
Etude du comportement mécanique des papiers en compression à partir d'essais de calandrage

3. - Etude du comportement mécanique des papiers en compression à partir d'essais de calandrage	97
3.1. - Descriptif de la calandre pilote du CTP	97
3.1.1. - Les rouleaux et les nips de la calandre	98
3.1.2. - Calandrage de bobines ou de feuilles de papier	98
3.2. - Mesure de l'épaisseur et des déformations des papiers calandrés	100
3.2.1. - Méthode à partir d'un micromètre	101
3.2.2. - Méthode à partir d'un système optique	103
3.2.3. - Comparaison des mesures d'épaisseur obtenues par les deux méthodes....	107
3.3. - Détermination de la contrainte appliquée dans le nip lors du calandrage.....	110
3.4. - Influence de différents paramètres sur le comportement mécanique du papier	111
3.4.1. - Influence du conditionnement du papier	111
3.4.2. - Influence de la température du rouleau.....	114
3.4.3. - Influence de la nature de la pâte	115
3.4.4. - Influence de la couche	117
3.4.4.1. - Influence du procédé de couchage et de la concentration en pigments.	117
3.4.4.2. - Influence du poids de couche	118
3.4.4.3. - Influence du liant	120
3.4.5. - Conclusions sur l'influence des différents paramètres sur le comportement mécanique du papier	121
3.5. - Transfert des écarts de forme du rouleau au papier	122
3.5.1. - Présentation du rouleau et des conditions d'essai	122
3.5.2. - Analyse topographique du transfert de forme sur le papier	123
3.5.2.1. - Empreinte carbone en dynamique.....	123
3.5.2.2. - Profil de rugosité (Perthemeter)	124
3.5.2.3. - Topographie de la surface (Topo3D).....	125
3.5.2.4. - Mesure de l'épaisseur du papier au micromètre	128
3.5.3. - Application à l'étude du comportement mécanique du papier.....	129
3.5.3.1. - Détermination de la contrainte au niveau des formes géométriques	129
3.5.3.2. - Influence de la vitesse de calandrage	132
3.5.3.3. - Influence du papier	134
3.5.4. - Conclusion	135

3. - Etude du comportement mécanique des papiers en compression à partir d'essais de calandrage

L'utilisation de calandres industrielles engendre des coûts dissuasifs pour les travaux de recherche. Des essais ont donc été effectués sur une calandre pilote afin d'étudier la compression du papier. Il s'agit donc d'une autre méthode de caractérisation du comportement mécanique des papiers par rapport aux essais de laboratoire présentés dans le chapitre 2. Après une brève description de la calandre pilote, nous présentons le protocole mis au point pour mesurer la déformation du papier dans un nip de calandre. Nous appliquons ensuite la méthode à différents papiers et nous effectuons enfin une étude du transfert des écarts de forme du rouleau au papier.

3.1. - Descriptif de la calandre pilote du CTP

La calandre pilote permet de calandrer des papiers dans des conditions analogues aux conditions industrielles :

- La force linéique maximale est 550 kN/m. Selon l'équation de Hertz (Equation 1.1), la largeur de nip dépend des rayons et des modules d'élasticité des rouleaux. A titre d'exemple, une largeur de nip de 5 mm donne une pression maximale de 140 MPa et une pression moyenne de 110 MPa (Equation 1.2).
- La température maximale de surface des rouleaux chauffants est de 270°C.
- La vitesse linéaire maximale est de 800 m/min. Comme le diamètre des rouleaux (17 cm) est plus faible que celui des rouleaux d'une calandre industrielle (environ 75 cm), cette vitesse linéaire maximale équivaut à 1600 m/min pour une calandre industrielle ([CTP, 2004]). Par ailleurs, la régulation de la vitesse se fait par le rouleau supérieur qui entraîne le papier et les rouleaux inférieurs. Ainsi, nous parlerons dans la suite du manuscrit de la vitesse de rotation du rouleau en tr/min.

Des bobines ou des feuilles de papiers peuvent être calandrées sur le pilote. La Figure 3. 1 présente une vue générale de la calandre pilote avec le système d'insertion de feuille.



Figure 3. 1 : Vue générale de la calandre pilote avec l'insertion de feuille

3.1.1. - Les rouleaux et les nips de la calandre

La calandre pilote est constituée de trois rouleaux, formant ainsi deux nips (Figure 3. 2). Les papiers peuvent alors être calandrés soit dans un nip, soit dans les deux, à peu de temps d'intervalle. Par exemple, pour une vitesse de rotation du rouleau de 400 tr/min, le temps écoulé entre le premier et le second nip est d'environ 0,12 s. Les rouleaux supérieur et inférieur sont métalliques. Ils sont chauffés par une résistance électrique au centre. Le rouleau intermédiaire peut être soit métallique formant ainsi un hard nip, soit en polymère formant ainsi un soft nip. Différentes duretés et natures du rouleau polymère sont disponibles : 93 et 91 ShD (composite à base de polyuréthane) et 78 ShD (élastomère). La laize utile des rouleaux est de 80 mm. Ainsi, des papiers de laize 75 mm sont généralement calandrés sur le pilote.

La force est appliquée sur les rouleaux par un vérin hydraulique situé au pied de la calandre. Un vérin pneumatique est également utilisé pour mettre en contact le rouleau intermédiaire et le rouleau supérieur. Ainsi, le poids du rouleau intermédiaire est compensé par la pression d'air et la force appliquée sur le rouleau inférieur engendre une pression équivalente dans les deux nips.

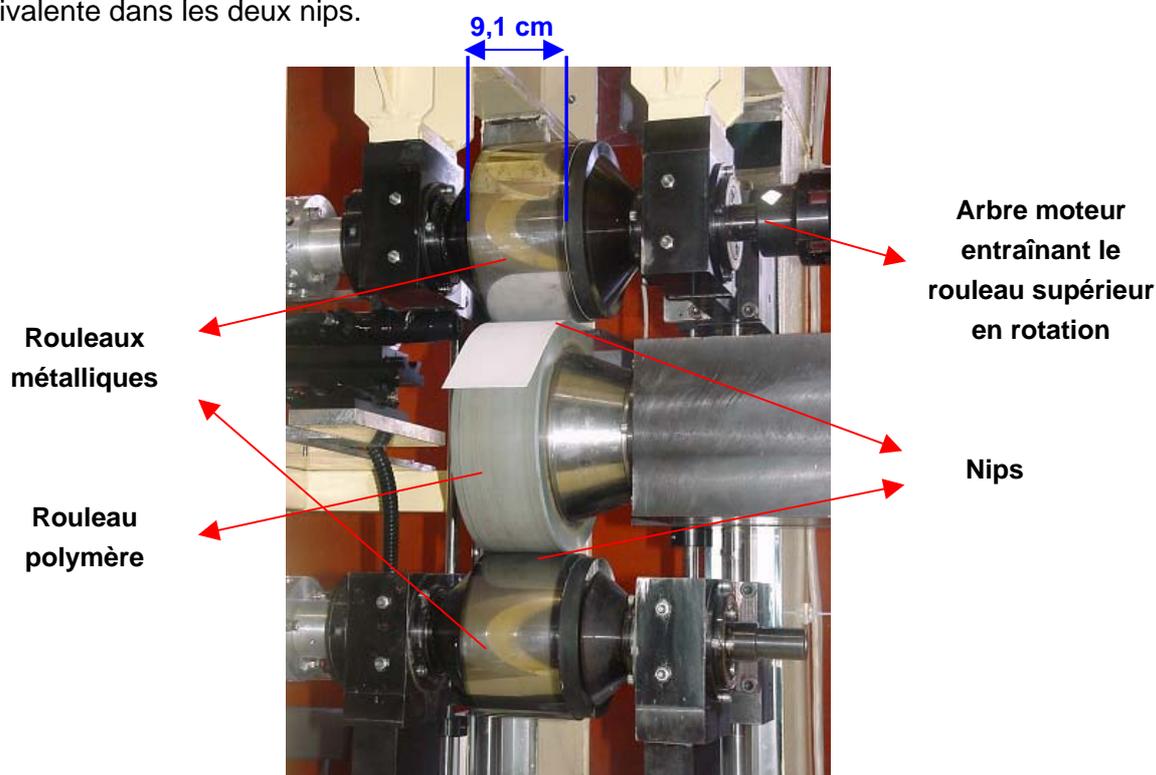


Figure 3. 2 : Vue des trois rouleaux de la calandre pilote formant deux « soft » nips en mode feuille à feuille

3.1.2. - Calandrage de bobines ou de feuilles de papier

Le calandrage en mode feuille à feuille permet de calandrer des papiers d'environ un mètre de long. Un système de préchauffage par une résistance électrique permet d'augmenter la température de la feuille jusqu'à 90°C (Figure 3. 3). La feuille est ensuite introduite automatiquement dans le nip et un système de racle permet de récupérer l'échantillon. L'humidité des papiers peut également être régulée en conditionnant par

avance les feuilles dans une chambre climatique. Une étude a été réalisée afin d'ajuster le temps de préchauffage à la température et l'humidité de la feuille désirée ([CTP, 2004]). Cette étude a également montré une bonne similitude des propriétés du papier (épaisseur, brillant Gardner, lissé Bekk) obtenues à partir d'une soft calandre industrielle et celles obtenues à partir de la calandre pilote.

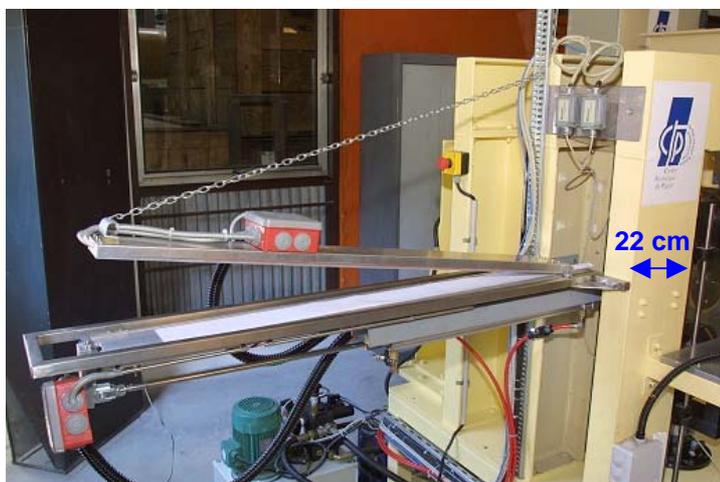


Figure 3. 3 : Vue du système de préchauffage et d'insertion automatique de feuilles

Le calandrage en mode bobine a été mis au point durant la thèse. Des bobines de papier d'un diamètre de 600 mm peuvent être calandrées, ce qui correspond approximativement à une longueur de papier de 2,7 km pour une épaisseur de 100 μm , (Figure 3. 4 et Figure 3. 5). Le montage est équipé d'un enrouleur motorisé, d'un dérouleur muni d'un frein et de deux capteurs de force (avant et après le nip) afin d'une part, d'ajuster le défilement du papier à la vitesse de rotation des rouleaux et d'autre part, d'adapter la tension de la feuille en fonction de la résistance en traction des papiers calandrés. Par ailleurs, un capteur de position et un actionneur dans le sens de la laize du papier permettent d'assurer le passage de la bande au même endroit dans le nip.

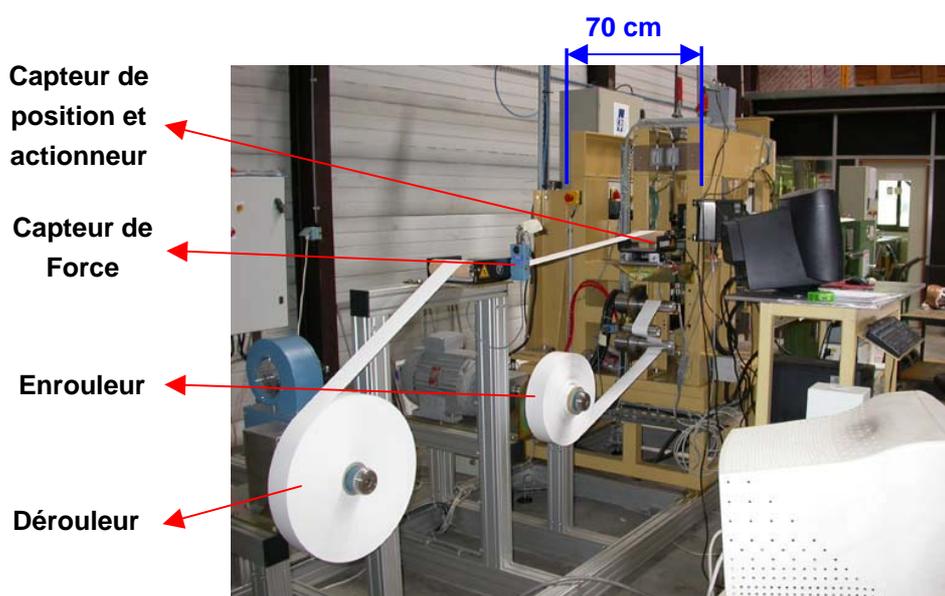


Figure 3. 4 : Vue générale du défilement de la bande de papier en mode bobine

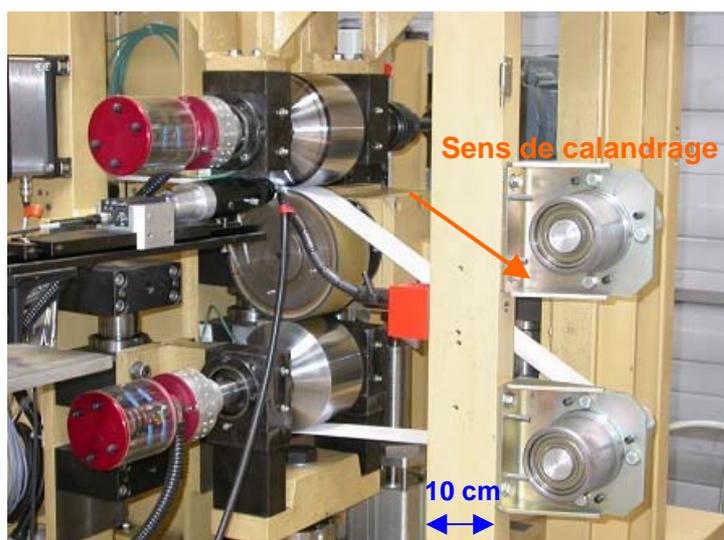


Figure 3. 5 : Vue générale des rouleaux en mode bobine et le passage d'une bande de papier dans un nip

Les bobines de papier peuvent être préchauffées avant d'être calandrées dans une étuve. Une étude sur le temps de conditionnement suivi du calandrage des bobines a montré que pour une bobine chauffée dans une étuve à 100°C pendant 4 jours, la température mesurée par infra-rouge au niveau du dérouleur était comprise entre 80 et 85°C. La mauvaise conductivité thermique du papier (entre 0,042 et 0,293 W/m.K, revue bibliographique des valeurs trouvées dans la littérature : [Guérin, 2000]) a permis de conserver l'énergie thermique de la bobine et de maintenir ainsi un écart de température inférieur à 5°C entre le début et la fin de l'essai de calandrage (Vitesse de rotation : 200 tr/min (environ 30 minutes) ; Température du rouleau métallique : 260°C). Au niveau de l'enrouleur, la température du papier était comprise entre 60 et 65°C.

Bien que cette étude mérite d'être approfondie, par exemple en fonction du type de papier (grammage, couché, non couché...) ou de la vitesse de calandrage, elle montre comme pour le calandrage en mode feuille à feuille, que la calandre pilote permet de s'approcher au plus près des conditions industrielles.

3.2. - Mesure de l'épaisseur et des déformations des papiers calandrés

L'objectif de la méthode mise au point est de mesurer la compression du papier au cours du calandrage. Pour cela, différents essais de calandrage ont été effectués dans diverses conditions expérimentales : force linéique, température du rouleau métallique, vitesse de calandrage. Afin de déterminer le comportement du papier, c'est à dire avoir des courbes de contrainte / déformation, la mesure de l'épaisseur du papier est nécessaire. Elle a donc été effectuée par deux méthodes : la première à partir d'un micromètre après calandrage et la seconde à partir d'un système optique in-situ au cours du calandrage. Les essais présentés dans la partie 3.2. - ont été réalisés en soft nip avec un rouleau intermédiaire en polymère de dureté 91ShD. Des bobines de papier ont été calandrées à température et humidité ambiantes.

3.2.1. - Méthode à partir d'un micromètre

Dans le milieu papetier, la méthode utilisée pour mesurer une épaisseur s'effectue à partir d'un micromètre. Le protocole de mesure s'est inspiré de la norme ISO534 où une pression de 100 kPa est appliquée sur une superficie du papier de 200 mm². Le temps de mesure n'est pas précisé dans la norme. Au cours de nos essais, il était d'environ 5 secondes. Les mesures d'épaisseur ont été réalisées juste après l'essai de calandrage (environ 5 minutes). Les échantillons n'ont donc pas été conditionnés dans une chambre climatique à température et humidité contrôlées.

Le parallélisme des rouleaux de la calandre est réglé avant un essai de calandrage à l'aide de papier carbone afin de s'assurer que la force linéique s'applique de manière homogène dans le nip. La réduction d'épaisseur est alors identique sur toute la laize du papier ce qui se vérifie quasiment sur la Figure 3. 6. Les mesures d'épaisseur ont été réalisées sur le papier pré-couché (cf Tableau 2.6), calandré à différentes forces linéiques (côté transmission, centre et côté conducteur – laize papier : 7,5 cm).

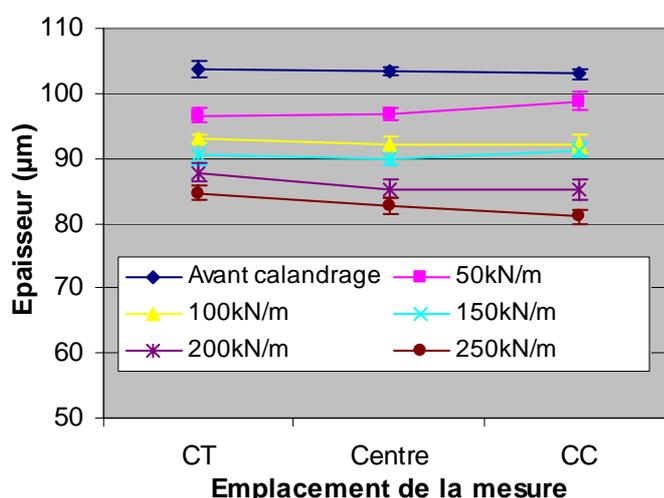


Figure 3. 6 : Mesure de l'épaisseur du papier pré-couché (cf Tableau 2.6), calandré à différentes forces linéiques – Micromètre sur toute la laize – Température du rouleau métallique : 100°C – Vitesse de rotation : 400 tr/min – Rouleau polymère de dureté 91ShD –
CT : Coté Transmission ; CC : Coté Conducteur

Nous avons choisi les épaisseurs moyennes avant et après calandrage au centre de la laize du papier pour déterminer la déformation plastique (Figure 3. 7). C'est la raison pour laquelle les courbes déformation plastique / force linéique ou dans la suite du manuscrit, les courbes contrainte / déformation ne présentent pas de barres d'incertitude. Nous avons cependant réalisé pour quelques campagnes d'essais un calcul de déformation plastique directement à partir des dix mesures d'épaisseur avant et après calandrage afin d'avoir un écart type. L'ordre de grandeur de l'incertitude du calcul de la déformation plastique est d'environ 1%.

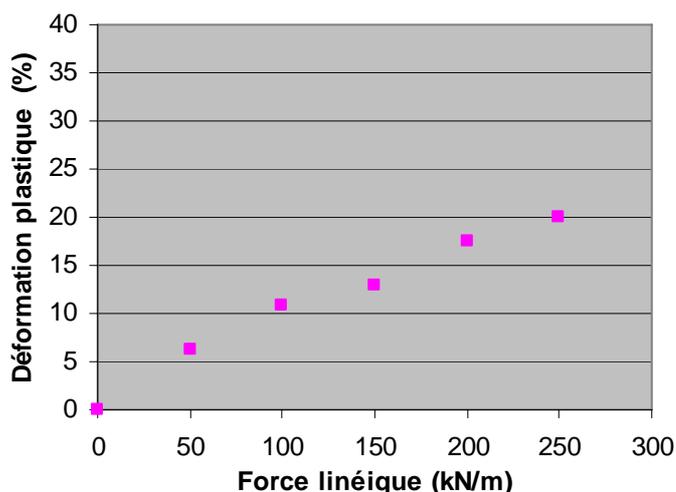


Figure 3. 7 : Déformation plastique du papier pré-couché (cf Tableau 2.6) en fonction de la force linéique à partir du micromètre – Condition de calandrage : cf Figure 3. 6

Afin de s'assurer de la reproductibilité des mesures, le papier F (cf Tableau 2.6) a été calandré dans les mêmes conditions expérimentales à plusieurs jours d'intervalle. La Figure 3. 8 donne les épaisseurs mesurées au micromètre et montre une parfaite reproductibilité des résultats pour les trois séries.

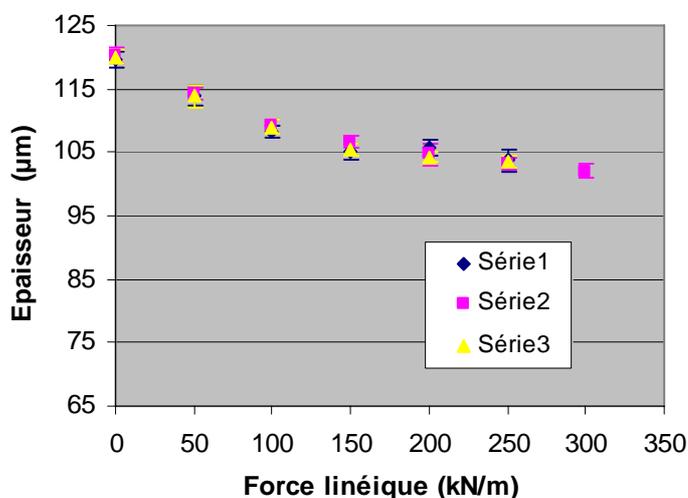


Figure 3. 8 : Reproductibilité des mesures d'épaisseur du papier F (cf Tableau 2.6) calandré à différentes forces linéiques – Micromètre – 3 séries – Température du rouleau métallique : 100°C – Vitesse de rotation : 400 tr/min

3.2.2. - Méthode à partir d'un système optique

La calandre pilote est équipée d'une caméra qui permet d'observer le défilement du papier dans le nip. Elle est située à la hauteur du nip perpendiculairement au sens de calandrage (Figure 3. 9). Les images obtenues montrent le bord du papier (coupe) comprimé entre les deux rouleaux. Il s'agit d'une caméra semi-rapide (100 images/seconde). L'éclairage de la zone filmée est produite par un flash au xénon dont le temps d'exposition est d'environ 6 μ s. Le défilement du papier est alors figé, ce qui permet d'obtenir une image nette dans le sens de calandrage. A titre d'exemple, en prenant une vitesse de rotation de 400 tr/min, le déplacement du papier pendant l'éclairage est de l'ordre de 20 μ m. Avec un grossissement de 2,5 (objectif), la taille de l'image obtenue par la caméra est de 2,6 x 0,6 mm, ce qui est largement supérieur au 20 μ m.

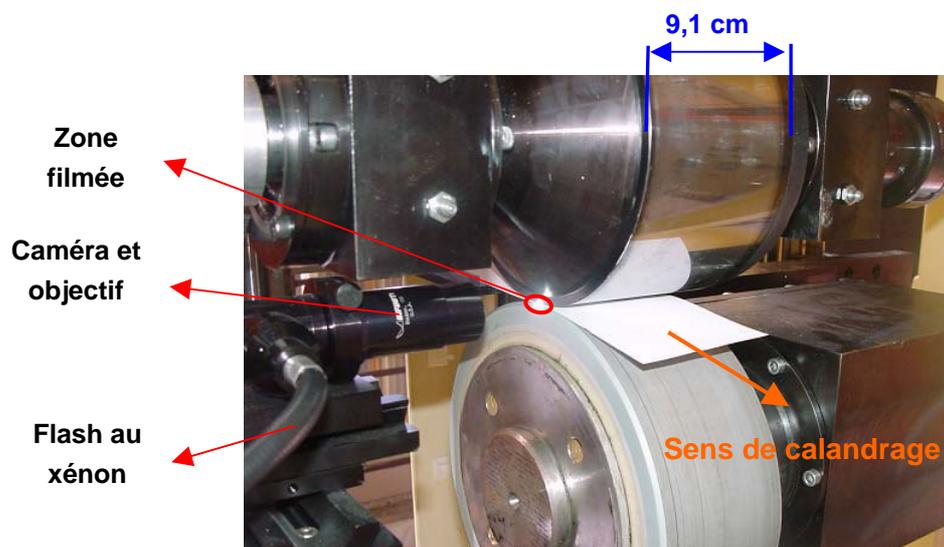


Figure 3. 9 : Système optique permettant de mesurer l'épaisseur du papier dans le nip

Les images obtenues à partir de la caméra sont en niveau de gris. La partie blanche correspond au papier et la partie noire aux rouleaux. Elles sont analysées grâce à un programme développé sous Matlab en jouant sur les niveaux de gris (Figure 3. 10). Connaissant la taille de l'image, l'épaisseur du papier peut en être déduite (Figure 3. 11).

Les premières images ont été obtenues lors d'un calandrage en mode feuille à feuille. Il était alors difficile d'ajuster la coupe de la feuille dans le plan focal du système optique. La netteté de l'image a été réglée légèrement à l'intérieur du bord des rouleaux afin d'être sûr de mesurer une épaisseur de papier dans le nip. Cependant, peu d'images étaient exploitables car les autres étaient en dehors du plan focal de la caméra (images flous). D'autre part, comme montre la Figure 3. 11, les épaisseurs des papiers devaient être importantes (entre 200 et 300 μ m).

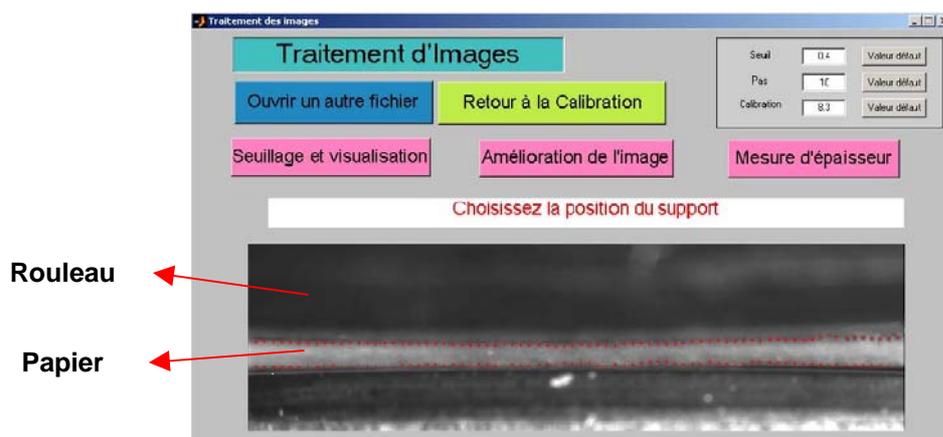


Figure 3. 10 : Interface du programme développé sous Matlab pour analyser les images et les épaisseurs de papier dans le nip

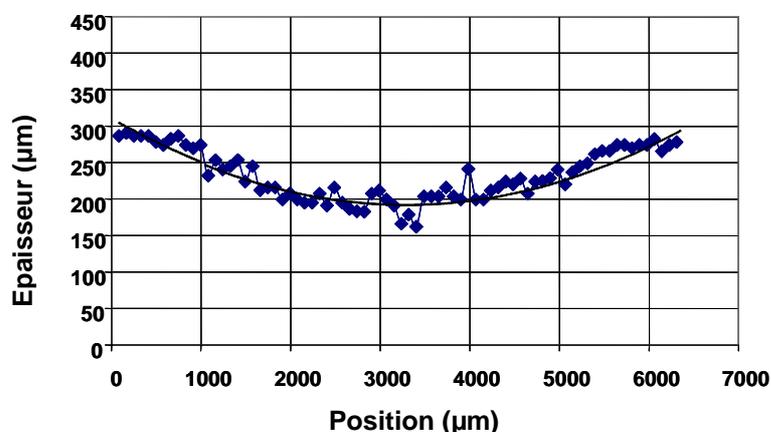


Figure 3. 11 : Profil d'épaisseur du papier au niveau du nip en mode feuille à feuille (Papier d'épaisseur initiale 300 μ m)

La modification de la calandre en mode bobine que nous avons réalisée, a facilité les réglages du système optique. Un ajustement de la netteté de l'image et de l'éclairage a pu être effectué avec la bande de papier sous tension avant le défilement du papier. Par ailleurs, l'utilisation du capteur de position et de l'actionneur permet d'assurer, dans le nip, une position quasiment constante de la bande de papier au bord des rouleaux. La meilleure netteté de l'image nous a permis d'utiliser un objectif de plus fort grossissement que celui employé lors du calandrage en mode feuille à feuille. Contrairement à la Figure 3. 11 présentant le profil d'épaisseur du papier sur toute la largeur du nip, les images obtenues, de dimension 2,6 x 0,6 mm, montrent le papier uniquement au centre du nip. L'épaisseur du papier apparaît alors constante et environ 75 mesures sont réalisées sur l'image. Par ailleurs, étant donné que la netteté d'une image dépend de la subjectivité de l'œil humain, une dizaine d'images ont été analysées pour chaque condition de calandrage. Une épaisseur moyenne a alors été estimée avec un écart type. D'autre part, le support de la caméra a été monté sur un rail parallèle au sens de calandrage afin d'obtenir des images du papier avant et après le nip. La Figure 3. 12 présente des images avant, dans et après le nip obtenues lors du calandrage du papier pré-couché (cf Tableau 2.6) en mode bobine à une vitesse de 400 tr/min.

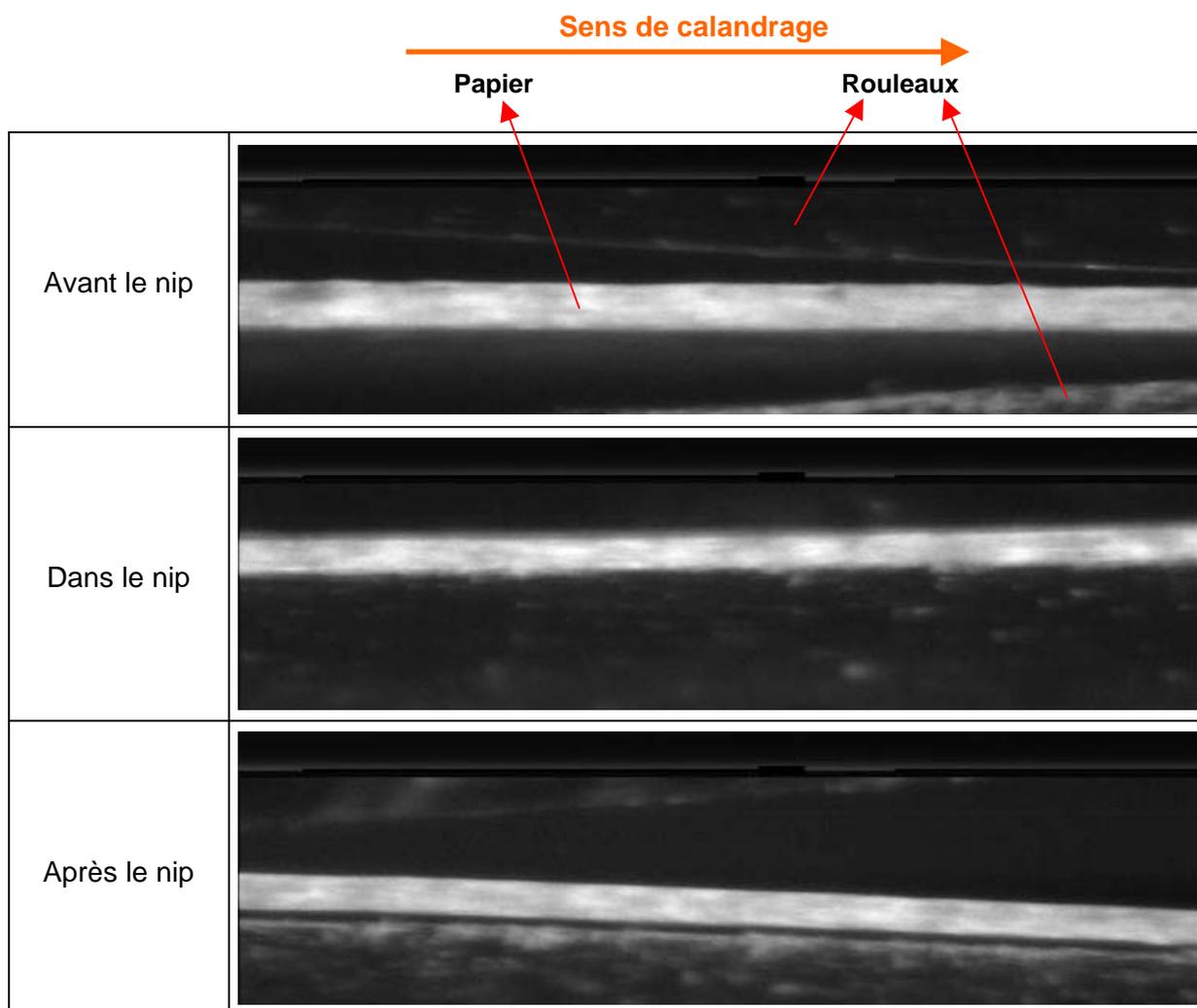


Figure 3. 12 : Images obtenues par le système optique lors du calandrage du papier pré-couché (cf Tableau 2.6) en mode bobine à 400 tr/min – Dimension : 2,6 x 0,6 mm

Les réglages du système optique restent cependant délicats. Les images obtenues avant et après le nip sont bien éclairées. Par ailleurs, la position du papier dans le sens travers est moins importante que celle pour les images obtenues dans le nip en raison d'une plus grande facilité d'éclairage. Effet, dans le nip, si la bande de papier est trop à l'intérieur du nip, l'éclairage rentre difficilement dans l'entrefer des rouleaux et le contraste entre les rouleaux et le papier n'est pas suffisant pour mesurer une épaisseur. Au contraire, si la bande de papier est trop près de la caméra, le papier est alors d'une part, sur-éclairé et d'autre part, non comprimé par les rouleaux. Par ailleurs, la régulation de l'actionneur permettant de maintenir la feuille de papier au même endroit dans le nip est de plus en plus approximative avec l'augmentation de la vitesse de calandrage. La profondeur de champ du système optique dépend entre autres, de l'objectif utilisé, de l'ouverture du diaphragme et de la tolérance définie ([Pérez, 1996]). Bien que tous les paramètres ne soient pas connus, nous pouvons estimer la profondeur de champ entre 50 et 200 μm . Les variations de position de la bande dans le sens de la laize doivent donc être très faibles pour obtenir en continu des images nettes, ce qui est difficile à grande vitesse. La vitesse maximale utilisée a donc été 400 tr/min, ce qui correspond en prenant une largeur de nip de 5 mm à un temps de contact de 1,4 ms.

La méthode à partir du système optique in-situ permet donc de déterminer l'épaisseur :

- Initiale,
- Sous charge,
- Quelques dizaine de milli-secondes après la sortie du contact.

La Figure 3. 13 présente les épaisseurs moyennes dans le nip et après le nip réalisées lors du calandrage du papier pré-couché (cf Tableau 2.6) à différentes forces linéiques.

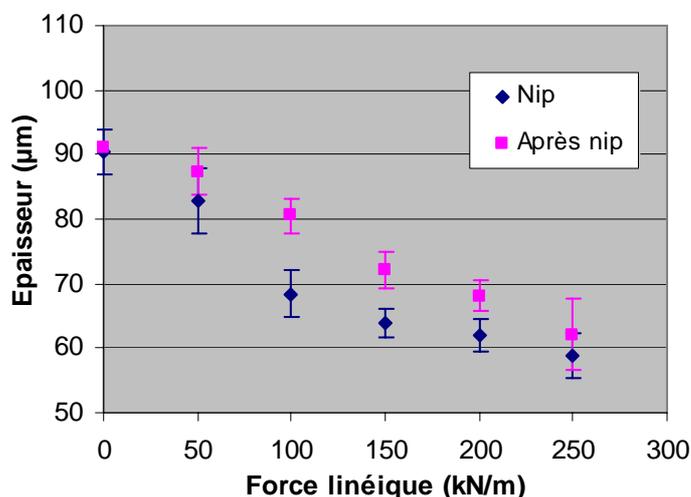


Figure 3. 13 : Mesure de l'épaisseur du papier pré-couché (cf Tableau 2.6), calandré à différentes forces linéiques – Système optique – Température du rouleau métallique : 100°C – Vitesse de rotation : 400 tr/min

Comme pour les mesures réalisées au micromètre, les épaisseurs moyennes avant, dans et après le nip permettent de déterminer les déformations totales, plastiques et élastiques (Figure 3. 14). L'ordre de grandeur de l'incertitude de la déformation est d'environ 4%.

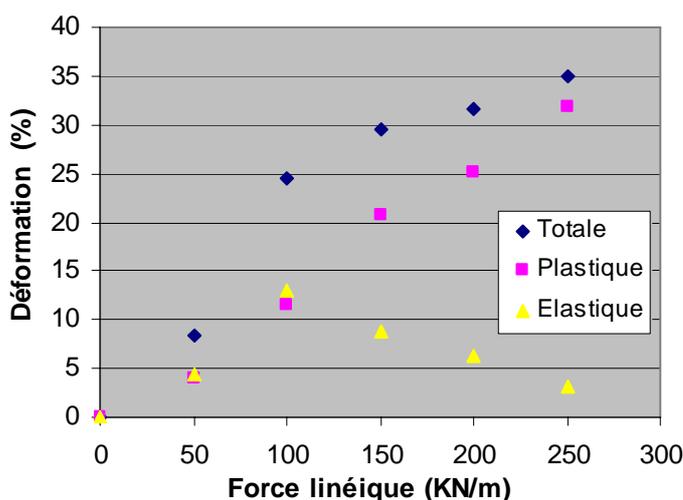


Figure 3. 14 : Evaluation de la déformation du papier pré-couché (cf Tableau 2.6) avec la force linéique – Système optique – Conditions de calandrage : cf Figure 3. 13

Comme pour la méthode de mesure à partir d'un micromètre, trois séries de mesure ont été réalisées sur le papier F (cf Tableau 2.6) lors de calandrage à différentes forces

linéiques. La Figure 3. 15 présente les épaisseurs du papier dans le nip et la Figure 3. 16 celles après le nip. Les courbes montrent une bonne reproductibilité des mesures pour les faibles forces linéiques (jusqu'à 100 kN/m). Par contre, les incertitudes de mesure sont plus importantes pour les fortes forces linéiques.

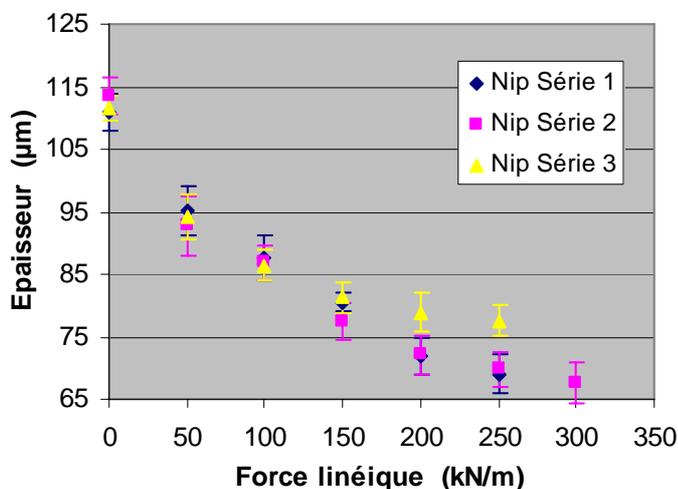


Figure 3. 15 : Reproductibilité des mesures d'épaisseur dans le nip du papier F (cf Tableau 2.6) calandré à différentes forces linéiques – Système optique – 3 séries – Température du rouleau métallique : 100°C – Vitesse de rotation : 400 tr/min

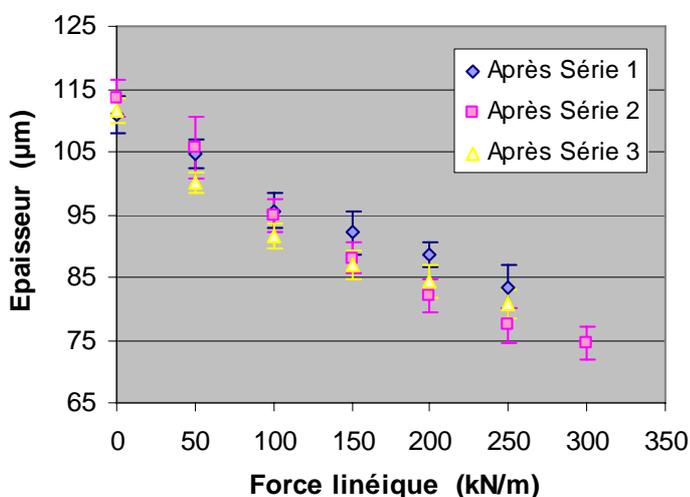


Figure 3. 16 : Reproductibilité des mesures d'épaisseur après le nip du papier F (cf Tableau 2.6) calandré à différentes forces linéiques – Système optique – 3 séries – Conditions de calandrage : cf Figure 3. 15

3.2.3. - Comparaison des mesures d'épaisseur obtenues par les deux méthodes

Les parties 3.2.1. - et 3.2.2. - présentent les épaisseurs du papier pré-couché et du papier F (cf Tableau 2.6) en fonction des conditions de calandrage, obtenues à partir des deux méthodes. Plusieurs comparaisons sont possibles :

- La première concerne les écarts types et la reproductibilité des mesures : celles réalisées à partir du micromètre sont moins dispersées et plus reproductibles que celles obtenues à partir du système optique.
- La seconde porte sur les valeurs d'épaisseur obtenues : les épaisseurs mesurées par le système optique sont toujours inférieures à celles obtenues à partir du micromètre.

En ce qui concerne les épaisseurs avant calandrage, cette constatation a été vérifiée sur différents papiers d'épaisseur allant de 50 à 400 μm . La Figure 3. 17 présente les mesures obtenues par les deux méthodes. On note que si la mesure optique conduit à des valeurs plus faibles, l'écart n'est premièrement pas constant et secondement faible pour certains papiers. Nous avons vu dans la partie 2.3.3.2 sur l'analyse topographique des impacts de chute de bille que la coupe des échantillons de papier entraînait certainement un endommagement et une compression du réseau fibreux. Les mesures d'épaisseur du papier par le système optique sont également réalisées sur la coupe des rouleaux de papier. 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 endommager la zone d'analyse des papiers. Cette hypothèse permet d'expliquer les écarts d'épaisseurs obtenus par les deux méthodes et également, les écarts types plus importants calculés à partir du système optique.

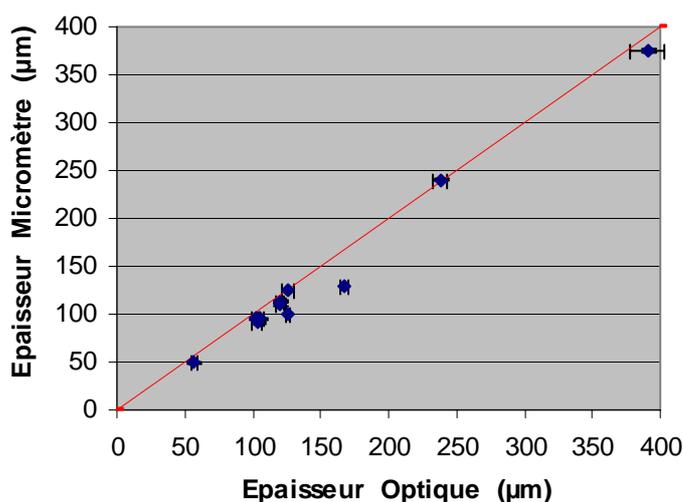


Figure 3. 17 : Comparaison des épaisseurs de différents papiers non calandrés obtenues par les deux méthodes

Etant donné que les épaisseurs mesurées avant calandrage par les deux méthodes sont différentes, nous nous intéressons aux réductions d'épaisseur (déformation plastique) suite au calandrage plutôt qu'aux épaisseurs mesurées après le nip. Les comparaisons des déformations plastiques obtenues à partir du système optique et du micromètre sont présentées sur la Figure 3. 18 pour le papier pré-couché et sur la Figure 3. 19 pour le papier F. Les résultats montrent pour les deux papiers, des déformations mesurées en optique plus importantes que celles mesurées par le micromètre. Les difficultés expérimentales des mesures par le système optique peuvent expliquer en partie cette différence. Cependant, le délai de temps de la mesure après calandrage est certainement le facteur principal pour expliquer ce constat. En effet, la mesure d'épaisseur à l'aide du micromètre est effectuée quelques minutes après la compression du papier, alors que par le système optique, la

mesure est réalisée après quelques milli-secondes. Nous pouvons donc penser que la recouvrance est viscoélastique et qu'elle nécessite un temps supérieur à quelques ms. La déformation que nous appelons « plastique » après quelques ms est alors un mélange entre la déformation résiduelle (réellement plastique) et la déformation visco-élastique non totalement recouvrée. Ces conclusions sont en accord avec les observations de Browne ([Browne *et al*, 1994]) qui a réalisé des mesures de réduction d'épaisseur dans le nip et après calandrage pour compléter l'équation de calandrage de Crotogino ([Crotogino, 1980]) (cf partie 1.3.1.2). Il a ainsi estimé le temps nécessaire pour une recouvrance visco-élastique complète entre 200 et 500 ms pour une vitesse de calandrage de 100 m/min et entre 10 et 30 ms pour une vitesse de 1000 m/min. Les propriétés viscoélastiques du papier pourraient également être une explication de la Figure 3. 14 décrivant les déformations totales, plastiques et élastiques obtenues à partir du système optique sur le papier pré-couché. En effet, nous constatons une déformation « plastique » plus importante que la déformation élastique alors que les résultats de Feygin ([Feygin, 1999]) présentés sur la Figure 1.16 montrent un comportement opposé à grande vitesse de sollicitation.

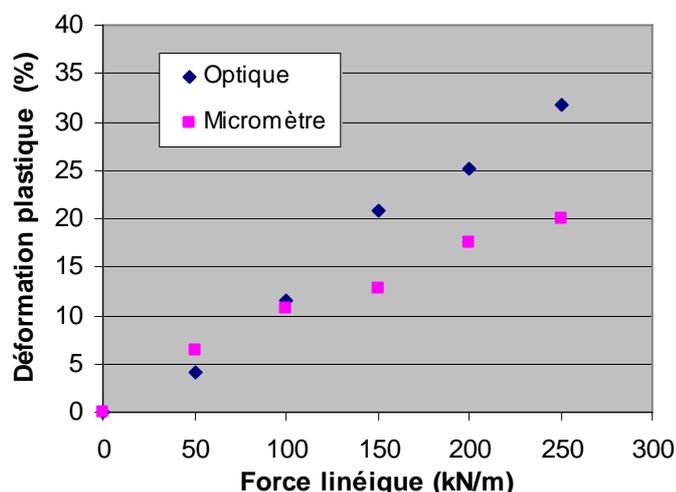


Figure 3. 18 : Comparaison des déformations plastiques obtenues par les deux méthodes de mesure d'épaisseur sur le papier pré-couché (cf Tableau 2.6)

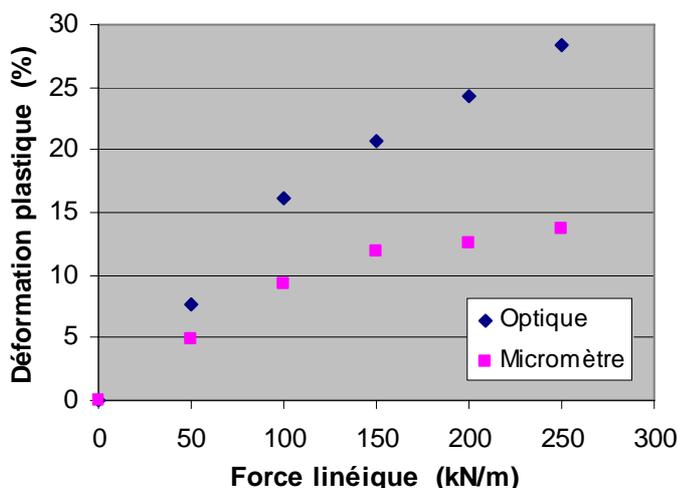


Figure 3. 19 : Comparaison des déformations plastiques obtenues par les deux méthodes de mesure d'épaisseur sur le papier F (cf Tableau 2.6)

Les deux méthodes de mesure d'épaisseur du papier donnent donc des informations complémentaires :

- Le micromètre permet d'obtenir la déformation plastique à des temps longs ;
- Le système optique permet d'obtenir la déformation totale et les déformations « plastiques » et « élastiques » à des temps très courts après le calandrage.

3.3. - Détermination de la contrainte appliquée dans le nip lors du calandrage

La partie 3.2. - vient de décrire les deux méthodes utilisées pour déterminer les déformations du papier. Il reste à définir la contrainte pour caractériser le comportement mécanique des papiers. Au cours du calandrage, la contrainte appliquée sur un papier dépend des paramètres de la calandre et des propriétés du papier (cf partie 1.2.3). Tous les essais présentés dans la partie 3. - ont été réalisés dans une configuration soft nip avec un rouleau métallique et un rouleau polymère de dureté 91ShD. Ainsi, le seul paramètre de calandrage qui a varié au cours des essais est la force linéique. En ce qui concerne les propriétés du papier, des mesures de largeurs de nip à l'aide de papier carbone (complexe : papier testé + papier carbone) ont été réalisées en statique et à différentes forces linéiques. Le Tableau 3. 1 présente les images et les largeurs de nip obtenues pour le papier couché F (cf Tableau 2.6).

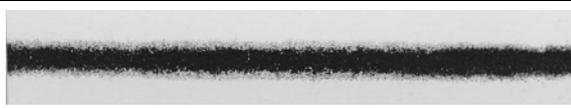
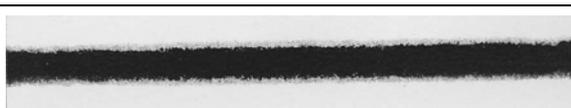
Force linéique (kN/m)	Empreinte carbone en statique	Largeur de nip (mm)
50		3,2
100		3,4
150		4,1
200		4,4
250		4,7
300		4,8

Tableau 3. 1 : Empreintes carbonées en statique et largeurs de nip en fonction de la force linéique pour le papier couché F (cf Tableau 2.6) – Soft nip – Dimension des empreintes :

7,5 x 1,25 cm

La Figure 3. 20 montre que la largeur de nip est une fonction croissante de la force linéique. Par ailleurs, les différents papiers présentés montrent clairement leurs influences sur la largeur de nip. En plus de l'influence de l'épaisseur exposée par Guérin ([Guérin et al, 2005]) (cf partie 1.2.3), les résultats montrent l'influence de la couche sur la largeur du nip : pour une même force linéique, le papier couché F d'épaisseur 120 μm a une largeur de nip inférieure à celle du papier pré-couché ; pourtant, de moindre épaisseur (106 μm). La largeur de nip dépend donc de l'épaisseur du papier mais également de sa compressibilité. Ce résultat confirme celui obtenu en compression quasi-statique où la déformation du papier pré-couché est plus importante que celle du papier F, à contrainte imposée (cf Figure 2.81). Nous verrons plus en détail au chapitre 5 dans quelle mesure les essais de compression statique du chapitre 2 sont en accord avec ces mesures de largeur de nip en statique. A ce stade, nous faisons l'hypothèse que la largeur de nip en calandrage est égale à la largeur mesurée en condition statique. Nous discuterons de la validité de cette hypothèse au chapitre 5. Connaissant la largeur de nip et la force linéique, la contrainte maximale appliquée dans le nip peut être évaluée à partir de l'Equation 1.2.

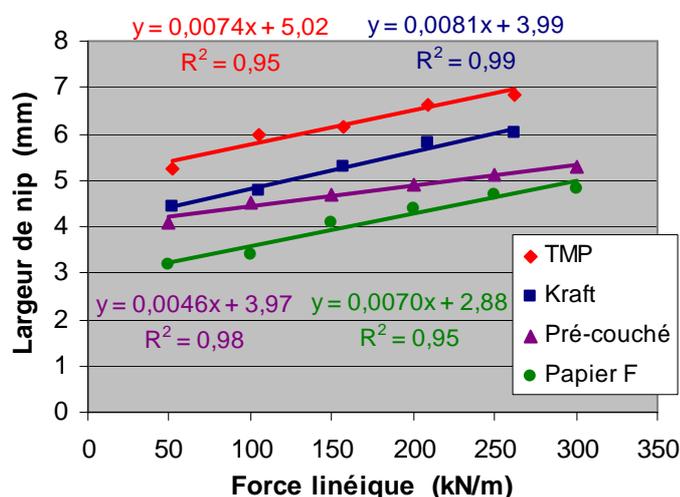


Figure 3. 20 : Largeur de nip mesurée en statique en fonction de la force linéique pour différents papiers (cf Tableau 2.3 et Tableau 2.6) – Soft nip

3.4. - Influence de différents paramètres sur le comportement mécanique du papier

Maintenant que nous connaissons la déformation du papier et la contrainte appliquée, nous pouvons étudier l'influence du conditionnement, de la température du rouleau métallique et du type de papier (influence de la nature de la pâte, de la couche) sur le comportement mécanique du papier.

3.4.1. - Influence du conditionnement du papier

Nous avons vu dans la partie 1.2.4. que les caractéristiques mécaniques du papier sont sensibles à la température et à l'humidité. Des essais de calandrage en mode feuille à feuille ont alors été réalisés sur des papiers conditionnés pendant 24 heures dans une chambre climatique ayant une humidité de 30 ; 50 ou 70%HR puis pré-chauffés pendant 30

secondes à une température de 30 ou 70°C juste avant l'insertion de la feuille dans le nip. Les conditions de calandrage ont été ajustées pour chaque papier afin d'avoir :

- Un temps de contact constant de 0,63 ms. Les vitesses de calandrage ont donc varié entre 775 et 1170 tr/min en fonction des papiers calandrés et des largeurs de nip.
- Une pression moyenne de 14 et 32 MPa. Les forces linéiques ont donc également varié entre 56 et 74 kN/m pour la faible pression et entre 175 et 206 kN/m pour la pression la plus élevée. La pression maximale au centre du nip a été recalculée.

Deux températures du rouleau métallique ont été utilisées : 100 et 160°C ; et les mesures de l'épaisseur finale du papier ont été réalisées à l'aide du micromètre.

La Figure 3. 21 présente les résultats de l'influence du conditionnement et du préchauffage sur le comportement mécanique du papier TMP (cf Tableau 2.3) calandré à une température de rouleau de 100°C. Les résultats obtenus avec le papier Kraft (cf Tableau 2.6) calandré à des températures de rouleau de 100°C et 160°C et ceux concernant le papier TMP (cf Tableau 2.3) calandré à une température de rouleau de 160°C sont présentés en annexe 3

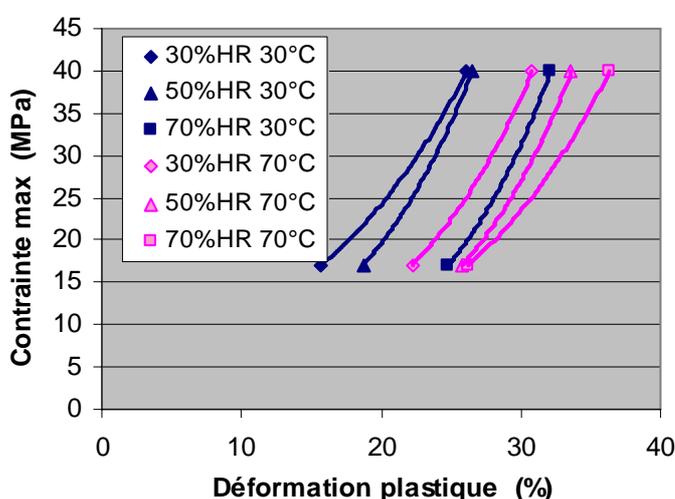


Figure 3. 21 : Influence du conditionnement et du préchauffage du papier TMP (cf Tableau 2.3) sur le comportement mécanique – Température rouleau : 100°C

Les résultats montrent qu'une augmentation de la température et de l'humidité de la feuille entraîne une déformation plastique plus importante pour une même contrainte appliquée. Suivant le conditionnement du papier, la déformation supplémentaire peut atteindre 10 à 15%. En effet, l'augmentation de la température de la feuille permet de se rapprocher de la température de transition vitreuse (T_g) du papier ce qui facilite sa déformation. Ce comportement est d'autant plus marqué que l'humidité du papier est faible. L'humidité du papier joue également sur la T_g que l'on appelle aussi la température de ramollissement. Vreeland ([Vreeland *et al.*, 1989]) a proposé une formule permettant de calculer la température de ramollissement de la cellulose en fonction de l'humidité :

$$T_g = 234,2 * e^{-0,131*m} \quad \text{Équation 3. 1}$$

Avec, T_g : température de transition vitreuse en (°C) et,
 m : humidité absolue du papier (rapport entre la masse d'eau et la masse de matière sèche en %).

Le papier TMP a été obtenu à partir d'un mélange de différentes pâtes mécaniques. Nous ne connaissons pas l'humidité absolue (m) après conditionnement et pré-chauffage pour ce papier. Par contre, nous connaissons l'humidité absolue pour des feuilles fabriquées à partir de chaque pâte utilisée dans le papier TMP. Ainsi, un calcul s'appuyant sur le pourcentage massique de chaque pâte utilisée et sur l'humidité absolue des différentes feuilles, permet d'estimer l'humidité absolue du papier TMP pour les différentes conditions d'essais. L'Équation 3. 1 permet alors de déterminer la température de ramollissement. Les différentes valeurs calculées doivent cependant être prises avec certaines précautions dans la mesure où l'Équation 3. 1 a été obtenue à partir des équations de Kaelble ([Kaelble, 1971]) utilisant les valeurs des coefficients de Salmen ([Salmen *et al*, 1977]) pour de la cellulose cristalline à 60%. Le papier TMP contient des fibres de cellulose, de taux de cristallinité inconnu, et également d'autres éléments tels que de la lignine ou des hémicelluloses. Le Tableau 3. 2 présente l'humidité et la température de ramollissement calculées pour les différents conditionnements et préchauffages du papier TMP.

Humidité du conditionnement (%HR)	Température de préchauffage (°C)	Humidité absolue du papier TMP m (%)	Température de ramollissement (°C)	Ecart entre la T.ramollissement et la T.préchauffage
30	30	6,3	102	72
50	30	7,5	87	57
70	30	13,7	39	9
30	70	5,2	119	49
50	70	6,4	101	31
70	70	11,0	55	-15

Tableau 3. 2 : Humidité absolue et température de ramollissement calculé à partir de l'Équation 3. 1 pour le papier TMP en fonction du conditionnement et du préchauffage

Le Tableau 3. 2 montre que l'humidité absolue du papier TMP augmente avec l'humidité du conditionnement, mais elle diminue avec la température de pré-chauffage. Le comportement de la température de ramollissement est opposé à celui de l'humidité relative car les deux paramètres sont reliés par une fonction de type exponentielle négative (Équation 3. 1). L'écart entre la température de ramollissement et la température de pré-chauffage permet d'étayer avec des données chiffrées les commentaires faits à partir de la Figure 3. 21 sur l'influence de la température et de l'humidité au niveau de la déformation : D'une manière générale, les courbes de contrainte / déformation se classent en fonction de l'écart entre la température de ramollissement et la température de pré-chauffage. Toutefois, nous observons un contre-exemple (Inversion entre : 70%HR – 30°C et 50%HR – 70°C).

Enfin, nous pouvons remarquer qu'une augmentation de l'humidité du papier permet de faire diminuer la température de ramollissement, par contre si nous souhaitons également augmenter la température de la feuille pour se rapprocher de cette dernière, l'humidité du papier diminue et la température de ramollissement ré-augmente. La température et l'humidité du papier entraînent certes un ramollissement du papier, par contre l'action conjointe de ces deux paramètres n'engendre pas forcément une déformation supplémentaire.

3.4.2. - Influence de la température du rouleau

Le paragraphe précédent étudiait l'influence de la température de la feuille sur le comportement mécanique du papier. Nous avons vu dans la partie 1.2.4., que l'on distinguait la température au cœur de la feuille de la température de surface qui est chauffée par le rouleau métallique. Les résultats présentés dans cette partie concernent les papiers TMP et Kraft, conditionnés, préchauffés puis calandrés selon le plan d'expérience décrit dans la partie 3.4.1. -. Les mesures de l'épaisseur du papier ont été réalisées à l'aide du micromètre. La Figure 3. 22 et la Figure 3. 23 présentent l'influence de la température du rouleau (100 et 160°C) sur le comportement mécanique du papier TMP conditionné à différentes humidités et préchauffé respectivement à 30 et 70°C. Les résultats obtenus avec le papier Kraft sont présentés en annexe 4.

Les courbes montrent certes l'influence de l'humidité du papier mais également, que plus la température du rouleau est élevée, plus la déformation est importante pour une même contrainte. Nous constatons que ce comportement est d'autant plus marqué que la température et l'humidité de la feuille sont faibles. En effet, l'écart entre la température du papier et la température de ramollissement est élevé si la température et l'humidité de la feuille sont faibles. Ainsi, l'augmentation de la température de la feuille par le rouleau va réduire cet écart. Par contre, si cet écart est déjà faible (haute température et humidité de la feuille), l'augmentation de la température du rouleau n'engendre qu'une faible élévation de la température de la feuille et donc peu de déformation supplémentaire.

Par ailleurs, l'augmentation de la température du papier par les rouleaux n'est pas homogène dans le sens de l'épaisseur (cf partie 1.2.4.). La température des rouleaux tend à concentrer la déformation au voisinage de la surface du papier, ce qui se caractérise davantage par l'amélioration du brillant et du lissé que par la réduction d'épaisseur de la feuille.

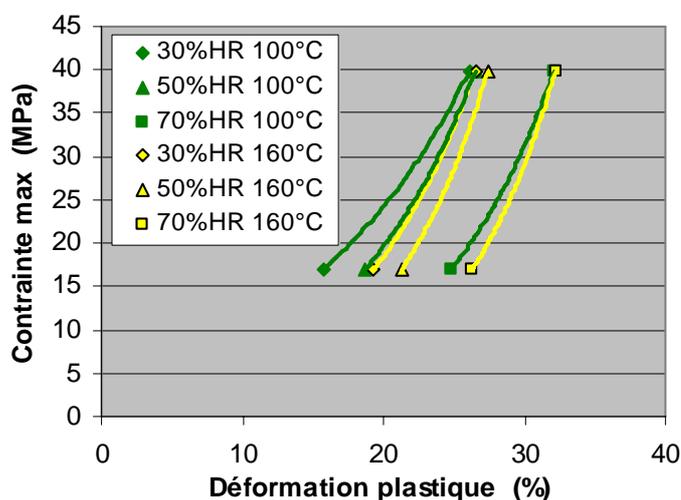


Figure 3. 22 : Influence de la température du rouleau métallique sur le comportement mécanique du papier TMP (cf Tableau 2.3) à une température de feuille de 30°C et pour différentes humidités

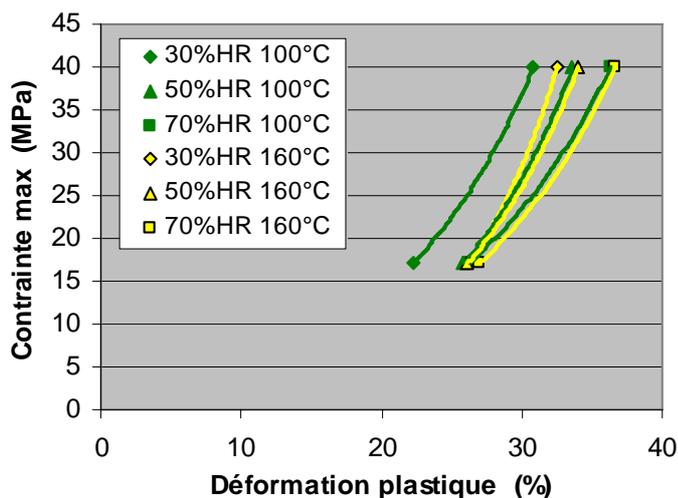


Figure 3.23 : Influence de la température du rouleau métallique sur le comportement mécanique du papier TMP (cf Tableau 2.3) à une température de feuille de 70°C et pour différentes humidités

La température, sa répartition dans le sens de l'épaisseur et l'humidité du papier sont des paramètres influençant le comportement mécanique du papier. La température de ramollissement du papier a été mise en avant pour essayer d'expliquer les résultats. Cette température a été estimée à partir d'équations issues de la littérature et des caractéristiques des différentes pâtes présentes dans le papier TMP. Il serait intéressant de réaliser une mesure de la température de ramollissement directement sur le papier.

3.4.3. - Influence de la nature de la pâte

Les résultats des essais de laboratoire en compression quasi-statique ou dynamique ont montré une influence de la nature de la pâte sur le comportement mécanique des papiers (cf partie 2.1.5.1). Les papiers TMP et Kraft (cf Tableau 2.3) ont été conditionnés, préchauffés puis calandrés selon le plan d'expérience décrit dans la partie 3.4.1. -. Les mesures de l'épaisseur du papier ont été réalisées à l'aide du micromètre. La Figure 3.24 et la Figure 3.25 présentent les courbes de contrainte / déformation plastique obtenues pour les deux papiers (à différentes humidités), calandrés à une température du rouleau de 100°C et respectivement, à une température de feuille de 30°C et 70°C. Les résultats obtenus pour une température du rouleau métallique de 160°C sont présentés en annexe 5.

Les résultats de calandrage semblent montrer que l'influence du type de pâte dépend de la température du papier. En effet, sur la Figure 3.24 (température des papiers 30°C) nous n'observons pas de différence significative entre les papiers TMP et Kraft alors que selon la Figure 3.25 (température des papiers 70°C) la déformation du papier TMP est d'une manière générale, plus importante que celle du papier Kraft pour une même contrainte. Les essais de laboratoire sur ces papiers n'ont pas été réalisés à plusieurs températures, mais les résultats obtenus (Figure 2.67 par exemple) sont identiques à ceux du calandrage à une température de feuille de 70°C. Comme pour l'influence de la température du rouleau, cette étude mérite d'être complétée par des essais de calandrage à différentes contraintes.

Par ailleurs, dans les résultats des essais de laboratoire, la contrainte a été multipliée par le rapport entre la masse volumique initiale et la masse volumique au cours de l'essai (cf

Figure 2.69 et Figure 2.71). Dans les essais de calandrage, la masse volumique du papier dans le nip aurait pu être déterminée à partir de la mesure d'épaisseur par le système optique, ce qui n'a pas été le cas lors de cette campagne d'essai. Nous connaissons seulement la masse volumique finale du papier et le produit de la contrainte par le rapport des masses volumiques (initial / final) engendre une diminution de la contrainte mais n'influence pas l'allure des courbes de comportement (cf annexe 3).

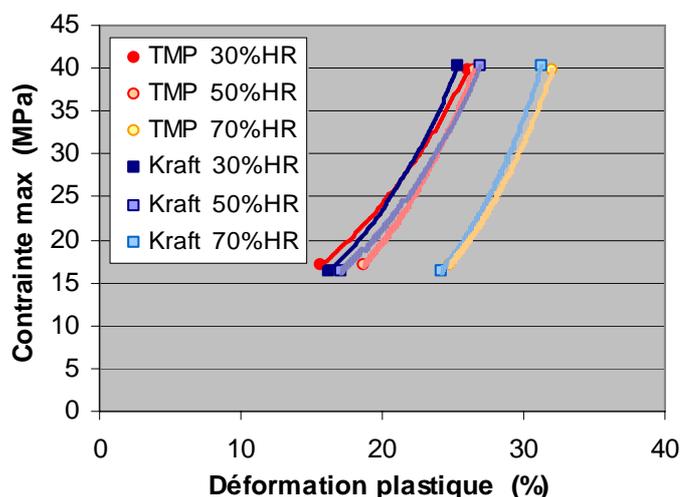


Figure 3. 24 : Influence de la nature de la pâte sur le comportement mécanique du papier (TMP et Kraft cf Tableau 2.3) à une température de feuille de 30°C et pour différentes humidités – Température du rouleau métallique 100°C

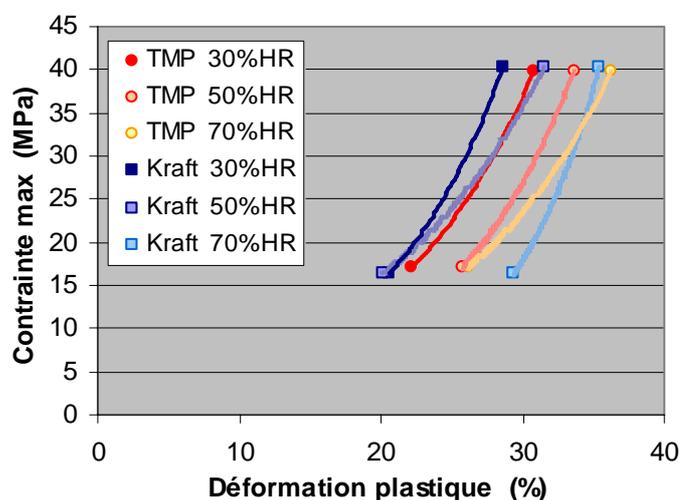


Figure 3. 25 : Influence de la nature de la pâte sur le comportement mécanique du papier (TMP et Kraft cf Tableau 2.3) à une température de feuille de 70°C et pour différentes humidités – Température du rouleau métallique 100°C

3.4.4. - Influence de la couche

Les essais de laboratoire ont montré que le procédé de couchage semblait davantage influencer le comportement mécanique du papier que le poids de couche ou la nature et le nombre de parts de liant (cf partie 2.5.4). Les papiers présentés dans le Tableau 2.6 ont été calandrés dans les conditions suivantes :

- Température et humidité du papier ambiante
- Vitesse : 400 tr/min
- Force linéique : 50, 100, 150, 200 et 250 kN/m
- Température du rouleau : 100°C.

Les épaisseurs des papiers ont été mesurées par les deux méthodes : micromètre et système optique. Les points abordés dans les essais de laboratoire sont repris dans le même ordre.

3.4.4.1. - Influence du procédé de couchage et de la concentration en pigments

Les courbes contrainte / déformation obtenues à partir de la méthode utilisant le micromètre (Figure 3. 26) montrent que la déformation du papier couché à l'aide du système « jet (jet flow) + lame lissante » est plus faible que celle du papier couché à l'aide du système « rouleau applicateur + lame raclante » pour une même contrainte. Ce résultat confirme bien celui mis en évidence à partir des essais de laboratoire (Figure 2.83 par exemple).

Papier C : rouleau applicateur + lame raclante : 25 g/m²/face en une dépose

Papier F : Jet (jet flow) + lame lissante : 25 g/m²/face en deux déposes

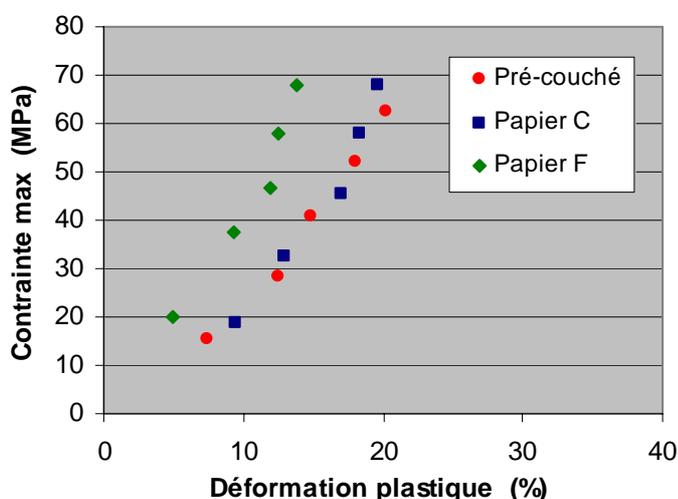


Figure 3. 26 : Influence de la couche et du procédé de couchage sur le comportement mécanique du papier (cf Tableau 2.6) – Epaisseur mesurée par le micromètre

Les courbes obtenues à partir du système optique : pour la déformation totale (Figure 3. 27) ou la déformation « plastique » (Figure 3. 28), montrent également l'influence du procédé de couchage. Par ailleurs, comme pour les résultats des essais de laboratoire, la déformation des papiers couchés apparaît plus faible que celle du papier pré-couché pour la même contrainte ; notons toutefois que, curieusement, cette différence est plus faible pour les mesures d'épaisseur après relaxation.

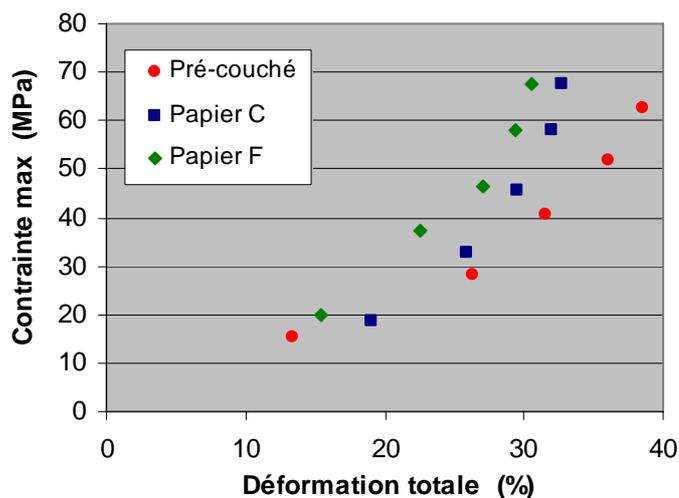


Figure 3. 27 : Influence de la couche et du procédé de couchage sur le comportement mécanique du papier (cf Tableau 2.6) – Epaisseur dans le nip mesurée par le système optique

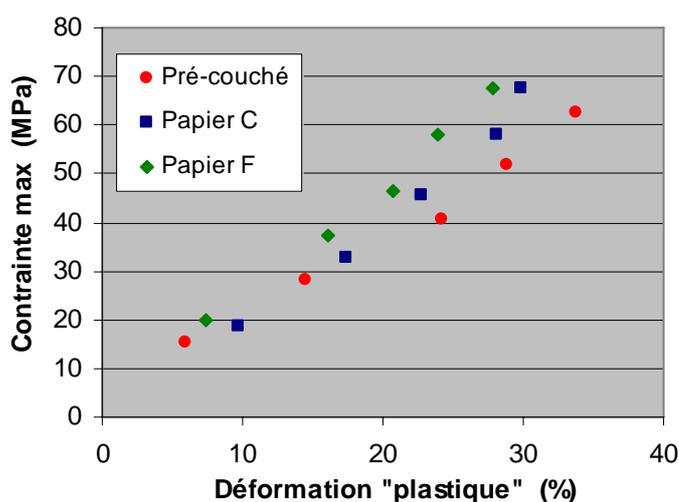


Figure 3. 28 : Influence de la couche et du procédé de couchage sur le comportement mécanique du papier (cf Tableau 2.6) – Epaisseur après le nip mesurée par le système optique

3.4.4.2. - Influence du poids de couche

Les résultats obtenus à partir du papier pré-couché et des papiers A, B et C en utilisant le micromètre, montrent une quasi-superposition des courbes contrainte / déformation pour tous les papiers couchés (Figure 3. 29). Ce résultat est identique à celui obtenu à partir des essais de laboratoire (Figure 2.86 par exemple).

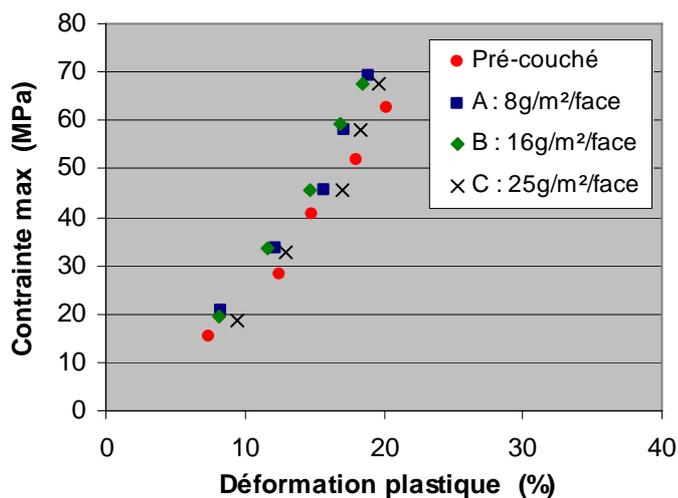


Figure 3. 29 : Influence du poids de couche sur le comportement mécanique du papier (cf Tableau 2.6) – Epaisseur mesurée par le micromètre

Les résultats obtenus à partir du système optique dans le nip semblent montrer pour une même contrainte, que la déformation totale (Figure 3. 30) et la déformation « plastique » (Figure 3. 31) sont plus faibles pour les papiers couchés que pour le papier pré-couché.

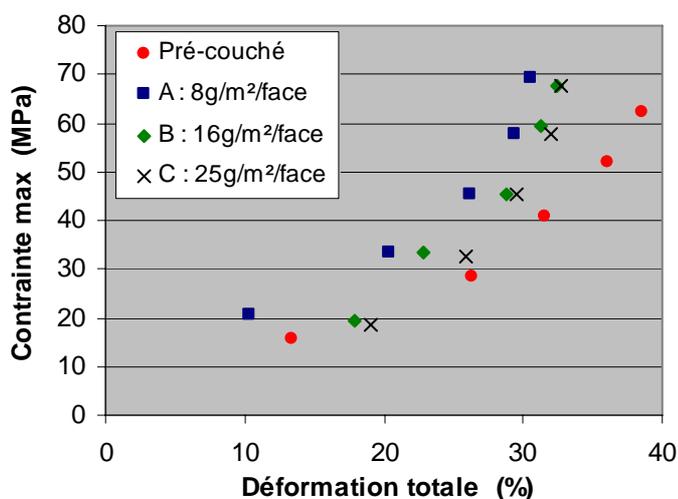


Figure 3. 30 : Influence du poids de couche sur le comportement mécanique du papier (cf Tableau 2.6) – Epaisseur dans le nip mesurée par le système optique

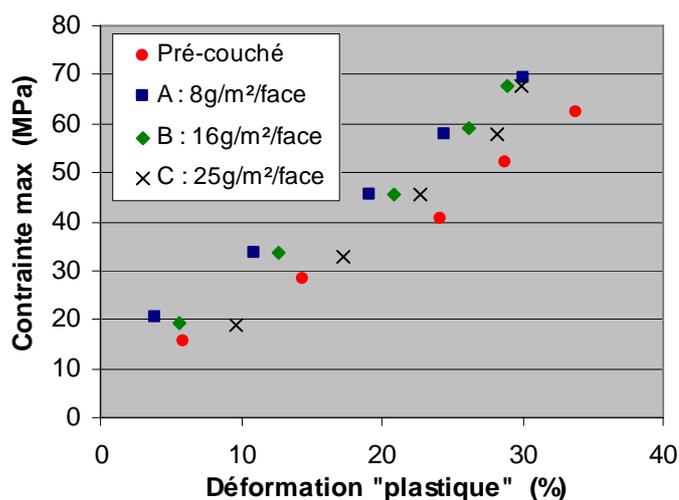


Figure 3. 31 : Influence du poids de couche sur le comportement mécanique du papier (cf Tableau 2.6) – Epaisseur après le nip mesurée par le système optique

3.4.4.3. - Influence du liant

La Figure 3. 32 présente la contrainte en fonction de la déformation plastique mesurée à partir du micromètre. La Figure 3. 33 et la Figure 3. 34 présentent les résultats obtenus à partir de la mesure d'épaisseur, respectivement, dans et après le nip. Les résultats sur l'influence du liant (nature et quantité) montrent également peu de différence sur le comportement mécanique du papier. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus à partir des essais de laboratoire (cf Figure 2.89 par exemple). Nous pouvons également noter que, pour ces essais, le papier pré-couché se déforme davantage que les papiers couchés pour une même contrainte.

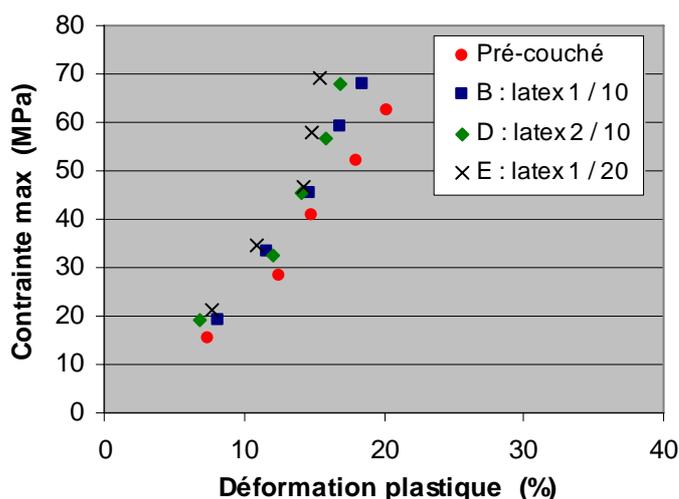


Figure 3. 32 : Influence du liant (nature et quantité) sur le comportement mécanique du papier (cf Tableau 2.6) – Epaisseur mesurée par le micromètre

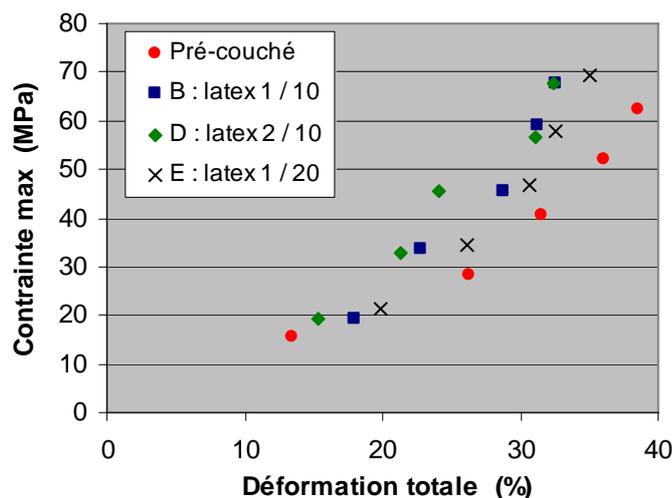


Figure 3. 33 : Influence du liant (nature et quantité) sur le comportement mécanique du papier (cf Tableau 2.6) – Epaisseur dans le nip mesurée par le système optique

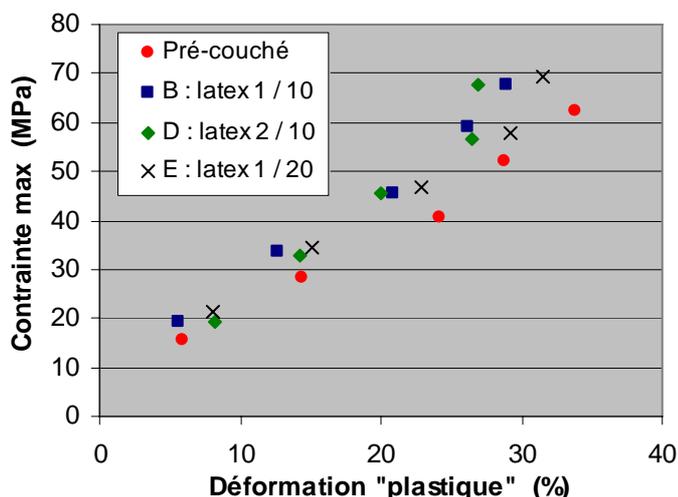


Figure 3. 34 : Influence du liant (nature et quantité) sur le comportement mécanique du papier (cf Tableau 2.6) – Epaisseur après le nip mesurée par le système optique

3.4.5. - Conclusions sur l'influence des différents paramètres sur le comportement mécanique du papier

Les essais de calandrage en soft nip et les deux méthodes utilisées pour mesurer l'épaisseur du papier ont pour objectif d'étudier le comportement mécanique du papier. Différents papiers ont été testés et nous avons mis en évidence plusieurs points :

- Le conditionnement du papier, à savoir sa température et son humidité, a une influence de premier ordre sur le comportement mécanique : une élévation de ces paramètres entraîne un ramollissement du papier et donc une déformation plus importante pouvant atteindre 10 à 15% en plus. Par contre, les résultats expérimentaux et l'estimation de la température de ramollissement pour les diverses conditions ont montré que l'action conjointe de ces deux paramètres n'entraînait pas forcément de déformation supplémentaire. En effet, l'augmentation de l'humidité

entraîne certes une diminution de la température de ramollissement mais une augmentation de la température tend à diminuer l'humidité du papier.

- La température du rouleau métallique influence également le comportement mécanique du papier mais, cet effet est du second ordre par rapport à l'effet du conditionnement. En effet, une augmentation de la température du rouleau entraîne une augmentation de la température moyenne de la feuille mais surtout un profil de température dans le sens de l'épaisseur. La déformation du papier n'est alors plus homogène. Elle est favorisée en surface où la température est plus élevée.
- Le nature de la pâte utilisée dans les papiers a une influence sur le comportement mécanique, cette influence dépend de la température de la feuille : le papier fabriqué à partir d'une pâte mécanique se déforme de manière plastique plus facilement que celui fabriqué à partir de la pâte chimique pour une température de feuille de 70°C. Ce résultat confirme celui obtenu à partir des essais de laboratoire.
- La composition de la couche montre peu d'influence sur le comportement mécanique. Par contre, comme pour les essais de laboratoire, la structure « papier + couche » apparaît plus rigide que le papier seul et le procédé de couchage semble influencer le comportement mécanique.

3.5. - Transfert des écarts de forme du rouleau au papier

Des essais de calandrage ont été réalisés avec un rouleau métallique ayant des formes géométriques particulières sur sa surface. L'objectif de ce travail est d'étudier comment la forme de la surface du rouleau se transfère sur la surface du papier : en d'autres termes, si une cavité sur le rouleau de dimension connue engendre dans cette zone, une déformation plus faible du papier calandré. Le second objectif est de déterminer l'influence des conditions de calandrage sur cette opération.

3.5.1. - Présentation du rouleau et des conditions d'essai

Quatre formes géométriques ont été réalisées par électro-érosion sur un rouleau métallique :

- 3 disques de diamètre 20 mm et de différentes profondeurs : 15, 23 et 27 μm (Figure 3. 35)
- 1 quadrillage (dimension totale : 25 x 35 mm ; 4 colonnes, 2 lignes ; profondeur 1 mm) (Figure 3. 36)

Entre les formes géométriques, le rouleau est lisse. Nous appelons ces zones dans la suite du manuscrit, zone sans forme géométrique.

Trois papiers ont été sélectionnés pour la réalisation des essais :

- Le papier pré-couché d'épaisseur 106 μm
- Le papier couché F d'épaisseur 120 μm
- Un papier G : non couché, élaboré à partir d'une pâte CTMP et d'épaisseur 391 μm

Les trois papiers ont été calandrés en mode feuille à feuille dans les conditions suivantes :

- Température et humidité du papier ambiantes
- Vitesse : 200 ; 400 et 600 tr/min
- Force linéique : 50, 100, 175 et 250 kN/m
- Température du rouleau métallique : 100°C
- Soft nip avec un rouleau polymère de dureté 91ShD.

Dix feuilles ont été calandrées pour les trois papiers dans chaque condition.

Sur-épaisseur sur l’empreinte silicone correspondant à une cavité sur le rouleau

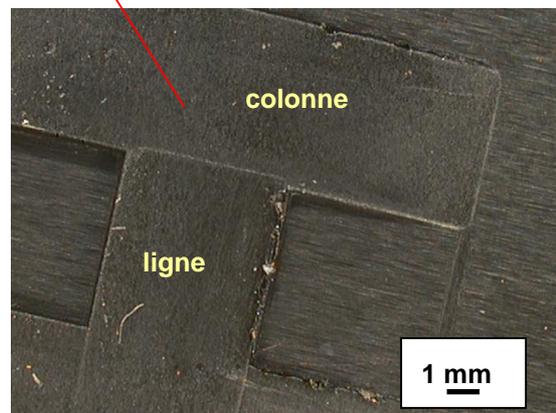
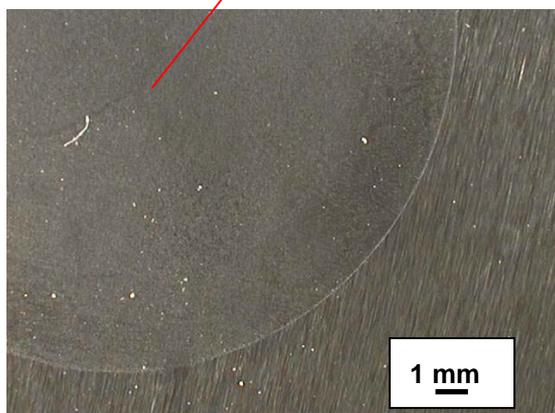


Figure 3. 35 : Observation au microscope d’empreinte silicone d’un disque

Figure 3. 36 : Observation au microscope d’empreinte silicone du quadrillage

3.5.2. - Analyse topographique du transfert de forme sur le papier

Une analyse topographique du transfert de forme a été effectuée sur les différents papiers calandrés. Dans cette partie, les résultats obtenus à partir du papier F (cf Tableau 2.6) calandré à une température du rouleau de 100°C, une vitesse de 200 tr/min et une force linéique de 100 kN/m sauf indication contraire seront présentés.

3.5.2.1. - Empreinte carbone en dynamique

Des empreintes en dynamique ont été réalisées aux différentes forces linéiques en utilisant du papier carbone. La température du rouleau était de 25°C. La Figure 3. 37 présente une empreinte carbone du quadrillage sur le papier F calandré à 250 kN/m. Cette empreinte et d’autres obtenues à différentes forces linéiques montrent qu’aucune pression n’est exercée sur le papier dans les cavités du quadrillage et ceci quelles que soient les conditions de calandrage et le papier testé. Ce résultat n’est guère étonnant compte tenu de la profondeur importante (1mm) des lignes et des colonnes.

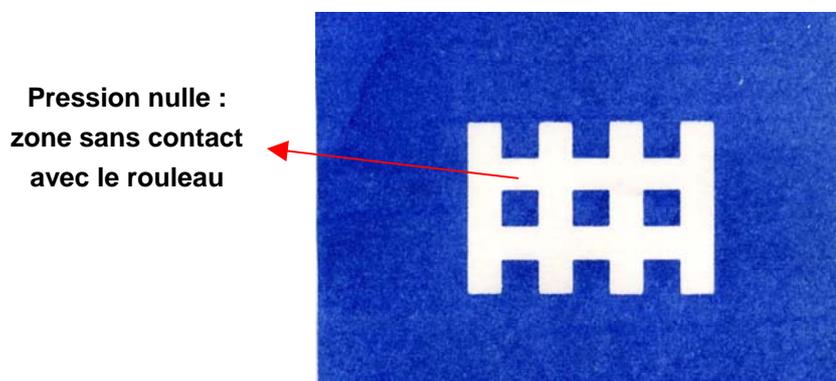


Figure 3. 37 : Empreinte carbone du quadrillage (profondeur 1mm) sur le papier F calandré à une force linéique de 250 kN/m et une vitesse de 200 tr/min – Dimension totale : 75 x 55 mm

La Figure 3. 38 présente les empreintes carbonées du disque de profondeur $27\ \mu\text{m}$ sur le papier F calandré à différentes forces linéiques. Les images montrent tout d'abord, que plus la force linéique est élevée, plus l'intensité de bleu du carbone est importante. Par ailleurs, le disque apparaît nettement, avec une intensité plus faible, ce qui traduit une diminution de la pression appliquée dans cette zone. Ceci est d'autant plus visible que la profondeur du disque est plus importante. Nous pouvons également noter, au regard de l'intensité de bleu imprimé par le carbone, que l'écart de pression entre le disque et l'extérieur de cette zone diminue avec l'augmentation de la force linéique.

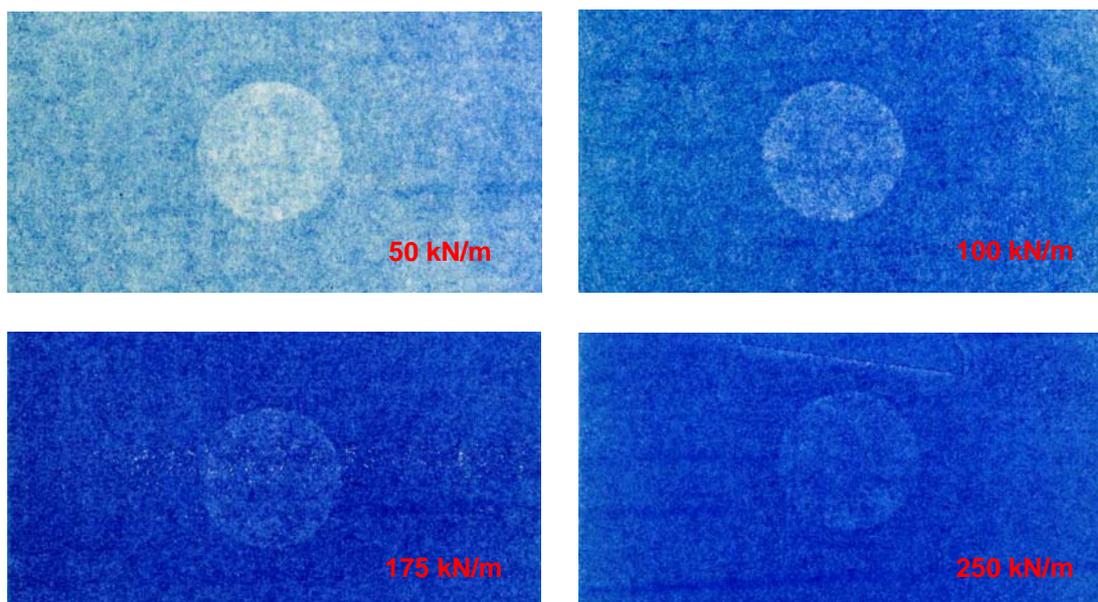


Figure 3. 38 : Empreintes carbonées du disque de profondeur $27\ \mu\text{m}$ sur le papier F calandré à différentes forces linéiques et une vitesse de $200\ \text{tr/min}$ (à froid) – Dimension totale : $75 \times 40\ \text{mm}$

3.5.2.2. - Profil de rugosité (Perthemeter)

Un rugosimètre (Perthemeter M2) a été utilisé pour réaliser des profils de rugosité dans les différentes zones des papiers calandrés. Les profils de rugosité ont été mesurés sur une longueur de $12,5\ \text{mm}$. L'appareil ajuste l'échelle de hauteur en fonction de la rugosité de l'échantillon. La Figure 3. 39 et la Figure 3. 40 présentent respectivement les profils de rugosité obtenus sur le bord d'un disque et dans la zone de quadrillage du papier F. Ces profils mettent en évidence le transfert des formes géométriques sur la surface du papier par des effets de bord (changement abrupt de hauteur). Il est par contre difficile de mettre en évidence de cette manière une épaisseur plus importante dans les zones où la contrainte est plus faible, voir nulle. Nous observons toutefois sur la Figure 3. 40, une rugosité plus importante dans la zone sans contact avec le rouleau.

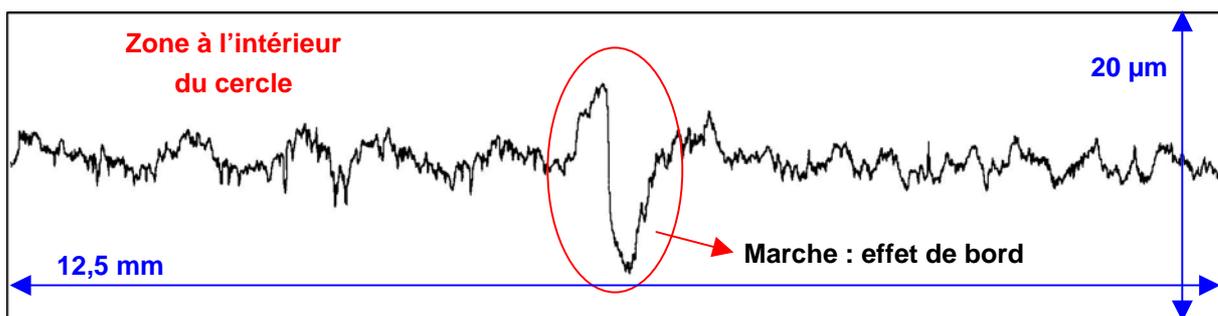


Figure 3. 39 : Profil de rugosité sur le papier F dans la zone du disque de profondeur $27\ \mu\text{m}$ (Perthometer) – Température du rouleau métallique : 100°C – Force linéique : $100\ \text{kN/m}$ – Vitesse de calandrage : $200\ \text{tr/min}$



Figure 3. 40 : Profil de rugosité sur le papier F dans la zone de quadrillage (Perthometer) – Condition de calandrage : cf Figure 3. 39

3.5.2.3. - Topographie de la surface (Topo3D)

L'appareil de Topo3D a également été utilisé pour analyser la surface des papiers calandrés. La Figure 3. 41 et la Figure 3. 43 représentent respectivement la surface du papier au niveau du disque et du quadrillage. La Figure 3. 42 et la Figure 3. 44 correspondent aux profils de rugosité des deux zones analysées. La topographie des papiers calandrés et les profils au niveau du disque ou du quadrillage montrent clairement un changement abrupt d'altitude : Une marche d'environ $10\ \mu\text{m}$ est mesurable entre la zone du disque et la zone sans forme géométrique et une marche, supérieure à la précédente, d'environ $20\text{-}25\ \mu\text{m}$ est présente dans la zone du quadrillage. Cette différence d'altitude entre les deux marches est normal en raison de la différence de l'écart de pression appliquée (cf différence d'intensité de bleu sur la Figure 3. 37 et sur la Figure 3. 38).

Le transfert des écarts de forme du rouleau au papier est donc mis en évidence sur le contour des formes géométriques. La surface analysée par le Topo3D ($1,4\ \text{mm} \times 1\ \text{mm}$) correspond aux dimensions des perturbations observées sur les profils du rugosimètre Perthometer au niveau des effets de bord (Figure 3. 39 et Figure 3. 40). Par ailleurs, le profil du Topo3D dans la zone du quadrillage (Figure 3. 44) montre une augmentation de l'altitude à l'intérieur de la zone la plus comprimée. Nous pouvons également remarquer que sur les images où l'épaisseur est la plus faible (bleu) apparaissent des lignes qui sont dans le sens de calandrage. Ces lignes proviennent des stries de la surface du rouleau métallique qui se sont transférées sur la surface du papier. Nous reviendrons dans le chapitre 4 sur ce transfert de l'état de surface du rouleau sur le papier.

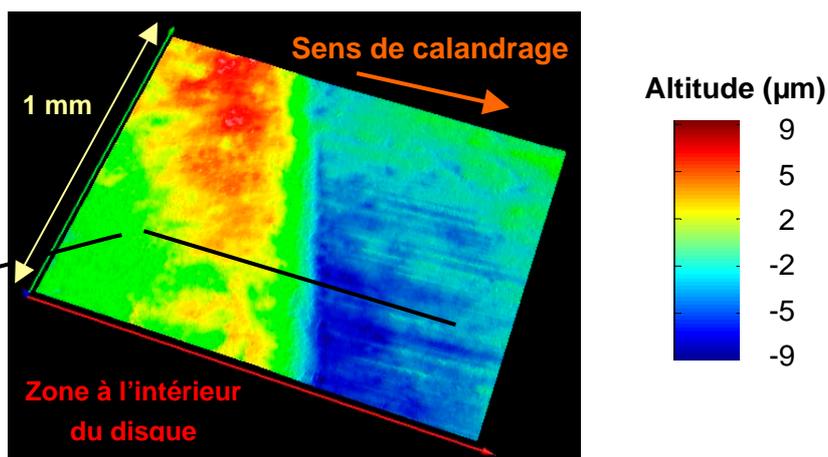


Figure 3. 41 : Topographie du papier F dans la zone du disque de profondeur $27\ \mu\text{m}$ – Vue 3D (Topo3D) – Dimension de la zone analysée : $1,4 \times 1\ \text{mm}$ – Température du rouleau métallique : 100°C – Force linéique : $100\ \text{kN/m}$ – Vitesse de calendrage : $200\ \text{tr/min}$

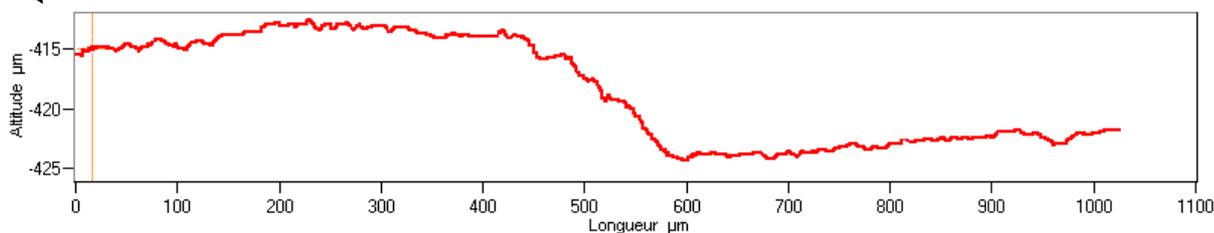


Figure 3. 42 : Profil du papier F de part et d'autre de la zone du disque – Figure 3. 41

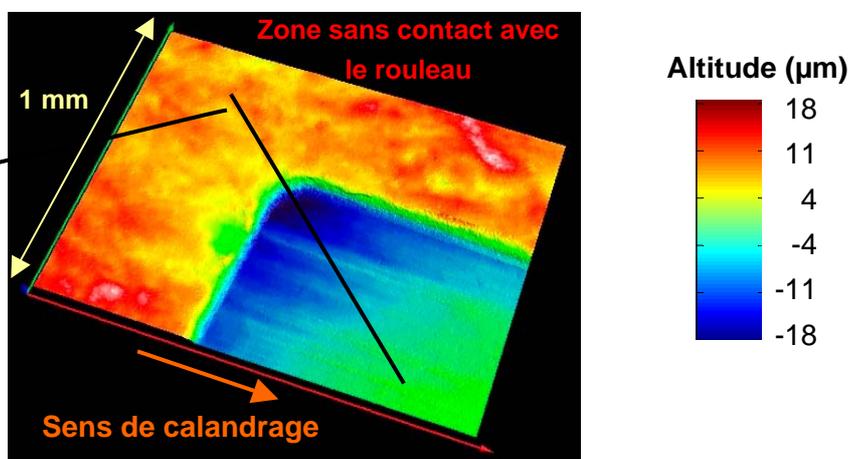


Figure 3. 43 : Topographie du papier F dans la zone du quadrillage - Vue 3D (Topo3D) – Dimension de la zone analysée : $1,4 \times 1\ \text{mm}$ – Conditions de calendrage : Figure 3. 41

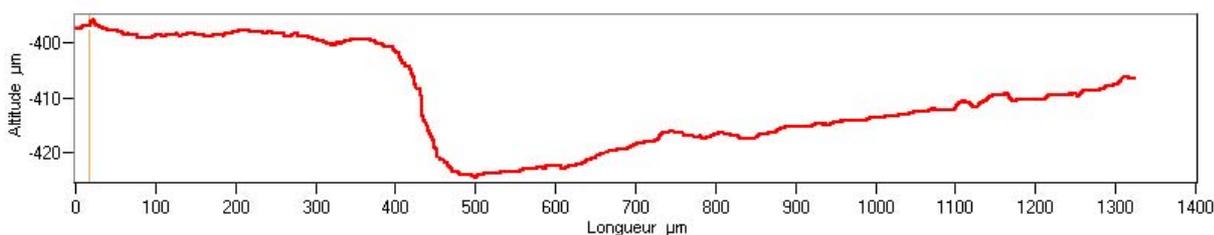


Figure 3. 44 : Profil du papier F sur la zone du quadrillage – Figure 3. 43

Plus récemment, une nouvelle fonction a été développée sur le Topo3D permettant d'acquérir plusieurs images et de les recoller les unes aux autres. Quelques observations ont donc été réalisées sur les papiers calandrés afin d'analyser des surfaces de plus grandes dimensions. La Figure 3. 45 et la Figure 3. 47 présentent les topographies obtenues au niveau du quadrillage dans des zones en contact et sans contact avec le rouleau. La Figure 3. 46 et la Figure 3. 48 correspondent aux profils. Les images présentées n'ont subi aucun traitement dans le plan (x, y) de la zone analysée. Une fonction du Topo3D permet de remettre à plat un échantillon incliné, mais dans notre cas, la marche due au transfert de forme sur le papier perturbe la correction. Par contre, dans le sens z (épaisseur du papier), l'échelle a été dilatée d'un facteur 5. Ce traitement d'image joue sur la visualisation en 3D de la surface du papier. La marche au niveau du quadrillage notamment apparaît de manière plus évidente. Par contre, les niveaux d'altitude et les couleurs correspondantes restent inchangés.

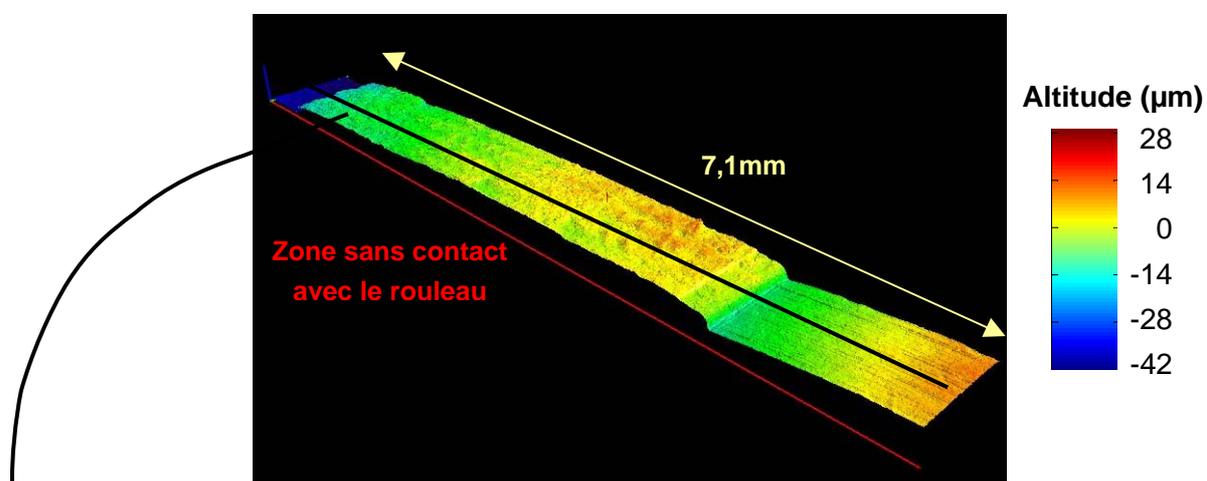


Figure 3. 45 : Topographie du papier F dans la zone du quadrillage (zone sans contact avec le rouleau) - Vue 3D (Multi acquisition au Topo3D) – Dimension : 7,1 x 0,8 mm

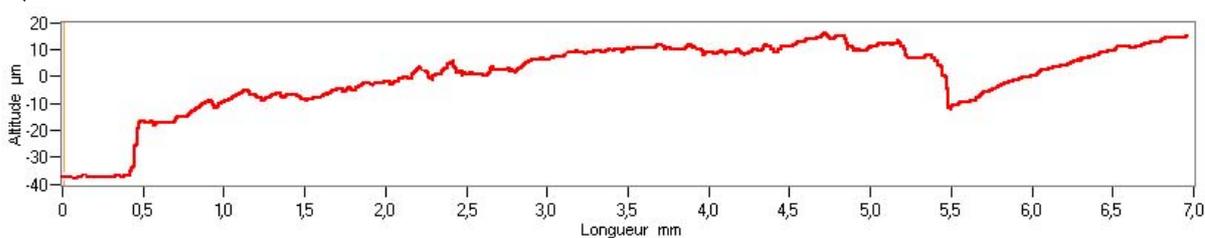


Figure 3. 46 : Profil du papier F sur la zone du quadrillage en contact sans le rouleau

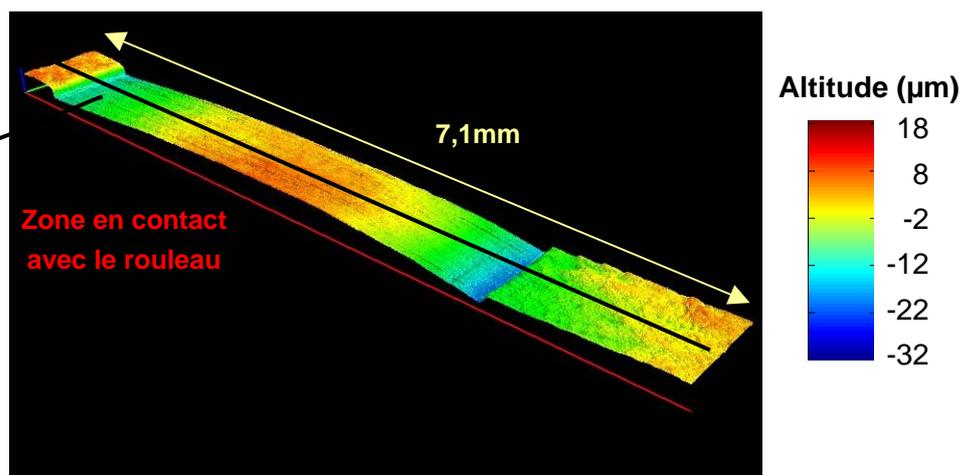


Figure 3. 47 : Topographie du papier F dans la zone du quadrillage (zone en contact avec le rouleau) - Vue 3D (Multi acquisition au Topo3D) – Dimension : 7,1 x 0,8 mm

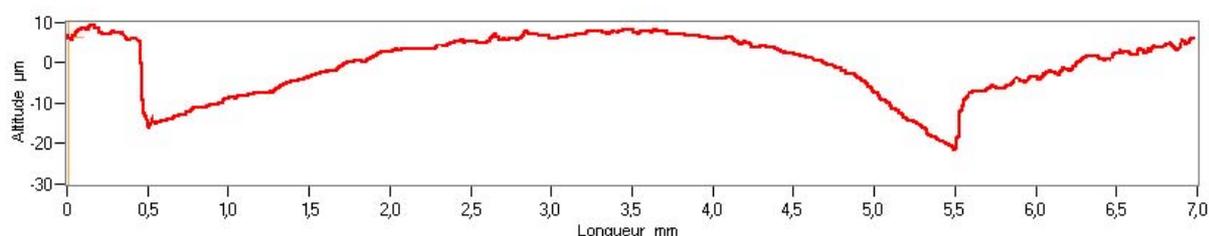


Figure 3. 48 : Profil du papier F sur la zone du quadrillage en contact avec le rouleau

Les images et les profils montrent un parfait transfert des formes au niveau des dimensions géométriques sur la surface du papier. L'espacement de 5 mm entre les lignes et les colonnes du quadrillage est reproduit sur les papiers. Par ailleurs, l'épaisseur des papiers dans les zones où la contrainte est plus faible, semble plus importante. Cependant, il est difficile d'en être certain au niveau du disque car celui-ci ne peut pas être analysé entièrement. Pour le quadrillage, la Figure 3. 48 montre un profil bombé dans la zone en contact avec le rouleau.

On peut donc s'interroger sur les résultats obtenus :

- Le transfert de forme apparaît-il uniquement par les effets de bord, en raison notamment du bombé dans la zone comprimée du quadrillage ?
- Le temps écoulé ou les variations d'humidité et de température entre les essais de calandrage et les acquisitions multiples des images sous Topo3D ont-ils permis au papier une recouvrance élastique plus importante ?

3.5.2.4. - Mesure de l'épaisseur du papier au micromètre

Les différentes techniques utilisées, présentant la topographie des papiers n'ont pas permis de déterminer l'épaisseur dans les différentes zones. Des mesures au micromètre ont donc été réalisées sur les feuilles calandrées en contact avec les 5 zones du rouleau : les 3 disques de profondeur différente, le quadrillage et la zone sans forme. Une pression de 100 kPa est appliquée sur une surface circulaire du papier de diamètre 17 mm, ce qui est inférieur aux diamètres des disques sur le papier. Par contre, la mesure sur le quadrillage a été réalisée dans une zone d'épaisseur inhomogène. La pression appliquée est en outre plus importante. Dix mesures par zone et par feuille calandree ont été réalisées pour chaque

condition présentée dans la partie 3.5.1. -. La Figure 3. 49 présente les épaisseurs moyennes et les écart types dans les 5 zones du papier F.

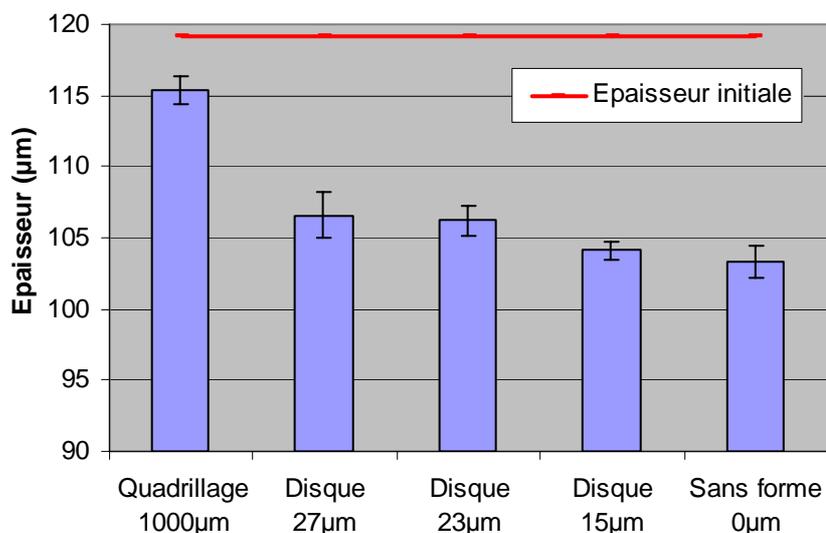


Figure 3. 49 : Mesure d'épaisseur au micromètre dans les 5 zones du papier F – Calandrage réalisé à une vitesse de 200 tr/min, une charge linéique de 100 kN/m et une température du rouleau de 100°C

Les valeurs montrent que les épaisseurs des différentes zones sont inférieures à l'épaisseur initiale du papier et que plus la forme géométrique sur le rouleau est profonde, plus l'épaisseur du papier est importante. Au niveau du quadrillage, l'épaisseur mesurée est peut être sous estimée en raison de la pression plus importante appliquée par le micromètre. Par ailleurs, nous observons que les différences d'épaisseur (marche) entre la zone sans forme géométrique et la zone du quadrillage ou du disque de profondeur 27 µm (respectivement 12 et 3 µm) sont plus faibles que celles observées sur les profils (Figure 3. 42 et Figure 3. 44). Un effet de poinçonnement avec une contrainte localement plus forte est sans doute présent, ce qui engendre une hétérogénéité probable d'épaisseur du papier au niveau de la forme. Cette déduction est en accord avec les observations en multi acquisition effectuées au Topo3D (profil bombé). Ces mesures d'épaisseur permettent de déterminer la déformation plastique moyenne dans chaque zone.

3.5.3. - Application à l'étude du comportement mécanique du papier

Comme nous venons de le voir, la déformation du papier au niveau des formes géométriques peut être déterminée à partir des mesures d'épaisseur au micromètre. L'évaluation de la contrainte peut se faire de deux manières : à partir des empreintes carbonées sur le papier en faisant des courbes d'étalonnage et en analysant les niveaux de couleur ou à partir d'un calcul se basant sur le modèle de fondation ([Johnson, 1985]).

3.5.3.1. - Détermination de la contrainte au niveau des formes géométriques

L'objectif de cette partie est de déterminer la contrainte au niveau des formes géométriques. Pour cela, nous allons construire à partir des observations de largeur de nip (cf Figure 3. 20) un modèle de pression de contact. L'analyse du modèle de fondation dans

le cas d'un contact bi-dimensionnel avec la largeur des rouleaux grande devant la largeur de nip, donne :

$$p(x) = \frac{K}{2R_{eq}e} \left(\left(\frac{l_{nip}}{2} \right)^2 - x^2 \right) \quad \text{Équation 3. 2}$$

Avec $p(x)$ la pression dans le nip, K le module élastique de la fondation (le papier), e l'épaisseur du papier, l_{nip} la largeur du nip et R_{eq} le rayon équivalent des rouleaux (R_1 et R_2) calculé à partir de l'Équation 3. 3 :

$$R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad \text{Équation 3. 3}$$

On obtient donc au centre du nip :

$$p(0) = p_{max} = \frac{K}{e} \frac{\left(\frac{l_{nip}}{2} \right)^2}{2R_{eq}} \quad \text{Équation 3. 4}$$

En comparant l'Équation 3. 4 et l'équation correspondante de Hertz (Equation 1.2), un ajustement peut être obtenu ([Johnson, 1985]), si on choisit :

$$\frac{K}{e} = 1,18 \frac{E_{eq}}{\frac{l_{nip}}{2}} \quad \text{Équation 3. 5}$$

L'Équation 3. 4 devient alors :

$$p_{max} = 1,18 \frac{E_{eq}}{\frac{l_{nip}}{2}} \frac{\left(\frac{l_{nip}}{2} \right)^2}{2R_{eq}} \quad \text{Équation 3. 6}$$

Le rouleau métallique a un rayon de 85 mm et le rouleau polymère de 95 mm. D'après l'Équation 3. 3, le rayon équivalent est égal à 45 mm. Le module équivalent peut être estimé à 3,4 GPa à partir de l'Equation 2.34 en prenant pour le rouleau métallique, un module de 200 GPa et un coefficient de Poisson de 0,3 ; et pour le rouleau polymère, un module 3 GPa et un coefficient de Poisson de 0,37.

La Figure 3. 50 présente la pression maximale au centre du nip en fonction de la force linéique obtenue pour le papier pré-couché et le papier F par les trois méthodes suivantes :

- « Hertz » : la pression maximale est calculée à partir de l'Equation 1.2 en utilisant l'Equation 1.1 pour déterminer la largeur du nip.
- « Empirique » : la pression maximale est également déterminée à partir de l'Equation 1.2, mais en utilisant la largeur du nip mesurée à partir des empreintes carbonées en statique (Figure 3. 20). C'est la raison pour laquelle les courbes empiriques diffèrent suivant les papiers et que les pressions sont plus faibles que celle calculée par la formule de Hertz.

- « Fondation » : la pression maximale est évaluée à partir de l'Équation 3. 6 en utilisant la largeur du nip mesurée à partir des empreintes carbones en statique. Les courbes diffèrent donc également en fonction des papiers.

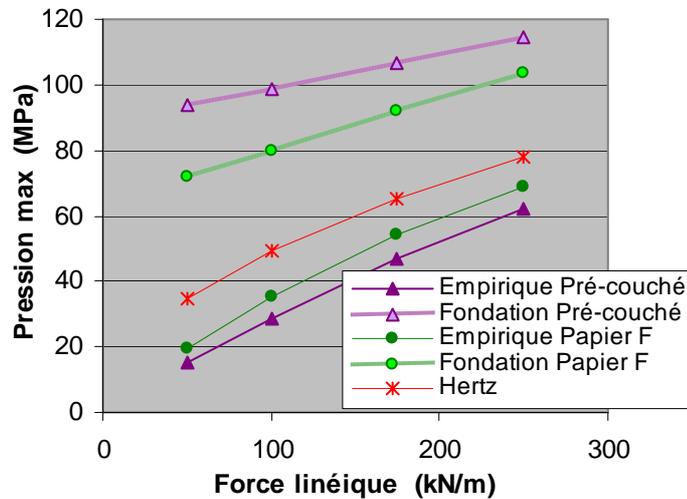


Figure 3. 50 : Pression maximale au centre du nip en fonction de la force linéique obtenue par différents calculs pour le papier pré-couché et le papier F – Essai sur la calandre pilote

La méthode « Fondation » donne des pressions plus élevées que les deux autres méthodes. Par ailleurs, contrairement à la méthode « Empirique » qui montre une pression plus élevée sur le papier F (couché) par rapport au papier pré-couché, la méthode « Fondation » indique un comportement opposé. En effet, selon l'Équation 3. 6, la pression maximale est proportionnelle à la largeur du nip alors que c'est l'inverse pour l'Equation 1.2 (Hertz). Le choix de l'Équation 3. 5 n'apparaît donc pas valable pour ces essais.

Ainsi, nous proposons de reprendre l'Équation 3. 6 pour calculer un module moyen des deux rouleaux et du papier (E_m). Pour cela, la pression déterminée par la méthode empirique et la largeur du nip mesurée à partir des empreintes carbones en statique sont utilisées :

$$E_m = \frac{R_{eq} P_{max}}{l_{nip}} \quad \text{Équation 3. 7}$$

La partie : $\frac{\left(\frac{l_{nip}}{2}\right)^2}{2R_{eq}}$ de l'Équation 3. 6 correspond à la déflexion des rouleaux. Or, au niveau

des formes géométriques, il faut déduire la profondeur des formes ΔH de la déflexion des rouleaux, on aboutit donc à :

$$\text{Contraint e} = \frac{2E_m}{l_{nip}} \left[\frac{\left(\frac{l_{nip}}{2}\right)^2}{2R_{eq}} - \Delta H \right] \quad \text{Équation 3. 8}$$

Cette équation est valable à condition que la déformation des rouleaux soit supérieure à la profondeur des formes géométriques ; ce qui est le cas pour les trois disques mais pas pour le quadrillage. La Figure 3. 51 présente l'application de cette méthode pour déterminer la courbe contrainte / déformation du papier pré-couché.

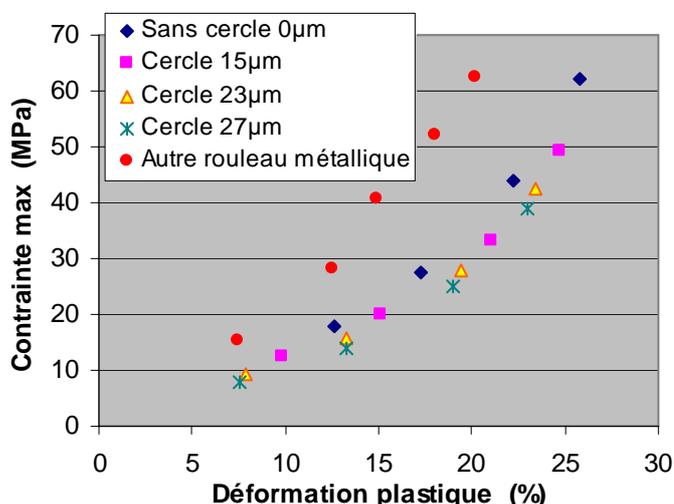


Figure 3. 51 : Application de la méthode basée sur le modèle de fondation pour déterminer la courbe contrainte / déformation du papier pré-couché – Vitesse de calandrage : 200 tr/min – Température du rouleau métallique : 100°C – Autre rouleau métallique : données

Figure 3. 26

La Figure 3. 51 montre que les courbes contrainte / déformation obtenues pour chaque disque sont très proches, ce qui valide la méthode de détermination de la contrainte. Il s'agit d'une méthode approchée car nous pouvons constater que la déformation dans une zone sans forme géométrique apparaît légèrement plus faible que celle mesurée au niveau des disques, pour une même contrainte.

Par contre, les courbes obtenues avec le rouleau métallique ayant les formes géométriques ne se superposent pas avec celle déterminée lors des essais avec un rouleau métallique lisse (autre rouleau métallique : données Figure 3. 26). Il semble donc difficile d'établir des comparaisons avec des essais réalisées dans d'autres configurations de nip. En effet, le rouleau métallique lisse n'a certainement pas les mêmes propriétés mécaniques que le rouleau avec les formes géométriques. D'autre part, les largeurs de nip utilisées pour calculer la contrainte, n'ont pas été mesurées avec le rouleau ayant les formes géométriques mais avec le rouleau ayant une surface lisse.

La méthode utilisée apparaît donc pertinente dans la configuration d'essai avec le rouleau ayant les formes géométriques. Elle est appliquée pour caractériser l'influence de la vitesse et le type de papier sur le comportement mécanique. Notons toutefois que la valeur « brute » de contrainte calculée doit être prise avec certaines précautions car elle apparaît sous-évaluée par rapport aux essais utilisant le rouleau métallique lisse.

3.5.3.2. - Influence de la vitesse de calandrage

Différents essais de calandrage ont été réalisés à une vitesse de 200, 400 et 600 tr/min, à une température du rouleau métallique de 100°C et à plusieurs forces linéiques.

La Figure 3. 52 présente la déformation plastique du papier pré-couché dans les différentes zones pour une force linéique de 100 kN/m.

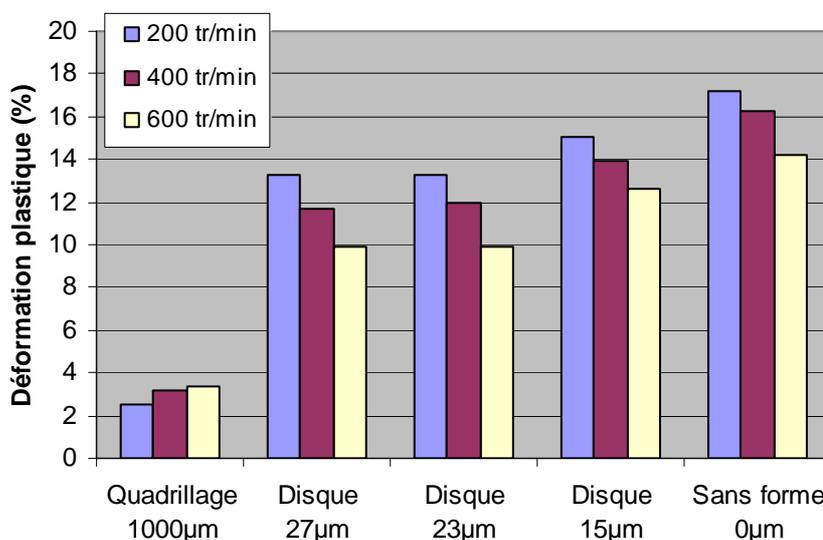


Figure 3. 52 : Influence de la vitesse de calandrage sur le déformation du papier pré-couché dans les 5 zones – Température du rouleau métallique : 100°C – Force linéique : 100 kN/m

Les résultats montrent, pour les zones des disques ou en l'absence de forme, c'est à dire les zones où une contrainte est appliquée sur le papier, que plus la vitesse de calandrage est élevée, plus la déformation plastique est faible. Ce constat rejoint les résultats obtenus avec les essais de laboratoire de compression ou ceux de Feygin ([Feygin, 1999]) présentés dans la partie 1.3.3.1 : Plus le papier est sollicité rapidement, plus la déformation plastique pour une contrainte donnée est faible.

Au niveau des cavités du quadrillage, aucune contrainte n'est appliquée sur le papier. Cependant, il semble que la vitesse de calandrage a une influence opposée par rapport à celle dans les zones des disques : plus la vitesse est grande, plus la déformation plastique est élevée. L'espacement entre les lignes et les colonnes du quadrillage est de seulement 5 mm. D'autre part, la feuille de papier a une tenue mécanique dans le plan qui est assurée en partie par l'enchevêtrement des fibres. Ainsi, la compression du papier dans les zones du quadrillage où une contrainte est appliquée, entraîne certainement une faible compression au bord de la zone où aucune contrainte n'est exercée, en raison de l'enchevêtrement des fibres. Il semble donc que plus la vitesse de calandrage est importante, plus la compression au bord de la zone où aucune contrainte n'est exercée, est importante.

La Figure 3. 53 présente les courbes de contrainte / déformation du papier pré-couché dans les zones où une pression est exercée pour les différentes vitesses. Nous constatons comme sur la Figure 3. 52 que la déformation plastique du papier augmente lorsque la vitesse diminue, à contrainte imposée. Ce résultat confirme celui obtenu à partir de la ré-interprétation des essais de compression réalisés par Feygin ([Feygin, 1999]) (partie 2.1.4) et celui obtenu à partir des essais de compression de laboratoire (partie 2.5.5) : Plus le papier est sollicité rapidement, plus il est difficile de le déformer.

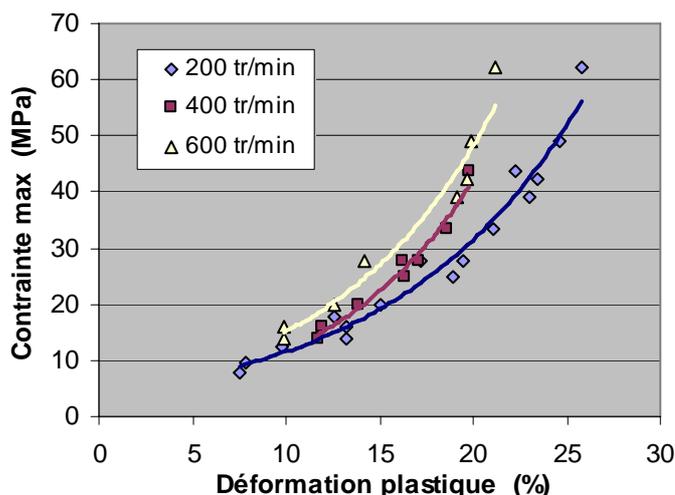


Figure 3. 53 : Courbes de contrainte / déformation pour trois vitesses de calandrage pour le papier pré-couché déduite des essais avec le rouleau métallique gravé de disques –
Température du rouleau : 100°C

3.5.3.3. - Influence du papier

La Figure 3. 54 présente les courbes de contrainte / déformation pour les trois papiers testés avec le rouleau gravé de disques : le papier pré-couché (106 μm), le papier F (120 μm) et le papier G (391 μm). La comparaison des courbes entre le papier pré-couché et le papier F montre une déformation plus importante du papier pré-couché par rapport au papier F pour une même contrainte. Ce résultat rejoint celui obtenu en essai de compression de laboratoire (en statique : Figure 2.81 ou dynamique : Figure 2.83) et celui déterminé lors des essais de calandrage (Figure 3. 26). Par ailleurs, les essais sur le papier G montre une déformation beaucoup plus importante que sur les deux autres papiers. Ce comportement a également été observé dans l'essai de compression quasi-statique (présenté en annexe 6).

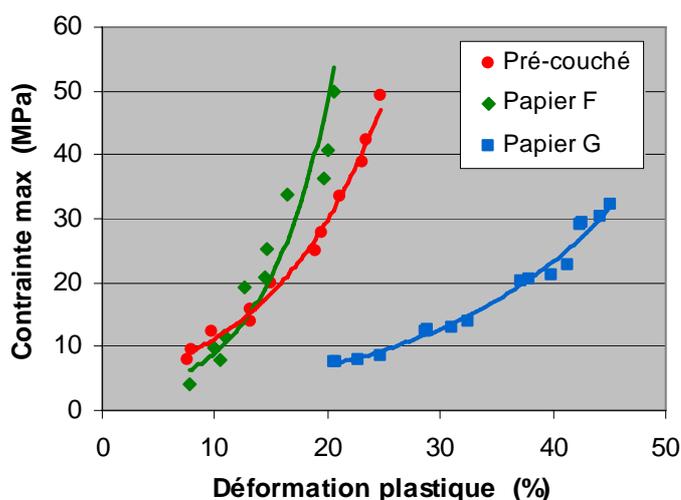


Figure 3. 54 : Courbes de contrainte / déformation pour les différents papiers – Température du rouleau : 100°C – Vitesse de calandrage : 200 tr/min