
Compression du papier

5. - Synthèse	179
5.1. - Compression du papier.....	179
5.1.1. - Comparaison des essais de laboratoire et des essais de calandrage	179
5.1.2. - Détermination de la largeur de nip en statique à partir des essais de compression quasi-statique.....	185
5.1.3. - Comportement mécanique des papiers couchés.....	187
5.2. - Etude du contact rouleau – papier lors du calandrage	191

5. - Synthèse

Le travail de thèse a porté sur le calandrage du papier. Les deux thématiques suivantes ont été abordées à partir d'essais de laboratoire et d'essais de calandrage :

- La caractérisation du comportement mécanique du papier dans le nip,
- La caractérisation des interactions de surface entre le papier et les rouleaux d'une calandre.

Ce dernier chapitre est donc une synthèse des chapitres 2, 3 et 4 portant sur ces deux thématiques.

5.1. - Compression du papier

5.1.1. - Comparaison des essais de laboratoire et des essais de calandrage

L'objectif des chapitres 2 et 3 était de caractériser le comportement mécanique des papiers lors de leur passage dans un nip de calandre. Pour cela, deux essais de laboratoire ont été développés :

- Un essai de chute de bille qui permet de solliciter le papier en compression à des temps courts et à grande vitesse,
- Un essai de compression quasi-statique qui sollicite le papier à une échelle de temps beaucoup plus longue.

En s'appuyant sur le modèle de fondation ([Johnson, 1985]), une analyse mécanique des essais a permis d'identifier des grandeurs intrinsèques au papier, telles qu'une contrainte d'écoulement et un module d'élasticité. La déformation du papier a été déterminée, soit sous la forme d'une déformation totale (essai dynamique), soit sous la forme de deux composantes : une déformation plastique et une déformation élastique (essai quasi-statique). La déformation plastique caractérise la densification irréversible du papier et la déformation élastique correspond à la composante réversible (très probablement viscoélastique en fait) après la charge. Les grandeurs mécaniques étant fonction de la déformation du papier, les différents résultats obtenus ont été présentés par des courbes contrainte / déformation ou module / déformation.

Parallèlement à ces essais de laboratoire, des essais sur une soft-calandre pilote ont été réalisés afin de caractériser le comportement mécanique du papier dans le nip dans des conditions quasi-industrielles. La contrainte a été identifiée à partir de la force linéique et de la largeur du nip en condition statique pour chaque papier étudié. La déformation a été déterminée à partir de deux méthodes :

- Un micromètre mesurant les épaisseurs des papiers avant et après calandrage. La « vraie » déformation plastique a alors été obtenue,
- Un système optique permettant de mesurer l'épaisseur du papier avant, dans et après le nip. La déformation totale et les déformations « plastiques » et « élastiques » apparentes (à un temps très court après la décharge) sont alors déterminées.

Les informations obtenues par les deux méthodes sont donc complémentaires. Les résultats ont également été présentés sous la forme de courbe contrainte / déformation.

Différents papiers ont été testés, que ce soit avec les essais de laboratoire, les essais sur la calandre pilote ou les deux. Plusieurs paramètres ont montré une influence sur le comportement mécanique :

- La formulation du papier (type de pâte, teneur en charge, couche, état de densification du papier)
- Le conditionnement du papier (température et humidité du papier),
- Les paramètres de calandrage (température du rouleau métallique, vitesse de calandrage).

L'influence du temps de sollicitation a été mis en évidence : plus le papier est sollicité rapidement, plus il est difficile de le déformer. Ceci a été observé à plusieurs niveaux :

- Au niveau de la comparaison entre les essais dynamiques et les essais quasi-statiques sur une feuille : les essais de chute de bille sur une feuille de papier ont un temps de contact d'environ 0,1 ms, alors que le papier est comprimé pendant 30 s lors des essais quasi-statiques.
- Au niveau des essais de chute de bille sur plusieurs feuilles de papiers superposées : le temps de contact est d'environ 0,3 ms pour 3 feuilles, alors qu'il est de 0,1 ms pour une feuille.
- Au niveau des essais de calandrage avec le rouleau ayant les formes géométriques : les vitesses de calandrage ont varié entre 200, 400 et 600 tr/min ce qui correspond à des temps de contact compris respectivement entre 2,3 et 2,9 ms ; 1,2 et 1,4 ms ; 0,8 et 1 ms pour le papier pré-couché. Pour chaque vitesse de calandrage, une fourchette de temps de contact est donnée, car pour ces essais, la vitesse de calandrage n'a pas été ajustée en fonction de la largeur de nip qui augmente avec la force linéique.

Nous pouvons noter que les essais de chute de bille ont un temps de contact compris entre 0,1 et 0,3 ms (suivant le nombre de feuilles), alors que les temps de contact lors des essais de calandrage se situent entre 0,63 et 1,5 ms (sans considérer les essais réalisés avec le rouleau ayant les formes géométriques). Tous les temps de contact des essais de chute de bille et de calandrage sont présentés dans l'annexe n°8. Des essais de calandrage à plus grande vitesse sont possibles sur la calandre pilote, mais cela n'a pas été réalisé lors des différentes campagnes. En comparaison, une calandre industrielle ayant une vitesse de 1800 m/min et une largeur de nip d'environ 10 mm, impose un temps de contact de l'ordre de 0,3 ms. Ainsi, au niveau du temps de contact, l'essai de chute de bille permet donc de déterminer le comportement mécanique du papier à des vitesses de sollicitation proche des calandres industrielles.

D'un point de vue qualitatif, les comportements mis en évidence par les essais de laboratoire et les essais sur la calandre pilote sont similaires (l'influence du type de pâte ou de la couche par exemple). Par contre, d'un point de vue quantitatif, les résultats ne sont pas concordants. La Figure 5. 1 et la Figure 5. 2 présentent pour le papier pré-couché et le papier couché F (Tableau 2.6) les courbes de contrainte / déformation totale obtenues à partir des deux essais de laboratoire et des essais de calandrage en utilisant la méthode optique pour mesurer la déformation du papier dans le nip. Nous constatons pour les deux papiers, que la courbe contrainte / déformation totale obtenue à partir des essais de

calandrage présente une déformation plus importante que celle déterminée à partir des essais de laboratoire, à contrainte donnée.

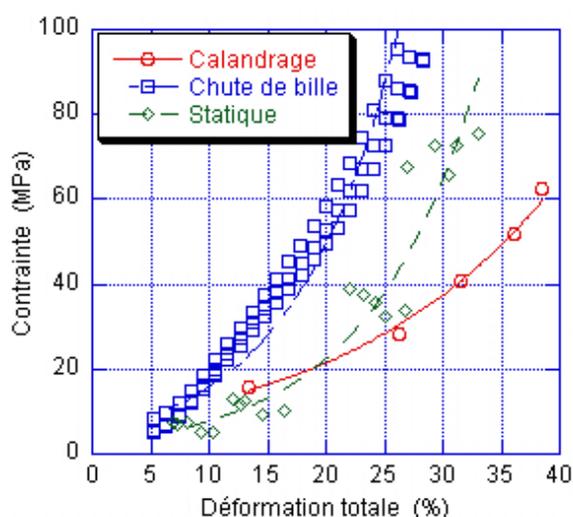


Figure 5. 1 : Comparaison des courbes contrainte / déformation totale obtenues à partir des deux essais de laboratoire et des essais de calandrage (méthode optique) pour le papier Pré-couché (Tableau 2.6)

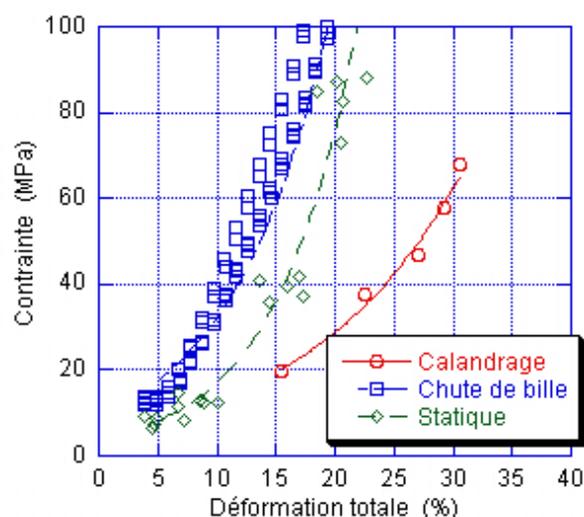


Figure 5. 2 : Comparaison des courbes contrainte / déformation totale obtenues à partir des deux essais de laboratoire et des essais de calandrage (méthode optique) pour le papier couché F (Tableau 2.6)

La Figure 5. 3 et la Figure 5. 4 présentent pour les deux papiers également, les courbes de contrainte / déformation plastique obtenues à partir de l'essai de compression quasi-statique et des essais de calandrage en utilisant la méthode du micromètre pour mesurer la déformation plastique du papier après calandrage. Nous notons par contre, que, de manière plus satisfaisante, les courbes contrainte / déformation plastique déduites du calandrage se situent au dessus de celles relatives au essais quasi-statique.

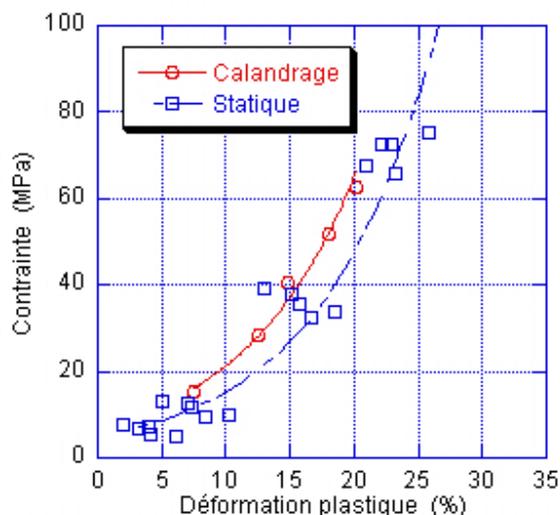


Figure 5. 3 : Comparaison des courbes contrainte / déformation plastique obtenues à partir de l'essai de compression quasi-statique et des essais de calandrage (méthode micromètre) pour le papier Pré-couché (Tableau 2.6)

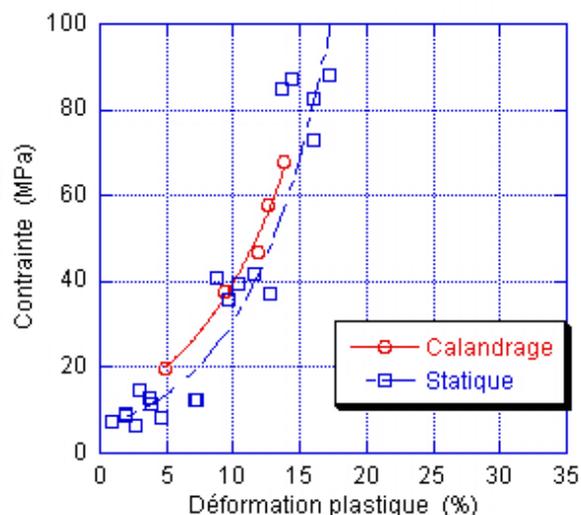


Figure 5. 4 : Comparaison des courbes contrainte / déformation plastique obtenues à partir de l'essai de compression quasi-statique et des essais de calandrage (méthode micromètre) pour le papier couché F (Tableau 2.6)

Les résultats sont surprenants dans le sens où ils montrent une déformation totale du papier plus importante, à contrainte imposée, lors des essais de calandrage que lors des essais de laboratoire. Nous avons vu précédemment que le temps de contact lors de l'essai de chute de bille est plus court que celui lors des essais de calandrage. Cependant, le temps de contact lors de l'essai de compression quasi-statique est beaucoup plus long par rapport aux deux autres (chute de bille et calandrage).

La détermination de la contrainte repose sur des modèles :

- Pour les essais de laboratoire, nous utilisons le modèle de fondation ([Johnson, 1985]) qui suppose une compression uni axiale du papier sous une contrainte σ_{zz} . Cependant, la forme sphérique de l'indenteur n'engendre pas lors de l'essai, une déformation homogène sur toute la zone de contact. Des cisaillements sont présents, ce qui tend à augmenter la contrainte σ_{zz} .
- Pour les essais de calandrage, nous utilisons le modèle de Hertz en prenant en compte la largeur du nip mesurées en statique. Cependant, le comportement mécanique des papiers a été déterminée à des vitesses de rotation de 400 tr/min. Les largeurs de nip en statique sont donc certainement surestimées par rapport à leurs valeurs en dynamique ; pour les deux raisons suivantes :
 - La largeur du nip dépend de la compressibilité du papier. Or, plus le papier est sollicité rapidement, plus il est difficile de le déformer. La largeur du nip a donc tendance à diminuer lors d'essai de calandrage par rapport à un essai en statique.
 - La largeur du nip dépend de la déformation du rouleau polymère. Nous ne connaissons pas réellement le comportement mécanique du rouleau utilisé en

dynamique. Cependant, si le module d'élasticité du polymère augmente avec la fréquence de sollicitation, la largeur du nip diminue également.

Par ailleurs, le profil de pression appliquée dans le nip a été défini en première approximation comme étant hertzien, ce qui signifie un profil de pression parabolique et symétrique par rapport au centre du nip. Cette approximation semble raisonnable en statique ; elle est par contre, plus douteuse en dynamique. En effet, au fur et à mesure de l'avancement du papier dans le nip, ce dernier subit une déformation visco-élastoplastique avec un profil de pression croissant jusqu'à une valeur maximale. Après cette déformation, correspondant à la pression maximale et à l'entrefer minimal, une recouvrance viscoélastique du papier a lieu avec un profil de pression diminuant, or les mesures montrent que la recouvrance dans le nip est faible. Ainsi, la zone de contact rouleau / papier après la pression maximale est due essentiellement à la recouvrance du rouleau polymère et est plus petite qu'à l'entrée du nip. La pression maximale ne serait donc pas appliquée au centre du nip mais plus proche de la sortie. La rotation des rouleaux est donc à l'origine d'une asymétrie du profil de pression entre l'entrée et la sortie du nip.

Les ordres de grandeur des contraintes déterminées par les deux modèles sont équivalents, par contre pouvons nous réellement les comparer ? Etant donné que lors de l'analyse des essais de calandrage, nous avons certainement sur-estimé la largeur du nip (mesures en statique) et donc sous-estimé la contrainte, la Figure 5. 5 et la Figure 5. 6 correspondent aux mêmes essais que ceux de la Figure 5. 1 et la Figure 5. 2 sauf que nous avons utilisé la largeur de nip déterminée par la formule de Hertz (sans prendre en compte le papier) et la demi-largeur de nip ($l_{nip}/2$) pour calculer la contrainte. Nous constatons que ces nouvelles courbes se rapprochent de celles obtenues à partir des essais de laboratoire et pourraient représenter une borne supérieure.

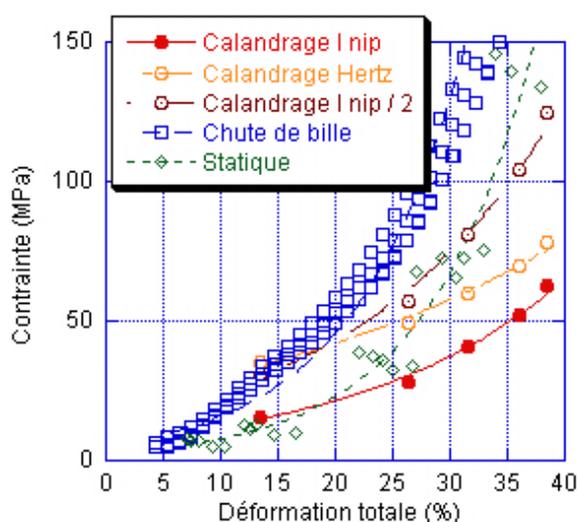


Figure 5. 5 : Comparaison essai de laboratoire / essai de calandrage – Résultats de la Figure 5. 1 avec d'autres calculs de la contrainte pour les essais de calandrage

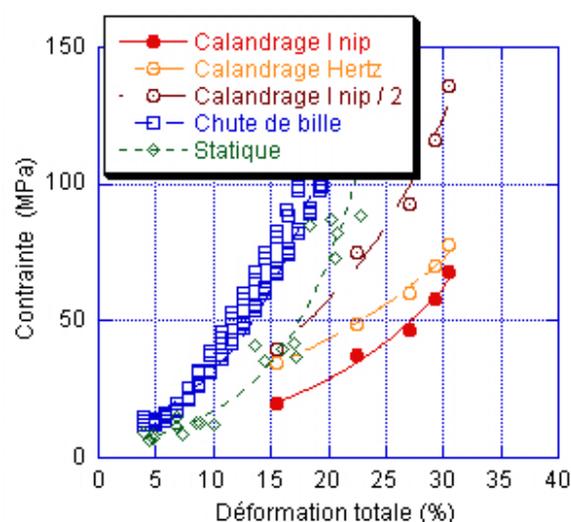


Figure 5. 6 : Comparaison essai de laboratoire / essai de calandrage – Résultats de la Figure 5. 2 avec d'autres calculs de la contrainte pour les essais de calandrage

Par ailleurs, nous pouvons rappeler que la détermination des déformations dans les essais de laboratoire est réalisée à partir du déplacement de la bille (capteur de déplacement pour l'essai de compression quasi-statique et capteur de force et analyse mécanique pour l'essai de chute de bille). L'aire de contact entre la bille et le papier est faible par rapport à celle des essais de calandrage. D'autre part, la méthode du micromètre pour mesurer la déformation plastique suite au calandrage est plus précise que la méthode optique qui mesure notamment l'épaisseur du papier dans le nip.

Enfin, deux autres paramètres pourraient intervenir : la température et l'humidité du papier. Les deux campagnes d'essais (laboratoire et calandrage) ont été réalisées en avril mais les essais de laboratoire ont été réalisés au CEMEF à Sophia-antipolis et les essais de calandrage au CTP à Grenoble. Les conditions atmosphériques (température, humidité) sont donc différentes, or nous avons vu dans la partie 3.4.1 que ces paramètres ont une forte influence sur les courbes de comportement du papier.

La Figure 5. 7 présente une comparaison entre les courbes de contrainte / déformation obtenues pour le papier pré-couché par les différentes méthodes (essais de laboratoire, calandrage) et celles déterminées à partir des données de Feygin ([Feygin, 1999]) sur un papier d'impression écriture de grammage 110 g/m² (cf figure 2.3). Les résultats montrent une déformation plus importante du papier utilisé par Feygin ([*ibid.*]) que celle du papier pré-couché pour une même contrainte appliquée. Ils montrent en outre, que, la vitesse aurait assez peu d'influence sur la courbe contrainte / déformation totale, ce qui est en accord avec les résultats des essais de laboratoire.

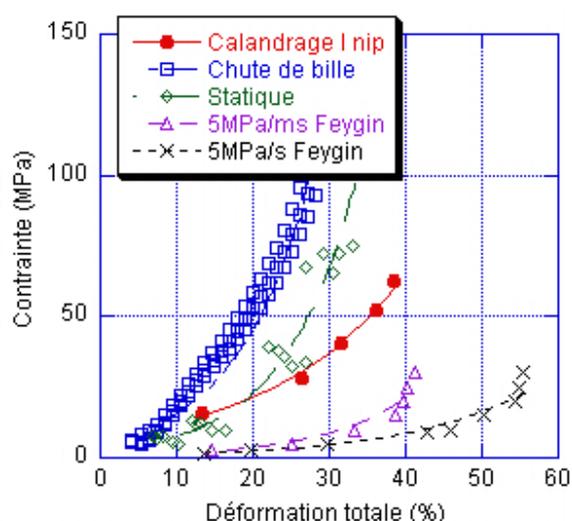


Figure 5. 7 : Comparaison entre les courbes de contrainte / déformation obtenues pour le papier pré-couché (cf Tableau 2.6) par les différentes méthodes et les courbes de contrainte / déformation obtenues à partir de la ré-interprétation des résultats de Feygin ([Feygin, 1999]) sur un papier d'impression écriture de grammage 110 g/m² (cf figure 2.3)

5.1.2. - Détermination de la largeur de nip en statique à partir des essais de compression quasi-statique

Nous proposons dans cette partie d'établir un parallélisme entre les mesures de largeur de nip en statique sur la calandre pilote et l'analyse des essais de compression quasi-statique.

Nous avons utilisé dans la partie 3.5.3.1 un ajustement proposé par Johnson ([Johnson, 1985]) (cf Equation 3.5) pour déterminer à partir du modèle de fondation et de la largeur du nip mesurée en statique, la pression maximale appliquée dans le nip. Ce choix ne s'est pas avéré très bon pour ces essais (cf Figure 3.50). Nous avons alors proposé de déterminer un module d'élasticité moyen entre les rouleaux et le papier afin d'évaluer la contrainte au niveau des formes géométriques (Equation 3.8). D'autre part, cette équation déduit la profondeur des formes géométriques à la déflexion des rouleaux.

Nous proposons ici de reprendre l'Equation 3.6 en déduisant la réduction d'épaisseur du papier à la déflexion des rouleaux :

$$p_{\max} = 1,18 \frac{E_{\text{eq}}}{\frac{l_{\text{nip}}}{2}} \left[\frac{\left(\frac{l_{\text{nip}}}{2}\right)^2}{2R_{\text{eq}}} - e\varepsilon \right] \quad \text{Équation 5. 1}$$

L'Équation 5. 1 est alors une équation du second degré de la demi-largeur du nip pouvant être écrite de la manière suivante :

$$\left(\frac{l_{\text{nip}}}{2}\right)^2 - 2R_{\text{eq}} \frac{p_{\max}}{1,18E_{\text{eq}}} \frac{l_{\text{nip}}}{2} - 2R_{\text{eq}} e\varepsilon = 0 \quad \text{Équation 5. 2}$$

Le rayon équivalent R_{eq} et le module équivalent E_{eq} entre les deux rouleaux sont respectivement d'environ 45 mm et 3,4 GPa (cf partie 3.5.3.1). En prenant les courbes de contrainte / déformation obtenues à partir des essais de compression quasi-statique, l'Équation 5. 2 permet de déterminer la largeur du nip. Dans le chapitre 2, les résultats des essais de compression quasi-statique sont présentés sous la forme de courbes contrainte / déformation plastique. Etant donné que nous avons besoin de la déformation totale dans l'Équation 5. 2, nous utilisons la Figure 5. 8 qui présente les courbes contrainte / déformation totale obtenues pour le papier TMP, le papier Kraft, le papier pré-couché et le papier F en compression quasi-statique.

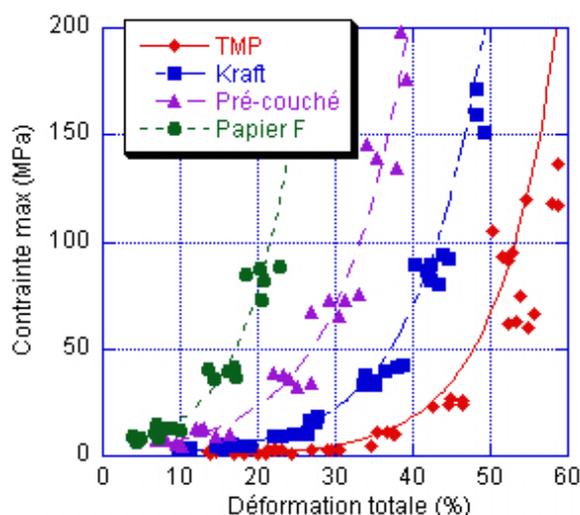


Figure 5. 8 : Courbes de contrainte / déformation totale obtenues à partir des essais de compression quasi-statique pour différents papiers

Connaissant la largeur de nip à partir de la résolution de l'Équation 5. 2, nous pouvons déterminer la force linéique pour une contrainte maximale donnée à partir de l'Equation 1.2.

Le Tableau 5. 1 présente une application numérique de la méthode proposée pour déterminer la largeur de nip. Nous avons pour cela, utilisé les résultats de compression quasi-statique en prenant la déformation totale des papiers à une contrainte maximale de 50 MPa. Les valeurs obtenues sont très proches des valeurs mesurées, et le modèle rend bien compte des différences de largeurs de nip observées. Le comportement mécanique des papiers déterminé à partir des essais de compression quasi-statique et le modèle proposé permettent donc d'évaluer la largeur du nip en statique par une autre méthode que le papier carbone.

Papier	Déformation totale à 50 MPa obtenue en compression quasi-statique (%)	Epaisseur initiale du papier (mm)	L_{nip} calculée à partir de l'Équation 5. 2 (mm)	Force linéique déterminée à partir de L_{nip} calculée (kN/m)	L_{nip} mesurée en statique à la force linéique calculée (mm) (cf Figure 3.20)
TMP	48	163	6,5	257	6,8
Kraft	37	126	5,4	211	5,8
Pré-couché	27	120	4,7	185	4,8
Papier F	17	106	3,9	153	4,0

Tableau 5. 1 : Détermination de la largeur de nip à partir de l'Équation 5. 2 et des résultats des essais de compression quasi-statique (Figure 5. 8) – Comparaison avec la largeur de nip mesurée sur la calandre pilote en statique

5.1.3. - Comportement mécanique des papiers couchés

Les résultats des essais de laboratoire ou de calandrage concernant les papiers couchés montrent que la couche confère au papier une rigidité plus importante et qu'il est plus difficile de déformer la structure « papier + couche » que le papier seul. Par contre, la composition de la couche (nature, quantité de latex) et le poids de couche ne semblent pas influencer réellement le comportement mécanique du papier. Le procédé de couchage apparaissait le plus influent. Nous avons comparé les papiers C et F qui ont le même poids de couche :

- Pour le papier F, la sauce est déposée en excès par un jet, puis le surplus est enlevé par une lame lissante. La couche a été obtenue en deux déposes (13 puis 12 g/m²/face).
- Pour le papier C, la sauce est déposée par un rouleau applicateur puis la quantité déposée est ajustée par une lame raclante. La dépose a été réalisée en une seule fois (25 g/m²/face).

Lors de l'opération de couchage, la lame applique une pression sur le papier. Il est difficile de connaître réellement les niveaux de pression appliqués expérimentalement, mais nous pouvons penser en première approximation qu'à concentration de sauce identique, ils sont du même ordre de grandeur pour une dépose sèche donnée, quelle que soit le système de raclage utilisé (lissant ou raclant). En effet, la force appliquée sur une lame lissante doit être importante pour pouvoir la plier et la faire travailler à plat, mais en contre partie, l'aire de contact est importante. La lame raclante travaille sur le biseau de la lame, l'aire de contact est donc faible. La gamme préférentielle d'utilisation d'une lame lissante avec une formulation pour impression – écriture (concentration allant de 65 à 71,5%) est de 12 à 20 g/m², tandis que la gamme préférentielle d'utilisation d'une lame raclante est de 7 à 15 g/m² avec une concentration de sauce allant de 55 à 68%. Une dépose de 25 g/m² en lame raclante se situe donc en dehors de la gamme conventionnelle d'utilisation. Par ailleurs, la concentration en pigment de la sauce a un écart absolu de 3% ce qui peut entraîner une différence dans la structure de la couche. Une autre différence entre les deux papiers est que la dépose sur le papier C a été réalisée en un seul passage alors que celle sur le papier F en deux fois. Ainsi, sachant que dès qu'une contrainte est appliquée sur le papier, ce dernier se déforme plastiquement, nous pouvons penser que la différence d'épaisseur entre les deux papiers avant calandrage (8 µm) pourrait, peut être, s'expliquer par le nombre de passage au niveau de poste de lame et par une pression plus importante appliquée sur le papier lors d'une dépose de 12 g/m² que lors d'une dépose de 25 g/m². A partir de cette hypothèse, le matelas fibreux du papier F serait donc plus comprimé que celui du papier C. En s'appuyant sur les résultats des essais de laboratoire concernant l'influence de la densité initiale du papier (cf partie 2.5.3), ce raisonnement permettrait d'expliquer les courbes contrainte / déformation obtenues à partir des essais de laboratoire ou de calandrage : la déformation du papier F plus dense, est plus faible que celle du papier C pour une même contrainte. La déformation d'un papier couché serait alors définie en premier lieu par la compressibilité du matelas fibreux. La couche n'interviendrait peut être qu'à des niveaux de contrainte et de déformation plus importants, une fois que le matelas fibreux serait complètement écrasé.

Cette hypothèse mérite d'être confirmée ; une étude bibliographique plus poussée permettrait peut être de trouver des ordres de grandeur de pression appliquée par la lame sur le papier. D'autre part, une étude plus exhaustive pourrait également être envisagée pour comparer séparément les influences respectives de la concentration de la sauce, du système de dépose, du procédé de raclage et de la double dépose sur la déformation du matelas fibreux lors du couchage. Une autre méthode permettant de vérifier cette hypothèse serait de mesurer l'épaisseur du matelas fibreux. Pour cela, des analyses au MEB de la coupe des papiers C et F avant calandrage ont été réalisées (Figure 5. 9, Figure 5. 10). Cependant, les images obtenues ne permettent pas de mettre en évidence une différence d'épaisseur du matelas fibreux entre les papiers C et F.

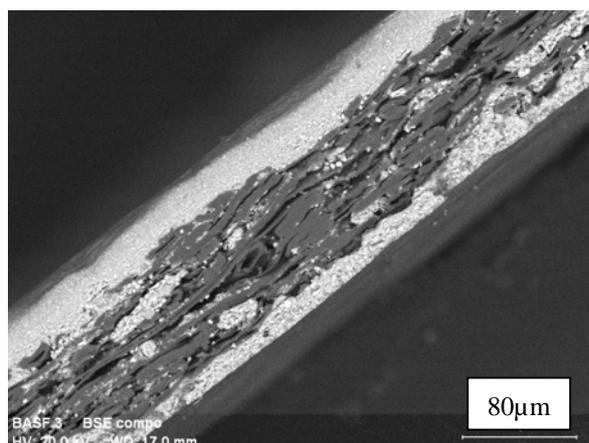


Figure 5. 9 : Observation au MEB de la coupe du papier C – Rouleau applicateur + lame raclante

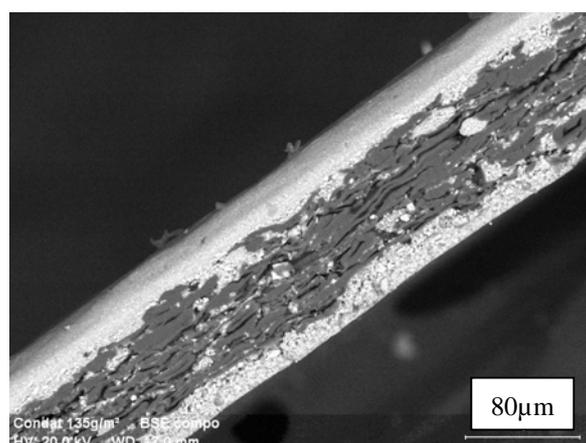


Figure 5. 10 : Observation au MEB de la coupe du papier F – Jet (jet flow) + lame lissante

D'autres essais de laboratoire ont été réalisés sur deux autres papiers couchés et leur papier support. La nature de la sauce déposée sur les papiers est identique, par contre, les poids de couche diffèrent. Les papiers ont été couchés sur les deux faces par un système de lame réservoir. Le Tableau 5. 2 présente les caractéristiques des trois papiers. Le papier support H et le papier couché I ont déjà été présentés dans la partie 4.1.1.1 concernant les essais de roulement sur le plan incliné.

Papier	Papier support H	Papier I	Papier J
Epaisseur (μm)	127	126	127
Grammage (g/m^2)	77	95	100
Poids de couche ($\text{g}/\text{m}^2/\text{face}$)	0	18,5	23,5
Masse volumique ρ_0 (kg/m^3)	606	751	788

Tableau 5. 2 : Caractéristiques des papiers couchés et de leur papier support – Lame réservoir

Nous pouvons remarquer que bien que le poids de couche augmente, l'épaisseur des papiers reste identique, ce qui n'était pas l'objectif recherché. Leur masse volumique

augmente donc également. La Figure 5. 11 présente des observations au MEB de la surface et de la coupe des différents papiers. Les images montrent que plus le poids de couche augmente, plus la surface des papiers est recouverte par la couche. Cependant, des fibres sont encore visibles même avec un poids de couche de 23,5 g/m²/face, ce qui semble tout à fait anormal. Le papier support était donc certainement, inadapté au couchage. Par ailleurs, les coupes des papiers montrent, que, si l'épaisseur des papiers est identique, par contre l'épaisseur du matelas fibreux diminue avec l'augmentation du poids de couche. D'autre part, nous constatons que les zones noires dans le sens de l'épaisseur, correspondant à des vides, diminuent quand le poids de couche augmente. Nous pouvons donc penser que la couche a pénétré dans le matelas fibreux et que, la pression appliquée par la lame sur le papier a certainement écrasé le matelas fibreux.

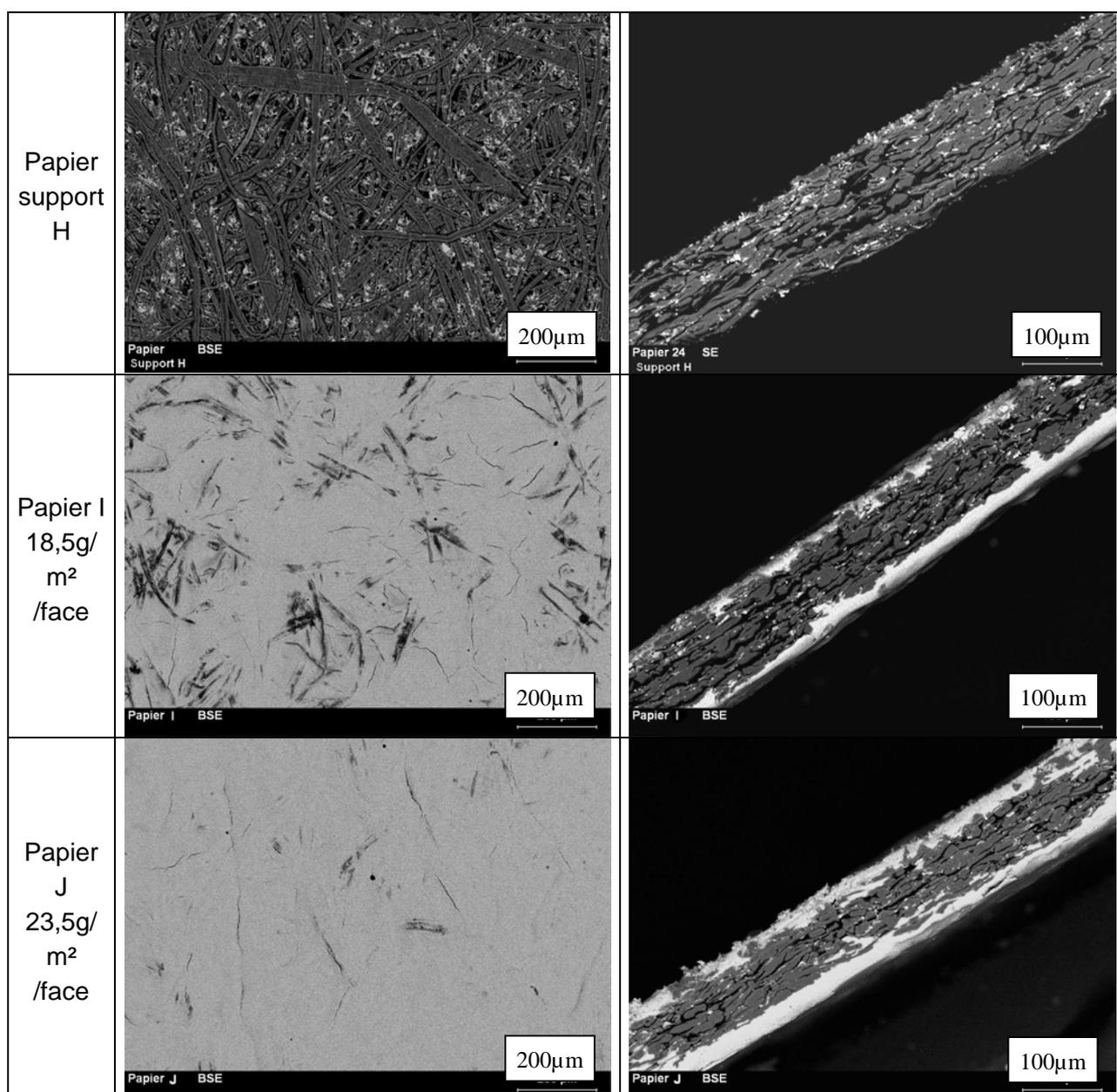


Figure 5. 11 : Observation au MEB de la surface et de la coupe des papiers couchés I et J et de leur papier support H – Lame réservoir

La Figure 5. 12 et la Figure 5. 13 présentent les résultats des essais de compression quasi-statique sur les papiers H, I et J et la Figure 5. 14, ceux des essais de chute de bille. Ils montrent que le papier J (23,5 g/m²/face) est plus difficile à déformer que le papier I (18,5 g/m²/face) et que le papier support H. Les observations au MEB (Figure 5. 11) ont montré que le matelas fibreux avait été comprimé lors de l'opération de couchage. Ainsi, si nous faisons l'hypothèse que la déformation des papiers couchés est définie par le matelas fibreux, il est normal que la déformation du papier J soit plus faible étant donné que le matelas fibreux est moins épais et plus dense. Tous les résultats concernant les papiers couchés correspondent donc au même type de comportement : le matelas fibreux subit en premier la déformation puis à des contraintes plus importantes, la couche pourrait intervenir dans le comportement mécanique du papier.

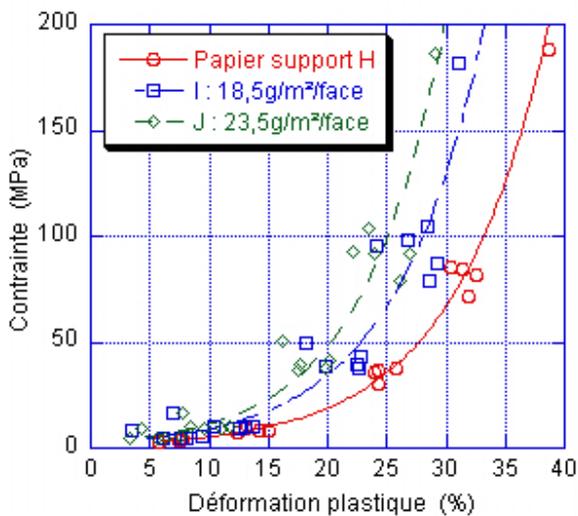


Figure 5. 12 : Essai de compression quasi-statique sur une feuille (M10) – Influence de la couche sur la contrainte

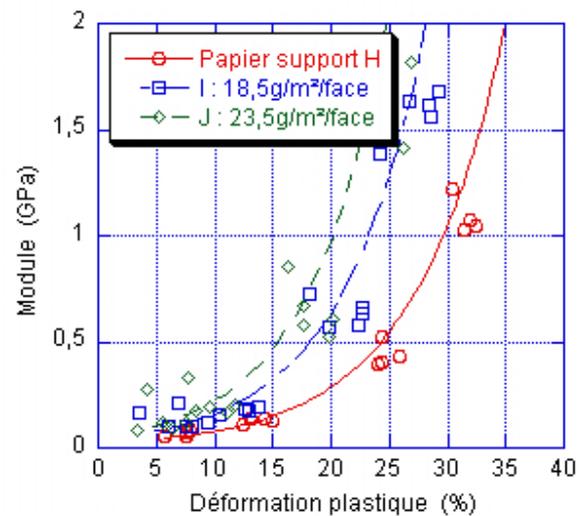


Figure 5. 13 : Essai de compression quasi-statique sur une feuille (M10) – Influence de la couche sur le module

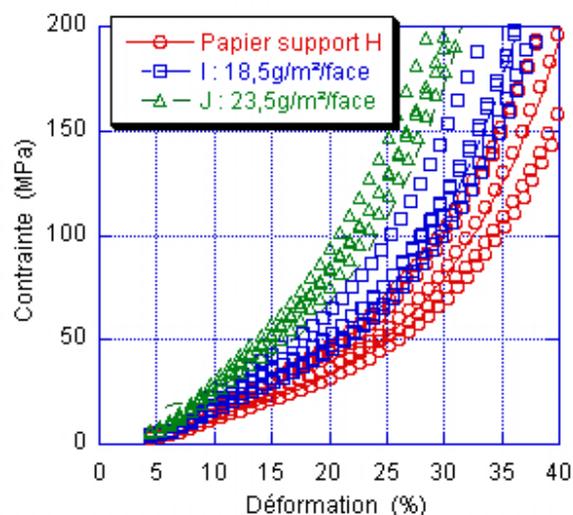


Figure 5. 14 : Essai de chute de bille sur une feuille (H1=10 cm M6 mm) – Influence de la couche sur la contrainte

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

La quatrième partie de la thèse a porté sur le contact entre le papier et le rouleau et plus particulièrement sur les interactions de surface. Nous nous sommes focalisés sur trois études :

- **L'adhésion entre le rouleau et la surface du papier** : Deux types d'essai ont été réalisés pour étudier cette problématique et notamment le développement des dépôts de type collant :
 - Un essai de roulement sur un plan incliné a été développé au laboratoire, pour caractériser les interactions de surface entre un cylindre et un papier, par un coefficient de frottement.
 - Des essais de calandrage dans des conditions extrêmes (température du rouleau très élevée, humidification du papier avant calandrage...) afin de générer et de quantifier des dépôts sur les rouleaux.

Les résultats de cette étude ont montré qu'il s'agissait d'un problème de surface ou au maximum de l'épaisseur de la couche. Des essais de laboratoire et des essais de calandrage ont été effectués sur un même panel de papiers. Concernant ces papiers, aucune différence du coefficient de frottement n'a été mise en évidence et aucun dépôt n'a été généré sur les rouleaux de la calandre. Par ailleurs, l'augmentation de la température du cylindre dans l'essai de roulement a montré une augmentation du coefficient de frottement qui pourrait caractériser une adhésion plus importante entre la surface du papier et le cylindre.

- **L'amélioration de l'état de surface du papier suite au calandrage** : Cette partie a porté sur l'optimisation des conditions de calandrage afin de mettre en relation des caractéristiques de surface (lissé, brillant) et des caractéristiques de volume (épaisseur). Nous avons montré que :
 - Le développement du brillant est lié à des phénomènes de déformation du papier au voisinage de la surface. La température du rouleau s'avère donc être un paramètre de premier ordre.
 - Le développement du lissé est lié à des phénomènes de déformation du papier au voisinage de la surface mais également dans son toute son épaisseur. En effet, l'augmentation du nombre de nips ou de la force linéique entraîne une compression du papier et continue d'améliorer le lissé même après la déformation plastique maximale. L'augmentation de la température du rouleau métallique permet également d'améliorer le lissé, mais à un second ordre par rapport à la force linéique.
 - Une augmentation conjointe de la température du rouleau métallique et de la force linéique engendre un lissé et un brillant du papier équivalents à ceux obtenus avec un nombre de nip important (supercalandre).
- **Le transfert de l'état de surface du rouleau au papier** : Cette partie a traité de l'influence de la rugosité du rouleau métallique sur la qualité de surface du papier. Un rouleau avec trois rugosités différentes a été utilisé dans cette étude. Les points suivants ont été mis en évidence :

- L'état de surface du rouleau se transfère sur le papier à une échelle locale (inférieure au millimètre). Ce résultat montre comme ceux obtenus avec le rouleau ayant des formes géométriques, qu'il n'y a pas de glissement dans le nip.
- L'état de surface du rouleau a une influence évidente sur le brillant des papiers. Une augmentation de la rugosité du rouleau de 0,1 à 0,4 μm entraîne une diminution du brillant comprise entre 15 et 25% suivant les conditions de calandrage.
- Comme pour le développement du brillant, l'augmentation de la température du rouleau favorise le transfert de l'état de surface.
- L'état de densification initial du papier (essais avec différents pré-calandrages) a peu d'effet sur le transfert de rugosité.

En conclusion, cette partie de la thèse, consacrée au contact entre le rouleau et le papier, a fait le lien entre des caractéristiques de surface et celles de volume. Citons juste un exemple pour fixer cette réflexion : L'obtention d'un lissé important nécessite des modifications topographiques importantes de la surface mais s'accompagne inévitablement d'une compression importante du papier.

La seconde réflexion est que l'amélioration des caractéristiques de surface (brillant, lissé, transfert de la rugosité du rouleau au papier) nécessite des modifications de la géométrie de la surface du papier. Ainsi, tous les phénomènes qui permettent de déformer plus facilement le papier au voisinage de la surface favorisent ces caractéristiques. Nous pouvons citer l'augmentation de la température du rouleau métallique, la réduction de la vitesse de calandrage, l'élargissement du nip avec un rouleau polymère de plus faible dureté. La force linéique ne peut être citée dans les paramètres précédents car, bien que l'augmentation de la force linéique permette d'améliorer la surface, la première conséquence de ce paramètre est la réduction d'épaisseur et donc la compression du papier. La température et l'humidité au cœur du papier ou l'augmentation du nombre de nips entraînent également en premier une compression du papier.

Enfin, dans les essais de calandrage ayant pour but de générer des dépôts sur les rouleaux, une ré-humidification de la surface du papier a été réalisée par un spray formé de micro-gouttelettes d'eau. Des investigations plus poussées sur la modification de l'humidité et de la température de la surface du papier, juste avant son entrée dans le nip, permettraient certainement d'améliorer les propriétés de surface, tout en conservant une épaisseur du papier plus importante.