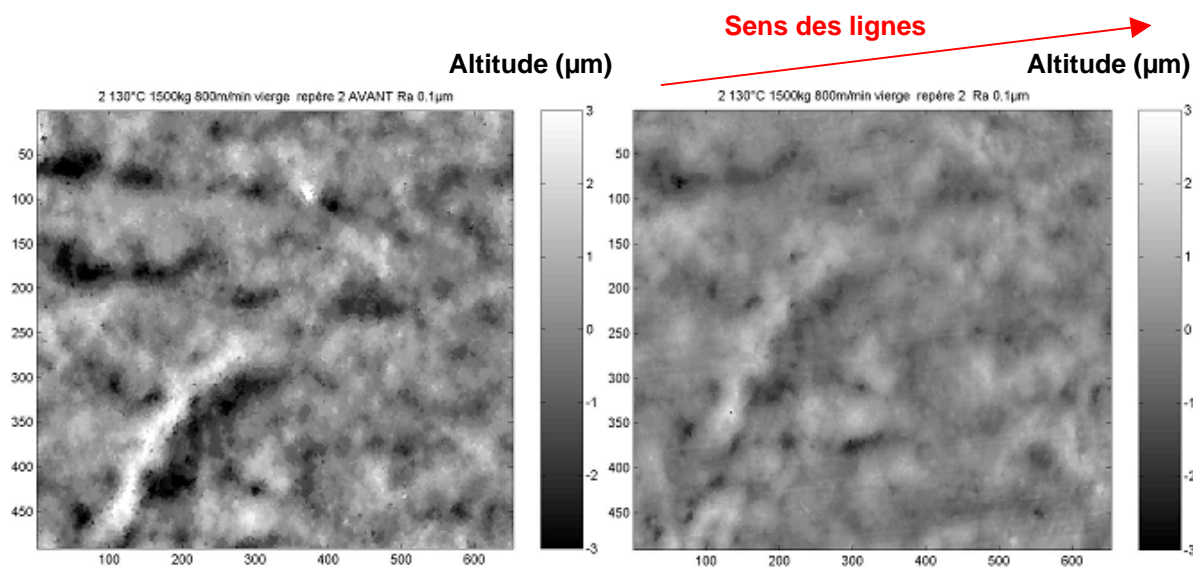


Figure 4. 39 : Topographie du papier dans une zone repérée avant calandrage

Figure 4. 40 : Topographie du papier dans la même zone repérée, après un contact dans le nip avec une zone du rouleau de rugosité 0,1 μm

Si les images topographiques montrent assez nettement un transfert de l'état de surface du rouleau au papier, des mesures de rugosité moyenne sur la zone analysée, réalisées à partir du Topo3D, montrent que les rugosités du papier sont peu sensibles à l'état de surface du cylindre : la rugosité des papiers est de 0,39 μm (avec un écart type de 0,06 μm pour trois surfaces analysées) pour le papier qui a été en contact avec la zone du rouleau de rugosité 0,1 μm . (Figure 4. 40) et de 0,45 μm (écart type de 0,03 μm) pour celui en contact avec la zone du rouleau de rugosité 0,4 μm (Figure 4. 38). La rugosité moyenne n'est donc pas un bon indicateur du transfert de rugosité.

Des mesures de brillant Gardner ont également été réalisées sur les papiers présentés précédemment (images topographiques). La Figure 4. 41 montre une nette diminution du brillant Gardner quand la rugosité du rouleau métallique augmente. La mesure de brillant Gardner s'avère donc être un bien meilleur indicateur que la rugosité moyenne déterminée à partir du Topo3D. Nous avons donc choisi d'utiliser cet indicateur pour déterminer l'influence des conditions de calandrage sur le transfert de l'état de surface du rouleau au papier.

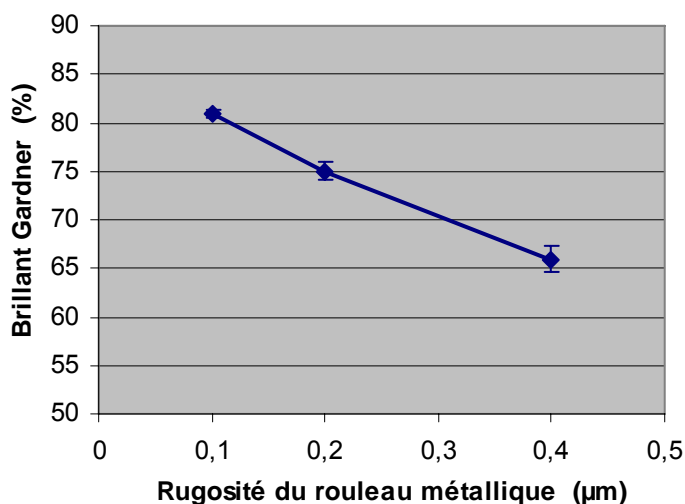


Figure 4. 41 : Evolution du brillant Gardner avec la rugosité du rouleau métallique sur les papiers calandrés F – Température du rouleau métallique : 130°C – Force linéique : 200 kN/m – Vitesse de calandrage : 800 tr/min

4.3.3. - Influence des conditions de calandrage sur le brillant Gardner des papiers

Dans cette partie, nous allons étudier l'influence des conditions de calandrage et de l'état de densification initial du papier sur le brillant en fonction de la rugosité du rouleau métallique. A titre indicatif, le brillant Gardner du papier non calandré sera indiqué (en vert).

4.3.3.1. - Influence de la température du rouleau métallique

Les essais concernant l'influence de la température du rouleau métallique ont été réalisés à une force linéique de 200 kN/m et une vitesse de calandrage de 800 tr/min. La Figure 4. 42 présente l'évolution du brillant Gardner des papiers calandrés à des températures du rouleau métallique de 90, 130 et 180°C avec la rugosité du rouleau métallique. Les résultats montrent tout d'abord une diminution du brillant du papier avec l'augmentation de la rugosité du rouleau. Par ailleurs, nous constatons pour le papier en contact avec une zone du rouleau de rugosité 0,1 µm, que plus la température du rouleau est élevée, plus le papier est brillant. Le comportement est opposé pour le papier en contact avec une zone du rouleau de rugosité 0,4 µm. Sachant que l'élévation de la température du rouleau favorise la déformation de la surface du papier (rapprochement de la température de ramollissement), il est donc normal que ce paramètre favorise le transfert de l'état de surface du rouleau au papier :

- Si le rouleau est lisse, plus la température du rouleau est élevée, plus le papier va être brillant.
- Si le rouleau est rugueux, l'élévation de la température va entraîner une diminution du brillant.

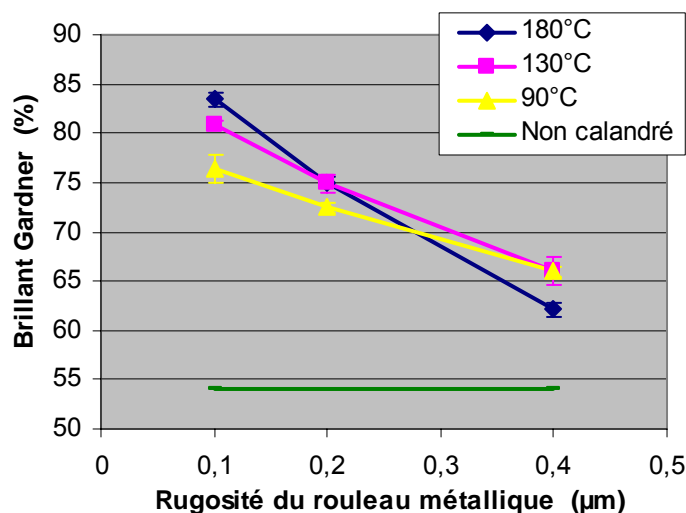


Figure 4. 42 : Evolution du brillant Gardner avec la rugosité du rouleau métallique – Influence de la température du rouleau – Force linéique : 200 kN/m – Vitesse de calandrage 800 tr/min

Des mesures de rugosité au Topo3D ont été réalisées pour les papiers calandrés à différentes températures. Les résultats présentés en annexe n°7 montrent que pour les essais de calandrage à une température du rouleau métallique de 90°C, la rugosité moyenne du papier est de 0,5 µm, quelle que soit la zone du rouleau qui a été en contact avec le papier. Pour les températures du rouleau plus élevées, les papiers, qui ont été en contact avec une zone du rouleau de plus faible rugosité, ont une rugosité moyenne de l'ordre de 0,4 µm. Ainsi, jusqu'à une rugosité du papier de 0,5 µm, le facteur limitant pour obtenir une rugosité plus faible est la température, car quel que soit l'état de surface du rouleau, la rugosité reste constante. En dessous de cette valeur, une rugosité plus faible du rouleau métallique associée à une température du rouleau plus importante permet de diminuer la rugosité du papier. L'état de surface du rouleau devient alors un paramètre influant au même niveau que la température du rouleau.

4.3.3.2. - Influence de la vitesse de calandrage

L'étude concernant l'influence de la vitesse de calandrage a été effectuée lors d'essais à une température du rouleau métallique de 130°C et une force linéique de 200 kN/m. La Figure 4. 43 présente l'évolution du brillant Gardner des papiers calandrés à des vitesses de calandrage de 400, 800 et 1200 tr/min avec la rugosité du rouleau métallique. Les résultats montrent comme précédemment que plus le rouleau est rugueux, plus le brillant des papiers calandrés est faible. Par ailleurs, nous pouvons observer pour les papiers en contact avec la zone du rouleau de rugosité 0,1 µm que plus la vitesse de calandrage est faible, plus le papier est brillant. Comme nous l'avons déjà vu précédemment (partie 1.2.4), la diminution de la vitesse de calandrage permet d'augmenter le temps de contact rouleau / papier et ainsi de favoriser le transfert de chaleur. Ces deux effets de la vitesse permettent d'améliorer le brillant du papier par un calandrage avec un rouleau de faible rugosité. En effet, aucune différence de brillant en fonction de la vitesse de calandrage n'est possible pour les papiers en contact avec une zone du rouleau de rugosité 0,4 µm. Comme pour l'élévation de la température du rouleau métallique, la diminution de la vitesse de calandrage permet d'améliorer le transfert de l'état de surface du rouleau au papier.

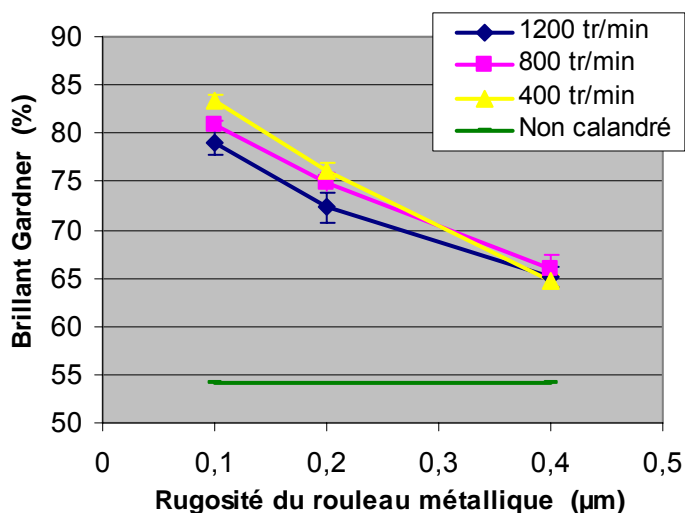


Figure 4. 43 : Evolution du brillant Gardner avec la rugosité du rouleau métallique – Influence de la vitesse de calendrage – Température du rouleau métallique : 130°C – Force linéique : 200 kN/m

4.3.3.3. - Influence de la force linéique

Les essais concernant l'influence de la force linéique ont été réalisés à température du rouleau métallique de 130°C et une vitesse de calendrage de 800 tr/min. La Figure 4. 44 présente l'évolution du brillant Gardner des papiers calandrés à des charges linéiques de 130, 200 et 260 kN/m avec la rugosité du rouleau métallique.

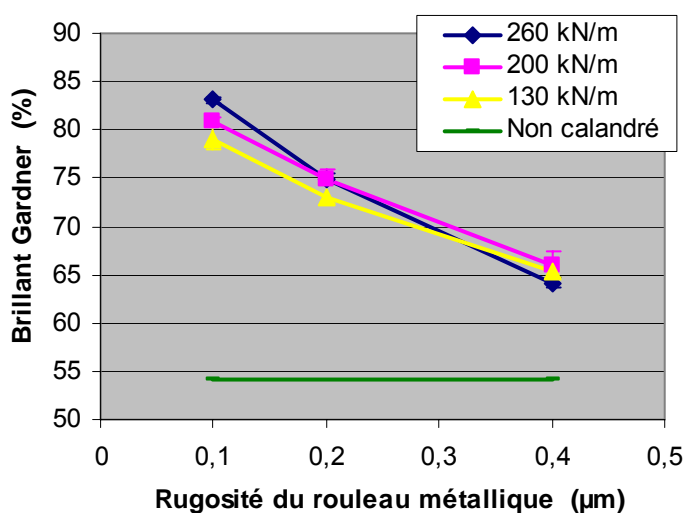


Figure 4. 44 : Evolution du brillant Gardner avec de la rugosité du rouleau métallique – Influence de la force linéique – Température du rouleau métallique : 130°C – Vitesse de calendrage : 800 tr/min

Comme pour les résultats concernant la température du rouleau métallique et la vitesse de calendrage, nous constatons une diminution du brillant Gardner des papiers avec l'augmentation de la rugosité du rouleau métallique. Par ailleurs, les résultats montrent pour

les papiers en contact avec la plus faible rugosité du rouleau (0,1 μm), que plus la force linéique est élevée, plus le papier est brillant. La tendance apparaît opposée pour les papiers en contact avec la plus forte rugosité du rouleau (0,4 μm). Il semble donc que plus le papier est comprimé, plus l'état de surface sur rouleau se transfère sur la surface du papier.

4.3.3.4. - Influence de l'état de densification du papier

Les essais précédents montrent que plus le papier est comprimé, plus l'état de surface du rouleau se transfère sur le papier. Nous avons donc pré-calandré le papier afin d'avoir des épaisseurs plus faibles et donc différents niveaux de densification du papier. Les pré-calandrages ont été effectués sur une soft calandre de laboratoire à froid et à très faible vitesse. Les forces linéiques appliquées dans le nip ont été d'environ 23, 39 et 85 kN/m pour obtenir en un seul passage dans le nip des épaisseurs respectives de 106, 104 et 99 μm . Une dernière condition de pré-calandrage a été effectuée en faisant passer la feuille 8 fois dans le nip avec une force linéique de 65 kN/m afin d'obtenir une feuille comprimée au maximum (94 μm). La Tableau 4. 4 présente les valeurs d'épaisseur et de brillant Gardner des papiers en fonction de leur pré-calandrage. Les valeurs de brillant correspondent à la face qui a été en contact avec le rouleau métallique lors du pré-calandrage. La première condition présentée (0 kN/m) correspond au papier initial sans pré-calandrage. Nous constatons que la diminution de l'épaisseur du papier engendre une amélioration du brillant.

Conditions de pré-calandrage	Epaisseur (μm)	Brillant Gardner (%)
Pas de pré-calandrage : 0 kN/m	115	54,1
1 passage dans le nip : 23 kN/m	106	60,1
1 passage dans le nip : 39 kN/m	104	64,5
1 passage dans le nip : 85 kN/m	99	68,9
8 passages dans le nip : 65 kN/m	94	79,6

Tableau 4. 4 : Mesure de l'épaisseur et du brillant Gardner des papiers suite au pré-calandrage

Les papiers pré-calandrés ont ensuite été calandrés afin d'étudier l'influence de l'état de densification initial sur le transfert de l'état de surface. Les conditions de calandrage ont été :

- Une température du rouleau métallique de 130°C
- Une vitesse de calandrage de 800tr/min
- Une force linéique de 200 kN/m
- La face la plus brillante (en contact avec le rouleau métallique lors du pré-calandrage) a été mise en contact avec le rouleau aux trois rugosités.

La Figure 4. 44 présente l'évolution du brillant Gardner des papiers pré-calandrés puis calandrés avec la rugosité du rouleau métallique.