



HAL
open science

Étude mécanique et physico-chimique du contact rouleau - papier lors du calandrage

Eric Tourette

► **To cite this version:**

Eric Tourette. Étude mécanique et physico-chimique du contact rouleau - papier lors du calandrage. Mécanique [physics.med-ph]. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2007. Français. NNT : 2007ENMP1510 . tel-00359998

HAL Id: tel-00359998

<https://pastel.hal.science/tel-00359998>

Submitted on 10 Feb 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une convention CIFRE entre le Centre de Mise en Forme des Matériaux de l'Ecole des Mines de Paris et le Centre Technique du Papier. Je remercie donc en premier les directions de ces deux centres de recherche qui m'ont fait confiance pour réaliser ce travail de thèse.

Je tiens à remercier tout particulièrement mes deux directeurs de thèse, Evelyne Darcque-Ceretti et Eric Felder, pour la qualité de leur encadrement scientifique et pour nos échanges qui ont su enrichir ce travail.

J'adresse aussi mes remerciements à mon encadrant industriel, David Guérin, qui m'a fait connaître un nouveau matériau, le papier, qui m'a accompagné et guidé au cours de ces trois années. Je remercie également tous les partenaires industriels qui ont participé au projet PROCAL.

Je remercie encore une fois, les membres du jury, Gérard Béranger, Jean-Louis Auriault, Didier Chaussy et Denis Bertrand, d'avoir accepté d'évaluer mon travail et d'y avoir apporté leurs commentaires.

J'adresse également mes remerciements à toutes les personnes qui ont contribué à l'avancement de ces travaux, tout d'abord à Sophia-antipolis, puis à Grenoble :

Je pense aux membres du groupe SET, Pierre Montmitonnet, Monique Repoux, Bernard Monasse ; aux personnes de l'atelier qui m'ont beaucoup apporté dans la réalisation des essais de laboratoire, entre autres, Alain le Floch, Francis, Simon, Marc ; mais aussi à Marie-françoise et sylvie pour tous les services rendus au quotidien.

Mes remerciements vont ensuite aux membres de l'UST 8 du CTP qui m'ont accueilli chaleureusement, Florence, Priscilla, Bernard, Laurent, Philippe et pour finir Franck qui m'a initié au calandrage ; je pense également à Véronique Morin, Davy Soysouvanh, Sylvie Combaz, Annie Coupat et Joan Thomas.

Je remercie également toutes les personnes que j'ai cotoyé au cours de ces trois années et qui ont égayé mon travail au quotidien : que ce soit au CEMEF ou au CTP, dans un couloir, à la cantine ou sur un terrain de volley. Et puis un grand merci à mes amis : Céline, ma binome d'école et Aurélien, Mike, Mathias, Olive, Manu et tous les autres.

Je tiens à remercier mes parents, mon frère et ma famille au sens large qui m'ont soutenu dans ces nombreuses années d'étude. Enfin, je terminerai par adresser mes plus affectueux remerciements à Maud qui m'épaulé et m'encourage tous les jours.

Sommaire

Introduction	1
Chapitre 1. - Revue bibliographique	3
1.1. - Le papier	5
1.1.1. - La fabrication.....	5
1.1.2. - La structure	7
1.1.3. - Les propriétés	8
1.1.4. - Le couchage.....	10
1.2. - Le calandrage.....	12
1.2.1. - Généralités.....	12
1.2.2. - Les rouleaux d'une calandre	13
1.2.3. - Approche mécanique d'un nip de calandre.....	13
1.2.4. - Les paramètres de calandrage et leur influence sur le papier	16
1.2.5. - Les types de calandres et leur influence sur le papier	18
1.3. - Modélisation du comportement mécanique du papier dans le nip.....	20
1.3.1. - Modèles empiriques	20
1.3.2. - Modèles phénoménologiques	22
1.3.3. - Modèles rhéologiques	24
1.3.4. - Limites des modèles	30
1.3.5. - Conclusion	31
1.4. - Calandrage des papiers couchés.....	31
1.4.1. - Déformation de la couche	31
1.4.2. - Interaction rouleau / papier et encrassement des rouleaux	33
1.4.3. - Etude de l'influence du latex des couches sur la formation de dépôt sur les rouleaux.....	34
1.4.4. - Technique de détection des dépôts sur les rouleaux.....	36
1.4.5. - Conclusion	37
1.5. - Conclusion	37
Chapitre 2. - Etude du comportement mécanique des papiers en compression à partir d'essais d'indentation sphérique de feuilles de papier	39
2.1. - Essai d'indentation sphérique d'un film mince compressible	41
2.1.1. - Principe et analogie avec le calandrage	41
2.1.2. - Analyse de la déformation du papier lors de la pénétration et estimation des caractéristiques rhéologiques du papier.....	43
2.1.3. - Etude de la décharge	45
2.1.4. - Détermination des grandeurs mécaniques à partir de données issues de la littérature	47
2.2. - Compression quasi-statique.....	48
2.2.1. - Présentation de l'essai et de son principe.....	48

2.2.2. - Interprétation de l'essai	49
2.2.3. - Répétabilité de l'essai.....	51
2.2.4. - Influence du rayon de la bille sur les grandeurs déterminées	52
2.2.5. - Influence du nombre de feuilles sur les grandeurs déterminées	52
2.3. - Compression dynamique par chute de bille.....	54
2.3.1. - Présentation de l'essai et de son principe	54
2.3.2. - Interprétation de l'essai de chute de bille	54
2.3.3. - Exemple d'analyse de chute de bille sur papier	56
2.3.4. - Vérification des vitesses d'impact et de rebond à l'aide de la caméra rapide ..	67
2.3.5. - Vérification des grandeurs calculées par un essai de chute de bille sur un échantillon d'aluminium	68
2.3.6. - Influence des conditions d'essai sur les grandeurs déterminées	71
2.4. - Application à l'étude du comportement mécanique d'une bille élastomère	77
2.4.1. - Compression d'une bille élastomère	77
2.4.2. - Compression de la bille élastomère en dynamique.....	79
2.5. - Application à l'étude du comportement mécanique des papiers.....	80
2.5.1. - Influence de la nature pâte	80
2.5.2. - Influence de la teneur en charges	83
2.5.3. - Influence de la densité initiale du papier	84
2.5.4. - Influence de la couche.....	87
2.5.5. - Influence de la vitesse de sollicitation	92
2.5.6. - Conclusions sur le comportement mécanique des papiers	93

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

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
3.4.5. - Conclusions sur l'influence des différents paramètres sur le comportement mécanique du papier	120
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
3.5.3. - Application à l'étude du comportement mécanique du papier.....	129

3.5.4. - Conclusion	135
Chapitre 4. - Etude du contact rouleau – papier lors du calandrage	137
4.1. - Etude de l'adhésion rouleau – papier	139
4.1.1. - Essai de roulement sur le plan incliné.....	139
4.1.2. - Essai de calandrage.....	150
4.1.3. - Conclusions sur l'étude d'adhésion rouleau / papier.....	153
4.2. - Optimisation des conditions de calandrage pour un meilleur compromis qualité de surface / compression du papier	154
4.2.1. - Description de l'étude.....	154
4.2.2. - Influence du nombre de nips	155
4.2.3. - Influence de la force linéique	158
4.2.4. - Influence de la température du rouleau métallique	160
4.2.5. - Condition la plus critique	161
4.2.6. - Conclusions sur l'optimisation des conditions de calandrage	162
4.3. - Transfert de l'état de surface des rouleaux au papier.....	165
4.3.1. - Description de l'étude.....	166
4.3.2. - Etude de la topographie des papiers calandrés.....	168
4.3.3. - Influence des conditions de calandrage sur le brillant Gardner des papiers...	171
4.3.4. - Conclusions sur le transfert de rugosité	176
Chapitre 5. - Synthèse.....	177
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
Conclusion générale et perspectives	193
Références bibliographiques	195
Glossaire des termes papetiers	201
Nomenclature	205
Annexes	207

Introduction

La découverte du papier est généralement située en Chine en l'an 105 après J.C. La pâte à papier était fabriquée à partir de vieux chiffons, d'écorces et de filets réduits en bouillie. Pour voir apparaître en France les premiers documents d'archives écrits sur papier, il faut attendre le 13^{ème} siècle. La première machine à papier en continu fut inventée en 1799, ce qui permit de produire plus de papier et à moindre coût. L'industrialisation massive débuta en Europe et aux Etats Unis vers 1825, jusqu'à atteindre de nos jours une consommation mondiale de papiers et de cartons de 350 millions de tonnes ([Cepi, 2005]). Les papetiers disposent de deux procédés de finition pour améliorer la qualité d'impression de leurs papiers :

- Le couchage qui consiste à déposer une sauce constituée principalement de pigments, d'eau, de liant et d'adjuvants sur l'une ou les deux faces d'un papier support. Cette opération modifie la composition superficielle et la rugosité du papier.
- Le calandrage qui intervient en fin de fabrication du papier, souvent après l'opération de couchage. Il s'agit d'un traitement mécanique du papier : la bande de papier est comprimée entre au moins deux rouleaux qui peuvent être chauffés, sous une forte pression (quelques dizaines de MPa) et pendant un temps très court (généralement inférieur à 1 ms). L'objectif principal du calandrage est d'améliorer la qualité de surface des papiers pour leur donner les caractéristiques requises avant l'impression. Cependant, cette opération entraîne également des modifications de la structure (réduction d'épaisseur, de porosité) et des propriétés mécaniques.

Notre étude porte sur la compréhension des phénomènes mécaniques et physico-chimiques du contact rouleau / papier dans un nip de calandre, à savoir la zone d'emprise entre les deux rouleaux. Les sortes de papiers étudiées sont les papiers à usage graphique pour impression – écriture.

Les études de ces vingt dernières années ont permis aux fabricants de calandre d'améliorer leurs matériels et ainsi d'augmenter les vitesses de calandrage (allant de nos jours régulièrement jusqu'à 25 – 30 m/s). Ces développements sont dus à une meilleure compréhension des mécanismes de calandrage. La littérature fournit beaucoup d'études descriptives qui présentent l'évolution des propriétés du papier en fonction du calandrage, mais il existe assez peu d'études permettant une véritable compréhension des phénomènes mis en jeu dans un nip de calandre. La détermination d'une relation contrainte / déformation dans un nip de calandre est difficile mais devient une nécessité pour améliorer la connaissance du procédé. De plus, les travaux de recherche réalisés sur le comportement mécanique du papier ont principalement porté sur des papiers non couchés. Il est donc important de travailler sur différents types de papier d'impression – écriture (couché, non couché, nature de la pâte à papier).

L'augmentation de la vitesse de calandrage et la perte d'efficacité qui en découle est généralement compensée par une augmentation de la température des rouleaux. De ce fait, des phénomènes d'encrassement des rouleaux de la calandre sont de plus en plus reportés par les papetiers, ce qui d'une part, nuit à la qualité de surface des papiers et d'autre part oblige à arrêter les machines pour nettoyer ou changer les rouleaux. Une meilleure maîtrise

des phénomènes d'adhésion entre le rouleau et la surface du papier permettrait d'améliorer encore plus les caractéristiques de surface du papier. Enfin, la compréhension des caractéristiques de surface du papier et des caractéristiques de volume permettrait d'optimiser les conditions de calandrage et peut être, d'ouvrir la voie à de nouveaux développements de calandre.

Le premier chapitre est une revue bibliographie sur le papier, son élaboration et sur le calandrage. Les principaux modèles de comportement mécanique des papiers et les études sur le calandrage des papiers couchés, issus de la littérature, sont décrits. Le second chapitre porte sur le développement d'essais de laboratoire en vue de caractériser le comportement mécanique des papiers. Une application de ces essais à des papiers couchés et non couchés est présentée. Le troisième chapitre concerne également la caractérisation du comportement mécanique des papiers mais à partir d'essais de calandrage. Le quatrième chapitre se consacre aux interactions de surface entre le rouleau et le papier. Le cinquième et dernier chapitre est une synthèse du travail sur les deux grandes thématiques : comportement mécanique du papier et interactions de surface dans un nip de calandre. Le manuscrit se termine par une conclusion générale et propose des perspectives. Un glossaire des termes papetiers et des annexes sont également ajoutés, dont l'annexe 1 qui présente des tableaux récapitulatifs de tous les papiers utilisés.

Chapitre 1 : Revue bibliographique

1. - Revue bibliographique	5
1.1. - Le papier	5
1.1.1. - La fabrication.....	5
1.1.1.1. - L'élaboration de la pâte	5
1.1.1.2. - La transformation de la pâte en feuille	6
1.1.2. - La structure	7
1.1.3. - Les propriétés	8
1.1.4. - Le couchage.....	10
1.2. - Le calandrage.....	12
1.2.1. - Généralités	12
1.2.2. - Les rouleaux d'une calandre	13
1.2.3. - Approche mécanique d'un nip de calandre	13
1.2.4. - Les paramètres de calandrage et leur influence sur le papier	16
1.2.5. - Les types de calandres et leur influence sur le papier	18
1.3. - Modélisation du comportement mécanique du papier dans le nip.....	20
1.3.1. - Modèles empiriques	20
1.3.1.1. - Différentes approches menant à l'équation de calandrage	20
1.3.1.2. - Relation entre la déformation permanente et la déformation dans le nip ..	21
1.3.2. - Modèles phénoménologiques	22
1.3.2.1. - Reproduction de l'état de surface des rouleaux	22
1.3.2.2. - Concept de plasticité	22
1.3.2.3. - Relation comportement macroscopique / propriétés microscopiques	24
1.3.3. - Modèles rhéologiques	24
1.3.3.1. - Essais expérimentaux de compression	24
1.3.3.2. - Modèle viscoélastique	28
1.3.3.3. - Modèle viscoélastique non linéaire avec patin plastique	29
1.3.4. - Limites des modèles	30
1.3.5. - Conclusion	31
1.4. - Calandrage des papiers couchés.....	31
1.4.1. - Déformation de la couche	31
1.4.2. - Interaction rouleau / papier et encrassement des rouleaux	33
1.4.2.1. - Dépôt sur les rouleaux.....	33
1.4.2.2. - Altération de la couche des papiers	34
1.4.3. - Etude de l'influence du latex des couches sur la formation de dépôt sur les rouleaux.....	34
1.4.3.1. - Présentation des propriétés viscoélastiques des latex	34
1.4.3.2. - Evaluation des dépôts sur les rouleaux.....	35
1.4.4. - Technique de détection des dépôts sur les rouleaux	36
1.4.5. - Conclusion	37
1.5. - Conclusion	37

1. - Revue bibliographique

Ce premier chapitre de la thèse a pour but de présenter le matériau étudié : le papier, mais également les étapes de son élaboration pour arriver à l'opération qui nous intéresse plus particulièrement : le calandrage. Cette partie s'appuie sur les ouvrages de Vallette et de Choudens ([Vallette *et al.*, 1989]), Gullichsen, Paulapuro et Lehtinen ([Gullichsen *et al.*, 1999]) et Guérin ([Guérin, 2000]). Les deux dernières parties font le point sur les modèles mécaniques de comportement du papier dans un nip de calandre et sur le calandrage des papiers couchés.

1.1. - Le papier

Le papier est un matériau complexe produit en grande quantité et à grande vitesse. Il est composé de fibres cellulosiques dont la répartition assure les propriétés finales du produit.

1.1.1. - La fabrication

La fabrication du papier comporte deux opérations principales : l'élaboration de la pâte et la transformation de la pâte en feuille, ([Vallette *et al.*, 1989]).

1.1.1.1. - L'élaboration de la pâte

La première étape consiste à isoler les fibres du bois, tout en les dégradant le moins possible. Cette séparation peut être obtenue soit par des moyens mécaniques, soit par action de réactifs chimiques.

Le procédé mécanique consiste à désintégrer le bois. Il s'effectue à l'aide de meules pour les rondins et de défibreurs pour les copeaux. L'échauffement et l'action de frottement mécanique permettent de fractionner le bois en fibres, on parle alors de défibrage du bois. La pâte obtenue est assez grossière et très hétérogène (amas de fibres, bûchettes, fibres individualisés, éléments fins). Des étapes supplémentaires de classage et de raffinage permettent de produire des fibres avec des propriétés homogènes aptes à donner au papier les qualités requises à la production. Des traitements à la vapeur avant l'opération de défibrage sont effectués pour les pâtes thermomécaniques (TMP). Cela permet de ramollir la lignine du bois, facilitant ainsi la séparation des fibres. Dans le cas des pâtes chimiothermomécaniques (CTMP), des agents chimiques sont utilisés à une température supérieure à 100°C afin d'améliorer encore la séparation des fibres.

Le procédé chimique consiste à faire cuire le bois dans un réacteur appelé « lessiveur » avec une liqueur de cuisson (acide ou basique) à chaud (entre 130 et 180°C selon le procédé) et sous pression. Les réactions chimiques permettent d'éliminer les éléments non cellulosiques, en particulier la lignine et de séparer les fibres les unes des autres avec une action mécanique limitée. Ainsi, la pâte obtenue dite Kraft par le procédé basique (soude caustique et sulfures de sodium) présente d'excellentes propriétés mécaniques.

Il existe également des traitements mixtes qui combinent une action chimique et une action mécanique. Ces pâtes sont appelées mi-chimiques. Enfin, les pâtes recyclées sont également de plus en plus présentes sur le marché. Elles offrent des caractéristiques très variables en fonction de la matière première et du nombre de cycle de recyclage.

Les pâtes mécaniques sont appelées pâtes à haut rendement comparativement aux pâtes chimiques (cf Tableau 1.1). Par ailleurs, elles offrent une bonne opacité et une bonne aptitude au calandrage. Par contre, leurs caractéristiques mécaniques sont plus faibles que celles des pâtes chimiques et la présence de lignine engendre un jaunissement du papier après vieillissement à la lumière. Le Tableau 1.1 présente quelques caractéristiques des pâtes obtenues par un procédé mécanique ou chimique.

Pâte	Pâte de meule (sapin)	Pâte de défibreur (sapin)	Pâte thermo-mécanique (sapin)	Pâte chimico-thermo-mécanique (sapin)	Pâte Kraft – sulfate (pin maritime)
Longueur de rupture (km)	3,0	3,6	3,8	4,8	8,9
Indice de déchirement (mN/m ² /g)	3,5	6,5	8,0	9,0	12,0
Rendement (%)	95	95	93	90	49

Tableau 1.1 : Caractéristiques des pâtes obtenues par un procédé mécanique ou chimique ([Vallette et al., 1989])

La couleur des pâtes fabriquées par les procédés évoqués précédemment est différente. Selon leur utilisation, elles nécessitent un blanchiment plus ou moins prononcé. Par exemple, les papiers d'impression et d'écriture nécessitent une étape de blanchiment de la pâte. On distingue le blanchiment des pâtes mécaniques de celui des pâtes chimiques.

- Dans le cas des pâtes mécaniques, le principe consiste à dégrader par des agents oxydants ou réducteurs les groupements chromogènes de la lignine. Cependant, ce procédé s'inverse sous l'action de la lumière, ce qui cause le jaunissement des papiers (par exemple le papier journal).
- Dans le cas des pâtes chimiques, le principe consiste en une délignification complémentaire de celle effectuée lors de l'étape de cuisson, en évitant le plus possible la dégradation des éléments cellulosiques.

Les papiers sont produits par un mélange de différentes pâtes. D'après la norme NF Q 01-007, on distingue les papiers sans bois et avec bois. Les papiers sans bois contiennent moins de 5% de pâte mécanique, thermomécanique ou mi-chimique alors que les papiers avec bois en contiennent entre 40 à 70%.

1.1.1.2. - La transformation de la pâte en feuille

Les usines qui ne fabriquent pas leurs pâtes reçoivent de la pâte en balles. C'est le cas pour les pâtes CTMP et chimiques. La première opération de la fabrication de la feuille de papier est donc de mettre les fibres en suspension dans l'eau. La désintégration a pour but de désagréger la pâte jusqu'à l'obtention de fibres individualisées et hydratées. Cette étape est facilitée par le caractère hydrophile de la cellulose.

Ensuite, ces fibres sont raffinées afin d'obtenir les propriétés requises pour la formation de la feuille. Cette opération consiste à convoier la pâte entre deux disques en rotation

opposée, garnis de lames. Les fibres sont hydratées (gonflement et assouplissement de la fibre) et fibrillées (arrachement partiel de la paroi externe de la fibre entraînant une augmentation de la surface et donc de la possibilité de créer des liaisons inter-fibres). Ce traitement conduit également à une coupe des fibres cellulósiques, phénomène qui n'est pas forcément recherché. Enfin, la pâte est épurée, diluée pour diminuer sa concentration et des charges peuvent être ajoutées avant son arrivée sur la machine à papier.

Il existe plusieurs procédés de formation de la feuille, mais le principe reste identique : une suspension très diluée de pâte (2 à 4 grammes de fibres par litre d'eau) est déposée sur une toile au niveau de la caisse de tête. La suspension s'égoutte à travers la toile afin d'éliminer une certaine proportion d'eau. Le matelas fibreux supporté par un feutre entre ensuite dans la section des presses où l'action mécanique permet d'éliminer une quantité supplémentaire d'eau avant son entrée dans la sécherie. Dans cette dernière partie, l'eau restante est éliminée par évaporation sous l'action de la chaleur et de l'air.

Suite à la fabrication de la feuille, deux procédés complémentaires permettent d'améliorer la qualité d'impression des papiers : le couchage et le calandrage.

1.1.2. - La structure

La feuille de papier a une surface plane, composée de fibres cellulósiques liées entre elles. On l'assimile généralement à un réseau contenant en plus des fibres, de l'air, de l'eau et des charges, (Figure 1.1). Les charges sont généralement des substances minérales comme le carbonate de calcium (CaCO_3), finement dispersées. Les pourcentages massiques de charge utilisés peuvent varier entre 5 et 35 % selon les applications. Celles-ci induisent des modifications au niveau des propriétés du papier et une baisse du prix de revient. Les agents de rétention peuvent également être ajoutés afin d'éviter une perte trop importante des éléments fins (éléments lignocellulosiques de petites tailles appelés fines, charges, colorants) lors de la phase d'égouttage de la formation de la feuille en caisse de tête.

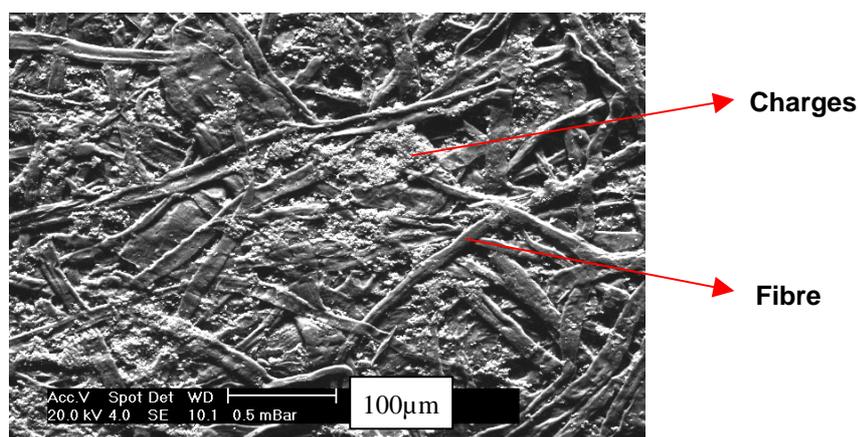


Figure 1.1 : Observation au microscope électronique à balayage (MEB) de la surface d'un papier (CEMEF - CTP)

Précisons quelques ordres de grandeurs : un papier de 60 g/m^2 a une épaisseur comprise entre 70 et $100 \mu\text{m}$. Une fibre cellulósique issue du bois de résineux a une longueur comprise entre 1 et 3 mm et un diamètre de l'ordre de 20 à $40 \mu\text{m}$. Sachant que les fibres sont aplaties lors de la fabrication du papier, il n'y a pas plus d'une dizaine de fibres dans l'épaisseur. La masse volumique de cette feuille est voisine de $0,6$ à $0,86 \text{ g/cm}^3$, soit environ

la moitié de la densité des fibres. Ainsi, en volume, le matelas fibreux contient environ 50 % de fibres et 50 % d'air.

Pendant la formation de la feuille, les fibres se répartissent de manière aléatoire ; le matelas fibreux contient donc des zones plus ou moins riches en fibres. Il se forme des agrégats que l'on appelle floccs. La répartition des fibres dans le plan est à l'origine de variations d'épaisseur et de densité qui influent sur les propriétés optiques ou mécaniques (Figure 1.2) ([Browne *et al.*, 2001]). Lorsque l'hétérogénéité est importante, cela peut devenir un défaut : on parle alors d'épau nuageux. L'épau est évalué visuellement en regardant par transparence l'homogénéité du papier.

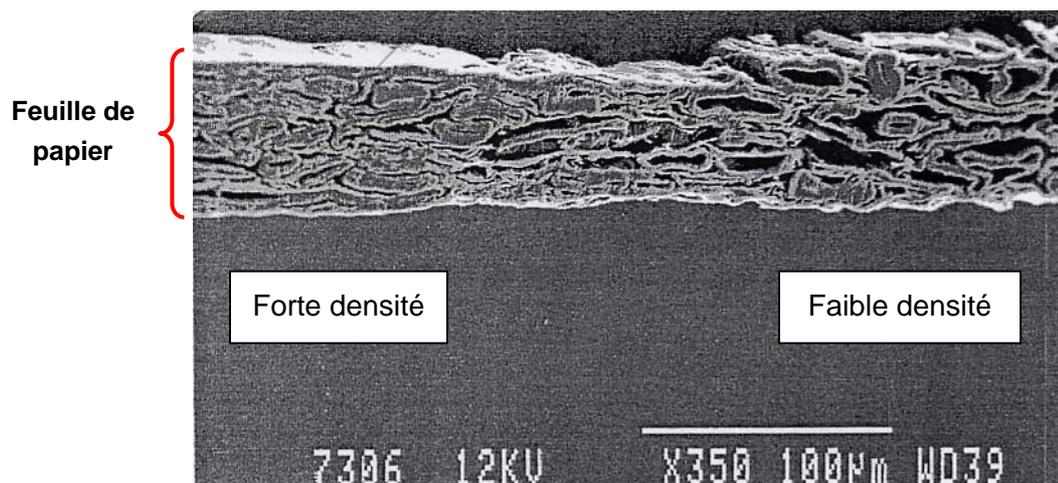


Figure 1.2 : Observation au MEB d'une tranche de papier (d'après [Browne *et al.*, 2001])

Dans la littérature ([Browne *et al.*, 2001], [Pfeiffer, 1992], [Rodal, 1989]), le papier est décrit comme un matériau mince, hétérogène, anisotrope, avec une surface rugueuse. Nous pouvons ajouter que le papier est un matériau compressible dont les propriétés dépendent de l'hygrométrie et de la température. Ces caractéristiques au niveau de la structure du papier rendent difficile le développement de modèle de comportement thermomécanique. En effet, la plupart des modèles développés pour les métaux ou les polymères s'appuient sur l'hypothèse d'un matériau homogène, isotrope, continu ce qui n'est pas le cas du papier. D'autre part, les fibres ont leurs propres caractéristiques (propriétés mécaniques par exemple), et le passage d'un modèle microscopique (propriétés locales) à un modèle macroscopique (propriétés globales) est difficile.

1.1.3. - Les propriétés

Schématiquement, le papier est analysé suivant quatre critères :

- Les propriétés de contexture (grammage, volume massique appelé « main », porosité, perméabilité à l'air, aux liquides, etc.);
- Les propriétés optiques (blancheur, couleur, opacité, capacité à transmettre la lumière de manière homogène, etc.);
- Les propriétés de résistance mécanique (traction, déchirure, éclatement, pliage, flexion avec la rigidité statique et dynamique, abrasion, compression, etc.);
- Les propriétés de surface (rugosité/lissé, brillance, etc.).

L'annexe 2 présente quelques techniques de mesure des caractéristiques papetières, notamment au niveau des propriétés de surface.

Les propriétés mécaniques du papier sont fondamentales d'une part pour la fabrication de la feuille elle-même, mais également pour l'utilisation finale du produit. La solidité du papier, qui traduit des propriétés mécaniques élevées, est obtenue par la création de liaisons inter-fibres. Celles-ci peuvent être d'origines mécaniques par enchevêtrement ou alors d'origines chimiques par la création de liaisons, principalement hydrogènes.

Différents paramètres influent sur les propriétés mécaniques :

- Les fibres ont leurs propres caractéristiques : Les fibres des résineux sont plus longues que celles des feuillus, ce qui augmente la possibilité d'entrecroisement et d'ancrage mécanique mais elles nécessitent un raffinage plus dur.
- Les caractéristiques des pâtes diffèrent selon le procédé de fabrication (mécanique ou chimique, cf partie 1.1.1.1. -) : Les fibres des pâtes chimiques qui ne contiennent quasiment plus de lignine, sont plus souples que celles des pâtes mécaniques ([Petit-Conil, 1995]). Cette augmentation de souplesse favorise la mobilité des fibres ce qui conditionne l'obtention de caractéristiques mécaniques élevées. Le degré de raffinage est également une caractéristique des pâtes qui détermine la possibilité de création de liaisons.
- Le procédé de formation de la feuille joue aussi un rôle important : L'avancement de la toile a tendance à orienter globalement les fibres dans le sens marche de la machine. De ce fait, les caractéristiques mécaniques du papier diffèrent selon le sens marche (machine – SM) et le sens travers (ST).

Les caractéristiques des pâtes sont également déterminantes pour les propriétés de texture et de surface. Bristow ([Bristow *et al.*, 1986]) montre qu'un papier fabriqué à partir d'une pâte chimique est plus compact et moins compressible. Les fibres plus souples des pâtes chimiques se conforment plus facilement lors de la formation de la feuille donnant ainsi un papier plus dense. La mesure d'épaisseur à très faible compression (1 MPa) pour un papier de même grammage fabriqué à partir d'une pâte mécanique ou chimique illustre ce constat (Figure 1.3).

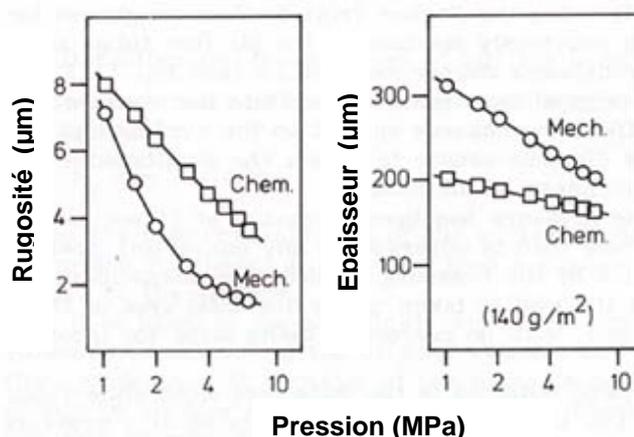


Figure 1.3 : Evolution de rugosité et de l'épaisseur avec la pression pour des papiers de même grammage fabriqués à partir de pâte mécanique ou chimique (d'après [Bristow *et al.*, 1986])

Les résultats présentés sur la Figure 1.3 montrent que la compression des papiers entraîne une diminution d'épaisseur et de rugosité mais dans des proportions différentes. Le papier

fabriqué avec une pâte chimique initialement plus compact a une réduction de l'épaisseur et de la rugosité plus faible que celui avec une pâte mécanique. Par contre, nous pouvons remarquer que même si la compressibilité est plus importante pour la pâte mécanique, l'épaisseur du papier après compression reste plus importante pour la pâte mécanique que pour la pâte chimique. D'autre part, Bristow ([Bristow *et al.*, 1986]) montre que plus le papier a une réduction d'épaisseur importante, plus sa rugosité diminue.

La formation de la feuille joue aussi sur les propriétés de surface. Lors de l'égouttage, les éléments fins sont attirés vers le bas entraînant ainsi une dissymétrie. On distingue alors le côté toile du côté feutre. Lorsque les rugosités des deux faces diffèrent de manière importante, on parle d'envers de rugosité.

Pour certaines utilisations du papier, notamment pour les papiers destinés à l'impression, les propriétés de surface ne sont pas suffisantes : surface trop rugueuse, pas assez brillante. Ainsi, d'autres étapes sont ajoutées au procédé pour les améliorer : le couchage et le calandrage.

1.1.4. - Le couchage

Le couchage est un traitement de surface appliqué sur une face ou sur les deux faces d'un papier afin d'en modifier les caractéristiques. Cette opération consiste à déposer sur la surface d'un papier, alors appelé support, une sauce de couchage (ou bain d'enduction), constituée principalement de pigments et de liants dispersés dans de l'eau. Après séchage, la surface rugueuse et macroporeuse du papier support devient lisse et microporeuse. La Figure 1.4 et la Figure 1.5 présentent des observations au microscope électronique à balayage d'une coupe et de la surface d'un papier couché. L'image de la surface montre l'amélioration globale de la qualité de surface. L'absence locale de couche sur une partie du matelas fibreux permet de mettre en évidence la transformation de la surface du papier.

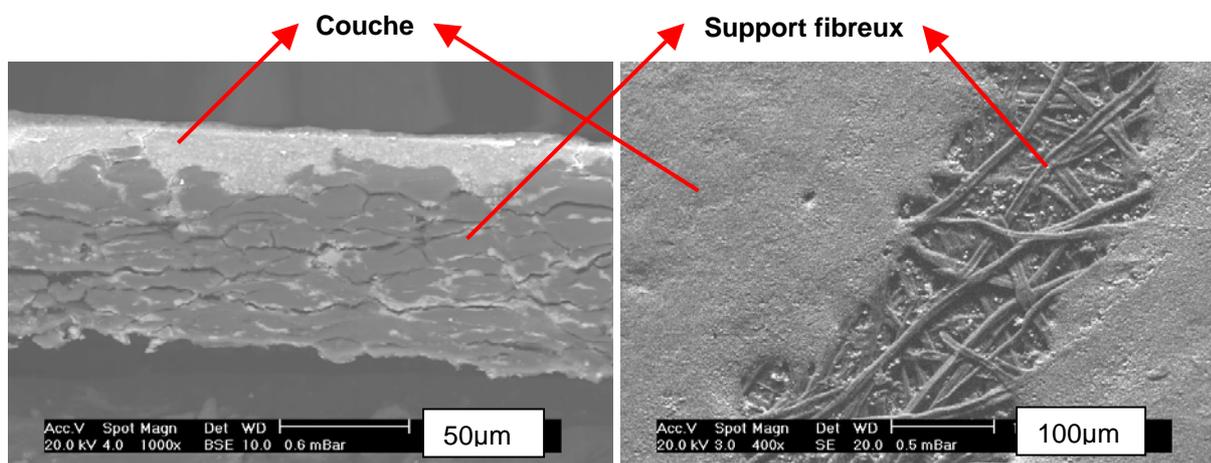


Figure 1.4 : Observations au MEB d'une coupe d'un papier couché (CEMEF - CTP)

Figure 1.5 : Observations au MEB de la surface d'un papier couché (CEMEF - CTP)

Selon leur usage, les papiers couchés doivent présenter des caractéristiques spécifiques en fonction des procédés d'impression. La norme NF Q 266001 distingue trois catégories de papiers couchés :

- Les couchés minces (LWC ou Light Weight Coated) : Couchés de grammage inférieur ou égal à 72g/m² et dont le poids de couche par face est inférieur à 10g/m². Ces papiers sont destinés aux publicités jetables et pages intérieures de magazines.
- Les couchés modernes : Couchés de grammage supérieur à 72g/m² et dont le poids de couche par face est compris entre 10 et 18g/m². Ces papiers sont destinés aux couvertures et aux revues.
- Les couchés classiques : Couchés de grammage supérieur à 72g/m² et dont le poids de couche par face est généralement supérieur à 18g/m². Cette dépose est généralement appliquée en plusieurs passages. On les retrouve dans les papiers haut de gamme.

Les proportions et les choix des constituants des sauces de couchage sont définis suivant l'utilisation finale du papier et surtout par le procédé d'impression. Cependant, on retrouve trois principaux constituants :

- Les pigments dont la taille est de l'ordre du micromètre, représentent 75 à 90% en masse de la couche sèche. Ces pigments donnent au papier une faible porosité de surface et une couleur blanche. Les pigments les plus couramment utilisés sont le carbonate de calcium (CaCO₃) et le kaolin (composant principal : la kaolinite, Al₄[Si₄O₁₀](OH)₈)
- Les liants qui représentent 10 à 25% de la masse de la couche. Leur rôle est d'assurer la cohésion de la couche ainsi que l'adhésion de la couche sur le support fibreux. Les principaux liants utilisés sont les amidons et les latex (styrène-butadiène, acrylique et acétate de vinyle)
- Des additifs divers ajoutés en faible quantité tels que les dispersants, les modificateurs de viscosité, les azurants optiques, qui permettent d'ajuster les propriétés de la sauce et de la couche finale.

Lors de l'opération de couchage, plusieurs étapes se succèdent : la sauce est déposée en excès, puis elle est dosée et étalée. Suivant les systèmes utilisés, les différentes étapes sont combinées ou réalisées séparément. On distingue les coucheuses comme la « sizepress » où la sauce est déposée et ajustée par un rouleau et les coucheuses à lame où la sauce est déposée par un rouleau applicateur ou par un jet, puis dosée et étalée par une lame métallique, une lame d'air ou une barre doseuse. Les lames métalliques sont les plus courantes et peuvent être raclantes, ce qui est le cas lors de faibles déposes (7 à 15 g/m²/face) ou lissantes (12 à 20 g/m²/face). Plus récemment, d'autres procédés de couchage ont fait leur apparition : le couchage par pulvérisation ou le couchage rideau. Dans ce dernier procédé, la sauce forme un rideau et tombe sur la surface du papier. La différence de vitesse entre le rideau et le défilement du papier étire le film et permet d'ajuster la dépose.

Suivant le procédé de couchage, la couche va, soit épouser la rugosité du papier support, ce qui est le cas pour les coucheuses à rouleau, à lame d'air ou à rideau, soit boucher les pores de la surface du papier et donner ainsi une surface plus lisse, ce qui est le cas des coucheuses à lames métalliques. Ainsi suivant l'utilisation finale, on va rechercher soit une distribution de poids de couche homogène permettant de réduire la perméabilité ce qui est le cas dans les applications barrières ; soit une surface lisse et brillante ce qui est le cas des papiers d'impression - écriture.

Par ailleurs, suite à la dépose de la sauce de couchage sur le papier, il se produit un phénomène de déshydratation de la sauce au cours de laquelle la phase aqueuse pénètre dans le papier. Il se forme à la surface du papier un lit de pigments appelé « gâteau de filtration » dont l'épaisseur est fonction de l'eau absorbée par le support. Une mauvaise déshydratation peut conduire à une mauvaise adhésion de la couche sur le support.

Enfin, le papier subit une opération de séchage au cours de laquelle l'eau contenue dans la couche et dans le support va être éliminée pour donner une couche rigide et poreuse. Les conditions de séchage et la quantité de liant influent sur le retrait et la porosité de la couche ([Moreau, 1994]).

1.2. - Le calandrage

1.2.1. - Généralités

Le calandrage est la dernière étape du procédé de fabrication du papier permettant d'influencer les propriétés finales. Contrairement au couchage qui modifie la composition superficielle du papier, le calandrage est un traitement mécanique et thermique sans apport extérieur de matière. Lors de cette opération, la bande de papier est comprimée entre au moins deux rouleaux, appelés aussi presses, qui peuvent être chauffés, sous une forte pression (quelques dizaines de MPa) et pendant un temps très court (généralement moins de 1 ms). Contrairement aux métaux et au laminage, la déformation du papier dans le sens de l'épaisseur n'est pas compensée par un allongement de la feuille. La zone de pincement de la feuille entre deux rouleaux de la calandre est appelée « nip ».

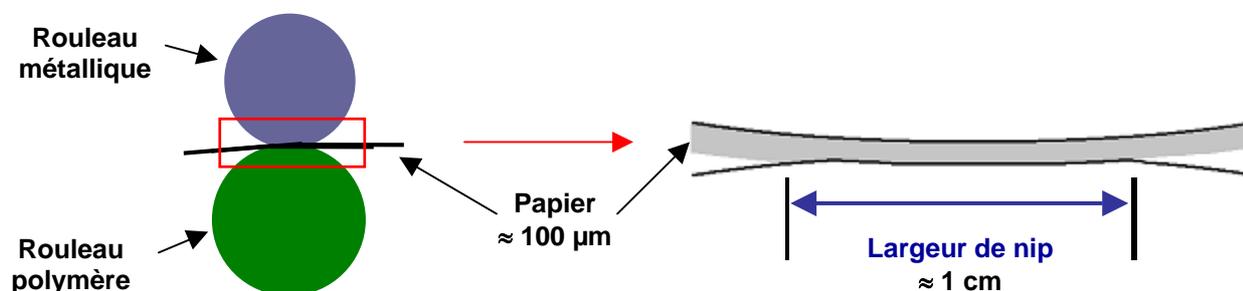


Figure 1.6 : Représentation schématique du passage d'un papier dans un nip de calandre

L'objectif principal du calandrage est d'améliorer l'état de surface du papier afin d'obtenir les meilleures propriétés possibles avant l'impression. Les principales caractéristiques recherchées sont le brillant et le lissé. Cependant, une autre conséquence du calandrage est la réduction d'épaisseur du papier. Certaines calandres sont alors utilisées dans le but de homogénéiser le profil d'épaisseur du papier. La Figure 1.7 et la Figure 1.8 montrent l'évolution de l'état de surface du papier suite au calandrage.

Pour atteindre les propriétés finales requises, le papetier dispose de différents facteurs : tout d'abord le type de papier, le type de calandre et ses réglages. Après avoir présenté les rouleaux d'une calandre et une approche mécanique d'un nip, les paramètres de calandrage et les différentes calandres seront développés dans la suite du chapitre. Les avancées de ces trente dernières années dans le domaine du calandrage ont eu pour but d'augmenter les vitesses de calandrage, pour essayer ainsi de rattraper celle des machines

à papier ou des coucheuses. De nouvelles calandres sont apparues : les soft calandres dans les années 1985 - 2000, et plus récemment, les calandres à nip étendues (1995 – 2000).

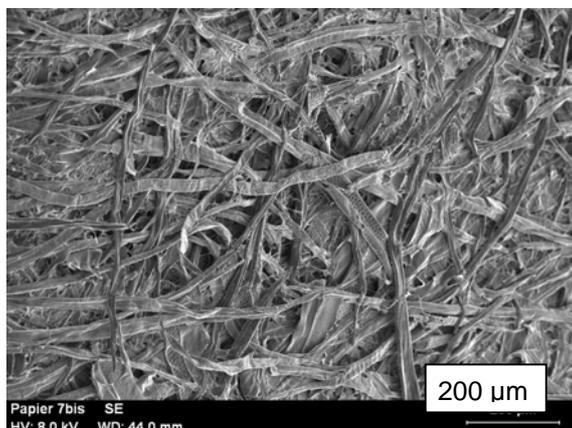


Figure 1.7 : Observation au MEB de la surface d'un papier non couché avant calandrage (CEMEF - CTP)

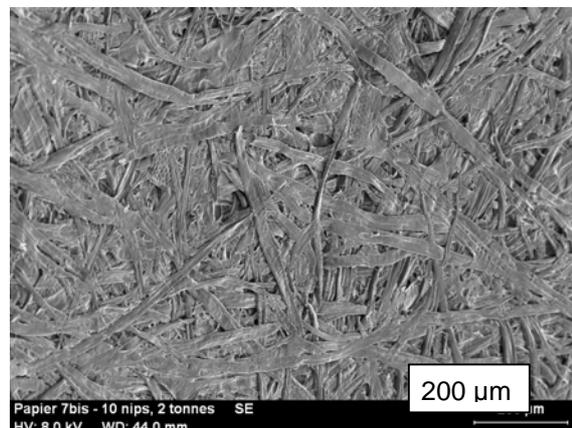


Figure 1.8 : Observation au MEB de la surface d'un papier non couché après calandrage (CEMEF - CTP)

1.2.2. - Les rouleaux d'une calandre

Il existe deux catégories de rouleaux : les rouleaux « durs » et les rouleaux « mous ».

- Les rouleaux « durs » sont métalliques. Ils peuvent être chauffés par induction électromagnétique ou par circulation d'un fluide caloporteur jusqu'à des températures de 300°C. Leur enveloppe externe est généralement en fonte ce qui leur confère une raideur élevée (module d'Young de l'ordre de 80 à 200 GPa) et un bon état de surface (rugosité moyenne de l'ordre de 0,1 - 0,2 µm).
- Les rouleaux « mous » ou polymères diffèrent suivant la nature du revêtement. On distingue les presses « carton » fabriquées à partir d'un empilement de feuille de carton et les presses synthétiques qui sont constituées d'un revêtement en résine thermodurcissable ou en élastomère. Les rouleaux mous ont des modules d'Young de quelques GPa (de 3 à 10 GPa suivant les auteurs de la littérature). La rugosité des presses synthétiques est de l'ordre de 0,3 - 0,6 µm ([Jokio, 1999]). Des développements ont été réalisés par les fabricants de rouleaux afin d'améliorer la tenue à la température et au cycle de compression - décompression des revêtements polymères.

1.2.3. - Approche mécanique d'un nip de calandre

Le nip de calandre est la zone d'emprise entre les deux rouleaux. La largeur du nip (dans la direction de calandrage) est un paramètre important du calandrage. Elle correspond à la zone de contact entre les deux rouleaux mis en pression à une certaine vitesse. Celle-ci évolue en fonction de la nature des rouleaux et de la force normale appliquée. Il est difficile de mesurer la largeur de contact en dynamique. Elle est généralement estimée à partir de méthode de mesure en statique. Dans ce cas, l'utilisation d'un papier carbone ou Fuji permet de révéler la largeur de contact en laissant une empreinte sur le papier.

Les théories concernant le contact mécanique de deux corps en roulement ont fait l'objet de nombreuses études (présentées notamment par Johnson [Johnson, 1985]). Le pionnier dans ce domaine est H. Hertz avec son travail sur le contact élastique en statique. Le modèle de Hertz permet de calculer la largeur de contact entre deux cylindres aux caractéristiques élastiques connues (modules d'Young et coefficients de Poisson) en fonction de leurs rayons et de la force normale appliquée (Figure 1.9 et Équation 1.1). La théorie de Hertz permet également de donner la répartition de la pression dans cette zone de contact (Équation 1.2).

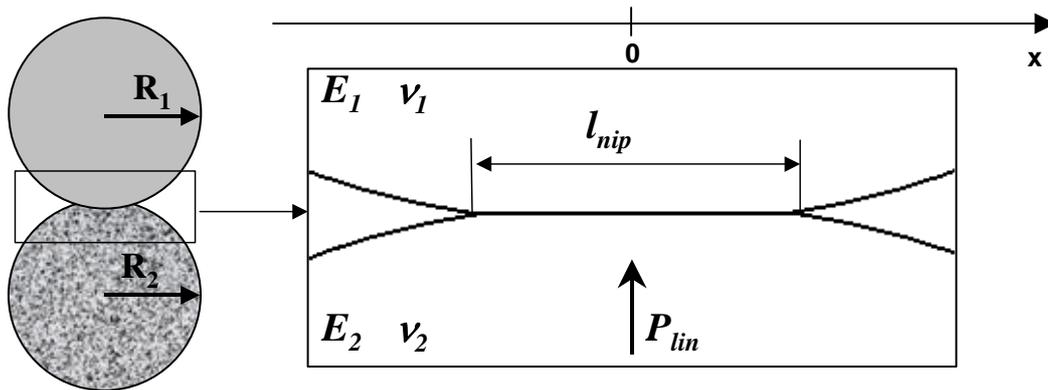


Figure 1.9 : Représentation schématique d'un nip.

La largeur de nip est ainsi donnée par :

$$\frac{l_{nip}}{2} = \sqrt{\frac{4P_{lin}}{\pi} \left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right) \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)} \quad \text{Équation 1.1}$$

Avec

l_{nip}	largeur de nip (m),
P_{lin}	force normale linéique (N/m),
R_1, R_2	rayons des rouleaux (m),
E_1, E_2	modules élastiques des rouleaux (Pa),
ν_1, ν_2	coefficients de Poisson des rouleaux.

La distribution de la pression est donnée par :

$$p(x) = \frac{4P_{lin}}{\pi l_{nip}} \cdot \sqrt{1 - \frac{4x^2}{l_{nip}^2}} \quad \text{de valeur moyenne } \frac{P_{lin}}{l_{nip}} \quad \text{Équation 1.2}$$

Avec

x	position dans la zone de pincement (entre $(-\frac{l_{nip}}{2})$ et $(\frac{l_{nip}}{2})$) (m),
$p(x)$	valeur de la pression à la position x de la zone de pincement (Pa).

Les hypothèses adoptées par Hertz pour établir ces équations sont :

- Les surfaces sont parfaitement lisses
- La largeur de la zone de contact est faible devant le rayon des cylindres : $l_{nip} \ll R_1, R_2$
- Chaque solide peut être considéré comme une demi-espace élastique
- La zone de contact est sans frottement

Une application numérique de ces équations a été réalisée par Guérin ([Guérin, 2000]) en utilisant les caractéristiques de rouleaux métalliques et polymères issues de la littérature. Les quatre cas étudiés dans le Tableau 1.2 font référence aux nips de différentes calandres industrielles. Les rayons des rouleaux et les forces linéiques ont été pris identiques, bien que ce ne soit pas le cas dans l'industrie, afin de pouvoir comparer les largeurs de nip et les profils de pression dans des conditions similaires.

Nature du rouleau 1	Métal	Revêtement synthétique	Métal	Métal
Caractéristiques du rouleau 1	$R_1=0,35$ m $E_1=200$ GPa $\nu_1=0,3$	$R_1=0,35$ m $E_1=3$ GPa $\nu_1=0,37$	$R_1=0,35$ m $E_1=200$ GPa $\nu_1=0,3$	$R_1=0,35$ m $E_1=200$ GPa $\nu_1=0,3$
Nature du rouleau 2	Métal	Revêtement synthétique	Revêtement synthétique	Revêtement carton
Caractéristiques du rouleau 2	$R_2=0,35$ m $E_2=200$ GPa $\nu_2=0,3$	$R_2=0,35$ m $E_2=3$ GPa $\nu_2=0,37$	$R_2=0,35$ m $E_2=3$ GPa $\nu_2=0,37$	$R_2=0,35$ m $E_2=2$ GPa $\nu_2=0,2$
Force linéique P_{lin} (kN/m)	300	300	300	300
Largeur de nip calculée (mm)	1,56	12,4	8,84	11,4
Pression moyenne (MPa)	92,3	24,2	34	26,3

Tableau 1.2 : Largeurs de contact entre deux rouleaux pour plusieurs natures de nips, calculées à l'aide de la formule de Hertz, ([Guérin, 2000]).

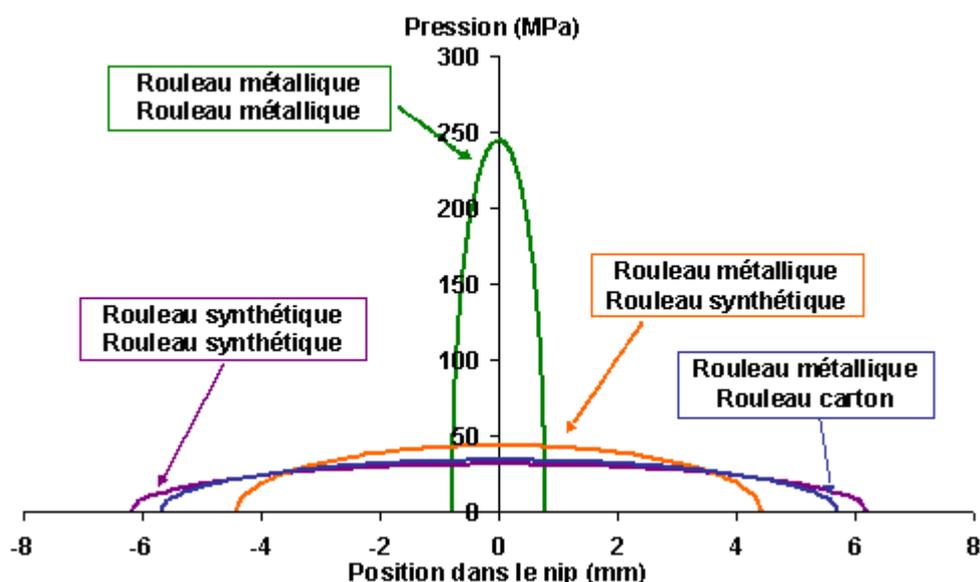


Figure 1.10 : Répartition de pression Hertzienne pour quatre natures de nip (à partir de [Guérin, 2000])

Les courbes de la Figure 1.10 montrent des profils de pression paraboliques quelle que soit la nature du contact. Par contre, les largeurs de contact et les pressions diffèrent en fonction des caractéristiques élastiques des rouleaux. Les rouleaux polymères dont le module d'Young est nettement inférieur à celui d'un rouleau métallique se déforment davantage ; entraînant ainsi un élargissement de la zone de contact et une diminution de la pression. Cette application numérique a été réalisée dans le cadre d'une étude théorique des équations de Hertz : En fait, les forces linéiques appliquées dans l'industrie lors d'un contact métal / métal sont plus faibles que celles lors d'un contact métal / polymère.

La théorie de Hertz permet d'estimer la largeur du contact entre deux rouleaux qui se déforment élastiquement lors de la mise sous pression car l'influence du papier et notamment de son épaisseur n'est pas prise en compte dans cette approche. Des largeurs de nip ont été mesurées sur la calandre de laboratoire du CTP dans une configuration soft nip (rouleau métallique / rouleau élastique) puis comparées aux largeurs de nip estimées à partir de la théorie de Hertz (d'après [Guérin *et al.*, 2005]). La Figure 1.11 montre l'augmentation de la largeur du nip avec la force linéique et avec l'épaisseur de la feuille. La largeur de nip déterminée à partir de la formule de Hertz donne des valeurs plus faibles. Ce résultat est normal étant donné que la présence du papier élargit le nip. Il montre par ailleurs, les limites du modèle, point sur lequel nous reviendrons par la suite.

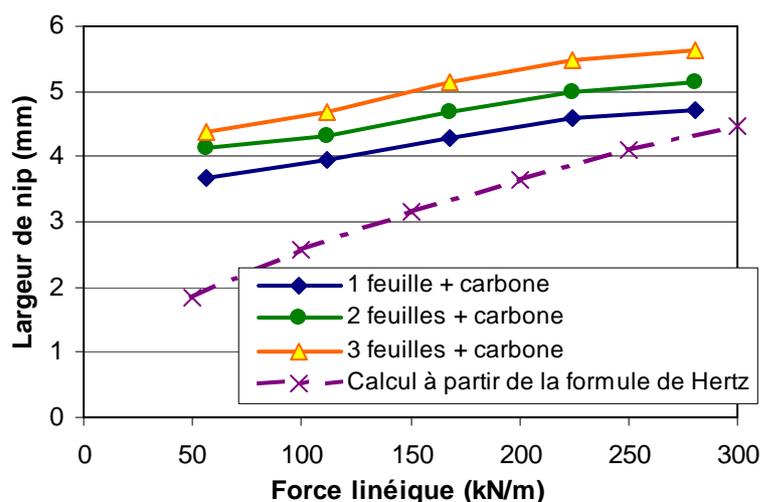


Figure 1.11 : Evolution de la largeur de nip en fonction la force linéique et de l'épaisseur du papier (1 feuille + carbone : 93 μm , 2 feuilles + carbone : 153 μm , 3 feuilles + carbones : 204 μm) (d'après [Guérin *et al.*, 2005])

1.2.4. - Les paramètres de calandrage et leur influence sur le papier

Différents paramètres sont utilisés pour définir les conditions de calandrage. On distingue :

- les paramètres constitutifs de la calandre : les caractéristiques des rouleaux (nature, état de surface, diamètre), le nombre de nips ;
- les paramètres de fonctionnement de la calandre : la force linéique (également appelée charge linéique), la vitesse, la température des rouleaux ;
- les paramètres du papier : la température, l'humidité de la feuille, sa composition.

De nombreux auteurs ont montré l'influence de ces différents paramètres sur les propriétés finales du papier. Le Tableau 1.3 en présente quelques unes.

		Nombre de nips	Force linéique	Vitesse	Température de la feuille	Humidité de la feuille
Épaisseur		↘	↘	↗	↘	↘
Lissé		↗	↗	↘	↗	↗
Brillant		↗	↗	↘	↗	↗
Longueur de rupture	SM	↘	↘		↗	
	ST	↘	↘		↗	
Allongement à la rupture	SM	↘	↘		↗	
	ST	↗	↗		↗	
Indice de déchirure	SM	↘	↘		↗	
	ST	↘	↘		↗	
Indice d'éclatement		↘	↘		↗	

Tableau 1.3 : Evolution des différentes propriétés du papier en fonction des paramètres de calandrage, [Zakaib et al., 1998] – SM : Sens Marche ; ST : Sens Travers

Pour les papiers d'impression, les principales caractéristiques sont l'épaisseur ou la main (volume massique) et les propriétés de surface (brillant, lissé). Ces deux caractéristiques ont des comportements inverses. Par exemple, si la force linéique augmente, l'état de surface du papier va s'améliorer au détriment de l'épaisseur. Il faut donc trouver le meilleur compromis possible en fonction de l'utilisation finale.

Ces paramètres de calandrage déterminent le temps de contact qui se révèle un paramètre important. Plus le temps de contact est long, plus la pression ou la température a un effet important sur la densification et l'amélioration de l'état de surface du papier. Le temps de contact est conditionné par la vitesse de calandrage, la nature des rouleaux, la force appliquée. Plus les rouleaux sont mous ou plus la force appliquée est importante, plus la largeur de nip et donc le temps de contact augmentent. Le nombre de nips est également un paramètre qui joue sur le travail mécanique produit par le calandrage car il augmente le temps au cours duquel le papier est comprimé.

Un autre paramètre important est la température : on distingue la température de la feuille qui va jouer sur la compressibilité du papier et la température des rouleaux qui va influencer la déformation au voisinage de la surface de la feuille. Comme pour les polymères thermoplastiques, la cellulose ou les éléments ligno-cellulosiques possèdent une température de transition vitreuse (Tg) au delà de laquelle le matériau passe d'un état raide et cassant à un état beaucoup plus souple. Selon la littérature, les températures Tg varient en fonction des éléments (cellulose, lignine, pâte...), des méthodes de mesures et des auteurs. On peut cependant dégager une tendance : la température de transition vitreuse de la cellulose est comprise entre 230 et 255°C et celle de la lignine entre 134 et 235°C ([Guérin, 2000]). Par ailleurs, cette température est influencée par l'eau qui est un plastifiant des éléments ligno-cellulosiques. On parle alors de température de ramollissement. Les calendres qui utilisent des températures de rouleau élevées ou des boîtes vapeurs installées juste avant l'insertion de la feuille dans le nip favorisent la déformation en surface du papier.

Les éléments ligno-cellulosiques de la surface dépassent leur température de ramollissement alors que ceux à cœur du papier restent peu déformables (Figure 1.12B).

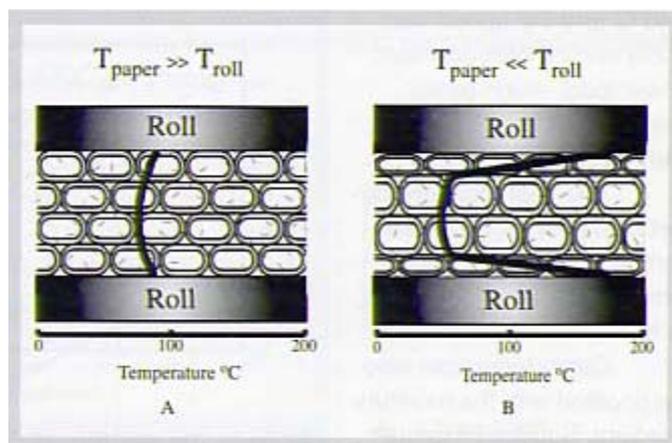


Figure 1.12 : Influence de la température des rouleaux sur la déformation du papier
 ([Gullichsen et al., 1999])

1.2.5. - Les types de calandres et leur influence sur le papier

Il existe différents types de calandre suivant la nature des rouleaux, le nombre de nip, le positionnement dans la ligne de fabrication du papier (en ligne : à la suite de la machine à papier, de la coucheuse ou hors ligne). On distingue les calandres dures, appelées « hard calandre » par la suite, dont leur nip est formé à partir de deux rouleaux métalliques ; les « soft » calandres dont leur nip est formé par l'association d'un rouleau métallique et d'un rouleau polymère (jusqu'à 4 ou 6 nips possibles) ; les supercalandres et les calandres multi-nips qui associent un nombre de nips compris entre 7 et 15 et des calandres plus spéciales telles que les calandres à nips étendus (appelées « shoe calender ») ou à bande métallique. Suivant les calandres utilisées, les effets produits sur le papier vont différer :

Les hard calandres qui possèdent de faibles largeurs de nip (de l'ordre de 2 à 3 mm) vont produire des papiers avec de faibles variations d'épaisseur, mais par contre, avec de fortes variations de densité. Les zones contenant plus de matière, les flocs par exemple, vont être fortement comprimées alors que les zones contenant peu de matière vont être faiblement déformées (cf Figure 1.2). Une trop forte différence de densité du papier peut devenir un défaut lorsqu'il apparaît sur le papier des points plus transparents. On parle alors d'hétérogénéité de brillant ou de problèmes de plombage (marbrage).

Les soft calandres possèdent des largeurs de nip plus importantes (de l'ordre d'une dizaine de millimètres suivant les raideurs des polymères et des pressions exercées). La déformation du rouleau polymère permet d'augmenter l'aire de contact papier / rouleau, améliorant ainsi la distribution de pression. La compression du papier se réalise de manière plus homogène ce qui engendre de faibles variations de densité. Au niveau de l'état de surface du papier, l'absorption de l'encre se fait de manière homogène, rendant ainsi un bon résultat d'impression. Par contre, étant donné que le rouleau tend à épouser la rugosité du papier, les zones d'épaisseur plus importantes n'ont pas été écrasées ce qui le rend plus rugueux et moins brillant. Une température élevée des rouleaux métalliques est couramment utilisée pour améliorer ces deux caractéristiques.

La Figure 1.13 compare les effets d'un calandrage dans un hard nip et dans un soft nip.

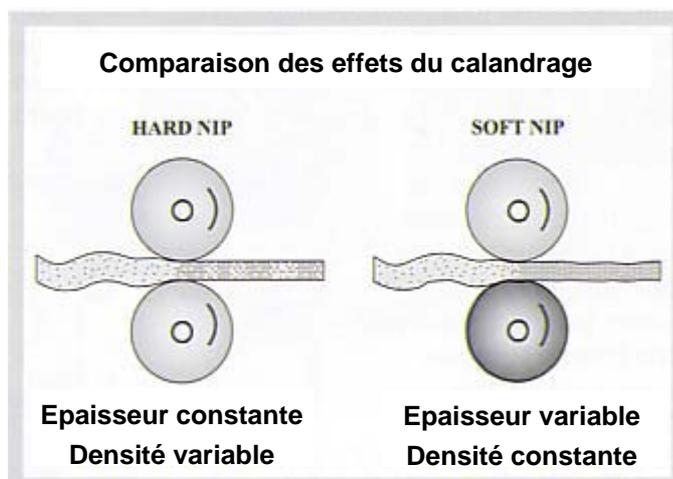


Figure 1.13 : Effet d'un hard nip et d'un soft nip sur la densification et le profil d'épaisseur du papier (d'après [Gullichsen et al., 1999])

Le Tableau 1.4 récapitule les caractéristiques des différentes calandres et leur influence sur la conservation de la main, l'amélioration du brillant et du lissé.

Type de calandre	Hard calandre	Soft calandre	Supercalandre	Calandre multi nips	Calandre à nip étendu
Température rouleau (°C)	60 à 200	60 à 240	40 à 100	60 à 180	130 à 250
Vitesse (m/min)	400 à 1800	400 à 1800	300 à 1000	400 à 1800	300 à 800
Nature du nip	rouleau métallique/ rouleau métallique	rouleau métallique / rouleau élastique			
Nombre de nips	1 nip	1 à 4 nips	7 à 15 nips	4 à 9 nips	1 nip
Largeur de nip	environ 2 mm	environ 8 – 10 mm	environ 8 - 10 mm	environ 8 – 10 mm	50 à 250 mm
en ligne / hors ligne	en ligne ou hors ligne	en ligne ou hors ligne	hors ligne	en ligne ou hors ligne	en ligne
Main	+	++	+	+	+++
Brillant	+	++	+++	++	++
Lissé	++	+	+++	++	+

Tableau 1.4 : Caractéristiques des différentes calandres et leur influence sur les principales propriétés recherchées suite au calandrage, le nombre de + caractérise l'amélioration de la propriété en fonction du type de calandre

1.3. - Modélisation du comportement mécanique du papier dans le nip

La théorie de Hertz présentée dans la partie 1.2.3. - est une approche mécanique de la déformation élastique des rouleaux dans un nip de calandre. Elle permet de déterminer la largeur du nip et la pression appliquée en tout point en s'appuyant notamment sur un contact statique et des caractéristiques de rouleaux homogènes. Cependant, le papier n'est pas pris en compte dans cette approche. Dans les paragraphes suivants, nous allons justement nous intéresser à la déformation du papier au cours de son passage dans le nip.

Le calandrage a pour principal objectif d'améliorer la qualité de surface du papier, mais inéluctablement, le passage de la feuille entre deux rouleaux mis sous pression entraîne une réduction d'épaisseur du papier. Les déformations dans le plan de la feuille ne sont pas tout à fait nulles (inférieure à 1%) mais nettement négligeables devant la réduction d'épaisseur (entre 10 et 30%) ([Lif *et al.*, 1997]). Lif ([*Ibid.*]) a également montré par un système de photographie électronique de tâche que l'anisotropie du papier induisait des déformations dans le sens travers plus importantes que dans le sens marche.

La déformation la plus facile à mesurer est la déformation que l'on peut qualifier de permanente ou plastique. Il s'agit de la compression irréversible de la feuille de papier suite au calandrage. Une mesure d'épaisseur avant et après permet de la déterminer. Suivant les conditions de calandrage, la feuille de papier peut subir dans le nip des déformations plus ou moins importantes, pouvant aller jusqu'à plus de 50%. Nous appellerons la déformation dans le nip la déformation totale. La différence de déformation dans le nip et celle que l'on mesure après calandrage correspond à la déformation élastique qui est qualifiée de réversible ; notons que cette déformation peut être en réalité de type viscoélastique.

Différentes études ont porté sur le comportement mécanique du papier. Certains auteurs ont abordé le sujet sous un aspect empirique en s'intéressant à l'influence des paramètres de calandrage sur la déformation du papier. D'autres ont essayé de déterminer des lois de comportement du papier dans le nip à partir de modèles phénoménologiques ou rhéologiques. L'objectif de tels modèles est de mieux comprendre ce qui se produit dans un nip de calandre et de prédire la déformation en fonction des contraintes qui lui sont appliquées.

1.3.1. - Modèles empiriques

Les modèles empiriques s'appuient sur des essais de calandrage. La déformation du papier, permanente dans un premier temps puis totale dans un second, a été déterminée en fonction des paramètres de calandrage.

1.3.1.1. - Différentes approches menant à l'équation de calandrage

Chapman et Peel ([Chapman *et al.*, 1969]) ont étudié l'influence de la pression moyenne (P) et du temps de contact (t_c) sur la feuille dans le nip. Ils ont proposé un modèle reliant sous forme logarithmique ces deux paramètres à l'épaisseur du papier après calandrage (e_{fin}) :

$$e_{fin} = A + B \log_{10}(t_c) + C \log_{10}(P) \quad \text{Équation 1.3}$$

avec A, B, C des constantes.

Colley et Peel ([Colley *et al.*, 1972]) ont modifié cette relation pour inclure les effets de la température (θ) et de l'humidité du papier (m) :

$$e_{fin} = e_{ini} - K(1 + \tanh(\mu)) \quad \text{avec } e_{ini} \text{ l'épaisseur initiale} \quad \text{Équation 1.4}$$

$$\mu = A + B \log_{10}(t_c) + C \log_{10}(P) + D m + E \theta$$

A, B, C, D, E des constantes

Nous pouvons noter que cette relation prévoit que l'épaisseur ne peut tomber en dessous d'une certaine valeur $e_{ini} - 2K$ correspondant à un maximum de densification. Ces précédentes relations empiriques ont été reprises par Kerekes ([Kerekes, 1976]) afin de prédire la réduction d'épaisseur dans un nip directement en fonction des paramètres de calandrage : la force linéique (P_{lin}), la vitesse de la calandre (V) et le rayon des rouleaux (R) :

$$\varepsilon = A \log_{10}(P_{lin}) + B \log_{10}(V) + C \log_{10}(R) + D \quad \text{Équation 1.5}$$

avec $\varepsilon = (e_{ini} - e_{fin}) / e_{ini}$ la déformation

et A, B, C, D des constantes

Enfin, Crotogino ([Crotogino, 1980]) a modifié l'équation de Kerekes ([Kerekes, 1976]) afin de l'adapter à plusieurs nips successifs. Il a également tenu compte de la température, de l'humidité et du volume massique du papier (B_{ini}) :

$$\varepsilon = A + \mu B_{ini} \quad \text{avec } \varepsilon = (e_{ini} - e_{fin}) / e_{ini} \quad \text{Équation 1.6}$$

$$\mu = B \log_{10}(P_{lin}) + C \log_{10}(V) + D \log_{10}(R) + E m + F \theta + G$$

A, B, C, D, E, F et G étant des constantes.

Cette dernière équation appelée « équation de calandrage » a été vérifiée expérimentalement sur une calandre de laboratoire avec du papier journal. Elle présente cependant quelques inconvénients :

- Pratiques tout d'abord, car elle nécessite la détermination de sept coefficients ;
- Théoriques car elle suppose que les variables sont indépendantes entre elles. En d'autres termes, une variation de la vitesse de calandrage entraînera une variation d'épaisseur indépendamment de la charge linéique ou de la température.

1.3.1.2. - Relation entre la déformation permanente et la déformation dans le nip

L'équation de calandrage établie par Crotogino ([Crotogino, 1980]) relie la déformation finale aux paramètres de calandrage. Browne et al. ([Browne *et al.*, 1994]) ont montré à l'aide d'une calandre de laboratoire que des équations similaires décrivent la déformation dans le nip qui est plus importante. La Figure 1.14 représente les résultats obtenus et la courbe de régression pour les différentes conditions testées (différentes valeurs des paramètres de l'équation de calandrage). Ainsi, les auteurs ont établi une relation purement empirique (elle n'a pas de sens pour une très faible déformation) entre la déformation dans le nip (ε_n) et la déformation finale (permanente) (ε_p) sous la forme d'une régression logarithmique :

$$\varepsilon_n = c_0 + c_1 \log_{10}(\varepsilon_p) \quad \text{Équation 1.7}$$

avec c_0 et c_1 des coefficients

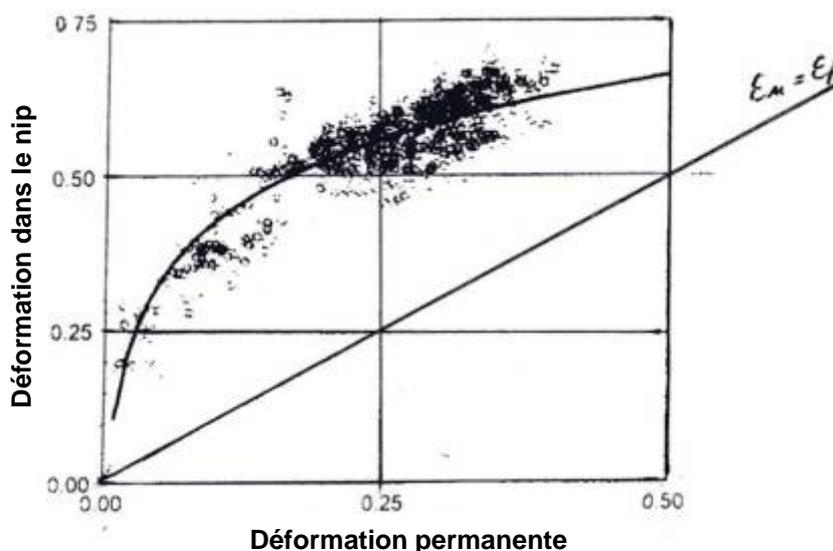


Figure 1.14 : Résultats expérimentaux de la relation entre la déformation permanente et la déformation dans le nip (d'après [Browne et al., 1994])

1.3.2. - Modèles phénoménologiques

Les études décrites précédemment se sont intéressées directement au calandrage en essayant de relier la déformation du papier aux paramètres de calandrage. D'autres auteurs ont essayé de comprendre de manière plus physique ce que subissait le papier dans un nip de calandre, en particulier en essayant d'établir des similitudes avec le laminage des métaux ou en passant de l'échelle microscopique (comportement des fibres) à l'échelle macroscopique (comportement du papier).

1.3.2.1. - Reproduction de l'état de surface des rouleaux

Certains auteurs pensaient que le papier dans le nip d'une calandre glissait entre les rouleaux et que ce glissement était à l'origine de l'amélioration de la qualité de surface des papiers. Les expériences de Pfeiffer ([Pfeiffer, 1970], [Pfeiffer, 1992]) ont montré que les principaux changements au niveau de l'aspect de surface des papiers provenaient de la reproduction de l'état de surface des rouleaux de la calandre. Il a alors proposé un modèle se basant sur la théorie de la plasticité, développée initialement pour modéliser la déformation permanente des métaux. La déformation est liée aux contraintes exercées sur un corps. Il existe deux types de contraintes : la pression hydrostatique qui entraîne une compaction volumétrique et les contraintes de cisaillement qui sont à l'origine de distorsion d'un objet. Quand les contraintes de cisaillement atteignent un seuil critique, une déformation permanente se produit. Pfeiffer ([*ibid.*]) explique la reproduction de l'état de surface des rouleaux par une distorsion du réseau fibreux et un mouvement des fibres les unes par rapport aux autres en surface créant ainsi une déformation permanente.

1.3.2.2. - Concept de plasticité

Rodal ([Rodal, 1993-a]) a essayé également d'aborder la déformation des papiers du point de vue de la plasticité. Il introduit le fait que les modèles sont, peut être, plus compliqués que ceux pour les métaux car le papier est un matériau anisotrope, compressible, avec un réseau fibreux dont les propriétés varient avec la température,

l'humidité... Pour les structures ouvertes comme le papier, le cisaillement n'est pas le seul mode de déformation possible. La déformation plastique d'un papier peut se produire par un simple écrasement du réseau fibreux, par un endommagement des liaisons entre fibres, ou par un gauchissement des fibres. Rodal ([*ibid.*]) prend en compte la notion de compactage du papier : une simple mesure de la densité avant et après calandrage permet de montrer que le changement permanent de volume est une conséquence directe du procédé de calandrage car la déformation du papier dans l'épaisseur n'est pas compensée par une elongation significative du papier dans le plan. Il insiste également sur le fait que la déformation plastique doit tenir compte du rôle prépondérant de la pression hydrostatique et du changement de volume par rapport aux contraintes de distorsion, contrairement à la théorie de Pfeiffer ([Pfeiffer, 1970]).

Rodal ([Rodal, 1989]) a introduit une déformation logarithmique ($\varepsilon = \ln\left(\frac{e_{ini}}{e_{fin}}\right)$ avec ε déformation de Hencky ; e_{ini} épaisseur initiale ; e_{fin} épaisseur après compression) et une contrainte de Kirchoff σ_K ($\sigma_K = \sigma \cdot \left(\frac{\rho_{ini}}{\rho_{fin}}\right)$ avec σ contrainte de Cauchy ; ρ_{ini} masse volumique avant la compression ; ρ_{fin} masse volumique après la compression).

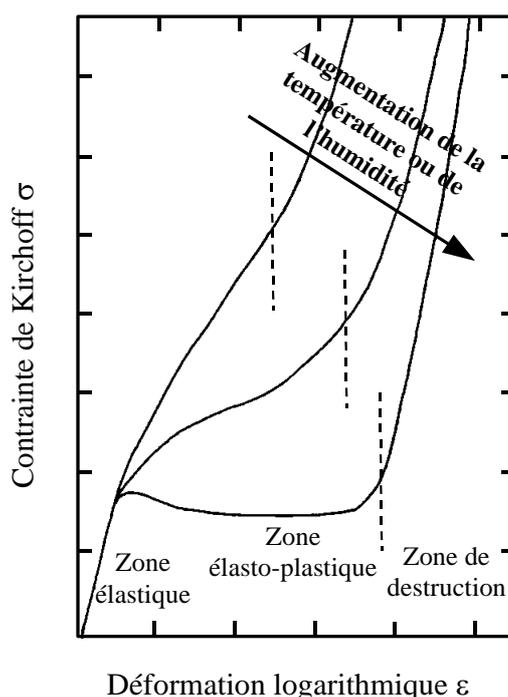


Figure 1.15 : Relation contrainte / déformation pour un papier dans un nip de calandre (d'après [Rodal, 1989])

Il définit trois zones d'évolution des relations contrainte / déformation (Figure 1.15) :

- La première zone correspond à des déformations essentiellement élastiques (appelée zone élastique). Les déformations sont faibles (de l'ordre de 1 %, généralement inférieures à 5 %) et à peu près réversibles. Mais les irrégularités de

surface et les vides sont déjà comprimés conduisant à une légère réduction du volume de vide et de porosité.

- La deuxième zone correspond à une déformation plastique du réseau fibreux (zone élasto-plastique). Les vides étant comprimés, c'est le réseau fibreux qui subit la charge conduisant à un affaissement et un gauchissement de la structure.
- La troisième zone correspond à une déformation plastique des fibres. La contrainte augmente fortement avec la déformation. Lorsque le réseau fibreux a déjà subi une déformation importante, les fibres sont très proches les unes des autres et se déforment jusqu'à une fragmentation (zone de destruction).

Les frontières entre ces trois zones dépendent de la température, de l'humidité du papier et de la vitesse de déformation. D'autre part, compte tenu des variations d'épaisseur du papier, ces trois zones coexistent dans le nip. Lorsque l'on se situe dans la zone élasto-plastique, plus la température et l'humidité du papier augmentent, plus les déformations sont importantes pour une contrainte donnée.

1.3.2.3. - Relation comportement macroscopique / propriétés microscopiques

D'autres études plus théoriques ont eu pour but de décrire le comportement macroscopique du réseau fibreux à partir des propriétés microscopiques des fibres et de la structure du papier. Ainsi, Ionides, Mitchell et Curzon ([Ionides *et al.*, 1981]) ont développé un modèle considérant que la force de compression est répartie sur des piles de fibres s'entrecroisant. Les nombres de piles et de fibres sont définis de manière statistique. La relation contrainte / déformation est alors exprimée sous la forme d'une loi puissance. Ce modèle nécessite la détermination des caractéristiques élastiques des fibres en compression (module d'élasticité et coefficient de Poisson).

Osaki, Fujii et Kiichi ([Osaki *et al.*, 1981]) ont utilisé un modèle semblable en définissant un nombre de contact entre des fibres cylindriques et une surface de contact entre les fibres. Pour de faibles contraintes, les fibres se rapprochent, la porosité du milieu diminue, mais les fibres ne se déforment pas. Le nombre de contact entre les fibres augmente, mais pas la surface de contact moyenne en chaque point. Pour des contraintes plus élevées, le nombre de contact entre fibres atteint sa valeur maximale, les fibres se déforment et la surface de contact en chaque point augmente. Ce modèle utilise les propriétés des fibres et du réseau fibreux qui sont difficiles à mesurer. De plus, la transition entre les deux régimes de déformation n'est pas définie avec précision.

1.3.3. - Modèles rhéologiques

Différentes études expérimentales ont été réalisées afin de simuler le calandrage. Les principaux essais sont des essais de compression réalisés à différentes vitesses de sollicitation. Ces essais sont à la base des modèles rhéologiques décrivant le comportement du papier.

1.3.3.1. - Essais expérimentaux de compression

L'utilisation de calandre industrielle pour des travaux de recherche a un coût non négligeable. Par ailleurs, il est généralement difficile d'équiper une calandre de capteurs permettant de mesurer l'épaisseur du papier dans un nip ou la pression exercée. Des essais de compression ont donc été élaborés.

Essai de compression : Feygin ([Feygin, 1999])

Feygin ([*ibid.*]) a effectué des essais de compression à différentes vitesses de sollicitations sur un papier d'impression – écriture de grammage 110 g/m². Ces essais ont permis de déterminer la déformation totale, élastique et plastique du papier en fonction de la contrainte appliquée (Figure 1.16). Il a montré tout d'abord que la déformation n'était pas une fonction linéaire de la contrainte. Par ailleurs, les courbes (Figure 1.16) montrent une sensibilité à la vitesse de sollicitation : plus la vitesse de sollicitation est importante, plus la déformation totale est faible. Au niveau de la décomposition en déformation plastique et élastique, le comportement dépend de la vitesse : à faible vitesse de sollicitation, la composante plastique est supérieure à la composante élastique, alors que c'est le contraire pour la grande vitesse. Ce comportement vis à vis de la vitesse de sollicitation traduit le caractère visqueux du papier.

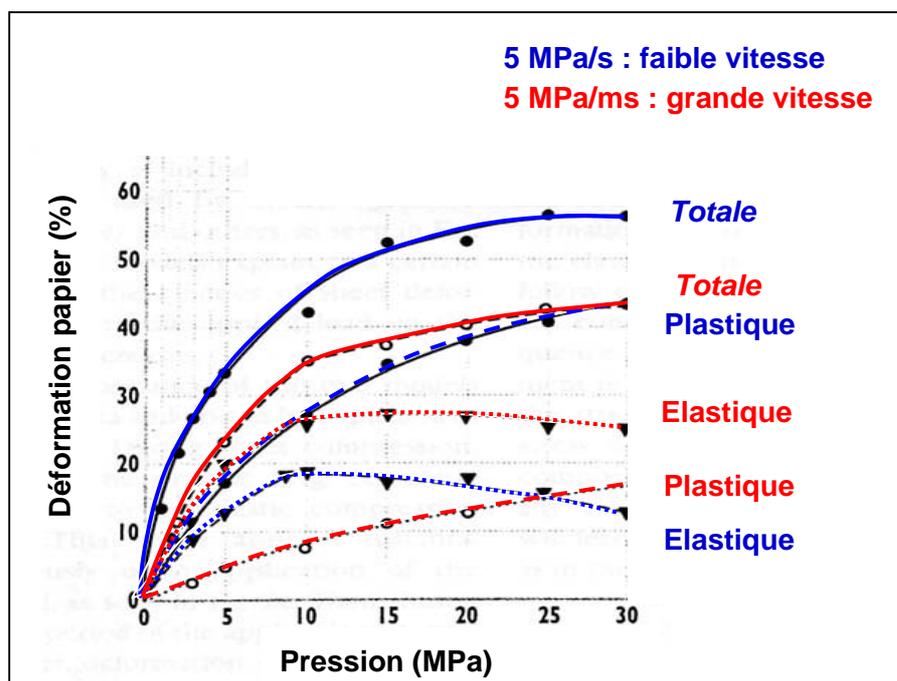


Figure 1.16 : Courbes de déformation / contrainte du papier en essai de compression (d'après [Feygin, 1999])

Ces résultats sont très intéressants, nous les recommanderons au chapitre 2. Toutefois, la méthode utilisée pour mesurer les déformations n'est pas détaillée dans l'article. D'autre part, les courbes (Figure 1.16) ne présentent pas de barre d'incertitude. Enfin, les vitesses de sollicitation restent inférieures à celle d'une calandre. Les temps de passage de la bande de papier dans un nip de calandre sont inférieurs à 1 ms sous une pression comprise entre 10 et 50 MPa. Même à grande vitesse, l'essai de compression nécessite 4 ms pour imposer une contrainte de 20 MPa.

Essai de compression : « Material Test System »

Le STFI (Swedish Pulp and Paper Research Institute) possède un essai de compression entre deux tas de presse plans nommé « Material Test System » (MTS). Deux modes d'application de contrainte peuvent être utilisés : un cycle de fluage – relaxation avec

un signal carré (contrainte constante pendant un certain temps) ou une impulsion de type sinusoïdale pour simuler l'application de la contrainte dans un nip de calandre. Les temps de sollicitation varient entre 20 et 1000 ms. Par ailleurs, les essais peuvent être réalisés dans une enceinte climatique faisant ainsi varier la température et l'humidité. Cet équipement représenté Figure 1.17 a notamment été utilisé dans les travaux de Wikström ([Wikström *et al.*, 1997]), Rättö ([Rättö, 1998]) ou Hovda ([Hovda, 2001]).

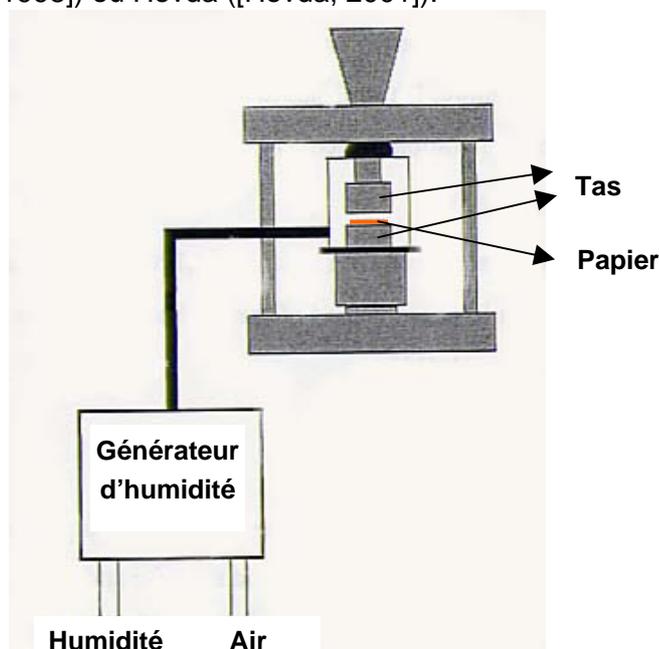


Figure 1.17 : Schéma de l'essai de compression entre deux tas de presse (MTS), (d'après [Rättö *et al.*, 2001])

Wikström ([Wikström *et al.*, 1997]) a réalisé des essais de compression sous la forme d'une impulsion sinusoïdale. Il a utilisé une formule de type « loi puissance » reliant la déformation permanente (ε_p), la contrainte (σ) et le temps (t) :

$$\varepsilon_p = K\sigma^m t^n \quad \text{Équation 1.8}$$

m , n et K étant des constantes déterminées expérimentalement à partir d'essais de compression. Bien que ce modèle possède peu de justifications théoriques, sa forme très simple a permis de comparer deux procédés de calandrage (soft calandre et calandre à nip étendu) pour des papiers couchés en donnant des réductions d'épaisseur théoriques proches des valeurs pratiques. Par ailleurs, la détermination des constantes a montré que la contrainte a une influence plus importante sur la déformation que le temps de contact dans le nip.

Rättö et Rigdahl ([Rättö *et al.*, 1998]) ont utilisé les essais de fluage - relaxation pour modéliser le comportement du papier. Ils ont décrit la déformation totale du papier par une loi simple du type :

$$\varepsilon = K(\sigma) + m(\sigma) \ln\left(\frac{t}{t_r}\right) \quad \text{Équation 1.9}$$

avec K et m des fonctions de la contrainte. Pour simplifier le modèle, le temps de référence t_r est pris égal à 1. Les essais de compression à des temps de contact compris entre 20 et

1000 ms ont montré que les fonctions K et m pouvaient être approchées jusqu'à des contraintes de 50 – 70 MPa par des fonctions affines du type :

$$\mathbf{K}(\sigma) = \mathbf{a}_k \sigma + \mathbf{b}_k$$

Équation 1.10

$$\mathbf{m}(\sigma) = \mathbf{a}_m \sigma + \mathbf{b}_m$$

Les différents coefficients des fonctions affines sont définies de manière empirique.

A partir des essais de fluage – relaxation et en utilisant le principe de superposition de Boltzmann, la déformation du papier sous une impulsion de type sinusoïdal peut également être prédite jusqu'à des contraintes de 50 – 70 MPa. Dans ces essais, l'inconvénient majeur reste le temps de sollicitation. D'autre part, les coefficients de l'Équation 1.8 et de l'Équation 1.10 sont valables pour un papier et doivent être re-déterminés pour un autre type de papier. Par contre, l'utilisation d'une contrainte sinusoïdale et d'une enceinte climatique permet d'avoir une sollicitation du papier plus proche du calandrage.

Essai de compression de type pendule : [Hestmo et al., 2000]

Un autre essai de compression du type essai de choc Charpy est également décrit dans la littérature. Le montage (Figure 1.18) est composé de deux pendules avec à chaque bout un marteau (H_1 et H_2) pouvant être tous les deux en acier pour simuler un hard nip ou avec un marteau H_2 recouvert d'un polymère pour simuler un soft nip. Le marteau H_1 vient frapper avec une certaine vitesse le marteau H_2 comprimant ainsi le papier situé entre les deux. Le temps d'impact est de l'ordre de 0,2 à 1 ms. Il dépend de la vitesse d'impact et de la nature du marteau H_2 . Bien que le temps de contact soit proche de celui rencontré dans un nip de calandre, les essais réalisés par Hestmo ([*ibid.*]) ont montré une diminution du temps d'impact avec la force. Ce comportement est opposé à celui que l'on peut trouver dans un nip de calandre où le temps de contact s'allonge lorsque la force linéique augmente. Par ailleurs, on peut s'interroger sur les difficultés de réglage mécanique du pendule : il faut que les deux faces des marteaux soient parfaitement planes et parallèles l'une à l'autre afin que la force s'applique uniformément sur toute la surface testée.

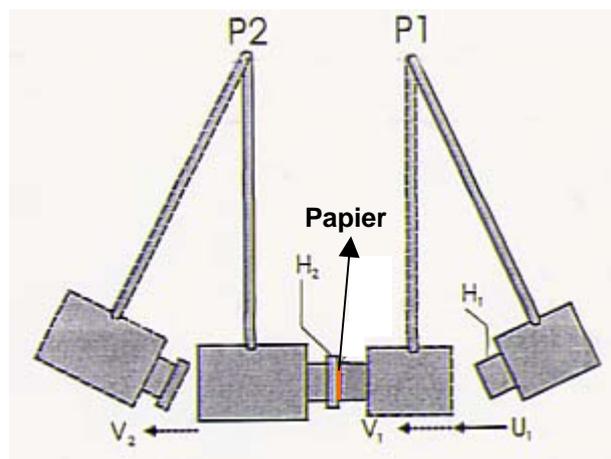


Figure 1.18 : Schéma de l'essai de compression par deux pendules (P1 et P2), (d'après [Hestmo et al., 2000])

1.3.3.2. - Modèle viscoélastique

Différents auteurs, ([Popil, 1989], [Browne *et al.*, 2001], [Meinecke, 1985]) ont proposé des modèles rhéologiques décrivant la déformation du papier dans le nip. La plupart sont des combinaisons dans des ordres différents de ressorts décrivant des composantes élastiques, d'amortisseurs représentant des composantes visqueuses et de patins décrivant la déformation plastique au delà d'un certain état de contrainte.

Browne ([Browne *et al.*, 2001]) propose un modèle avec quatre éléments : deux élastiques et deux visqueux. Les raideurs des deux ressorts correspondent à la déformation élastique des fibres d'une part et du réseau d'autre part. Ils définissent également un rapport entre la partie visqueuse et la partie élastique qui correspond au temps de relaxation.

Les modèles de Brecht (a) et Meinecke (b) présentés Figure 1.19 permettent de modéliser :

- La composante élastique (ϵ_e) et son retour instantané après la charge ;
- L'augmentation de la déformation due à une composante visqueuse (ϵ_d) et plastique (ϵ_p) pendant la charge (c) ;
- La recouvrance viscoélastique progressive après décharge.

La déformation plastique (ϵ_p) due au compactage du papier est bien intégrée. Cependant, ces modèles incluent le phénomène de plasticité à condition que la charge excède une certaine valeur (le patin). Or en réalité, même sous des faibles contraintes, le papier se déforme plastiquement (cf Figure 1.16).

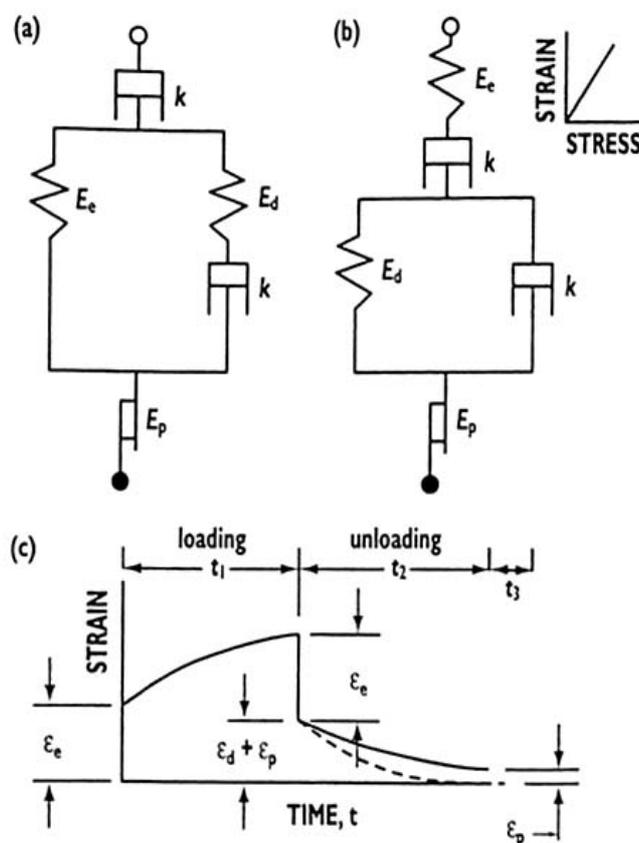


Figure 1.19 : Modèles viscoélastiques classiques avec patins plastiques ([Feygin, 1999])

1.3.3.3. - Modèle viscoélastique non linéaire avec patin plastique

Feygin ([Feygin, 1999]) met en évidence une autre faiblesse du modèle viscoélastique linéaire : il ne prend pas en compte l'augmentation de la densité du papier avec la déformation, il ne permet donc pas de convertir la déformation élastique en déformation plastique quand la charge ou le temps de charge augmente. Le module élastique E , pendant le calandrage, n'est pas constant et dépend de la contrainte (σ). Feygin ([*Ibid.*]) propose donc une relation qui définit une évolution linéaire du module et qui est valable dans une gamme de contrainte du calandrage (5 - 30 MPa) :

$$E_0 = E_i + N\sigma \quad \text{Équation 1.11}$$

avec E_i le module initial et N un facteur numérique. Ces deux paramètres sont déterminés par le type de papier, son humidité, sa température. Cette relation définit l'évolution du module du premier ressort de son modèle (Figure 1.20) qui en compte deux autres, E_1 et E_2 , un patin et un amortisseur visqueux. E_0 est le module au temps court et le module au temps long H vaut :

$$\frac{1}{H} = \frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \quad \text{Équation 1.12}$$

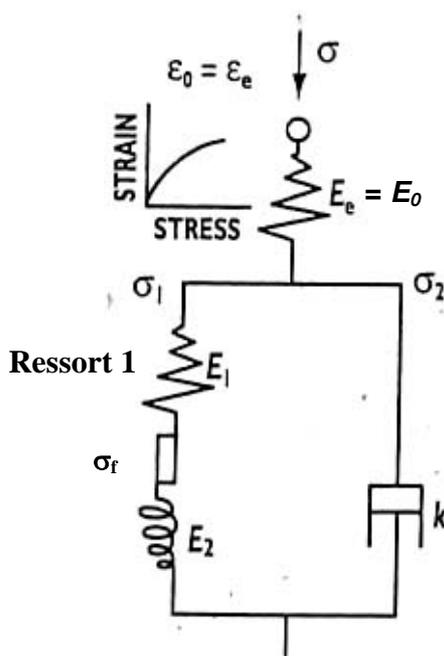


Figure 1.20 : Modèle viscoélastique non linéaire. ([Feygin, 1999])

Hovda ([Hovda *et al.*, 1999]) a proposé un nouveau modèle viscoélastique non linéaire en remplaçant l'élément visqueux du modèle de Feygin ([Feygin, 1999]) ($\sigma = k\dot{\epsilon}$) par un élément visqueux non linéaire ($\sigma = k\dot{\epsilon}^p$). Un exposant « p » apparaît donc au niveau de l'équation. L'ajout d'un élément visqueux non linéaire à l'élément élastique non linéaire déjà présent dans le modèle de Feygin ([Feygin, 1999]) permet une meilleure approche des courbes expérimentales des essais de fluage ([Hovda *et al.*, 2000]).

1.3.4. - Limites des modèles

Une des faiblesses du modèle viscoélastique non linéaire présenté dans la partie 1.3.3.3. - est l'absence de prise en compte de la température. Plus précisément, les coefficients rhéologiques déterminés expérimentalement sont établis de manière empirique pour une température et une humidité du papier. Cependant, au cours du passage du papier dans le nip, la température évolue : à la fois en surface, car les rouleaux sont chauffés, mais aussi, dans l'épaisseur. Les fibres de cellulose dépassent alors leur température de transition vitreuse entraînant une chute des propriétés mécaniques et donc des paramètres rhéologiques. Guérin ([Guérin, 2000]) a mis en évidence les profils de température dans l'épaisseur en fonction de modèles de transfert thermique dans le papier.

Rättö ([Rättö *et al.*, 2001]) aborde ce problème en incluant une double expression de type Arrhénius de la température, à un modèle viscoélastique non linéaire établi à température constante. Il utilise des méthodes éléments finis pour simuler le comportement. Les résultats sur la déformation permanente ou sur les profils de température ne correspondent pas exactement à ceux obtenus dans les expériences. Plusieurs approches peuvent améliorer ce type de modèle thermo-mécanique : une meilleure détermination des énergies d'activation des mécanismes ; une étude de la validité d'un modèle viscoélastique dont les coefficients dépendent de la température. D'autre part, il serait également intéressant d'intégrer le rôle de l'humidité du papier qui comme pour la température, influe sur les propriétés mécaniques.

Enfin, il ne faut pas oublier que le papier est un matériau hétérogène, présentant des variations d'épaisseur et de densité. Ainsi, pour une force donnée, la feuille ne subit pas une pression uniforme. Guérin ([Guérin *et al.*, 2005]) a mis en évidence la distribution de pression dans le plan de la feuille dans un nip de calandre (Figure 1.21).

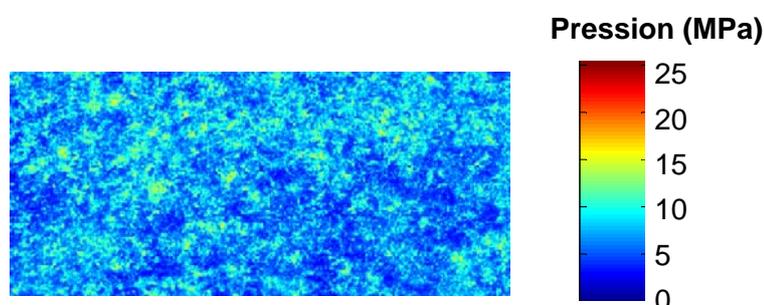


Figure 1.21 : Répartition de pression lors du calandrage d'une feuille de papier à une force linéique de 30 kN/m dans un hard nip, pour une pression moyenne de 9,7 MPa - Dimension de la zone analysée : 9 x 4 cm. ([Guérin *et al.*, 2005])

La connaissance de cette distribution de pression et sa prise en compte via des lois physiques ou statistiques peut permettre de définir une relation entre la contrainte appliquée localement et la réduction d'épaisseur du papier. Pawlak et Keller ([Pawlak *et al.*, 1995]) se sont intéressés à ce problème et ont montré que le module tangent moyen d'élasticité en compression était dépendant de la densité apparente locale. Cependant, ils n'ont pas trouvé de corrélation nette entre la densité apparente locale et le module tangent local, ce qui signifie que d'autres paramètres entrent en jeu.

La détermination d'une relation contrainte / déformation pour le papier dans le nip est difficile pour différentes raisons :

- Les pressions appliquées dans les nips sont élevées (quelques dizaines de MPa) et variables suivant la position dans le nip ;
- Les temps de contact entre la feuille et les rouleaux sont courts (généralement moins de 1 ms) ;
- Le transfert de chaleur entre les rouleaux et la feuille est bref. Il engendre un fort gradient de température dans la feuille de papier et les propriétés rhéologiques du papier dépendent de ce paramètre.
- Comme pour la température, un gradient d'humidité est présent dans le papier et influence donc les caractéristiques mécaniques du papier.
- Ces quatre paramètres (pression, temps, température et humidité) ne sont pas des variables indépendantes les unes des autres.

Ainsi, les modèles proposés nécessitent la connaissance des propriétés thermiques et mécaniques des papiers. L'amélioration des connaissances sur le calandrage a permis de développer de nouveaux types de calandrage (calandrage à gradient de température et calandrage à gradient d'humidité), mais il n'existe pas de modèle absolu permettant de décrire ces procédés. Par ailleurs, un essai de compression à des temps beaucoup plus courts, du style du pendule, est nécessaire pour caractériser le comportement du papier dans des conditions proche du calandrage ([Hovda *et al.*, 2004]).

1.3.5. - Conclusion

Le comportement mécanique du papier dans un nip de calandre a été étudié à partir de différentes approches : empirique, phénoménologique et rhéologique. Des essais de compressions ont été réalisés afin de simuler l'opération de calandrage. Cependant, les temps de sollicitation restent supérieurs à ceux rencontrés dans un nip de calandre. D'autre part, nous trouvons dans la littérature des courbes de déformation en fonction de la pression mais pas de grandeurs intrinsèques aux papiers telles que la contrainte d'écoulement ou le module d'élasticité au cours de la compression.

1.4. - Calandrage des papiers couchés

La plupart des papiers destinés à l'impression sont couchés, puis calandrés afin d'améliorer leur aspect de surface. Dans cette partie, nous allons nous intéresser plus particulièrement au cas des papiers couchés. La couche qui est formée principalement de pigments et de liants a une porosité et un comportement mécanique différent de celui de matelas fibreux. La déformation de la couche a non seulement un impact sur la qualité de surface du papier mais aussi sur l'aire réelle de contact entre la surface du papier et le rouleau. Par ailleurs, l'utilisation de température de rouleaux sans cesse plus élevée pour remplacer l'effet mécanique d'une forte pression ou d'un nombre de nips important favorise les interactions et les problèmes d'encrassement des rouleaux.

1.4.1. - Déformation de la couche

Le calandrage des papiers couchés a été abordé principalement sous l'aspect de l'amélioration de l'état de surface et peu sous l'aspect de la réduction d'épaisseur. Des mesures telles que le brillant ou la perméabilité à l'air permettent de déterminer l'influence de

différents paramètres de calandrage et de formulation de sauce sur la déformation de la couche. Les propriétés mécaniques de la couche sont déterminées par le liant qui assure la cohésion entre les charges. Différentes études se sont développées ces dernières années pour étudier l'influence des propriétés viscoélastiques des liants sur les résultats du calandrage.

Le pionnier dans l'étude des couches est Lepoutre ([Lepoutre *et al.*, 1978]). Son travail a porté sur des couches modèles déposées sur un support en polyester. Il a montré une réduction de la porosité initiale de 25 % environ après calandrage et une réduction relative d'épaisseur trois fois plus faible pour la couche que pour le support fibreux.

Kan ([Kan *et al.*, 1996]) a étudié le comportement viscoélastique d'une couche modèle en fonction de la température pour une fréquence de sollicitation donnée à l'aide d'un appareil d'analyse mécanique dynamique (DMTA). Il a ensuite utilisé le principe de superposition temps - température, établi par Williams, Landel et Ferry ([Ferry, 1961]), pour étendre la validité des mesures à des fréquences de sollicitation plus élevées et proches de celles rencontrées dans les nips de calandre. Ces mesures n'ont pas été réalisées en compression, mais suggèrent que l'effet du calandrage sur le brillant du papier peut être prédit à partir du module élastique de la couche.

Wikström ([Wikström *et al.*, 1999]) a également travaillé sur le comportement de couches modèles en compression sur une presse à plateaux. Les courbes de contrainte / déformation obtenues à partir des essais de compression montrent une déformation plus importante pour la couche contenant une plus faible quantité de latex (10 parts). Ce comportement est expliqué par une porosité plus grande de la couche contenant une faible quantité de latex (plus faible densité), ce qui permet donc une déformation plus importante.

Larsson ([Larsson *et al.*, 2006]) a également travaillé sur l'influence de la teneur en latex sur la déformation de la couche. Des papiers ont été couchés avec différents teneurs en latex, puis calandrés et caractérisés par porosimétrie au mercure. Les résultats montrent une diminution de la porosité et de la taille moyenne des pores avec l'augmentation de la teneur en latex sur les papiers calandrés et non calandrés. Par contre, contrairement à Wikström ([Wikström *et al.*, 1999]), la réduction de porosité suite au calandrage, traduisant la compressibilité du papier, augmente avec la teneur en latex. Il explique la compressibilité plus importante de la couche par le rôle lubrifiant du latex permettant un re-arrangement des charges dans la couche. L'augmentation de la teneur en latex permettant une diminution de la porosité de la couche est un phénomène bien connu. Par contre, le comportement du latex lors du calandrage reste donc controversé.

Par ailleurs, Wikström ([Wikström *et al.*, 1999]) a mis en évidence le rôle prépondérant du latex et de sa température de transition vitreuse (T_g) sur la déformation de la couche. Lorsque la température du latex dépasse sa T_g , son module élastique diminue fortement ce qui traduit la forte mobilité des chaînes macromoléculaires. Wikström ([Wikström *et al.*, 2002]) a également montré qu'il est important de différencier la déformation au voisinage de la surface de la couche de ce qui se produit à cœur. La déformation de la couche est caractérisée en surface par l'augmentation du brillant et à cœur par la diminution de la porosité. Comme pour les papiers non couchés, l'utilisation d'une température de surface de rouleau élevée et d'une faible pression appliquée dans le nip favorise la déformation au voisinage de la surface. La structure poreuse de la surface de la couche apparaît plus fermée et améliore ainsi le brillant. Par ailleurs, les charges présentes à la surface ont alors tendance à s'orienter dans le sens du calandrage. ([Hiorns *et al.*, 1998]).

Mikkilä ([Mikkilä *et al.*, 2002]) a étudié l'influence de la Tg sur la déformation de papier couché durant le calandrage. Il a distingué la déformation de la surface de la couche caractérisée par des mesures de brillant, de la déformation à cœur caractérisée par des mesures de perméabilité à l'air (porosité). Il a montré que la Tg du latex avait un double effet sur le brillant : si la Tg est élevée (45°C), la rigidité de la couche limite la déformation de la surface et si la Tg est faible (-7°C), la bonne formation du film entre le latex et les charges lors du séchage de la couche limite la déformation. Ainsi les couches contenant un latex dont la Tg est comprise entre les deux extrêmes (environ 10 - 20°C) sont les plus déformables durant le calandrage. Mikkilä ([Mikkilä *et al.*, 2002]) a montré que plus la Tg est faible, plus la compression de la couche est importante, surtout aux faibles températures.

Selon Lamminmäki ([Lamminmäki *et al.*, 2005]), le degré de liaison du latex, la taille des particules de latex et des charges jouent sur la déformation de la couche. Ses travaux montrent que de nombreuses propriétés de la couche après calandrage peuvent être reliées à celles avant calandrage et que la formation de la couche (latex, température de séchage) conditionne la déformation de la couche durant le calandrage.

1.4.2. - Interaction rouleau / papier et encrassement des rouleaux

Au cours du calandrage, des interactions entre les rouleaux et les couches des papiers se développent et peuvent entraîner des dépôts qui s'accumulent au cours du temps. Ces dépôts sont néfastes à l'état de surface des papiers et aux rouleaux.

1.4.2.1. - Dépôt sur les rouleaux

Carlsson ([Carlsson *et al.*, 2002]) présente deux types de défauts différents : des dépôts de type poussière et d'autres de type collant.



Figure 1.22 : Aspect d'un rouleau avant calandrage ([Carlsson *et al.*, 2002])

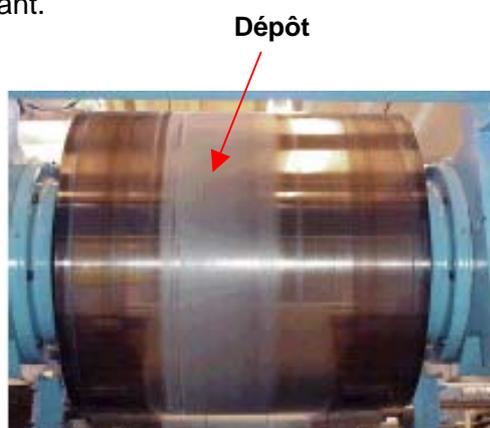


Figure 1.23 : Dépôt sur le rouleau après calandrage ([Carlsson *et al.*, 2002])

Il a proposé deux mécanismes de formation de dépôt :

- Le dépôt de type poussière (« poussierage ») pourrait provenir d'un détachement de particules de la couche. Le liant ne serait pas suffisant pour assurer une bonne adhésion des pigments dans la couche.
- Le dépôt de type collant apparaît quand l'adhésion de la couche sur la surface des rouleaux est plus forte que les forces de cohésion de la couche elles-mêmes. Le dépôt de type collant est illustré sur la Figure 1.23.

1.4.2.2. - Altération de la couche des papiers

Les dépôts de types collant entraînent des ruptures de la couche qui se déposent sur les rouleaux. Ce type de défaut endommage l'état de surface du papier. La Figure 1.24 montre des cratères qui sont dus à l'arrachement de la couche.

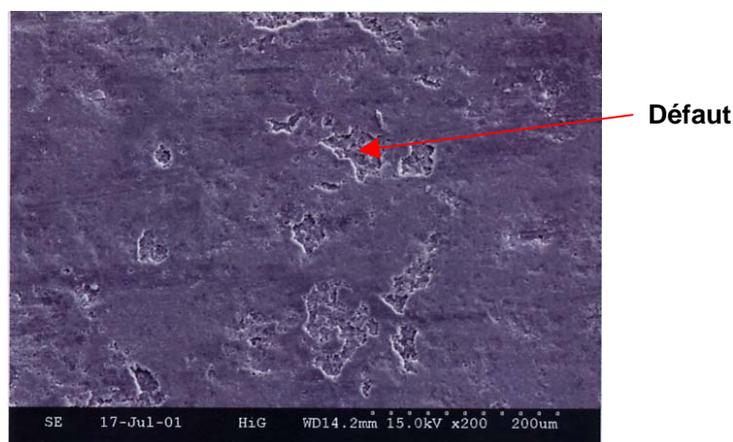


Figure 1.24 : Défaut de surface sur les papiers couchés ([Carlsson et al., 2002])

Les interactions entre la surface des papiers couchés et les rouleaux entraînent des problèmes de productivité dans les industries papetières. Non seulement, l'accumulation de dépôts oblige un arrêt des calandres pour pouvoir nettoyer les rouleaux, mais aussi les papiers produits sont de moins bonne qualité. Par ailleurs, l'apparition de dépôt est influencée par la température et les dépôts de type collant s'amplifient avec la température.

1.4.3. - Etude de l'influence du latex des couches sur la formation de dépôt sur les rouleaux

Pour essayer de mieux comprendre les conditions conduisant à la formation de dépôt sur les rouleaux, Carlsson ([*ibid.*]) s'est intéressé aux propriétés viscoélastiques des couches. Le latex qui assure la cohésion de la couche a tendance à s'écouler plus facilement avec la température. La couche devient plus déformable favorisant ainsi le contact avec les rouleaux et donc les phénomènes de collage. Des essais de calandrage dans différentes conditions de température des rouleaux et de force linéique ont été réalisés avec quatre papiers dont les propriétés viscoélastiques des latex diffèrent.

1.4.3.1. - Présentation des propriétés viscoélastiques des latex

Quatre latex styrène-butadiène avec des propriétés mécaniques différentes (A, B, C, D) ont été sélectionnés pour réaliser les couches. Le comportement rhéologique des différents latex a été caractérisé par un spectromètre mécanique dynamique (DMS), (Figure 1.25). Le module de conservation élastique G' caractérise la contrainte nécessaire à produire une déformation donnée. Le pic de $\tan\delta$ (rapport entre le module visqueux et le module élastique) caractérise la température de transition vitreuse du latex. Un faible module traduit le caractère très déformable du latex ce qui permet une bonne formation du film. Cependant, des risques d'adhésion peuvent se produire durant le séchage ou le calandrage.

Les courbes de G' en fonction de la température montrent que, comparativement, les latex A et B ont une plus grande facilité à se déformer dans une gamme de température entre 20 et

50°C. La même tendance est observée pour les latex B et D aux plus hautes températures (100 – 140°C). D'autre part, les courbes de $\tan\delta$ en fonction de la température montrent nettement une température de transition vitreuse pour les latex C et D aux alentours de 50 – 60°C, ce qui est en dehors de la gamme utilisée en papeterie ; alors que les latex A et B ont une transition vitreuse moins marquée vers 25 - 30°C.

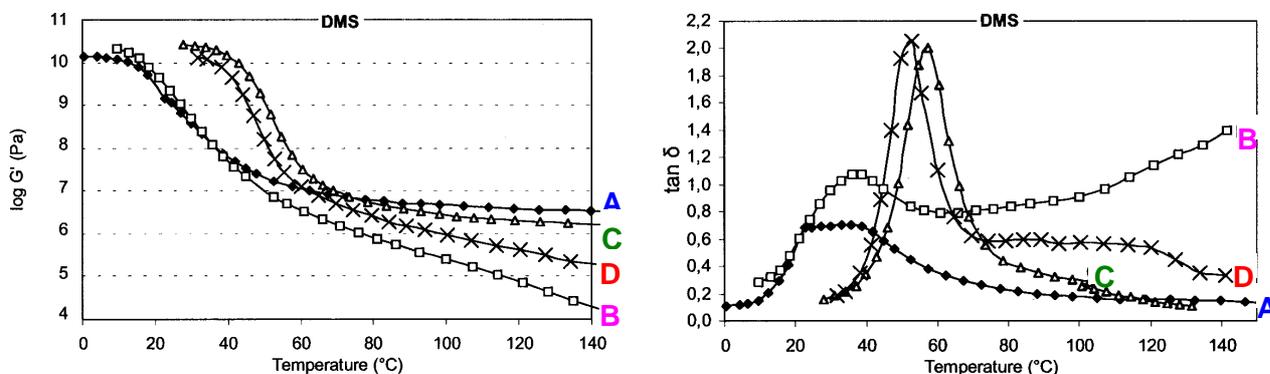


Figure 1.25 : Caractérisation des propriétés rhéologiques des latex par DMS (G' et $\tan\delta$), (d'après [Carlsson et al., 2002])

1.4.3.2. - Evaluation des dépôts sur les rouleaux

Des essais de calandrage ont été effectués pour des températures de surface des rouleaux de 70, 120, 160 et 250°C avec des forces linéiques de 30, 70 et 150 kN/m. Les dépôts sur les cylindres ont été évalués de manière visuelle et notés de 0 à 4 : 0 : pas de transfert de la couche sur le rouleau ; 4 : nombreux dépôts. A titre d'exemple, le dépôt observé sur la Figure 1.23, a été obtenu en calandrant le papier couché contenant le latex D, avec une température du rouleau de 250°C et une force linéique de 150 kN/m. La

Figure 1.26 montre les résultats obtenus pour les forces linéiques de 70 et 150 kN/m.

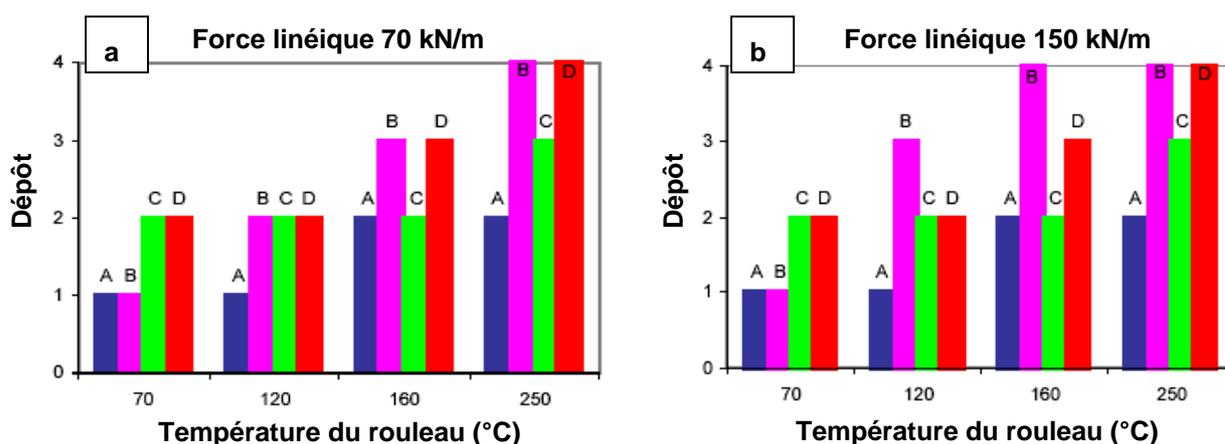


Figure 1.26 : Représentation de la quantité des dépôts observée sur les rouleaux en fonction de la température des rouleaux et de la force linéique : a : 70 kN/m ; b : 150 kN/m ; graduation des dépôts : 0 : pas de transfert, 4 : nombreux dépôts ; (d'après [Carlsson et al., 2002])

Les résultats montrent que les dépôts pour les deux forces linéiques présentées augmentent avec la température, l'augmentation étant la plus forte pour les latex B et D :

- Pour les faibles températures de rouleau (70°C), les latex A et B engendrent moins de dépôts que les latex C et D. Le « poussierage » pourrait être le mécanisme dominant pour la formation de dépôt. Les difficultés d'écoulement des latex C et D résulteraient en la formation de couches de mauvaise qualité et engendreraient ainsi le départ de particules dû à une cohésion insuffisante de la couche.
- Pour les températures plus élevées (160, 250°C), les latex B et D qui ont une plus grande facilité à l'écoulement engendrent plus de dépôts. Carlsson ([*Ibid.*]) explique ce résultat par le fait que l'augmentation des zones de contact entre le rouleau et la couche entraîne des forces d'adhésion plus importantes que les forces de cohésion de la couche. Le mécanisme de collage serait donc à l'origine du dépôt.

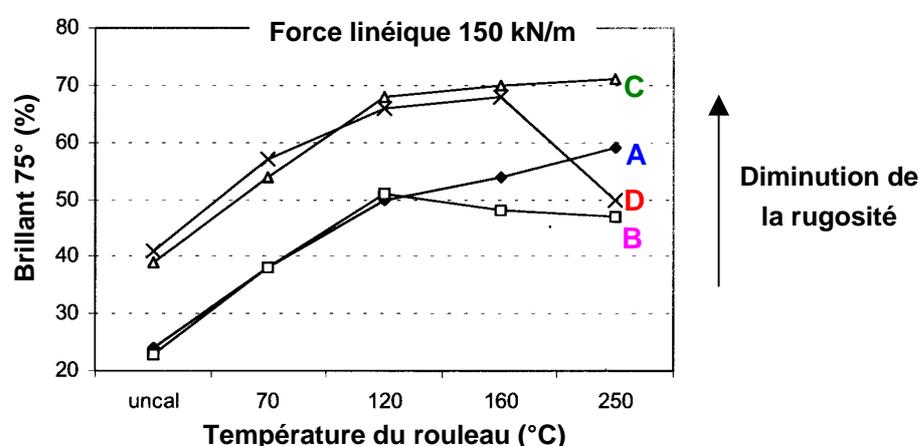


Figure 1.27 : Brillant du papier en fonction de la température du rouleau – Force linéique : 150 kN/m (d'après [Carlsson et al, 2002])

Les tests de caractérisation de la surface des papiers montrent une chute de la brillance pour les plus hautes températures avec les latex B et D ayant conduit aux dépôts les plus importants sur les cylindres (Figure 1.27). En d'autres termes, le phénomène de collage endommage plus la surface des papiers que le phénomène de « poussierage ». Enfin, Carlsson ([*Ibid.*]) montre dans cette étude que la température de transition vitreuse n'est pas un paramètre suffisant pour prédire la formation de dépôt lors du calandrage à des températures élevées. Une étude complète du comportement viscoélastique en fonction de la température est nécessaire pour optimiser le procédé de calandrage.

1.4.4. - Technique de détection des dépôts sur les rouleaux

Les travaux de Carlsson ([*Ibid.*]) ont permis de mettre en évidence le rôle prépondérant des propriétés viscoélastiques des latex dans les mécanismes de dépôts sur les rouleaux. Cependant, le moyen utilisé pour déterminer les variations de dépôts entre les différents essais est dépendant de l'œil humain. Cette méthode donne des résultats intéressants, mais, il s'agit d'un travail difficile et sujet à la variation d'appréciation des opérateurs. Heeschen ([Heeschen et al., 1999]) développe un détecteur de dépôt sur les rouleaux, basé sur un phénomène de photo détection. Cet appareil permet de mesurer la lumière réfléchie par les rouleaux métalliques. Ainsi dès qu'un dépôt apparaît sur la surface du rouleau, la

lumière n'est plus réfléchi vers le détecteur mais diffuse. Ce moyen de détection permet de réaliser une mesure quantitative des dépôts, mais aussi de détecter leur apparition plus rapidement qu'avec l'œil humain. D'autre part, elle permet de suivre l'évolution de dépôt au cours du calandrage et ainsi d'établir des cinétiques de dépôt.

La compréhension de ces problèmes de dépôt a un double intérêt : d'une part, elle permet d'aider à la formulation des saucages conduisant à des produits de meilleures qualités ; d'autre part, elle permet d'éviter ou de ralentir l'endommagement des rouleaux et d'obtenir ainsi un gain de productivité.

1.4.5. - Conclusion

Le calandrage des papiers couchés a pour objectif d'améliorer l'état de surface des papiers. De nouvelles études sur la déformation de la couche sont apparues ces dernières années. La nature de la couche et principalement le comportement rhéologique du liant se sont avérés déterminants sur la déformation de la couche.

Les études sur le contact entre le papier et les rouleaux sont plus récentes. En 2002, deux types de dépôt (poussière et collage) ont été identifiés sur les rouleaux. La méthode de caractérisation par réflexion, présentée en 2004, paraît prometteuse pour identifier les mécanismes de dépôts. Les propriétés rhéologiques des latex présents en surface des papiers couchés sont une des origines des dépôts de type collant. Une meilleure connaissance du contact entre les rouleaux et le papier permettrait d'améliorer les propriétés de surface du papier (brillant, lissé) et de limiter la formation de dépôt sur les rouleaux.

1.5. - Conclusion

L'objectif de cette thèse est d'améliorer les connaissances des phénomènes mécaniques et physico-chimiques mis en jeu dans un nip de calandre. Cette étude bibliographique a permis de présenter le papier et l'opération de calandrage. L'objectif principal de cette dernière opération est l'amélioration de la qualité de surface des papiers, or celle-ci se produit inévitablement au détriment de l'épaisseur des papiers. Différentes calendres ont été développées ces dernières années afin de pouvoir adapter les conditions d'utilisation en fonction des propriétés du papier recherchées. Cependant, la compréhension totale des phénomènes qui se produisent dans le nip passe par l'établissement d'une relation contrainte / déformation et nécessite de relier les mécanismes de volume (compression du papier) aux mécanismes de surface (développement de brillant, phénomènes d'adhésion).

Le comportement mécanique du papier a été étudié par différents auteurs à partir d'essais de compression ou de calandrage. Ces essais sont à l'origine des modèles empiriques, phénoménologiques et rhéologiques présentés. La principale limite des essais de compression se situe au niveau des temps de sollicitation qui restent longs par rapport à ceux rencontrés dans un nip de calandre (inférieur à 1 ms). Par ailleurs, les courbes de comportement mécanique du papier présentées dans la littérature, ne comportent que rarement des grandeurs intrinsèques au papier, telles que la contrainte d'écoulement ou le module d'élasticité.

La quatrième partie de ce chapitre bibliographique s'est intéressé plus particulièrement au cas des papiers couchés. Le couchage est un traitement de surface qui se produit généralement avant le calandrage. La présence d'une couche sur la surface d'un papier

modifie donc sa structure, son comportement mécanique et également ses interactions avec la surface du rouleau dans le nip. Par ailleurs, l'utilisation d'une température du rouleau métallique sans cesse plus élevée a engendré le développement de dépôt sur les rouleaux de la calandre. Le comportement rhéologique des liants présents dans la couche, s'est récemment avéré déterminant sur la déformation de la couche et sur le génération de dépôts de type collant.

Le développement des caractéristiques de surface repose sur la maîtrise, déjà bien connue, des paramètres de calandrage. Cependant, l'amélioration du brillant ou du lissé et la conservation de la main du papier sont des caractéristiques antagonistes. Ainsi, les conditions de calandrage doivent être optimisées afin de trouver le meilleur compromis possible.

Dans le chapitre 2, une étude du comportement mécanique du papier en compression est présentée à partir d'essais d'indentation sphérique de feuille de papier. Le chapitre 3 est également consacré au comportement mécanique du papier en compression mais à partir d'essais de calandrage. Le chapitre 4 est dédié aux interactions de surface et au contact entre le papier et le rouleau dans le nip. Enfin, le chapitre 5 est une synthèse du comportement mécanique du papier et des interactions de surface dans le nip.

Chapitre 2 : Etude du comportement mécanique des papiers en compression à partir d'essais d'indentation sphérique de feuilles de papier

2. - Etude du comportement mécanique des papiers en compression à partir d'essais d'indentation sphérique de feuilles de papier	41
2.1. - Essai d'indentation sphérique d'un film mince compressible	41
2.1.1. - Principe et analogie avec le calandrage	41
2.1.2. - Analyse de la déformation du papier lors de la pénétration et estimation des caractéristiques rhéologiques du papier.....	43
2.1.3. - Etude de la décharge	45
2.1.4. - Détermination des grandeurs mécaniques à partir de données issues de la littérature	47
2.2. - Compression quasi-statique.....	48
2.2.1. - Présentation de l'essai et de son principe.....	48
2.2.2. - Interprétation de l'essai	49
2.2.3. - Répétabilité de l'essai	51
2.2.4. - Influence du rayon de la bille sur les grandeurs déterminées	52
2.2.5. - Influence du nombre de feuilles sur les grandeurs déterminées.....	52
2.3. - Compression dynamique par chute de bille	54
2.3.1. - Présentation de l'essai et de son principe.....	54
2.3.2. - Interprétation de l'essai de chute de bille.....	54
2.3.2.1. - Bilan et analyse des forces.....	55
2.3.2.2. - Détermination de la force réelle F appliquée sur le papier	56
2.3.2.3. - Détermination de la pénétration δ de la bille dans le papier.....	56
2.3.3. - Exemple d'analyse de chute de bille sur papier	56
2.3.3.1. - Analyse mécanique	56
2.3.3.2. - Analyse topographique.....	62
2.3.4. - Vérification des vitesses d'impact et de rebond à l'aide de la caméra rapide ..	67
2.3.5. - Vérification des grandeurs calculées par un essai de chute de bille sur un échantillon d'aluminium	68
2.3.6. - Influence des conditions d'essai sur les grandeurs déterminées	71
2.3.6.1. - Influence de l'hétérogénéité du papier	72
2.3.6.2. - Influence de la bille et de la hauteur de chute	73
2.3.6.3. - Influence du nombre de feuilles de papier.....	75
2.4. - Application à l'étude du comportement mécanique d'une bille élastomère	77
2.4.1. - Compression d'une bille élastomère	77
2.4.2. - Compression de la bille élastomère en dynamique.....	79
2.5. - Application à l'étude du comportement mécanique des papiers.....	80
2.5.1. - Influence de la nature pâte.....	80
2.5.2. - Influence de la teneur en charges.....	83
2.5.3. - Influence de la densité initiale du papier	84

2.5.4. - Influence de la couche.....	87
2.5.4.1. - Influence du procédé de couchage et de la concentration en pigments...	88
2.5.4.2. - Influence du poids de couche	89
2.5.4.3. - Influence du liant.....	91
2.5.5. - Influence de la vitesse de sollicitation	92
2.5.6. - Conclusions sur le comportement mécanique des papiers	93

2. - Etude du comportement mécanique des papiers en compression à partir d'essais d'indentation sphérique de feuilles de papier

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, les principaux essais de sollicitations mécaniques du papier présentés dans la littérature sont des essais de compression. Cependant, les temps de sollicitation sont longs par rapport à ceux rencontrés dans un nip de calandre. Deux essais de laboratoire permettant de caractériser le comportement mécanique du papier ont alors été développés. Après avoir présenté les essais et leurs méthodes d'interprétation mécanique, nous les appliquerons à une étude du comportement mécanique des papiers.

2.1. - Essai d'indentation sphérique d'un film mince compressible

Les deux essais de laboratoire développés reposent sur le principe de l'indentation du papier par une bille sphérique :

- Le premier essai sollicite le papier à des temps longs caractérisant la compression quasi-statique,
- Le second sollicite le papier à des temps courts avec des vitesses de sollicitation beaucoup plus élevées : Il s'agit d'un essai de chute de bille sur une feuille de papier.

L'indenteur choisi est une bille, sphérique, afin de simplifier la conception mécanique de l'essai. Ainsi, quelles que soient les conditions d'essai, la géométrie de la zone de contact est reproductible, contrairement à des essais sur une presse entre tas plats où les plateaux doivent être parfaitement parallèles. Le rayon de la bille est choisi grand devant l'épaisseur du papier. Dans les essais de chute de bille et de compression quasi-statique, une bille comprime le papier déposé contre un support métallique. Le support et la bille sont supposés rigides et indéformables de telle sorte que ce soit le papier qui subisse la déformation. Ce type d'essai s'inspire des essais de dureté Brinell permettant de caractériser le comportement rhéologique d'un matériau.

2.1.1. - Principe et analogie avec le calandrage

Au cours de l'essai d'indentation, la bille s'enfonce dans le papier avec une force croissante entraînant la déformation du papier sous l'indenteur. La forme sphérique de l'indenteur de rayon R engendre une zone de contact circulaire dont le rayon a , augmente au fur et à mesure de la pénétration de la bille dans le papier jusqu'à une valeur maximale notée a_M . La force atteint alors une valeur maximale notée F_M . Pour un essai réalisé par chute de la bille, la vitesse de l'indenteur décroît jusqu'à zéro. Le temps d'enfoncement est alors noté t_M . Après ce temps, l'indenteur se retire avec une vitesse négative et laisse sur le papier une empreinte résiduelle dont le rayon final est noté a_f .

Pour décrire la déformation du papier, le modèle de fondation ([Johnson, 1985]) est adopté. L'épaisseur du papier (e environ 100 μm) étant faible devant le rayon de contact (a environ 1 mm dans nos essais), tout se passe en effet comme si chaque colonne de papier située à la distance radiale r subit une compression uni axiale selon l'axe z sous une contrainte σ_{zz} (car $a \ll R$). Le modèle suppose qu'il n'y a pas d'interaction entre les

colonnes, pas de cisaillement. Ainsi, en dehors de la zone de contact avec l'indenteur, le papier ne se déforme pas.

Le mode de déformation du papier dans un nip de calandre est du même type. La zone de contact (longueur de nip, quelques mm) est grande devant l'épaisseur du papier (e environ $100\ \mu\text{m}$). La réduction d'épaisseur n'est pas compensée par un allongement dans le plan de la feuille : Lif ([Lif *et al.*, 1997]) a montré que les déformations dans le plan sont inférieures à 1% pour des réductions d'épaisseur entre 10 et 30%. Par ailleurs, comme nous l'avons vu dans la partie 1.3.2.1 et nous le verrons dans le chapitre 4, la réplication de l'état de surface du rouleau sur le papier montre que le glissement est quasiment inexistant. Le modèle de fondation s'appuyant sur le tassement d'une tranche sur elle-même indépendamment de sa voisine apparaît alors tout à fait adapté à la description du comportement du papier lors du calandrage. Dans le chapitre 5, nous précisons les différences inévitables entre cet essai et le calandrage.

La pénétration de la bille dans le papier est donc différente pour chaque colonne étudiée. Elle dépend de sa position radiale. On la note $h(r)$ et δ pour $h(0)$. La Figure 2. 1 présente une schématisation de l'empreinte laissée par la bille sur le papier sous la force maximale F_M et après le contact.

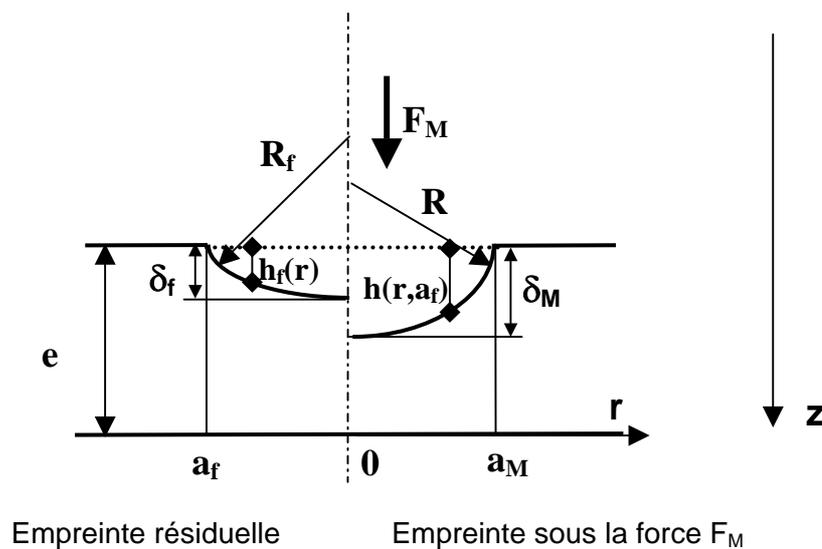


Figure 2. 1 : Schématisation de l'empreinte bille / papier sous une force maximale F_M et après contact

La déformation totale pendant l'enfoncement de la bille est la somme d'une déformation plastique ε_p et d'une déformation élastique ε_e :

$$\varepsilon(\mathbf{r}, \mathbf{a}) = \varepsilon_p(\mathbf{r}, \mathbf{a}) + \varepsilon_e(\mathbf{r}, \mathbf{a}) \quad \text{Équation 2. 1}$$

En négligeant l'élasticité de la bille et du socle, hypothèse qui sera vérifiée par la suite, la déformation totale, pour un rayon de contact a , est donnée par l'équation d'une calotte sphérique de rayon égale à celui la bille R . Pour un faible enfoncement, on a donc :

$$\varepsilon(\mathbf{r}, \mathbf{a}) \approx \frac{a^2 - r^2}{2Re} \approx \frac{h(r)}{e} \quad \text{Équation 2. 2}$$

La déformation plastique $\varepsilon_p(r,a)$ peut être déterminée à partir de la cavité résiduelle formée par la bille. Celle-ci est reliée à l'écrasement final $h_f(r, a_f)$ de la colonne :

$$\varepsilon_p(\mathbf{r}, \mathbf{a}_f) = \frac{\mathbf{h}_f(\mathbf{r})}{e} \quad \text{Équation 2. 3}$$

2.1.2. - Analyse de la déformation du papier lors de la pénétration et estimation des caractéristiques rhéologiques du papier

Dans la gamme de vitesse de déformation de l'essai, le comportement du papier lors de la pénétration est caractérisé par deux grandeurs que nous supposons fonction de la déformation plastique ε_p :

- La contrainte σ_{zz} que nous appelons contrainte d'écoulement du papier : $\sigma_0(\varepsilon_p)$
- Le module d'élasticité : $E^*(\varepsilon_p)$

La déformation élastique est supposée linéaire, c'est à dire, la contrainte $\sigma_0(\varepsilon_p)$ est reliée à la déformation par le module d'élasticité. Compte tenu du mode de déformation du papier (modèle de fondation), ce module d'élasticité $E^*(\varepsilon_p)$ n'est pas le module de traction uniaxial E . Pour un corps élastiquement isotrope, les deux modules sont reliés par l'Équation 2. 4 où intervient le coefficient de Poisson ν :

$$E^* = E \frac{(1-\nu)}{(1-2\nu)(1+\nu)} \quad \text{Équation 2. 4}$$

On a donc :

$$\varepsilon_e(\mathbf{r}, \mathbf{a}) = \frac{\sigma_0(\varepsilon_p(\mathbf{r}, \mathbf{a}))}{E^*(\varepsilon_p(\mathbf{r}, \mathbf{a}))} \quad \text{Équation 2. 5}$$

Par ailleurs, nous faisons également l'hypothèse que le rayon à la pénétration maximale est égal au rayon résiduel : $\mathbf{a}_M = \mathbf{a}_f$.

Dans le cas où la déformation plastique augmente, on obtient la relation suivante en reportant l'Équation 2. 2 et l'Équation 2. 5 dans l'Équation 2. 1 :

$$\varepsilon(\mathbf{r}, \mathbf{a}) \approx \frac{\mathbf{a}^2 - \mathbf{r}^2}{2\mathbf{R}e} = \varepsilon_p(\mathbf{r}, \mathbf{a}) + \frac{\sigma_0(\varepsilon_p(\mathbf{r}, \mathbf{a}))}{E^*(\varepsilon_p(\mathbf{r}, \mathbf{a}))} \rightarrow \sigma_0(\varepsilon_p(\mathbf{r}, \mathbf{a})) = \sigma_0\left(\varepsilon_p\left(\frac{\mathbf{a}^2 - \mathbf{r}^2}{2\mathbf{R}e}\right)\right) \quad \text{Équation 2. 6}$$

Cette relation montre que la déformation plastique d'une tranche et la contrainte d'écoulement associée sont en fait des fonctions implicites de $(a^2-r^2)/(2Re)$.

Considérons maintenant le processus d'enfoncement de la bille dans le papier. Pour une pénétration δ , le rayon vaut a , la contrainte d'écoulement est fonction de la déformation plastique, donc de la colonne étudiée à la distance r du centre.

Ainsi, la force F s'opposant à la pénétration de la bille est égale à :

$$F = 2\pi \int_0^a \sigma_0(\varepsilon_p(r)) r dr \quad \text{Équation 2. 7}$$

D'après l'Équation 2. 6, on a :

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{F} = 2\pi \int_0^a \sigma_0 \left(\varepsilon_p \left(\frac{a^2 - r^2}{2Re} \right) \right) r dr \\ \delta = \frac{a^2}{2R} \quad \text{au centre du contact} \end{array} \right. \quad \text{Équation 2. 8}$$

en posant $\mathbf{u} = \frac{a^2 - r^2}{2Re}$, on obtient :

$$\mathbf{F} = 2\pi Re \int_0^{\delta/e} \sigma_0(\varepsilon_p(\mathbf{u})) du \rightarrow \frac{d\mathbf{F}}{d\delta} = 2\pi R \sigma_0 \left(\varepsilon_p \left(\frac{\delta}{e} \right) \right) \quad \text{Équation 2. 9}$$

Cette relation montre que la dérivée de la force par rapport à la pénétration est égale à la contrainte d'écoulement au centre du contact (à un facteur multiplicatif près), à condition que la déformation plastique augmente. On a donc :

$$\sigma_0(\varepsilon_p) = \frac{1}{2\pi R} \frac{d\mathbf{F}}{d\delta}(\delta) \quad \text{Équation 2. 10}$$

Connaissant la contrainte pour une déformation plastique donnée, le module d'élasticité peut être déduit à partir de la pénétration maximale ($h_M(r)$) et de la pénétration résiduelle ($h_f(r)$).

$$\mathbf{E}^*(\varepsilon_p) = \left(\frac{e}{h_M(r) - h_f(r)} \right) \sigma_0(\varepsilon_p) \quad \text{Équation 2. 11}$$

Par ailleurs, selon l'hypothèse que le rayon de contact maximal est égal au rayon de contact résiduel, les grandeurs recherchées pour la pénétration maximale à la distance radiale r sont identiques à celles relatives au centre de l'impact à un temps inférieur à t_M pour la même pénétration que l'on note δ_r . On a donc :

$$\varepsilon_p(r) = \frac{h_f(r)}{e} \quad \delta_r = \frac{a^2 - r^2}{2R} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \sigma_0(\varepsilon_p) = \frac{1}{2\pi R} \frac{d\mathbf{F}}{d\delta}(\delta = \delta_r) \\ \mathbf{E}^*(\varepsilon_p) = \left(\frac{e}{\delta_r - h_f(r)} \right) \sigma_0(\varepsilon_p) \end{array} \right. \quad \text{Équation 2. 12}$$

Il s'agit des relations fondamentales cherchées. Elles permettent de relier ce qui se passe au centre du contact durant l'impact aux grandeurs relatives à l'empreinte résiduelle.

Cette analyse suppose toutefois que les effets visqueux sont négligeables. Une méthode approchée pour décrire l'effet de la vitesse de déformation sur la contrainte d'écoulement consiste à introduire une loi de plasticité du type :

$$\sigma_0 = \sigma_1(\varepsilon_p)^{m^*} \quad \text{Équation 2. 13}$$

Si l'exposant m^* est faible, les conséquences déduites de l'Équation 2. 6 restent valables. On note $t(\delta)$ le temps nécessaire pour atteindre la pénétration δ . Les vitesses de déformation

au centre en cours d'impact δ_c et au rayon r de l'empreinte résiduelle associé δ_r sont de l'ordre de :

$$\delta_c \approx \frac{\delta_r}{e(t(\delta_r))} \quad \delta_r \approx \frac{\delta_r}{e(t_M - t(r^2/(2R)))} \quad \text{Équation 2. 14}$$

Les relations (Équation 2. 12) sont alors modifiées de la manière suivante :

$$\varepsilon_p(\mathbf{r}) = \frac{\mathbf{h}_f(\mathbf{r})}{e} \quad \delta_r = \frac{a_f^2 - r^2}{2R} \rightarrow \begin{cases} \sigma_1(\varepsilon_p) = \frac{\delta_c^{m^*}}{2\pi R} \frac{dF}{d\delta} (\delta = \delta_r) \\ E^*(\varepsilon_p) = \left(\frac{e}{\delta_r - \mathbf{h}_f(\mathbf{r})} \right) \sigma_1(\varepsilon_p) \delta_c^{m^*} \end{cases} \quad \text{Équation 2. 15}$$

Des essais effectués avec diverses vitesses d'impact, épaisseurs de papier (feuilles superposées) et / ou rayons de bille permettront de faire varier la durée d'impact et donc d'identifier la valeur de m^* .

La prise en compte de la viscoélasticité du papier semble plus difficile. On note les points suivant :

- En toute rigueur, l'Équation 2. 15 fournit le module aux temps longs du papier ou module relaxé puisqu'il est déduit de l'empreinte résiduelle après un temps long devant le temps d'impact.
- Par contre, on peut, en principe, estimer un module quasi-instantané (pour les durées d'impact explorées) E_d^* en exploitant les résultats de divers impacts après avoir identifié la loi $\sigma_0(\varepsilon_p)$. Connaissant la courbe de la force en fonction de la pénétration au centre de l'impact $F(\delta)$ durant la charge et le retrait, nous pouvons déduire une pénétration finale noté δ_{fd} lorsque la force redevient nulle. Cette méthode permet d'estimer la recouvrance élastique aux temps courts du papier pour sa déformation plastique maximale.

$$\delta_M = \frac{a_f^2}{2R} \rightarrow \varepsilon_p = \frac{\delta_f}{e} \quad E_d^*(\varepsilon_p) = \left(\frac{e}{\delta_M - \delta_{fd}} \right) \sigma_0(\varepsilon_p) \quad \text{Équation 2. 16}$$

Il est donc possible en modulant les conditions d'essai d'estimer la valeur du module quasi-instantané du papier pour diverses valeurs de déformation plastique. L'écart que l'on peut avoir entre la pénétration finale (résiduelle) et la pénétration finale déduite peut être dû à la recouvrance viscoélastique du papier. On s'attend donc à obtenir un module aux temps courts supérieur à celui aux temps longs.

2.1.3. - Etude de la décharge

L'analyse de la décharge est a priori très complexe, puisque, contrairement à la phase de pénétration, nous ignorons l'évolution du rayon de contact a avec la pénétration et que, si on peut très vraisemblablement négliger la déformation plastique, la décharge peut induire des phénomènes de relaxation viscoélastique.

Supposons en première approximation, la décharge comme élastique et négligeons toute adhésion entre le papier et la bille. La décharge peut alors être vue comme le retrait élastique de la bille d'une cavité axisymétrique, de profondeur $h_d(r)$, située dans une couche de module $E_d^*(\varepsilon_p)$ (Figure 2. 2).

A priori, la fonction $h_d(r)$ vérifie les conditions :

$$\mathbf{h}_d(\mathbf{0}) = \delta_{fd} \quad \mathbf{h}_d(\mathbf{a}_f) = \mathbf{0} \quad \text{Équation 2. 17}$$

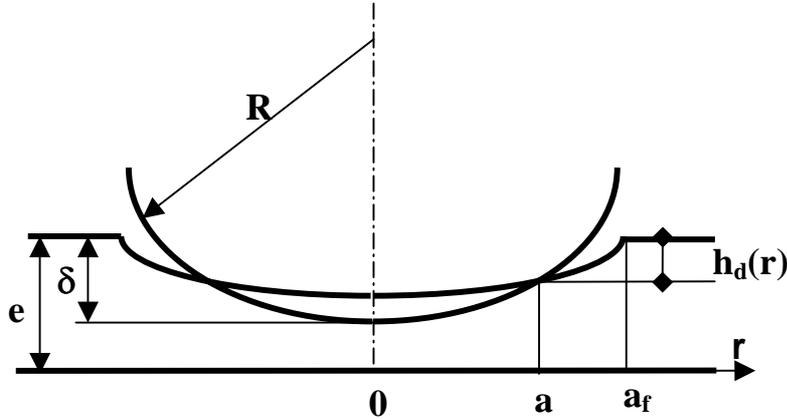


Figure 2. 2 : Schématisation de la décharge

Pour une pénétration comprise entre δ_M et δ_{fd} dans le papier, le rayon de contact a vérifie l'équation :

$$\delta - \frac{\mathbf{a}^2}{2\mathbf{R}} = \mathbf{h}_d(\mathbf{a}) \quad \text{Équation 2. 18}$$

La force F pour la pénétration δ vaut :

$$\mathbf{F}(\delta) = \frac{2\pi}{\mathbf{e}} \int_0^{\mathbf{a}} \mathbf{E}_d^*(\boldsymbol{\varepsilon}_p(\mathbf{r})) \left(\delta - \frac{\mathbf{r}^2}{2\mathbf{R}} - \mathbf{h}_d(\mathbf{r}) \right) \mathbf{r} \, \mathbf{d}\mathbf{r} \quad \text{Équation 2. 19}$$

Comme la fonction sous l'intégrale est nulle au bord du contact (Équation 2. 17), on a par dérivation :

$$\frac{\mathbf{d}\mathbf{F}}{\mathbf{d}\delta} = \frac{2\pi}{\mathbf{e}} \int_0^{\mathbf{a}} \mathbf{E}^*(\boldsymbol{\varepsilon}_p(\mathbf{r})) \mathbf{r} \, \mathbf{d}\mathbf{r} \quad \text{Équation 2. 20}$$

On obtient alors en utilisant l'Équation 2. 8 ($\mathbf{a}_M^2 = 2\mathbf{R}\delta_M$) au rayon maximal, une estimation du module d'élasticité moyen :

$$\mathbf{E}^*(\boldsymbol{\varepsilon}_p) = \frac{\mathbf{e}}{2\pi\mathbf{R}\delta_M} \frac{\mathbf{d}\mathbf{F}}{\mathbf{d}\delta} \quad \text{Équation 2. 21}$$

Cette formule permet de déterminer à partir de la pente de la courbe force / pénétration à la décharge, le module instantané à un facteur multiplicatif près.

L'analyse de l'essai d'indentation d'un film mince compressible par le modèle de fondation lui attribue un comportement mécanique analogue à celui du papier lors du calandrage. Ainsi, à condition que les durées de sollicitations soient comparables ; ce qui est le cas pour la chute de bille, les deux grandeurs mécaniques déterminées (contrainte d'écoulement et module d'élasticité) sont directement utilisables pour modéliser le calandrage. Il s'agit d'un modèle unidirectionnel et simple, mais il ne prétend pas être

forcement complet. Par ailleurs, l'absence d'élargissement dans le plan compensant la réduction d'épaisseur justifie le fait que nous ne nous préoccupons pas de généraliser la loi de comportement obtenue à une sollicitation tridimensionnelle.

2.1.4. - Détermination des grandeurs mécaniques à partir de données issues de la littérature

Dans la partie 1.3.3.1, nous avons présenté des essais de compression réalisés par Feygin ([Feygin, 1999]) à différentes vitesses de sollicitations. Il a représenté l'évolution des déformations totales, plastiques et élastiques en fonction de la contrainte. A partir de ces données brutes, nous pouvons déterminer des grandeurs intrinsèques aux papiers tel que la contrainte d'écoulement et le module d'élasticité. Ces grandeurs sont supposées fonction de la déformation plastique. La contrainte peut donc être directement tracée à partir des données et le module d'élasticité est déterminé à partir de l'Équation 2. 5.

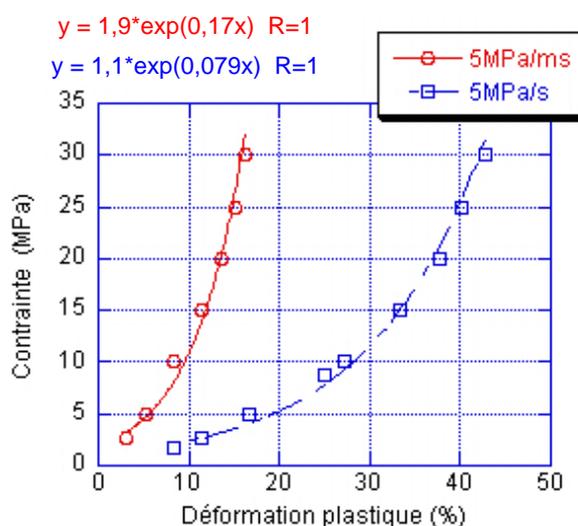


Figure 2. 3 : Détermination de la contrainte d'écoulement en fonction de la déformation plastique d'après les données de Feygin ([Feygin, 1999])

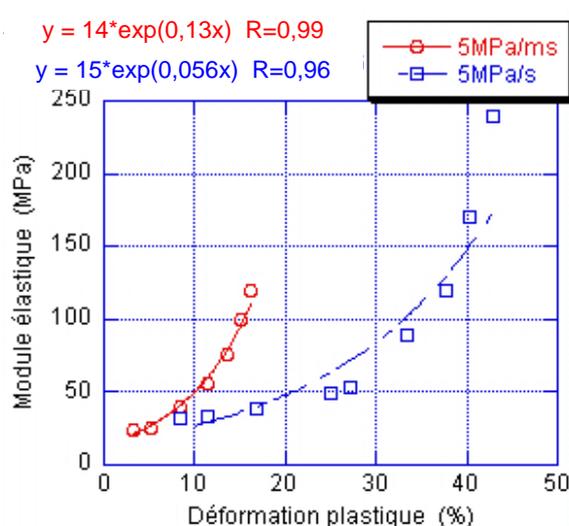


Figure 2. 4 : Détermination du module d'élasticité en fonction de la déformation plastique d'après les données de Feygin ([Feygin, 1999])

La Figure 2. 3 et la Figure 2. 4 montrent des courbes croissantes de la contrainte et du module en fonction de la déformation plastique :

- Ce comportement rhéologique indique que le papier est de plus en plus difficile à déformer au fur et à mesure de sa densification. Les données peuvent être représentées avec une bonne approximation par des lois de type exponentiel.
- Les grandeurs mécaniques sont également fonction de la vitesse de sollicitation : plus le papier est sollicité rapidement, plus la contrainte et le module croissent rapidement avec la déformation plastique. Il est donc important de prendre en compte la sensibilité à la vitesse. Nous y reviendrons par la suite (partie 2.3.6.3. -).

2.2. - Compression quasi-statique

2.2.1. - Présentation de l'essai et de son principe

Pour étudier le comportement du papier à des temps de sollicitation relativement longs par rapport au calandrage, un essai de compression quasi-statique avec une bille a été développé. Une balance à fléau permet d'appliquer une force F contre un support rigide en acier (Figure 2. 5). La feuille de papier est maintenue contre le support par un aimant percé au centre. Ainsi, lors de l'application de la force, la bille est directement en contact avec la feuille de papier. D'autre part, le système possède un capteur de déplacement permettant de déterminer la position d'équilibre de la bille.

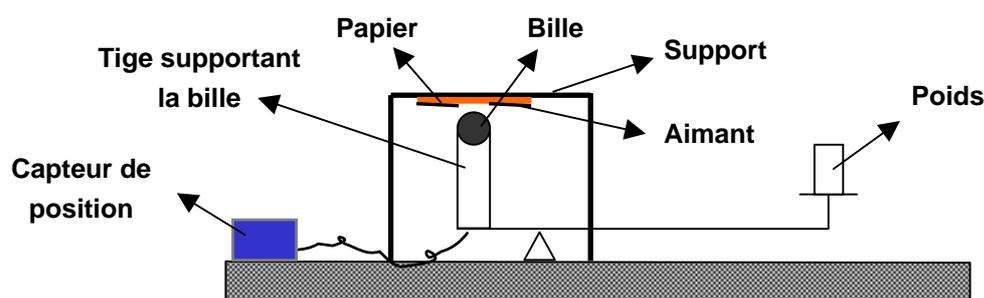


Figure 2. 5 : Schéma de l'essai de compression quasi-statique

L'essai consiste à imposer une faible pré-charge $F_0 = 0,4 \text{ N}$ afin de déterminer le niveau initial de la feuille et son épaisseur. Ensuite, des forces de 8 ; 21,8 ; 40 ; 80 et 160 N sont successivement appliquées pendant 30 secondes. Le capteur de déplacement donne la pénétration maximale sous charge de la bille dans le papier. La pré-charge de 0,4 N est à nouveau appliquée après chaque force afin de déterminer le retour élastique instantané et la profondeur résiduelle de la cavité. Les billes utilisées sont métalliques et de rayon R de 6,75 et 15 mm.

Le montage a été étalonné avec un capteur de force afin de vérifier que le poids déposé, multiplié par le bras de levier correspond bien à la force appliquée F par la bille. Par ailleurs, le capteur de déplacement a également été étalonné en plaçant sur le support un nombre variable de feuilles d'emballage alimentaire en aluminium d'épaisseur connue. L'application de forces plus ou moins élevées a mis en évidence une déformation élastique du montage. Le déplacement mesuré correspond alors à la pénétration de la bille dans le papier mais également au cédage élastique du montage. Ainsi pour déterminer la pénétration réelle de la bille, il faut apporter une correction. Celle-ci est linéaire et proportionnelle à la force appliquée (Figure 2. 6).

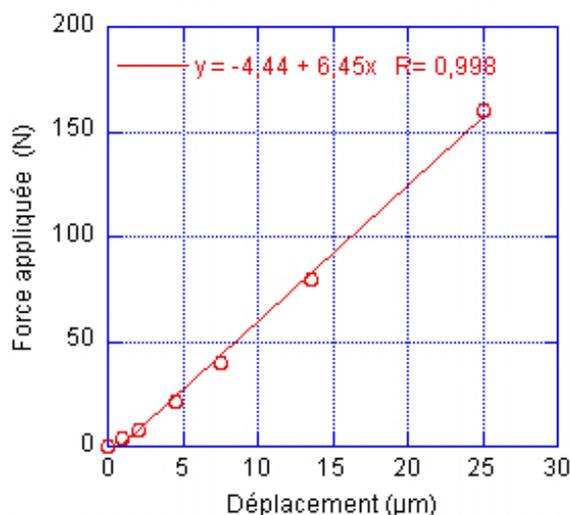


Figure 2. 6 : Courbe de cé dage du montage de l'essai de compression quasi-statique

2.2.2. - Interprétation de l'essai

L'essai permet de mesurer pour une force appliquée la pénétration totale, plastique et élastique du papier. Connaissant l'épaisseur du papier à l'endroit de l'essai grâce à la pré-charge appliquée initialement, nous pouvons en déduire la déformation totale, élastique et plastique (Figure 2. 7).

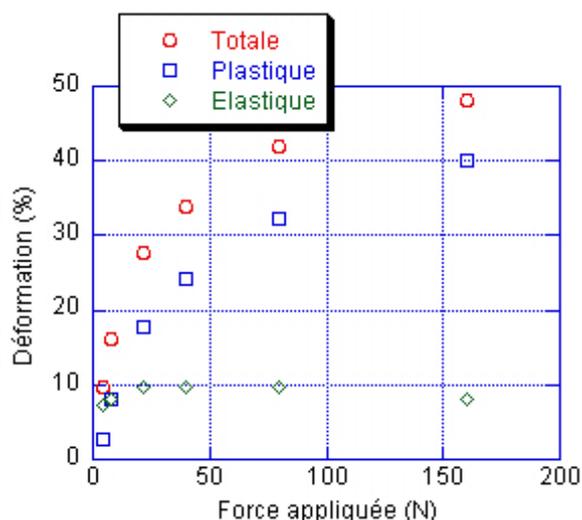


Figure 2. 7 : Essai de compression quasi-statique : Déformations d'un papier non couché (papier Kraft cf Tableau 2. 3) en fonction de la force appliquée – Bille métallique $R = 15$ mm

La Figure 2. 7 montre que les déformations totales et plastiques augmentent avec la force appliquée de manière logarithmique, tandis que la déformation élastique augmente aux faibles forces puis diminue pour les forces plus importantes. Nous retrouvons donc un comportement comparable à celui observé dans l'essai de compression entre tas plats réalisé par Feygin ([Feygin, 1999]) à la faible vitesse de sollicitation (présenté figure 1.16).

Les mesures permettent de tracer la courbe force en fonction de la pénétration de la bille dans le papier. Ainsi, à partir de l'Équation 2. 10, nous pouvons déterminer la contrainte au centre de l'impact. La courbe de la force en fonction de la pénétration est approchée par

une loi exponentielle du type $F = b \exp(c\delta^n)$ avec b , c et n comme coefficients. L'exposant n est ajusté de telle sorte que le coefficient de régression de la loi exponentielle soit le plus proche possible de 1. Dans le cas présenté sur la Figure 2. 8, l'exposant n est égal à 5/4.

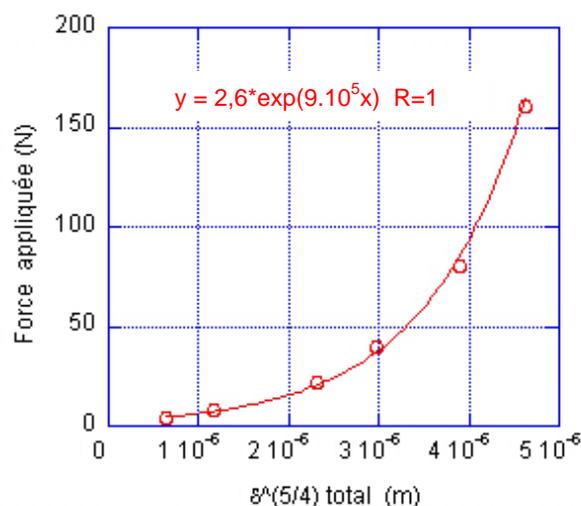


Figure 2. 8 : Courbe de la force en fonction de la pénétration portée à la puissance $n = 5/4$ – Papier Kraft (cf Tableau 2. 3) – Bille métallique $R = 15$ mm

Ainsi, en dérivant analytiquement la fonction exponentielle, nous pouvons tracer la contrainte en fonction de la déformation plastique (Figure 2. 9).

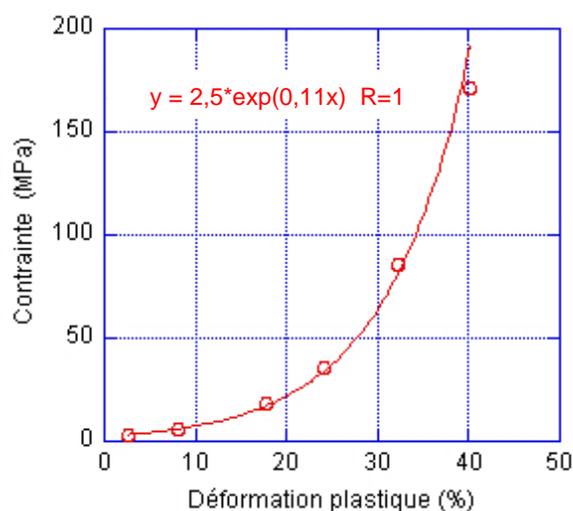


Figure 2. 9 : Contrainte en fonction de la déformation plastique (compression quasi-statique) – Papier Kraft (cf Tableau 2. 3) – Bille métallique $R = 15$ mm

Connaissant la contrainte et la déformation élastique, le module d'élasticité peut être déduit à partir de l'Équation 2. 11 au centre du contact ($r = 0$ ainsi $h_M(0) = \delta_M$ et $h_f(0) = \delta_f$) (Figure 2. 10). Il s'agit d'un module déterminé aux temps longs ou module relaxé puisqu'il est obtenu à partir de l'empreinte résiduelle.

Tant pour la contrainte d'écoulement que pour le module d'élasticité, les résultats sont analogues à ceux obtenus à partir des essais de Feygin ([Feygin, 1999]), (cf Figure 2. 3 et Figure 2. 4).

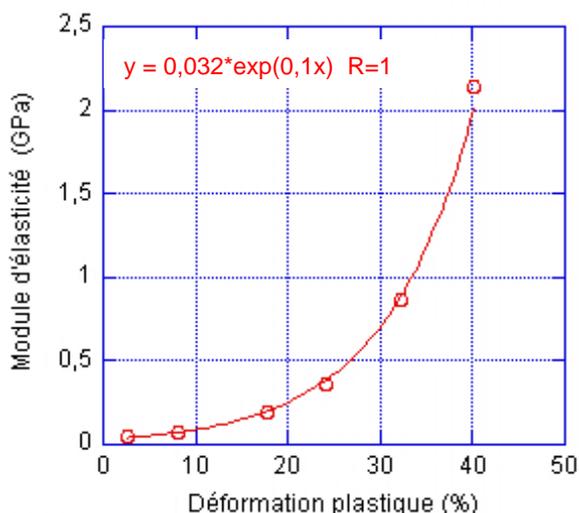


Figure 2. 10 : Module d'élasticité relaxé en fonction de la déformation plastique (compression quasi-statique) – Papier Kraft (cf Tableau 2. 3) – Bille métallique $R = 15\text{mm}$

2.2.3. - Répétabilité de l'essai

Les essais ont été réalisés avec une bille métallique de rayon égale à 6,75 mm. La pénétration de la bille dans le papier dépend de la force appliquée et du papier, principalement de son épaisseur. Avec une bille de rayon égale à 6,75 mm et une force de 160 N, l'ordre de grandeur de la pénétration au centre du contact est de 60 – 70 μm . En appliquant l'Équation 2. 8 ($a = \sqrt{\delta 2R}$), nous pouvons estimer le rayon de contact $a \approx 0,9\text{ mm}$. Ce rayon de contact est certes grand devant l'épaisseur du papier, mais reste petit devant les dimensions dans le plan d'une feuille de papier. Ainsi, étant donné que le papier est un matériau hétérogène, nous avons réalisé pour chaque papier testé une série de 5 essais. La Figure 2. 11 et la Figure 2. 12 montrent pour un papier non couché (Kraft cf Tableau 2. 3) une très bonne répétabilité des grandeurs calculées (contrainte et module).

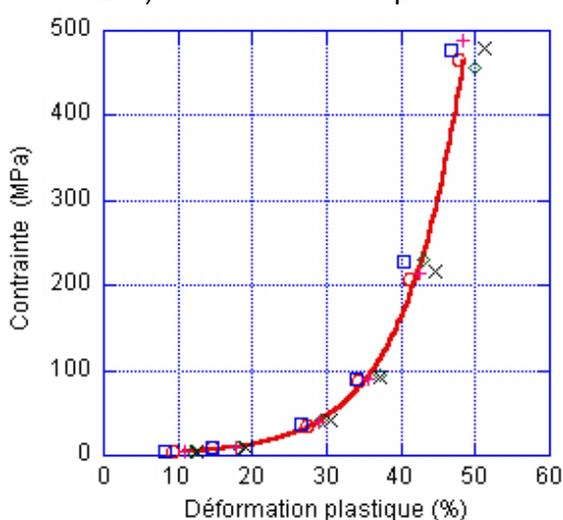


Figure 2. 11 : Essai de compression quasi-statique - Répétabilité de la contrainte

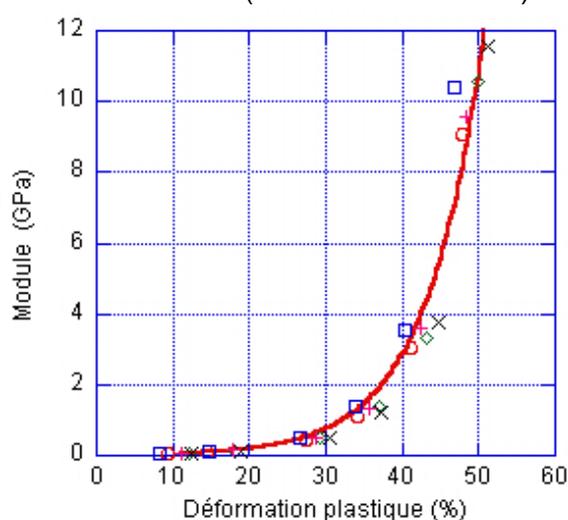


Figure 2. 12 : Essai de compression quasi-statique - Répétabilité du module

2.2.4. - Influence du rayon de la bille sur les grandeurs déterminées

Le calcul de la contrainte d'écoulement au centre du contact à partir de l'Équation 2. 10 tient compte du rayon de la bille. Cependant, afin de vérifier que les grandeurs mécaniques déterminées ne soient pas dépendantes de ce paramètre, nous avons réalisé d'autres essais avec une bille toujours métallique mais de rayon 15 mm. Les essais réalisés ont donné une pénétration de la bille dans le papier comprise entre 50 et 60 μm ; ce qui correspond à un rayon de contact de l'ordre de 1,3 mm. L'aire de contact étant légèrement plus grande, l'hétérogénéité du papier semble avoir moins d'influence.

Le calcul de la contrainte et du module d'élasticité présenté sur la Figure 2. 13 et la Figure 2. 14 montre une parfaite superposition entre les deux séries d'essais réalisées avec les billes de différents rayons. Nous pouvons en déduire que les grandeurs mécaniques calculées (contrainte et module d'élasticité) sont bien intrinsèques au papier et ne dépendent pas des conditions d'essais. Nous pouvons également noter que l'utilisation de la bille de plus faible rayon conduit à une déformation, et donc à une contrainte et un module, plus importants. Ce constat est normal étant donné que l'aire de contact est plus faible et que les forces appliquées sont identiques.

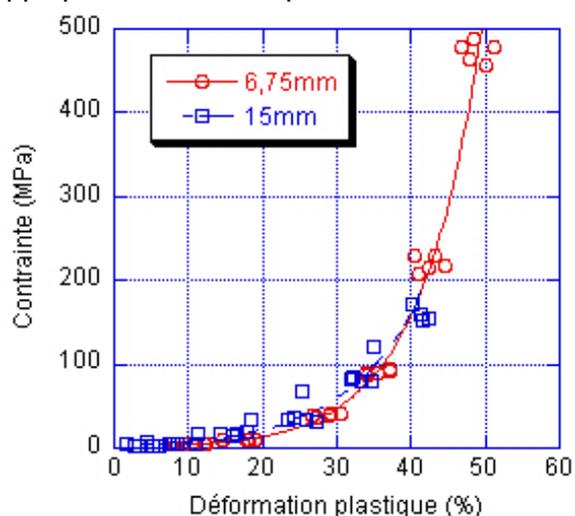


Figure 2. 13 : Influence du rayon de la bille sur la contrainte – Compression quasi-statique) – Papier Kraft (cf Tableau 2. 3)

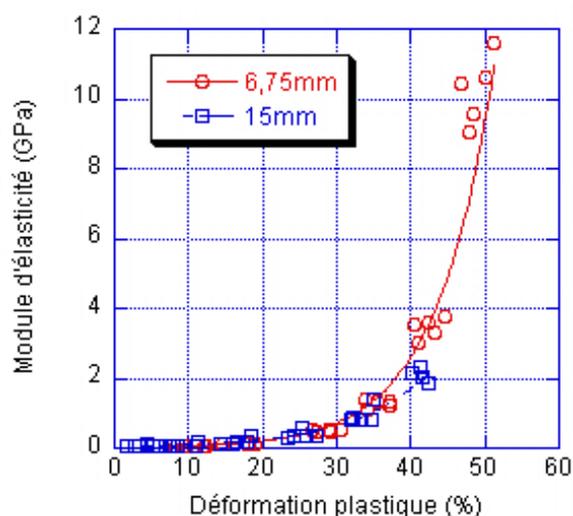


Figure 2. 14 : Influence du rayon de la bille sur le module – Compression quasi-statique) – Papier Kraft (cf Tableau 2. 3)

2.2.5. - Influence du nombre de feuilles sur les grandeurs déterminées

Des essais de compression quasi-statique ont été réalisés sur une et trois feuilles superposées de papier. Plusieurs papiers ont été testés et nous avons choisi de présenter deux résultats obtenus sur un papier non couché d'épaisseur 163 μm et un papier pré-couché d'épaisseur 106 μm (6 $\text{g}/\text{m}^2/\text{face}$). La Figure 2. 15 et la Figure 2. 16 présentent les courbes de contrainte / déformation obtenues.

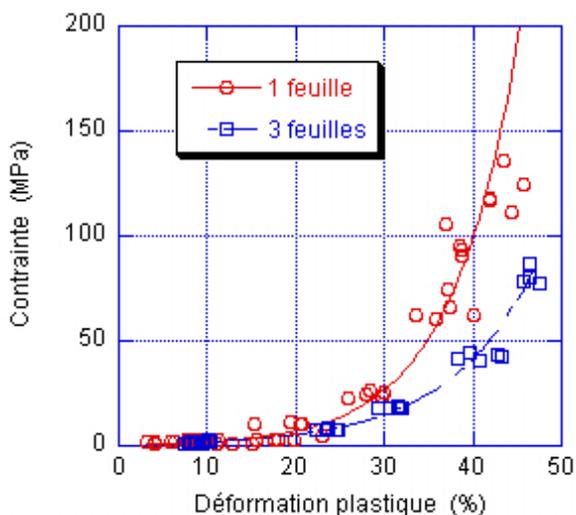


Figure 2. 15 : Influence du nombre de feuilles sur le comportement mécanique – Compression quasi-statique d'un papier non couché (Papier TMP cf Tableau 2. 3) – Bille métallique $R = 15\text{ mm}$

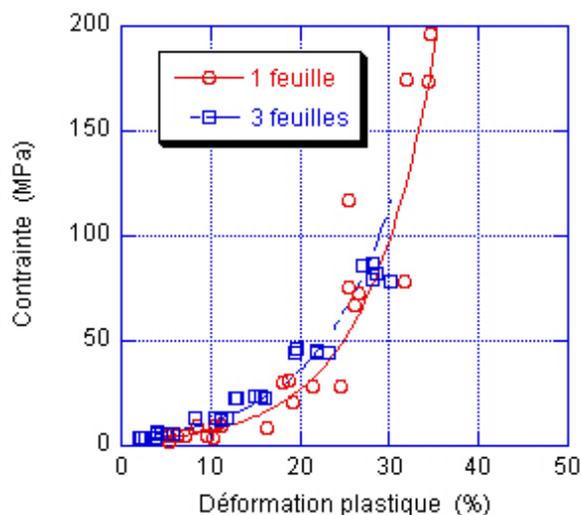


Figure 2. 16 : Influence du nombre de feuilles sur le comportement mécanique – Compression quasi-statique d'un papier pré-couché (cf Tableau 2. 6) – Bille métallique $R = 15\text{ mm}$

Les résultats montrent une bonne superposition des courbes entre une et trois feuilles jusqu'à des déformations plastiques de 30% pour les deux papiers présentés. Les essais de compression réalisés sur le papier non couché ont permis d'atteindre des niveaux de déformation entre 40 à 50% et, montrent une déformation plastique sur trois feuilles plus importante que sur une feuille pour une même contrainte. Un ré-arrangement des trois feuilles superposées sous la zone de contact est peut être à l'origine de cette augmentation de la déformation plastique. Il est difficile de déterminer s'il y a du glissement entre les feuilles. Par ailleurs, étant donné que le papier est rugueux, la superposition de deux ou trois feuilles est une approximation pour avoir une feuille d'épaisseur plus importante. D'autre part, le papier contient des zones plus ou moins riches en fibres (flocs cf partie 1.1.2), la superposition de trois feuilles a tendance à engendrer une densité plus homogène. Ce point sera rediscuté dans le paragraphe portant sur l'influence de l'hétérogénéité du papier lors d'un essai de chute de bille (partie 2.3.6. -). Cette approximation semble raisonnable pour un papier non couché, par contre, pour un papier couché, elle est plus discutable dans la mesure où une couche plus rigide est présente sur chaque face des trois feuilles superposées (Figure 2. 17).

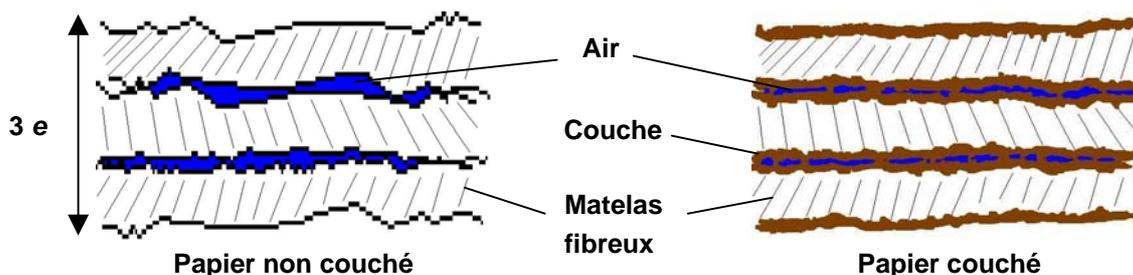


Figure 2. 17 : Schéma de la superposition de trois feuilles de papier

2.3. - Compression dynamique par chute de bille

2.3.1. - Présentation de l'essai et de son principe

L'essai de chute de bille est un essai d'indentation à grande vitesse. Le principe consiste à faire tomber d'une hauteur H_1 une bille de masse m et de rayon R sur n feuilles de papier d'épaisseur initiale e ($n = 1-2-3\dots$). Après l'impact, la bille remonte à une hauteur $H_2 < H_1$ en laissant dans le papier une cavité de révolution et de rayon a (Figure 2. 18). Les feuilles sont déposées sur une enclume, de masse $M = 4,7$ g, qui est montée sur un capteur piézoélectrique afin de mesurer la force d'impact. Par ailleurs, une caméra rapide de fréquence d'acquisition 1000 images par seconde permet de suivre la trajectoire de la bille pendant l'essai. Selon nos mesures, la feuille de papier est sollicitée à grande vitesse : le temps de contact bille / papier varie entre 0,1 et 0,3 ms selon la hauteur de chute et le nombre de feuilles n . La force maximale appliquée pendant l'essai dépend du nombre de feuille (n), de la bille (m et R) et de la hauteur de chute (H_1).

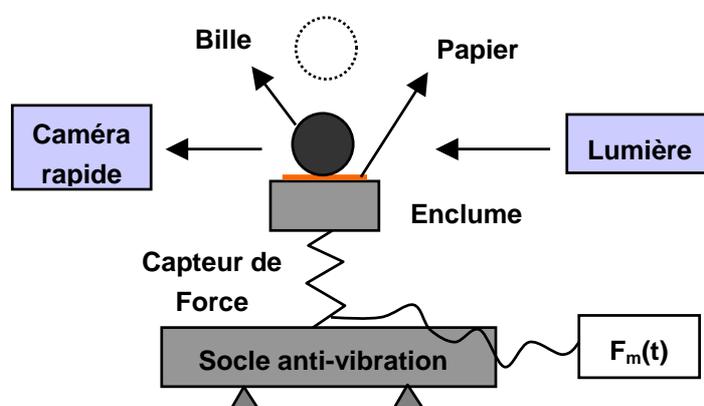


Figure 2. 18 : Montage de l'essai de chute de bille

2.3.2. - Interprétation de l'essai de chute de bille

L'interprétation de l'essai de chute de bille s'appuie sur l'analyse du mouvement de la bille et la mesure de la force au cours du temps.

Avant l'impact, la bille est en chute libre. L'énergie potentielle se transforme en une énergie cinétique. Elle arrive donc à l'instant $t = 0$ sur le papier avec une vitesse qui, en supposant la résistance de l'air négligeable, est égale à :

$$V_0 = \sqrt{2gH_1} \quad \text{Équation 2. 22}$$

A partir de cet instant $t = 0$, une force F s'oppose au mouvement de la bille. Réciproquement, le principe de l'action et de la réaction impose que la bille applique la même force contre le papier et l'enclume. Nous négligeons les forces d'inertie dans le papier. Au cours du temps, la force appliquée croît jusqu'à une valeur maximale puis diminue. Parallèlement, la bille impose une compression locale et s'enfonce dans le papier suivant l'axe z . A t_M , la compression est maximale et la pénétration de la bille dans le papier est noté δ_M . Après t_M , la restitution de l'énergie élastique du papier fait remonter la bille en laissant une déformation résiduelle.

La chute de la bille entraîne un écrasement du papier mais également un léger déplacement de l'enclume qui est fixée sur le capteur de force. Ce capteur de force à haute fréquence d'acquisition est assimilé à un ressort de raideur k (donnée constructeur : $k = 300 \text{ N}/\mu\text{m}$). On distingue alors la pénétration de la bille dans le papier, le déplacement de la bille et celui de l'enclume. Une différence est également effectuée entre la force mesurée et la force appliquée par la bille sur le papier. Etant donné la raideur du capteur k , le déplacement de l'enclume z_e est largement inférieur à la pénétration de la bille dans le papier δ_M , la Figure 2. 19 montre une schématisation des différents déplacements et la déformation de la feuille de papier durant l'essai. Le déplacement de l'enclume est fortement exagéré sur la Figure 2. 19 par rapport à la réalité, afin de rendre lisible schéma.

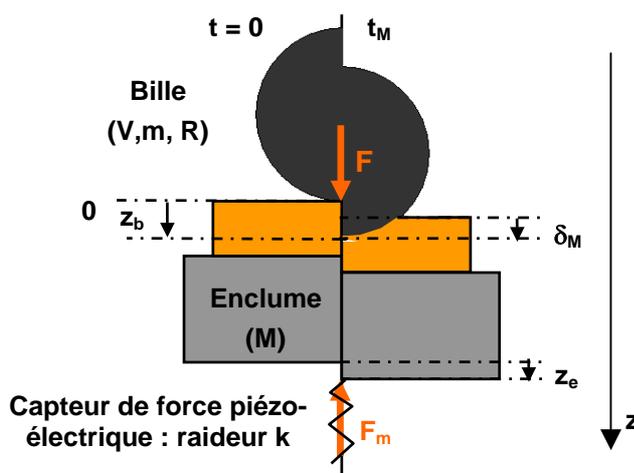


Figure 2. 19 : Schéma d'écrasement du papier lors de l'essai de chute de bille

- F : Force exercée par la bille sur le papier au cours du temps
- F_m : Force mesurée par le capteur de force au cours du temps
- δ : Pénétration de la bille dans le papier au cours du temps ou écrasement du papier
- z_b : Déplacement de la bille
- z_e : Déplacement de l'enclume

2.3.2.1. - Bilan et analyse des forces

La pénétration de la bille dans la feuille de papier est donnée par la différence entre le déplacement de la bille z_b et celui de l'enclume z_e :

$$\delta = z_b - z_e \quad \text{Équation 2. 23}$$

En appliquant l'équation fondamentale de la dynamique ($\sum F_{\text{ext}} = m \cdot \gamma$) à l'enclume et à la bille, on obtient les relations suivantes :

$$F - F_m = M \cdot \frac{d^2 z_e}{dt^2} \quad \text{Équation 2. 24}$$

$$mg - F = m \cdot \frac{d^2 z_b}{dt^2} \quad \text{Équation 2. 25}$$

La relation caractéristique du capteur donne :

$$F_m = kz_e \quad \text{Équation 2. 26}$$

2.3.2.2. - Détermination de la force réelle F appliquée sur le papier

A partir de l'Équation 2. 24 et de l'Équation 2. 26, la force réelle F appliquée sur la feuille de papier peut être déduite de la force F_m mesurée par le capteur de force :

$$\mathbf{F} = \frac{\mathbf{M}}{\mathbf{k}} \frac{d^2\mathbf{F}_m}{dt^2} + \mathbf{F}_m \quad \text{Équation 2. 27}$$

Le cé dage du capteur et la masse de l'enclume impliquent donc une légère correction.

2.3.2.3. - Détermination de la pénétration δ de la bille dans le papier

En combinant l'Équation 2. 23, l'Équation 2. 24, l'Équation 2. 26 et l'Équation 2. 27, nous pouvons exprimer la pénétration δ en fonction de la force mesurée F_m :

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = g - \frac{F_m}{m} - \frac{(M+m)}{mk} \frac{d^2F_m}{dt^2} \quad \text{Équation 2. 28}$$

Après une double intégrale et en utilisant les deux conditions aux limites suivantes,

$$1^\circ) \delta(0) = 0 : \text{pénétration de la bille nulle à } t = 0$$

$$2^\circ) \frac{d\delta}{dt}(0) = \sqrt{2gH_1} : \text{vitesse de chute libre de la bille à } t = 0 \text{ (cf Équation 2. 22)}$$

l'Équation 2. 28 devient :

$$\delta = \frac{1}{2}gt^2 + \sqrt{2gH_1}t - \left(\frac{m+M}{m}\right) \cdot \frac{1}{k}F_m - \frac{1}{m} \int_0^t \int_0^t F_m dt^2 \quad \text{Équation 2. 29}$$

A partir de l'Équation 2. 27 et l'Équation 2. 29, une représentation paramétrique de la courbe force / pénétration $F(\delta)$ est obtenue. La contrainte d'écoulement est alors déterminée à l'aide de l'Équation 2. 10. Par ailleurs, connaissant l'épaisseur initiale du papier, la déformation totale au cours de la compression est évaluée. La déformation plastique peut être déduite à partir de la courbe $F(\delta)$. L'Équation 2. 16 et l'Équation 2. 21 permettent d'estimer le module d'élasticité aux temps courts à la charge et la décharge.

2.3.3. - Exemple d'analyse de chute de bille sur papier

2.3.3.1. - Analyse mécanique

Nous avons choisi de présenter dans cette partie une application concrète de l'interprétation mécanique de l'essai de chute de bille. Une bille métallique de rayon $R = 6,75$ mm et de masse $m = 10$ g a été lâchée d'une hauteur $H_1 = 10$ cm sur un papier pré-couché d'épaisseur initiale $e = 106$ μm (papier présenté dans la partie 2.2.4. -, cf Tableau 2. 6). Le capteur de force permet de mesurer la force au cours du temps durant l'impact. La Figure 2. 20 présente le pic de force durant l'impact. Il est suivi d'oscillations de plus faibles amplitudes. La phase où la force devient négative après le pic pourrait correspondre à une force de traction s'il y a une adhésion significative du papier à la bille. Cependant, bien que le capteur de force soit monté sur un socle anti-vibration, les oscillations autour de la force nulle nous font plutôt penser à des vibrations du montage. La fréquence est effectivement proche de celle de l'enclume solidarisée au capteur.

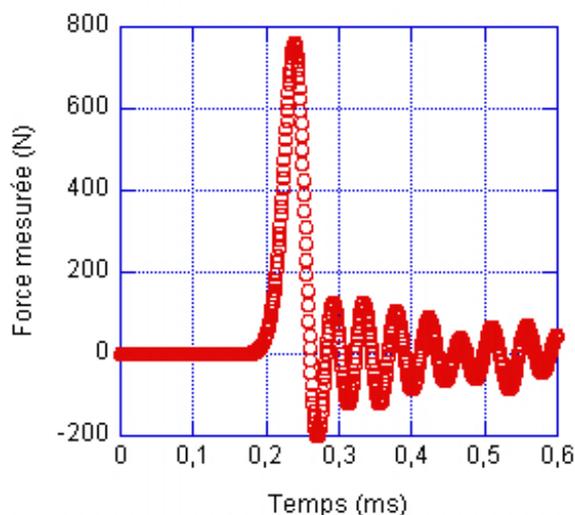


Figure 2. 20 : Force mesurée par le capteur de force en fonction du temps – Papier pré-couché (cf Tableau 2. 6) – Bille métallique $R = 6,75 \text{ mm}$ – Hauteur de chute $H_1 = 10 \text{ cm}$

Pour déterminer les grandeurs mécaniques, la partie de la courbe de la Figure 2. 20 qui nous intéresse est le pic. Dans cet exemple, la force maximale durant l'impact est de 760 N et le temps de contact d'environ 0,1 ms. Nous pouvons constater que le capteur de force à hautes fréquences d'acquisition permet d'obtenir un nombre de mesure tout à fait convenable par rapport au temps. Par ailleurs, nous faisons l'hypothèse que les oscillations observées à la suite du pic n'influent pas sur la force mesurée durant l'impact.

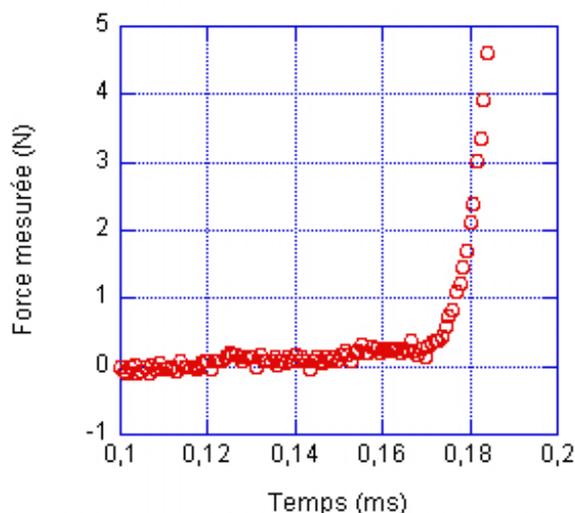


Figure 2. 21 : Début du pic de la force mesurée en fonction du temps (cf Figure 2. 20)

La zone utile est donc le pic de force dû à l'impact. Cependant, nous nous sommes interrogés sur le début et la fin du pic : A partir de quels moments, peut-on estimer que la bille entre en contact avec le papier et quitte le contact. La Figure 2. 21 est un agrandissement du début du pic et montre des légères oscillations de très faibles amplitudes dues au capteur piézoélectrique. Nous avons choisi arbitrairement de prendre le début du contact à partir du moment où la force mesurée est supérieure à 1 N. La force a donc été corrigée de 1 N afin d'être nulle à $t = 0$. Elle est notée F_{m0} .

La force mesurée en fonction du temps durant l'impact (pic) est approchée par une régression polynomiale de degré 11. Etant donné que la force mesurée est directement reliée à la pénétration dans l'Équation 2. 29 et que les termes de degrés 0, 1 et 2 doivent être nuls du fait des conditions aux limites, nous avons choisi un polynôme commençant au degré 3 :

$$F_m(t) = \sum_3^{11} a_i t^i \quad \text{Équation 2. 30}$$

Les coefficients a_i sont déterminés à l'aide du logiciel KaleidaGraph®. Afin d'éviter d'avoir des coefficients très grands ou très petits, la force mesurée a été normée par la force maximale (F_{mM}) et le temps de contact par un temps final (t_f). Nous constatons sur la Figure 2. 22 que la régression polynomiale suit parfaitement les points expérimentaux.

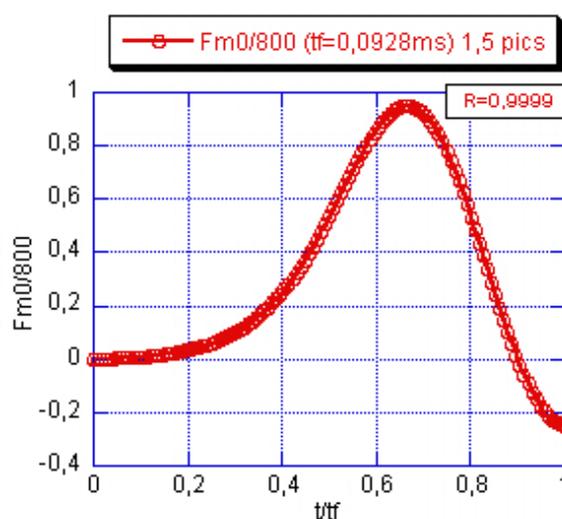


Figure 2. 22 : Régression polynomiale du pic de force durant l'impact – Papier pré-couché (cf Tableau 2. 6) – Bille métallique $R = 6,75 \text{ mm}$ – Hauteur de chute $H_1 = 10 \text{ cm}$

A partir de la régression polynomiale et de l'Équation 2. 29, la pénétration de la bille dans le papier est déterminée en fonction du temps. La double intégrale de la régression polynomiale est effectuée grâce au logiciel KaleidaGraph® par la méthode des trapèzes. La Figure 2. 23 montre une pénétration maximale (δ_M) de la bille dans le papier de $65 \text{ }\mu\text{m}$.

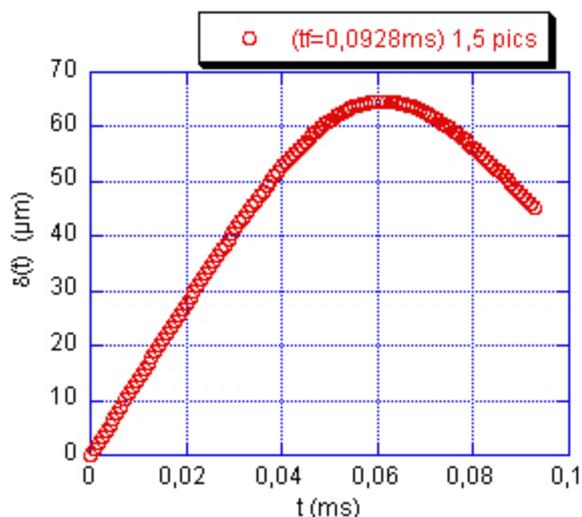


Figure 2. 23 : Pénétration de la bille dans le papier en fonction du temps – Papier pré-couché (cf Tableau 2. 6) – Bille métallique $R = 6,75 \text{ mm}$ – Hauteur de chute $H_1 = 10 \text{ cm}$

La force réelle appliquée par la bille sur le papier est déterminée à partir de l'Équation 2. 27 et de la régression polynomiale. La double dérivée du polynôme est effectuée analytiquement, car celle effectuée par le logiciel KaleidaGraph® à partir des points expérimentaux donne un nuage de points. La Figure 2. 24 présente la force mesurée et la force appliquée sur le papier en fonction du temps. La correction est principalement effectuée au niveau de la force maximale ($F_M = 700 \text{ N}$ et $F_{mM} = 760 \text{ N}$) mais change peu la forme du pic.

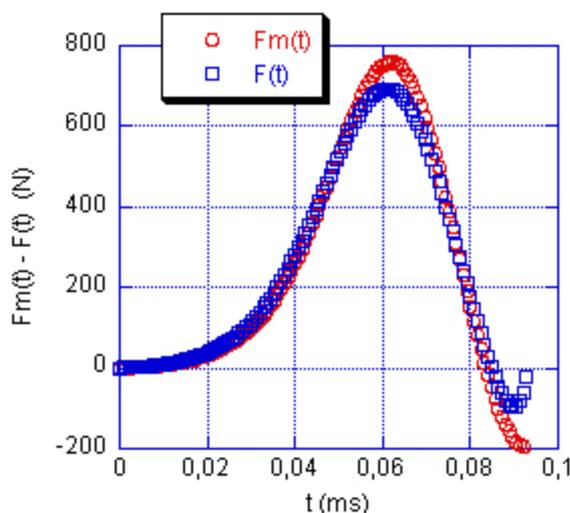


Figure 2. 24 : Détermination de la force réelle appliquée sur le papier à partir de la force mesurée – Papier pré-couché (cf Tableau 2. 6) – Bille métallique $R = 6,75 \text{ mm}$ – Hauteur de chute $H_1 = 10 \text{ cm}$

Connaissant la force appliquée sur le papier et la pénétration de la bille en fonction du temps, nous pouvons tracer la courbe force / pénétration (Figure 2. 25). La partie croissante de la courbe traduit la phase de pénétration et la partie décroissante, celle du retrait. Son allure générale est analogue à celle des essais d'indentation ([Oliver *et al.*, 1992]).

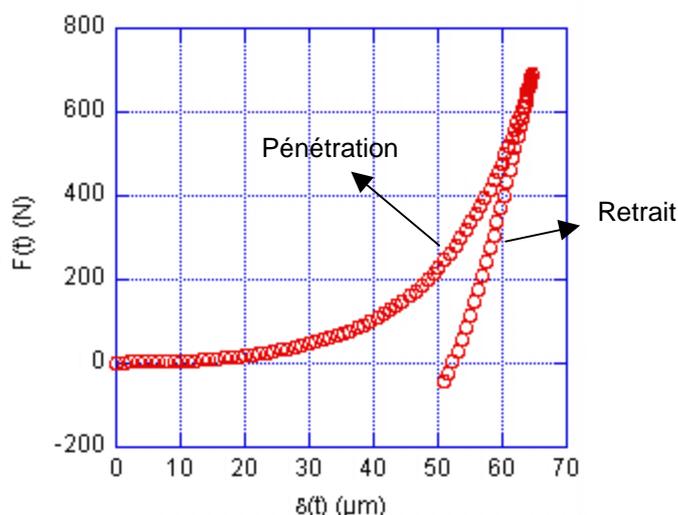


Figure 2. 25 : Force appliquée en fonction de la pénétration de la bille dans le papier – Papier pré-couché (cf Tableau 2. 6) – Bille métallique $R = 6,75 \text{ mm}$ – Hauteur de chute $H_1 = 10 \text{ cm}$

La contrainte d'écoulement est alors déterminée sur la partie croissante de la courbe $F(\delta)$. La Figure 2. 26 présente un comportement exponentiel de la contrainte en fonction de la déformation totale. La contrainte maximale obtenue lors de cet essai est de 1300 MPa. Par la suite, nous nous intéresserons à des niveaux de contrainte plus faibles, de l'ordre de la 100^{ème} MPa, afin de se rapprocher de ceux appliqués lors du calandrage.

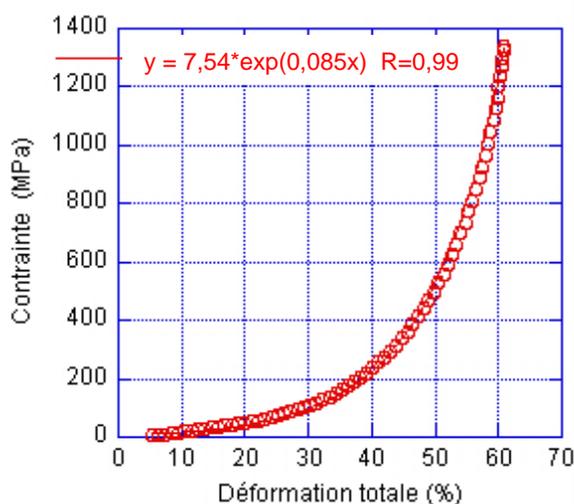


Figure 2. 26 : Contrainte en fonction de la déformation totale – Chute de bille métallique $R = 6,75 \text{ mm}$ – Papier pré-couché (cf Tableau 2. 6) – Hauteur de chute $H_1 = 10 \text{ cm}$

Comme pour l'essai de compression statique, la Figure 2. 27 montre une bonne superposition des courbes contrainte / déformation totale pour une série de 5 essais dans les mêmes conditions expérimentales et sur un même papier.

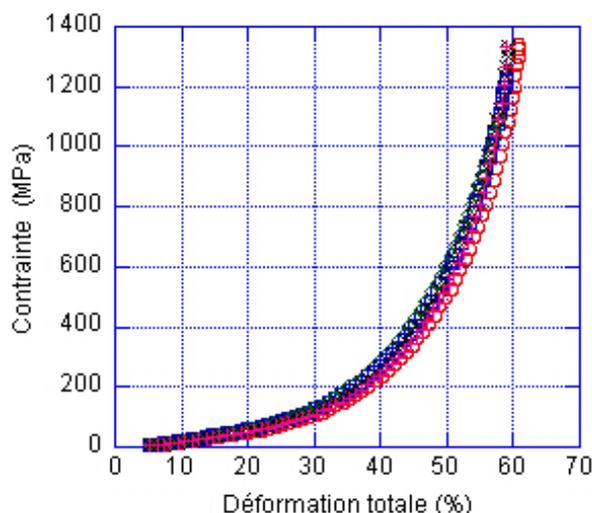


Figure 2. 27 : Contrainte en fonction de la déformation totale – Série de 5 essais – Chute de bille métallique $R = 6,75 \text{ mm}$ – Papier pré-couché (cf Tableau 2. 6) – Hauteur de chute $H_1 = 10 \text{ cm}$

La pénétration résiduelle (δ_{rd}) à des temps très courts (quelques dixièmes voir centièmes de milliseconde) peut être déterminée lorsque la force s'annule (Figure 2. 28). Dans le cas étudié, δ_{rd} est égale à $52 \mu\text{m}$. Connaissant la pénétration maximale ($\delta_M = 65 \mu\text{m}$), nous pouvons déduire le retour élastique à un temps court ($\delta_{eld} = 13 \mu\text{m}$). En appliquant l'Équation 2. 16 et en utilisant la contrainte atteinte pour la déformation maximale (1300 MPa), nous déduisons un module élastique (E_d^*) pour la déformation maximale en fin de charge de 10,6 GPa.

L'étude de la décharge de la courbe $F(\delta)$ permet également d'estimer un module élastique moyen à un temps court (E^*) (Équation 2. 21). Dans le cas présent, le module calculé est égale à 2,6 GPa.

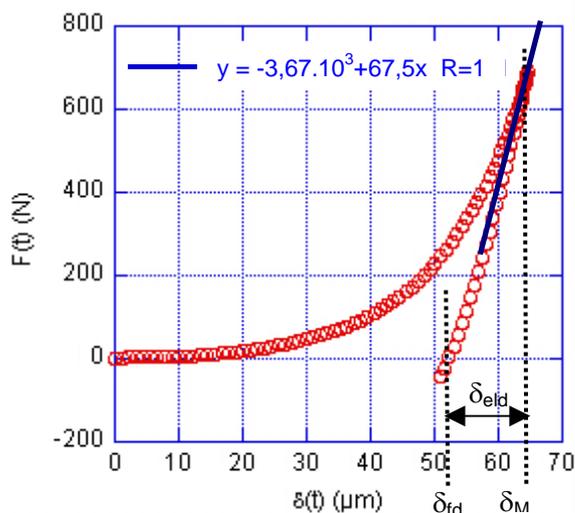


Figure 2. 28 : Evaluation de la pénétration résiduelle et du module d'élasticité moyen à un temps court à partir de la courbe $F(\delta)$ – Chute de bille métallique $R = 6,75 \text{ mm}$ – Papier pré-couché (cf Tableau 2. 6) – Hauteur de chute $H_1 = 10 \text{ cm}$

L'écart entre les modules d'élasticité à un temps court obtenus par les deux méthodes est normal puisque l'un correspond à la compression au centre du contact où la déformation est maximale (contrainte très élevée) et l'autre à la moyenne sur l'ensemble des déformations imposées au papier. Il faut noter toutefois que les équations utilisées pour déterminer le module d'élasticité ne prennent pas en compte le caractère visqueux du papier. Ce comportement pourrait influencer notamment au voisinage de la pénétration maximale où la vitesse de la bille s'annule : la viscosité du papier pourrait ainsi provoquer une décroissance de la force avant d'atteindre la pénétration maximale.

Par ailleurs, l'estimation suivante montre que les déflexions élastiques de la bille et de l'enclume restent négligeables devant la pénétration de la bille dans le papier. Le contact entre la bille et l'enclume peut être assimilé à celui d'un poinçon plat de rayon a_{pf} et de module d'élasticité équivalent entre la bille et l'enclume de E_S . La déflexion δ_S est alors égale à ([Johnson, 1985]) :

$$\delta_S \approx \frac{F_M}{2E_S a_{pf}} \quad \text{Équation 2. 31}$$

La bille et l'enclume étant en acier, l'ordre de grandeur du module élastique est de 200 GPa. La force maximale obtenue lors de l'exemple décrit est de 700 N pour un rayon d'impact avec le papier d'environ 1 mm. Sans le papier qui élargit la zone de contact, on peut estimer le rayon du poinçon plat à la moitié ($a_{pf} \approx 0,5$ mm). La déflexion δ_S est alors égale à $3,5 \mu\text{m}$ (largement inférieur au $65 \mu\text{m}$ de pénétration de la bille dans le papier).

2.3.3.2. - Analyse topographique

Les impacts de la bille sur le papier ont été analysés au microscope électronique à balayage et par un appareil de topographie, Topo3D, fonctionnant sur un principe d'interférométrie en lumière blanche ([Soysouvanh, 2007]). Pour des raisons de netteté d'image, l'exemple choisi pour présenter l'analyse topographique d'un impact de chute de bille a été réalisé avec une bille métallique de rayon $R = 6,75$ mm et de masse $m = 10$ g, lâchée d'une hauteur $H_1 = 15$ cm sur un papier non couché d'épaisseur initiale $e = 163 \mu\text{m}$ (Papier TMP cf Tableau 2. 3). La surface de ce papier avant impact a déjà été présentée sur la Figure 1.1. La Figure 2. 29 montre l'empreinte résiduelle circulaire laissée par la bille après l'impact.

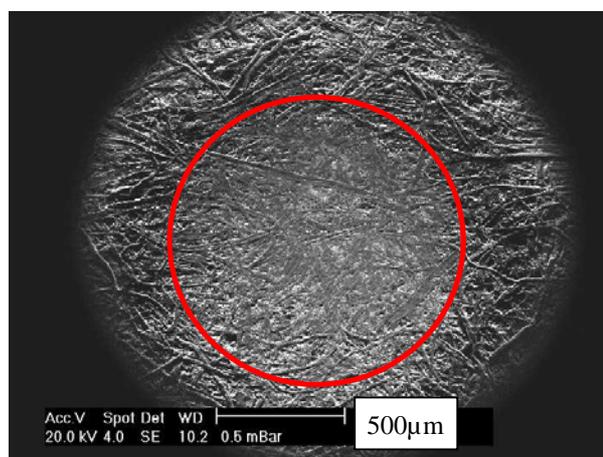


Figure 2. 29 : Observation de l'empreinte résiduelle de l'impact de la bille sur le papier TMP (cf Tableau 2. 3) (MEB)

Un plus fort grossissement sur le bord de l’empreinte montre clairement la différence entre la zone comprimée et la zone à l’extérieur du contact. Cette observation visuelle, très nette, suggère qu’il n’y a pas de compression du papier en dehors de la zone de contact.

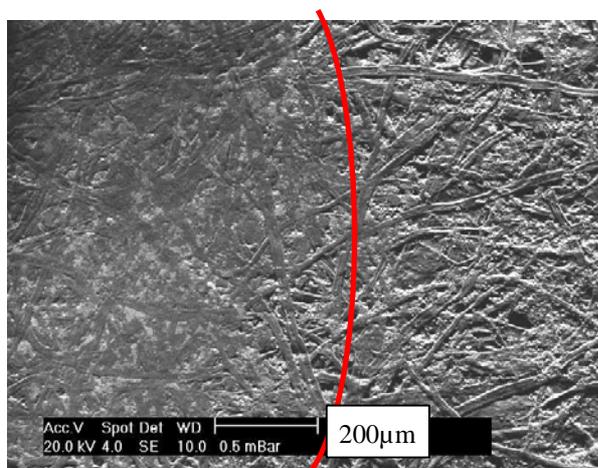


Figure 2. 30 : Observation de l’empreinte au bord du contact (MEB) – Papier TMP (cf Tableau 2. 3)

Dans la zone d’impact, les fibres cellulosiques apparaissent aplaties et proches les unes des autres. Visuellement, la rugosité semble plus faible. Cette impression sera quantifiée par la suite à partir de l’appareil de Topo3D. La Figure 2. 31 est une observation de la surface de papier au centre de l’impact à la même échelle que la figure 1.1 avant impact.

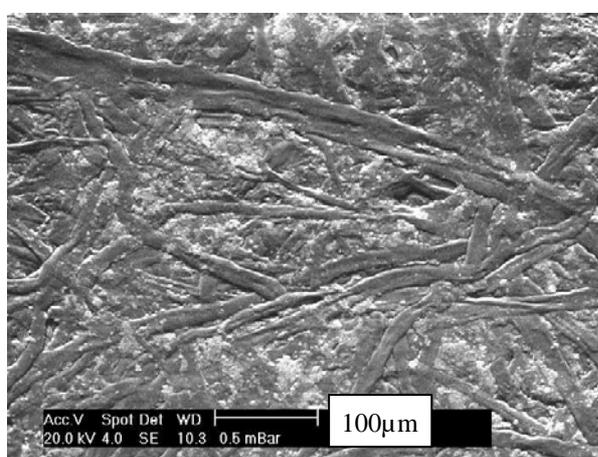


Figure 2. 31 : Observation de la surface du papier au centre de l’impact (MEB) – Papier TMP (cf Tableau 2. 3)

L’observation de la coupe de la feuille de papier au centre de l’impact révèle également la compression du papier (Figure 2. 32). Des entailles à l’extérieur de la zone d’impact ont été effectuées afin de faciliter les observations.

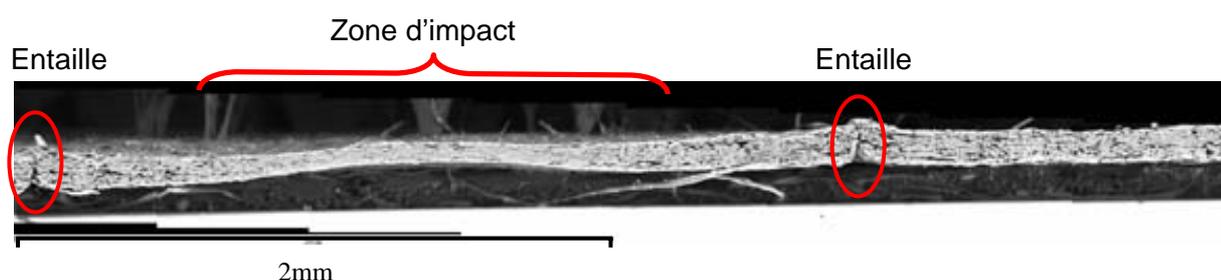


Figure 2. 32 : Observation de la coupe de la feuille de papier au centre de l'impact (MEB) – Papier TMP (cf Tableau 2. 3)

La Figure 2. 33 présente une observation de la coupe à l'extérieur de la zone de contact. Certaines fibres cellulosiques sont perpendiculaires à la coupe. Une visualisation des parois et de l'intérieur de la fibre (zone plus sombre) est alors possible.

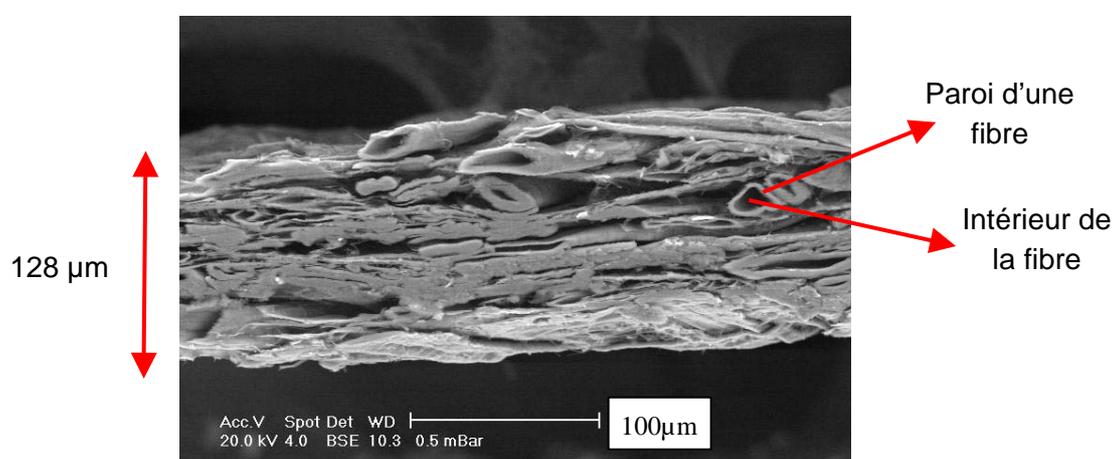


Figure 2. 33 : Observation de la coupe à l'extérieur de la zone de contact (MEB) – Papier TMP (cf Tableau 2. 3)

L'épaisseur mesurée à partir de l'image (Figure 2. 33) est de 128 μm . Cette valeur est nettement inférieure à l'épaisseur mesurée au micromètre (163 μm). La préparation et la coupe entraînent certainement un endommagement et une compression du papier dans le sens de l'épaisseur.

Sur la Figure 2. 34, présentant la coupe au centre de l'impact, les fibres cellulosiques sont écrasées. La distinction entre la paroi et l'intérieur des fibres est alors plus difficile. L'épaisseur mesurée du papier est de 60 μm . En se basant sur l'épaisseur du papier mesurée à partir des observations au MEB, la chute de bille a entraîné une réduction au centre de l'impact de 53%.

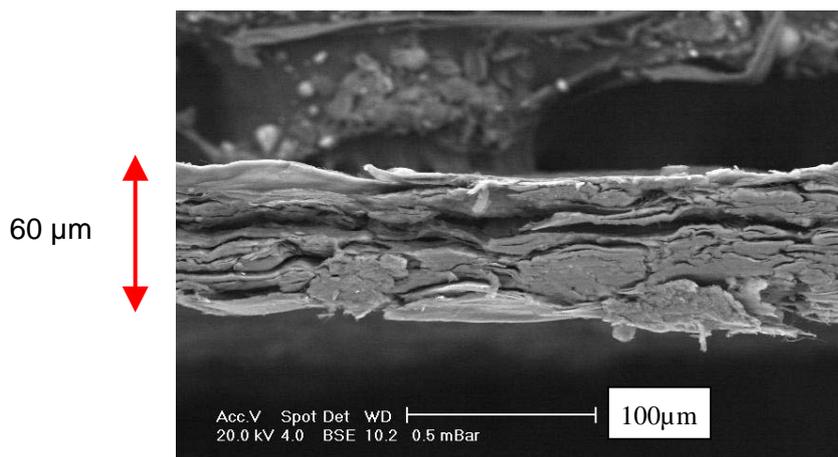


Figure 2. 34 : Observation de la coupe au centre de l'impact (MEB) – Papier TMP (cf Tableau 2. 3)

L'appareil de Topo3D permet d'obtenir la topographie de la zone d'impact (centre de l'impact en bleu sur la Figure 2. 35).

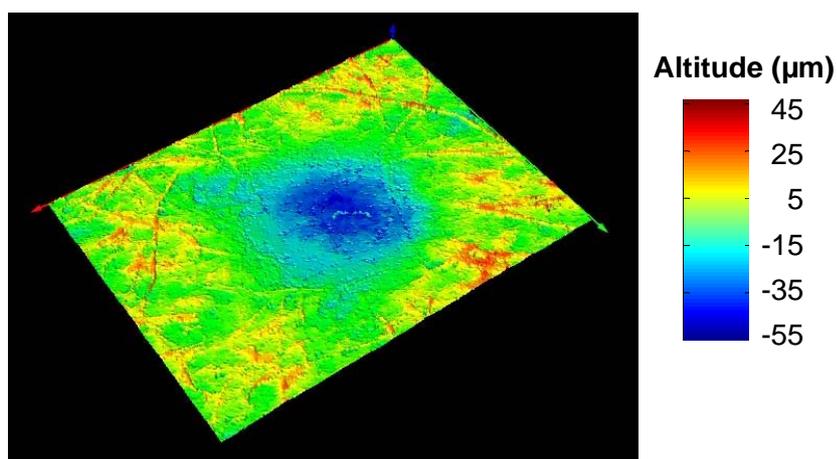


Figure 2. 35 : Topographie de la zone d'impact en vue 3D (Topo3D) – Dimension de la zone analysée : 2,7 x 2 mm – Papier TMP (cf Tableau 2. 3)

A l'extérieur du contact, les fibres cellulosiques apparaissent en rouge et montrent une surface rugueuse. Sur la Figure 2. 36, une zone à l'extérieur du contact A_1 et une autre au centre de l'impact sont référencées. La rugosité moyenne de la zone A_1 est égale à $7,4 \mu\text{m}$ alors que celle de la zone A_2 est égale à $2,6 \mu\text{m}$.

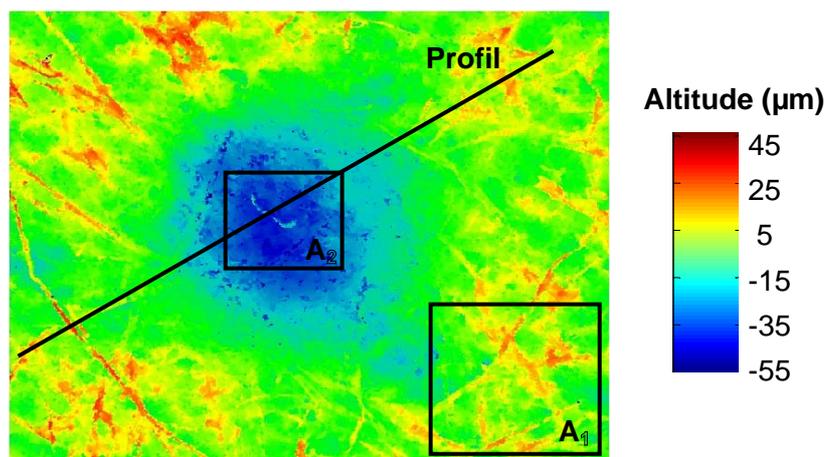


Figure 2. 36 : Topographie de la zone d'impact vue 2D (Topo3D) – Dimension de la zone analysée : 2,7 x 2 mm – Papier TMP (cf Tableau 2. 3)

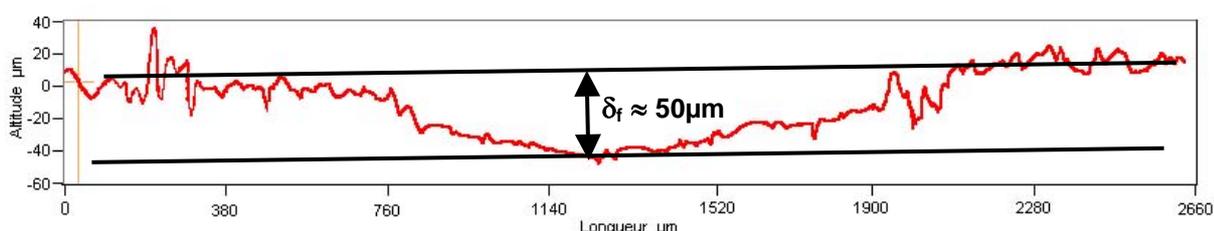


Figure 2. 37 : Profil de rugosité du papier au centre de l'impact (Topo3D) – Ligne indiquée sur la Figure 2. 36

Le profil de rugosité montre également une rugosité plus faible dans la zone de contact (Figure 2. 37). Par ailleurs, la pénétration résiduelle au centre de l'impact est évaluée par cette méthode à environ 50 µm. En prenant l'épaisseur mesurée selon la norme ISO534 (163 µm), la déformation résiduelle est alors égale à 31%. La Figure 2. 38 schématise les observations réalisées à l'aide du Topo3D sur la zone d'impact :

- Pour des faibles hauteurs de chute (5 – 10 cm), les analyses au Topo3D ont révélé une cavité à l'endroit de l'impact sur le verso de la feuille.
- Par contre, pour les hauteurs de chute plus importantes (25 – 30 cm), la zone d'impact sur le verso de la feuille a tendance à former une bosse.

L'épaisseur finale du papier doit donc tenir compte des pénétrations résiduelles mesurées sur le recto et sur le verso. La déformation résiduelle augmente alors pour les faibles hauteurs de chute et diminue pour les grandes hauteurs de chute.

Faibles hauteurs de chute (5 – 10 cm)		Fortes hauteurs de chute (25 – 30 cm)	
	↓ Sens de l'impact		↓ Sens de l'impact
Recto		Recto	
Verso		Verso	

Figure 2. 38 : Représentation schématique de la coupe de la feuille après l'impact de la bille sur le papier non couché, en fonction de la hauteur de chute

Connaissant le diamètre et la profondeur de l'empreinte résiduelle suite à l'impact, l'Équation 2. 11 pourrait donner un module d'élasticité du papier à un temps long et à grande vitesse de sollicitation. Cependant, les incertitudes de mesure des empreintes sur le papier sont trop importantes. Cette méthode a donc été abandonnée.

2.3.4. - Vérification des vitesses d'impact et de rebond à l'aide de la caméra rapide

L'analyse mécanique de l'essai de chute de bille nous permet de déterminer l'évolution de la pénétration de la bille dans le papier en fonction du temps. La dérivée de cette fonction est égale à la vitesse de la bille. La Figure 2. 39 montre une diminution de la vitesse durant l'écrasement du papier jusqu'à atteindre une vitesse nulle, correspondant à la pénétration maximal δ_M . Par la suite, la vitesse devient négative et correspond à la remontée de la bille jusqu'à atteindre une vitesse limite. Dans l'exemple présenté une bille métallique de rayon $R = 6 \text{ mm}$ a été lâchée d'une hauteur $H_1 = 10 \text{ cm}$ sur un papier non couché d'épaisseur $e = 163 \text{ }\mu\text{m}$ (Papier TMP cf Tableau 2. 3). La vitesse de rebond est égale à $0,67 \text{ m/s}$.

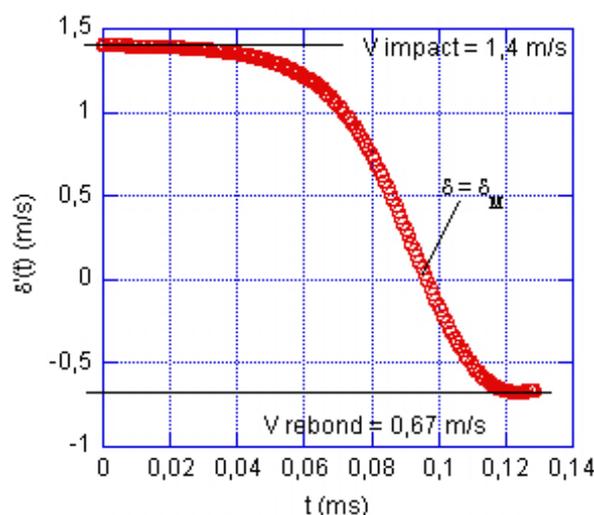


Figure 2. 39 : Vitesse de la bille durant l'impact estimée à partir du capteur de force – Papier TMP (cf Tableau 2. 3) – Bille métallique $R = 6 \text{ mm}$ – Hauteur de chute $H_1 = 10 \text{ cm}$

Parallèlement à l'acquisition de la force d'impact, la trajectoire de la bille est filmée à l'aide d'une caméra rapide. La Figure 2. 40 présente la position de la bille suivant l'axe z avant et après l'impact. La vitesse de rebond peut alors être déduite en traçant la tangente à la courbe lors de la remontée de bille. La vitesse obtenue est égale à $0,65 \text{ m/s}$ et correspond à celle estimée à partir du capteur de force ($0,67 \text{ m/s}$). Notons par ailleurs que la vitesse d'impact déduite de la trajectoire de la bille ($1,39 \text{ m/s}$) est bien égale à la vitesse théorique d'une chute libre de 10 cm . La vitesse du second impact est égale à la vitesse de rebond.

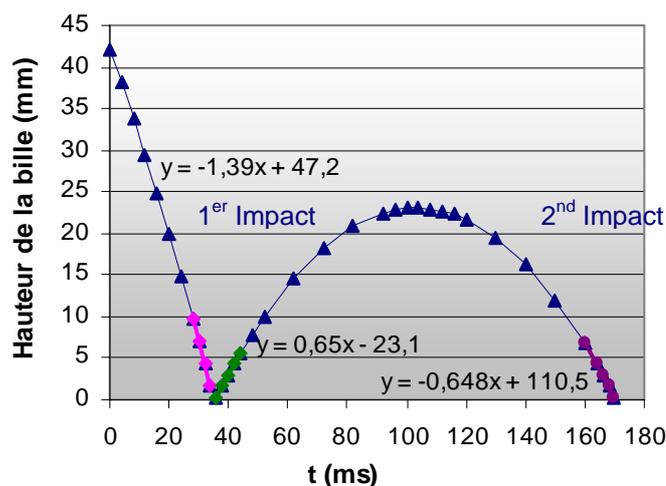


Figure 2. 40 : Trajectoire de la bille obtenue à partir de la caméra rapide – Papier TMP (cf Tableau 2. 3) – Bille métallique $R = 6 \text{ mm}$ – Hauteur de chute $H_1 = 10 \text{ cm}$

Les différents essais réalisés ont montré une bonne concordance entre les valeurs de la vitesse de rebond déterminées à partir du capteur de force et, celles obtenues à partir de la caméra (Figure 2. 41), validant ainsi la méthode expérimentale et l'analyse de l'essai de chute de bille.

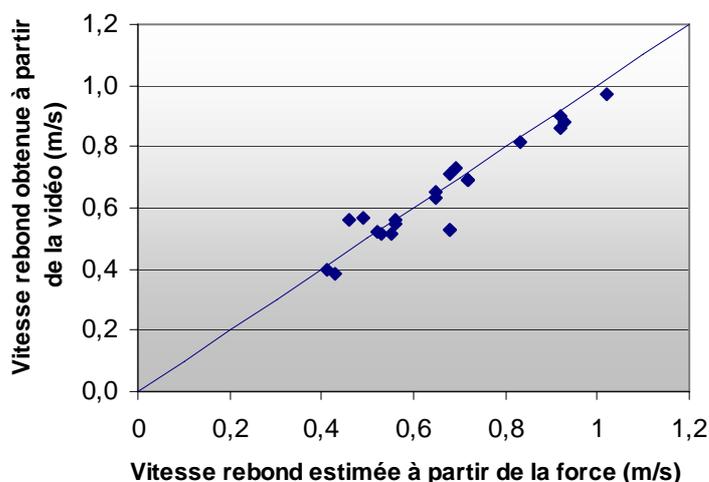


Figure 2. 41 : Comparaison des vitesses de rebond obtenues à partir du capteur de force et de la caméra rapide

2.3.5. - Vérification des grandeurs calculées par un essai de chute de bille sur un échantillon d'aluminium

L'utilisation de la caméra rapide nous a permis de vérifier que la détermination de la pénétration de la bille dans le papier à partir de la mesure de la force est correcte. L'essai de chute de bille sur un échantillon d'aluminium a pour objectif de valider le calcul des grandeurs mécaniques telles que les déformations plastiques, élastiques et la contrainte d'écoulement. Une bille métallique de rayon $R = 6 \text{ mm}$ a été lâchée d'une hauteur de $H_1 = 10 \text{ cm}$ sur un échantillon d'aluminium d'épaisseur $e = 5 \text{ mm}$. L'analyse mécanique de

l'essai nous permet de tracer la force en fonction de la pénétration de la bille dans l'aluminium (Figure 2. 42). L'analyse de l'essai conduit à une pénétration maximale de la bille dans l'aluminium de $36 \mu\text{m}$ pour une force maximale de 450 N . La pénétration résiduelle déduite lorsque la force s'annule, est égale à $21 \mu\text{m}$. Le retour élastique est alors égale à $15 \mu\text{m}$.

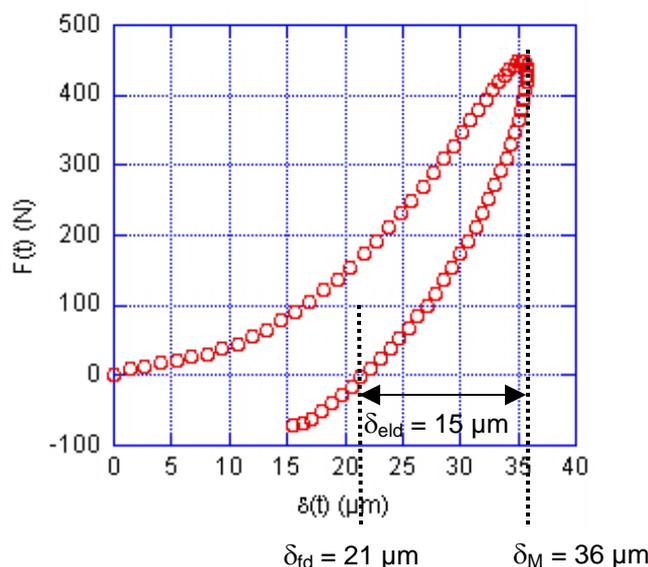


Figure 2. 42 : Force en fonction de la pénétration de la bille dans l'aluminium – Bille métallique $R = 6 \text{ mm}$ – Hauteur de chute $H_1 = 10 \text{ cm}$

Contrairement au papier, les observations des impacts au microscope optique ou à l'aide du Topo3D sont très nettes. Le diamètre d'impact peut alors être mesuré avec précision. D'après l'observation au microscope optique (Figure 2. 43), le diamètre d'impact est égal à $0,97 \text{ mm}$. A plus fort grossissement, le réglage de la focale du système optique permet d'évaluer la différence de hauteur entre le centre de l'impact et le bord du contact. La pénétration résiduelle mesurée est égale à $17 \mu\text{m}$.

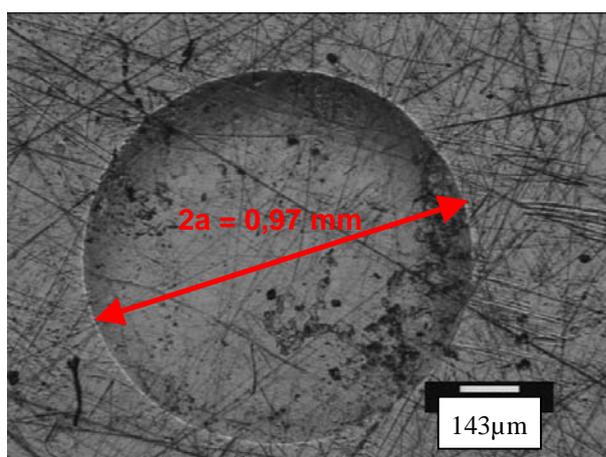


Figure 2. 43 : Observation au microscope optique de l'impact sur l'aluminium

L'observation de la zone d'impact au Topo3D (Figure 2. 44) montre une altitude légèrement plus importante entourant la zone d'impact (2 à $3 \mu\text{m}$). Le profil de rugosité (Figure 2. 45) permet de mesurer un diamètre d'impact de $0,94 \text{ mm}$ et une pénétration

résiduelle de 18 μm . La mesure des dimensions d'impact par les deux méthodes donne des résultats équivalents. Par ailleurs, la pénétration résiduelle mesurée δ_f est du même ordre de grandeur que celle déduite de la courbe force / pénétration (Figure 2. 42), lorsque la force s'annule.

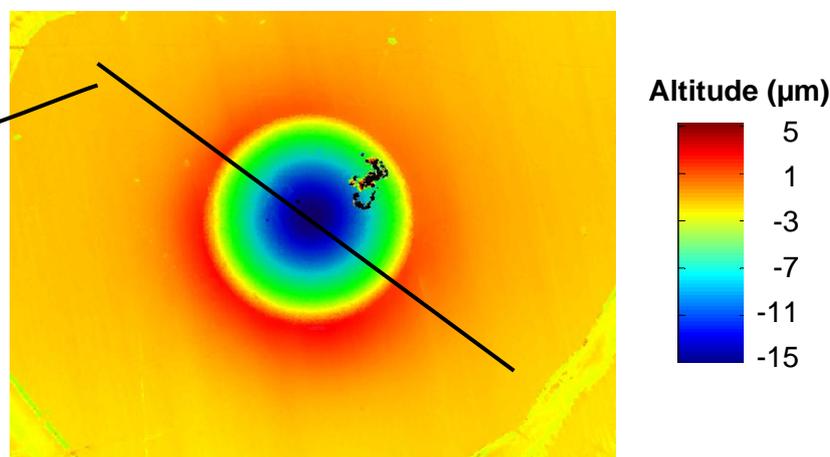


Figure 2. 44 : Observation au Topo3D de l'impact sur l'aluminium – Dimension de la zone analysée : 2,7 x 2 mm

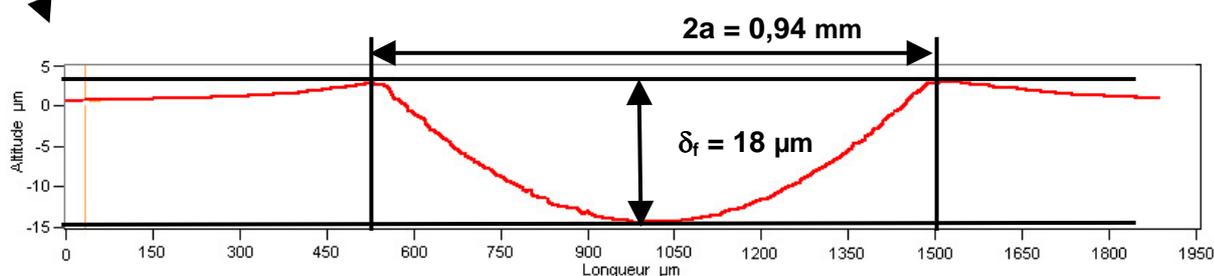


Figure 2. 45 : Profil de rugosité de l'aluminium au centre de l'impact – Ligne indiquée sur la Figure 2. 44

En prenant l'hypothèse d'un contact élastique selon Hertz, la déformation élastique au centre du contact d'un système avec dépression est égale à ([Johnson, 1985]) :

$$\delta_{el} = \left(\frac{3F}{4aE_{eq}} \right)^{1/3} \quad \text{Équation 2. 32}$$

$$\delta_{el} = \frac{a^2}{R} \quad \text{Équation 2. 33}$$

Avec F la force normale, a le rayon de contact et E_{eq} le module équivalent entre l'aluminium et l'acier.

$$E_{eq} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad \text{Équation 2. 34}$$

En prenant pour l'acier $E_1 = 210 \text{ GPa}$, $\nu_1 = 0,29$ et pour l'aluminium $E_2 = 70 \text{ GPa}$, $\nu_2 = 0,345$ ([Metals Handbook]), le module équivalent E_{eq} est égale à 59 GPa. Connaissant la force maximale et le rayon d'impact, l'Équation 2. 32 donne un retour élastique d'environ 12 μm . Comme pour la pénétration résiduelle, le retour élastique déduit de la courbe force /

pénétration est du même ordre de grandeur que celui estimé en supposant un contact hertzien. Un calcul simplifié permet de déterminer la dureté du matériau testé à partir de la force maximale et de la surface projetée du contact :

$$\text{Dureté} = \frac{F_{\max}}{S_{\text{projetée}}} \quad \text{Équation 2. 35}$$

La contrainte peut alors être assimilée avec une bonne approximation à ([Tabor, 1951]) :

$$\text{Contrainte } \sigma \approx \frac{\text{Dureté}}{3} \quad \text{Équation 2. 36}$$

Pour l'aluminium la dureté évaluée par l'essai de chute de bille est de 600 MPa, ce qui correspond à une contrainte d'environ 200 MPa.

Afin de vérifier cet ordre de grandeur, un essai de micro-dureté Vickers a été réalisé sur l'échantillon. La dureté obtenue est de 37 H_V, ce qui correspond à 360 MPa. Cette dureté est plus faible que celle obtenue par l'essai de chute de bille, mais cela peut s'expliquer par un comportement viscoplastique de l'échantillon d'aluminium. En effet, la vitesse de sollicitation est beaucoup plus faible lors de l'essai de dureté Vickers comparativement à l'essai de chute de bille.

Les résultats obtenus sur l'aluminium montrent des ordres de grandeurs cohérents (déformations plastiques, élastiques ; contrainte d'écoulement), validant ainsi la méthode expérimentale et l'analyse de l'essai de chute de bille.

2.3.6. - Influence des conditions d'essai sur les grandeurs déterminées

Comme pour l'essai de compression quasi-statique, l'essai dynamique a été réalisé dans différentes conditions expérimentales :

- Une ou plusieurs feuilles de papier superposées
- Des billes de nature et de dimensions différentes (masse, rayon)
- Des hauteurs de chute différentes

Le Tableau 2. 1 décrit les billes et les différentes hauteurs de chute utilisées au cours des essais :

Bille	Métallique			Verre
Masse m (g)	6,8	10	32,6	4,8
Rayon R (mm)	6	6,75	10	7,8

Hauteur de chute H ₁ (cm)	5	10	15

Tableau 2. 1 : Caractérisation des billes et des différentes hauteurs de chute utilisées au cours de l'essai de compression dynamique

Pour simplifier la notation des expériences, nous avons adopté les abréviations suivantes : H₁=5cm : hauteur de chute de 5 cm ; M6mm : bille métallique de rayon 6 mm ; V7,8mm = bille de verre de rayon 7,8 mm.

2.3.6.1. - Influence de l'hétérogénéité du papier

Généralement, cinq essais sont réalisés sur un papier pour s'assurer de la répétabilité des grandeurs déterminées. Cependant, certains papiers non couchés sont très hétérogènes ; ainsi, quinze essais ont été effectués. La Figure 2. 46 et la Figure 2. 47 présentent les courbes de contrainte / déformation obtenues sur une et trois feuilles d'un papier non couché (Papier TMP cf Tableau 2. 3). Les résultats montrent une meilleure répétabilité des courbes contrainte / déformation sur les essais réalisés sur trois feuilles que ceux sur une feuille. Lors de l'essai, la bille peut tomber sur des zones plus ou moins riches en fibres cellulosiques (flocs) ou en charges. La déformation des zones plus denses est alors inférieure à celles des zones de faibles densités. Par ailleurs, l'hétérogénéité du papier (zones plus ou moins denses) influe peu les courbes aux faibles déformations mais davantage à des déformations supérieures à 30% (Figure 2. 46).

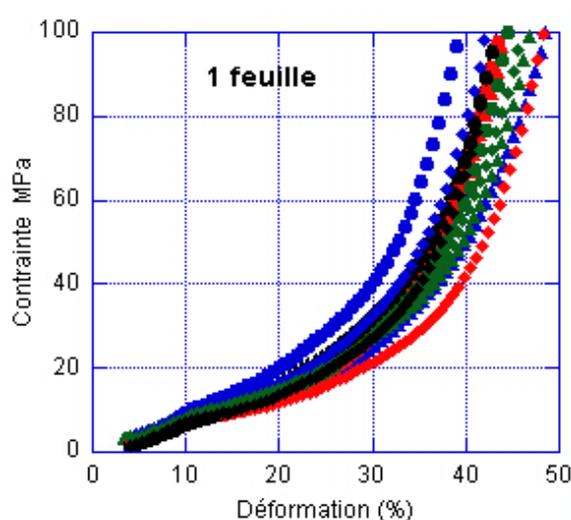


Figure 2. 46 : Essai de chute de bille sur une feuille de papier non couché (Papier TMP cf Tableau 2. 3) – M6mm – $H_1=10\text{cm}$

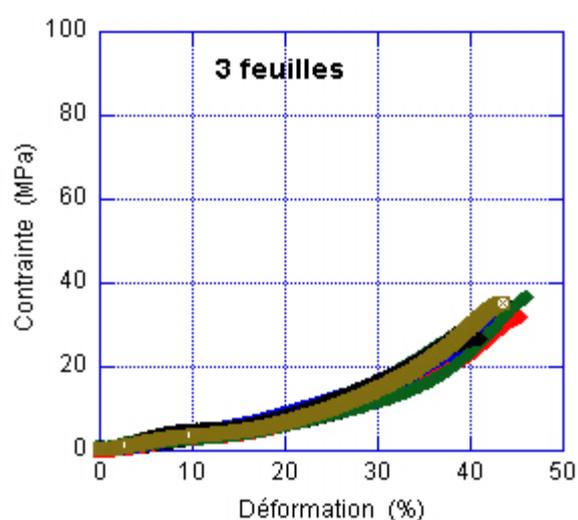


Figure 2. 47 : Essai de chute de bille sur trois feuilles de papier non couché (Papier TMP cf Tableau 2. 3) – M6mm – $H_1=10\text{cm}$

La Figure 2. 48 et la Figure 2. 49 présentent des images d'éclair obtenues sur une et trois feuilles d'un papier non couché (Papier TMP cf Tableau 2. 3) (cf partie 1.1.2). Nous pouvons tout d'abord constater que le niveau de gris moyen est plus clair sur l'image d'éclair d'une feuille de papier par rapport à celle sur 3 feuilles. Bien que le logiciel d'analyse d'éclair effectue une correction du niveau de gris, il semble normal que la lumière transmise à travers trois feuilles soit inférieure à celle transmise à travers une seule feuille. Par ailleurs, nous remarquons également que les niveaux de gris sont plus homogènes sur l'image correspondant à trois feuilles de papier que sur celle correspondant à une feuille. Ces images révèlent donc que la superposition de trois feuilles de papier rend l'ensemble plus homogène, ce qui explique la meilleure répétabilité des valeurs de contrainte obtenues sur trois feuilles de papier.

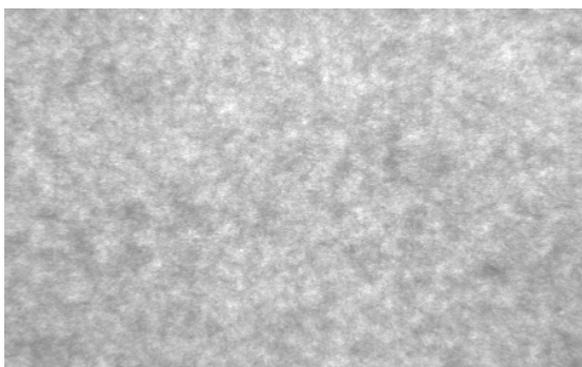


Figure 2. 48 : Image d'éclair d'une feuille d'un papier non couché (Papier TMP cf Tableau 2. 3) – Dimension : 12 x 7,5 cm

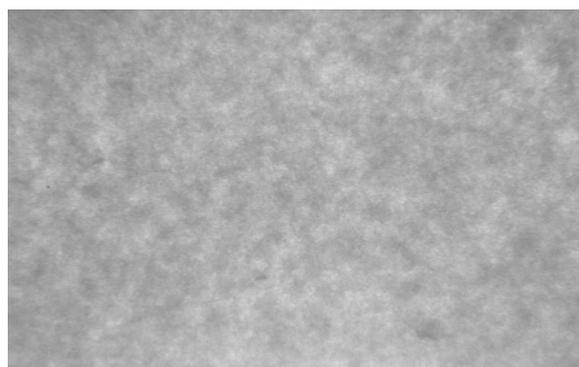


Figure 2. 49 : Image d'éclair de trois feuilles d'un papier non couché (Papier TMP cf Tableau 2. 3) - Dimension : 12 x 7,5 cm

2.3.6.2. - Influence de la bille et de la hauteur de chute

La Figure 2. 50 et la Figure 2. 51 présentent les courbes de contrainte / déformation obtenues sur une et trois feuilles de papier non couché (Papier TMP cf Tableau 2. 3) avec différentes billes. La Figure 2. 52 et la Figure 2. 53 concernent l'influence de la hauteur de chute sur le même papier.

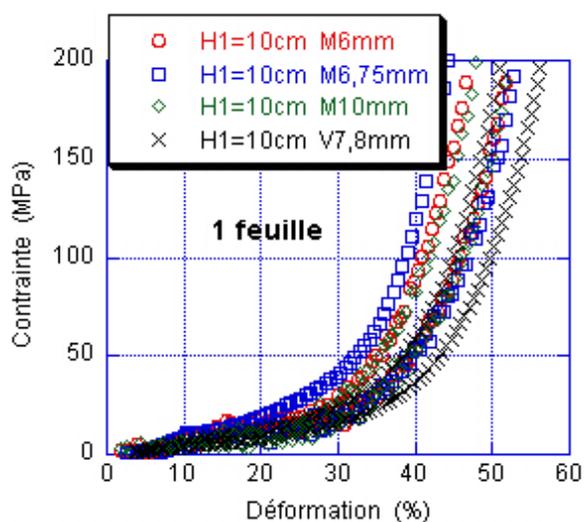


Figure 2. 50 : Influence de la bille sur la courbe contrainte / déformation (1 feuille) (Papier TMP cf Tableau 2. 3)

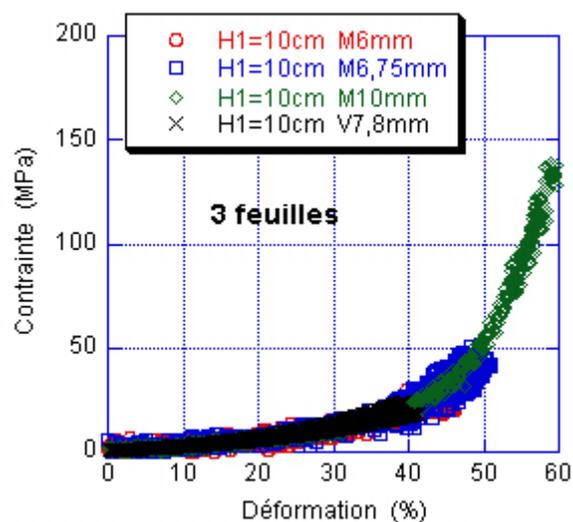


Figure 2. 51 : Influence de la bille sur la courbe contrainte / déformation (3 feuilles) (Papier TMP cf Tableau 2. 3)

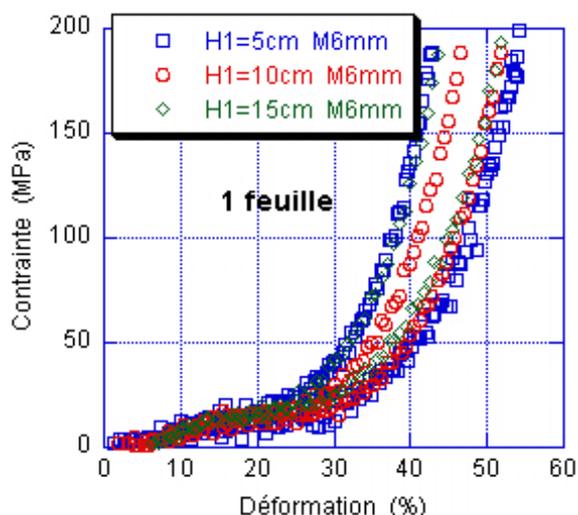


Figure 2. 52 : Influence de la hauteur de chute sur la courbe contrainte / déformation (1 feuille) (Papier TMP cf Tableau 2. 3)

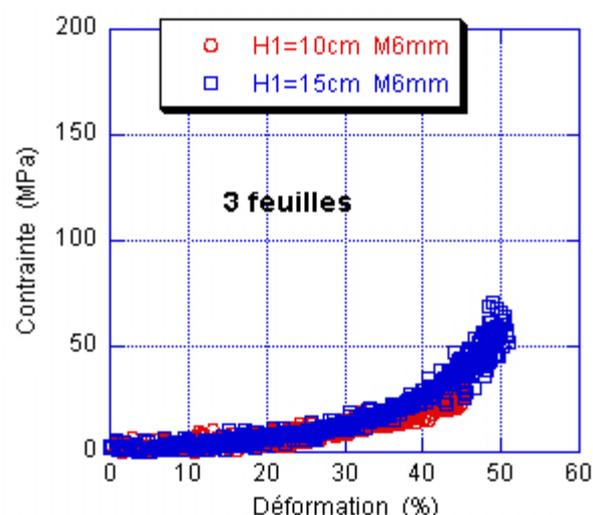


Figure 2. 53 : Influence de la hauteur de chute sur la courbe contrainte / déformation (3 feuilles) (Papier TMP cf Tableau 2. 3)

Les courbes de contrainte / déformation obtenues en faisant varier la bille ou la hauteur de chute ne montrent pas de nette différence. Ce résultat est cependant à prendre avec certaines précautions étant donné que seulement deux ou trois essais ont été réalisés dans certaines conditions expérimentales. En effet, des variations sont visibles, notamment sur une feuille, pour la même condition. Cependant, étant donné que les essais ont été réalisés sur un papier non couché, elles peuvent également être dues à l'hétérogénéité du papier. La répétabilité de l'essai n'étant pas suffisante, il est difficile de déterminer l'influence de la vitesse de sollicitation dans cette étude. Par contre, nous pouvons remarquer que plus le rayon de la bille et la masse sont importants, plus la force maximale d'impact est importante et surtout, plus le temps de sollicitation est long (Tableau 2. 2). Par ailleurs, plus la hauteur de chute est grande, plus le temps d'impact est court et plus la force maximale est grande. Enfin, il est important de noter que la bille et la hauteur de chute ont une influence secondaire sur le temps de sollicitation et la force maximale par rapport au nombre de feuilles.

Bille	Hauteur de chute	1 feuille		3 feuilles	
		Temps d'impact (ms)	Force max (N)	Temps d'impact (ms)	Force max (N)
M10mm	H1=10cm	0,165	1375	0,39	470
M6,75mm	H1=10cm	0,14	475	0,35	136
M6mm	H1=10cm	0,125	380	0,33	87
V7,5mm	H1=10cm	0,125	250	0,32	70
M6mm	H1=5cm	0,16	160		
M6mm	H1=15cm	0,11	510	0,29	135

Tableau 2. 2 : Temps d'impact et force maximale appliquée sur une et trois feuilles de papier pour différentes billes et hauteurs de chute

2.3.6.3. - Influence du nombre de feuilles de papier

Comme nous venons de le voir, le nombre de feuilles est un facteur de premier ordre sur le temps de sollicitation et la force appliquée. La Figure 2. 54 et la Figure 2. 55 présentent les courbes de contrainte / déformation obtenues en dynamique sur une feuille et trois feuilles d'un papier non couché (Papier TMP cf Tableau 2. 3) et d'un papier pré-couché (6 g/m²/face) (cf Tableau 2. 6). Les essais ont tous été réalisés avec une bille métallique de rayon 6 mm et une hauteur de chute de 10 cm.

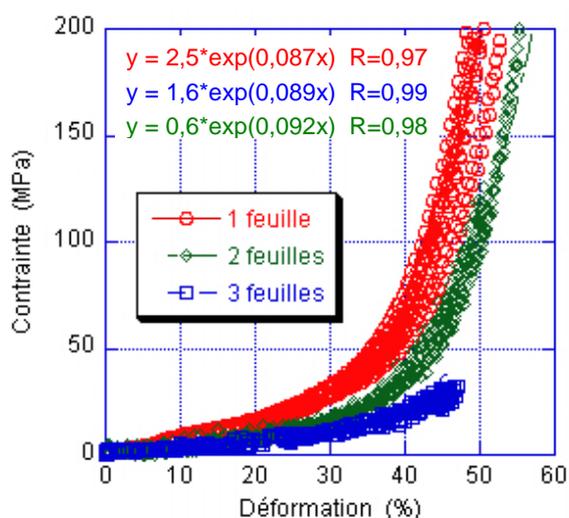


Figure 2. 54 : Influence du nombre de feuilles sur le comportement mécanique en dynamique d'un papier non couché (Papier TMP cf Tableau 2. 3) – M6mm – H₁=10cm

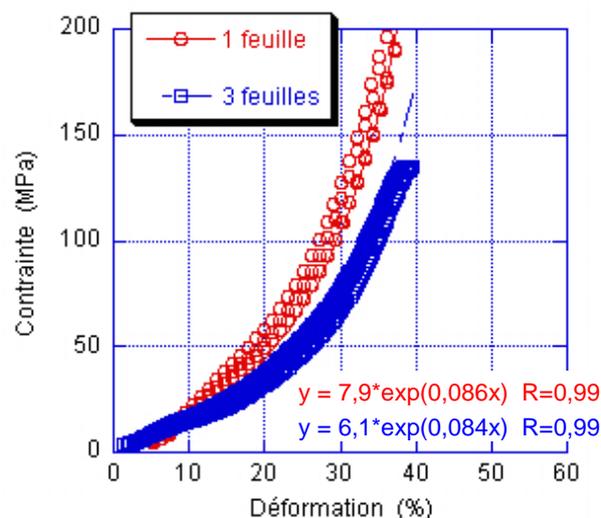


Figure 2. 55 : Influence du nombre de feuilles sur le comportement mécanique en dynamique d'un papier pré-couché (cf Tableau 2. 6) – M6mm – H₁=10cm

Contrairement aux résultats obtenus en compression quasi-statique sur les mêmes papiers (couché et non couché) (partie 2.2.4. -), les courbes de contrainte / déformation ne se superposent pas, même aux faibles déformations. Nous pouvons constater que plus le nombre de feuilles augmente (l'épaisseur), plus le papier se déforme pour une même contrainte appliquée.

La Figure 2. 56 et la Figure 2. 57 présentent les vitesses de déformation ($\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\epsilon}}{e}$) en fonction de la déformation du papier. Nous pouvons remarquer que plus le nombre de feuilles est important, plus la vitesse de sollicitation du papier est faible pour la même déformation. Ce constat permet d'expliquer les courbes de contrainte / déformation obtenues sur plusieurs feuilles et rejoint les résultats de la partie 2.1.4. - à partir des données de Feygin ([Feygin, 1999]) : plus le papier est sollicité rapidement, plus la contrainte croît avec la déformation.

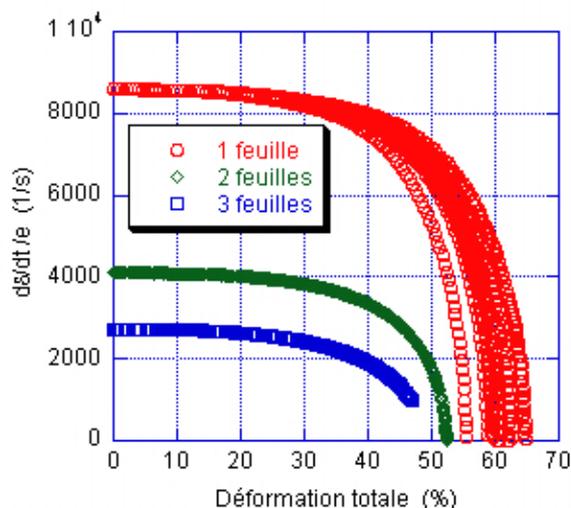


Figure 2. 56 : Vitesse de déformation en fonction de la déformation d'une, deux et trois feuilles de papier non couché (Papier TMP cf Tableau 2. 3) – M6mm – H₁=10cm

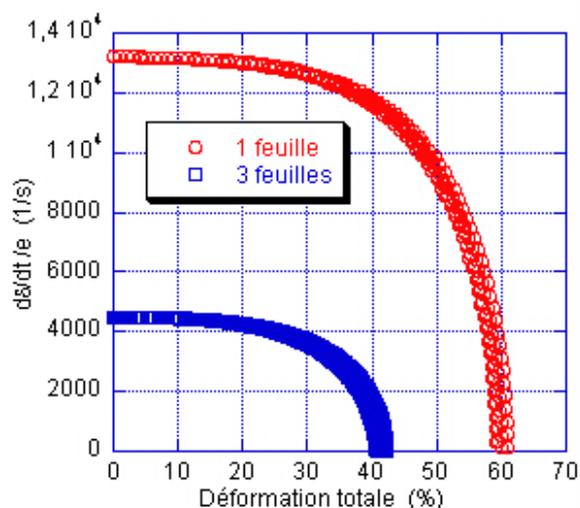


Figure 2. 57 : Vitesse de déformation en fonction de la déformation d'une et trois feuilles de papier pré-couché (cf Tableau 2. 6) – M6mm – H₁=10cm

La vitesse de sollicitation est donc un paramètre important qui influe sur les courbes de contrainte / déformation. L'augmentation de l'épaisseur du papier (en superposant des feuilles), est une méthode pour mettre en évidence ce paramètre. En supposant que la croissance exponentielle de la contrainte avec la déformation totale (Figure 2. 54 et Figure 2. 55) est pondérée par un terme multiplicatif de type puissance décrivant l'influence de la vitesse de déformation, on aboutit aux relations suivantes :

$$\begin{cases} \sigma_1 = F(\varepsilon_{tot})[\dot{\varepsilon}_1]^{m^*} \\ \sigma_2 = F(\varepsilon_{tot})[\dot{\varepsilon}_2]^{m^*} \end{cases} \rightarrow m^* = \frac{\ln(\sigma_1 / \sigma_2)}{\ln(\dot{\varepsilon}_1 / \dot{\varepsilon}_2)} \quad \text{Équation 2. 37}$$

Les indices 1 et 2 définissent les résultats obtenus avec deux nombres de feuilles différents. Etant donné qu'aucune loi simple ne permet d'approcher les points expérimentaux avec un bon coefficient de corrélation, nous avons alors essayé d'identifier le paramètre de sensibilité à la vitesse de déformation m^* pour un niveau de déformation donné (10, 20, 30 et 40%). La Figure 2. 58 présente les résultats obtenus pour les deux papiers. Nous constatons que pour le papier pré-couché, le paramètre m^* apparaît peu sensible à la déformation et qu'il est égal à environ 0,25. Cette valeur traduit une forte sensibilité de la contrainte à la vitesse de déformation, dans la gamme sollicitée. Pour le papier TMP, l'interprétation des résultats est plus compliquée. En effet, on s'attendrait à ce que les trois courbes (entre une et trois feuilles, une et deux feuilles et, deux et trois feuilles) soient plus proches. Nous pouvons donc penser qu'il y a deux effets qui se superposent :

- Un effet de la vitesse de sollicitation : la contrainte augmente avec la vitesse.
- Un effet de l'hétérogénéité du papier : la superposition deux ou trois feuilles n'a pas forcément les mêmes caractéristiques qu'une seule feuille.

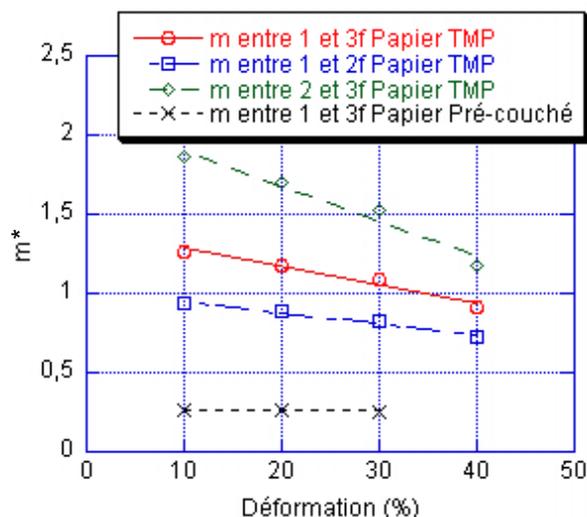


Figure 2. 58 : Paramètre de sensibilité à la vitesse de déformation m^* en fonction de la déformation totale – Papier non couché (TMP cf Tableau 2. 3) et Papier pré-couché (cf Tableau 2. 6) – $M6mm$ – $H_1=10cm$

2.4. - Application à l'étude du comportement mécanique d'une bille élastomère

2.4.1. - Compression d'une bille élastomère

L'essai de compression quasi-statique a été modifié afin de comprimer une bille élastomère de rayon $R = 12,25$ mm. Dans le cas de la compression du papier, la bille est métallique et considérée comme rigide. Dans cet essai, la tige et le support sont considérés comme indéformables et rigides ; c'est la bille élastomère qui se déforme. La tige en V supportant la bille a été remplacée par une tige avec un embout plat (Figure 2. 59).

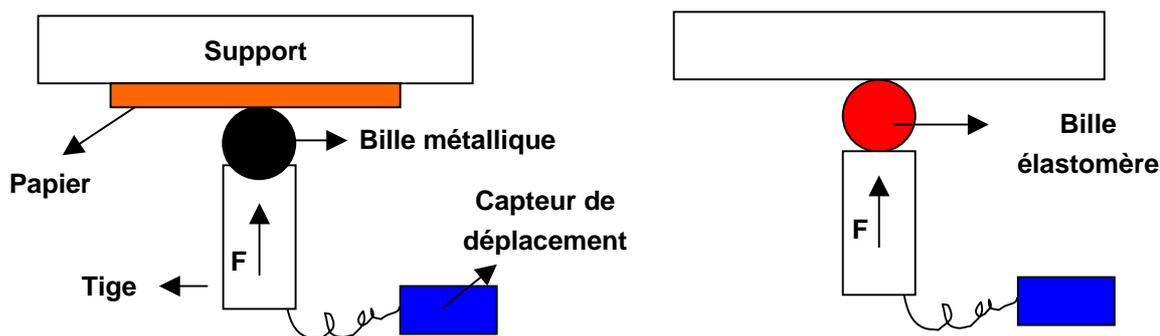


Figure 2. 59 : Schéma des modifications de l'essai de compression quasi-statique pour l'étude du comportement mécanique d'une bille élastomère

Le protocole expérimental a été le même que pour l'essai de compression du papier (partie 2.2.1. -). Le cépage élastique du montage a également été déduit de la déformation de la bille.

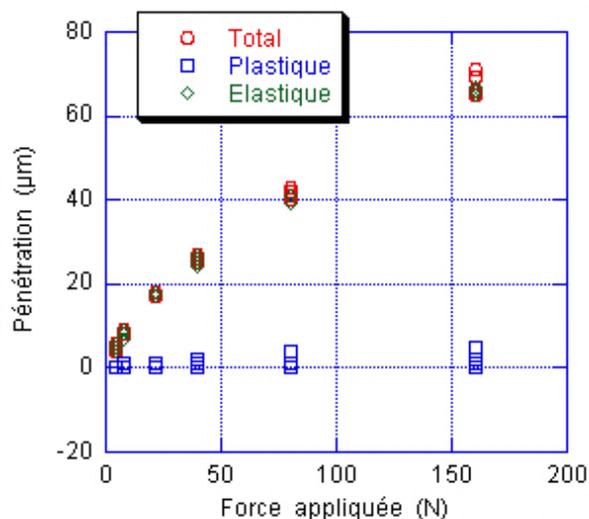


Figure 2. 60 : Déformation de la bille élastomère en fonction de la force – essai de compression quasi-statique

La Figure 2. 60 montre que la déformation de la bille élastomère est quasiment élastique. Il n'y a pas de déformation résiduelle après la charge. La théorie de Hertz sur le contact élastique relie la force à la déformation. La combinaison de l'Équation 2. 32 et de l'Équation 2. 33 donne :

$$\mathbf{F} = \frac{4}{3} \mathbf{a} \mathbf{E}_{eq} (\delta_{el})^{3/2} \quad \text{Équation 2. 38}$$

Etant donné que la bille se déforme du côté de la tige et du côté du support, nous avons divisé la déformation par 2.

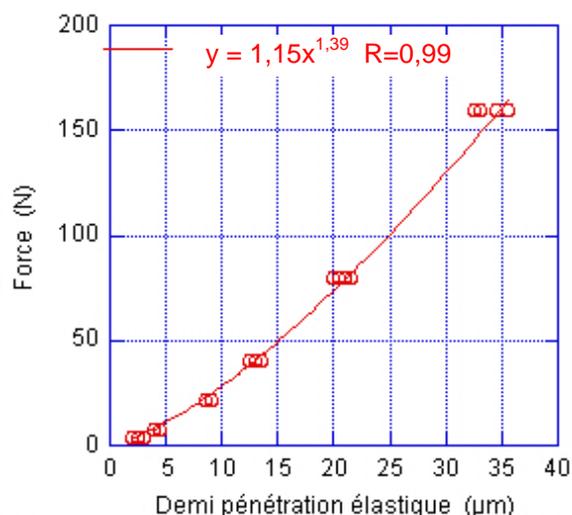


Figure 2. 61 : Force en fonction de la demi pénétration élastique

La Figure 2. 61 montre que la force est bien une fonction de type puissance de la déformation élastique. Cependant l'exposant n'est pas égal à 1,5 conformément à l'Équation 2. 38. La Figure 2. 62 montre que la force à la puissance 2/3 est bien une fonction affine de la demi pénétration élastique avec un coefficient d'ordre 0 non nul. Ainsi, la pré-charge appliquée pour initialiser le capteur de position entraîne une légère déformation de la bille. Une correction de 0,42 µm est alors appliquée à la demi pénétration élastique. La Figure 2.

63 montre alors une loi de type puissance de la force en fonction de la déformation avec un coefficient de 1,48 en prenant en compte cette correction. Une application numérique de l'Équation 2. 38 permet également de déterminer un module équivalent de l'ordre de 5,5 GPa.

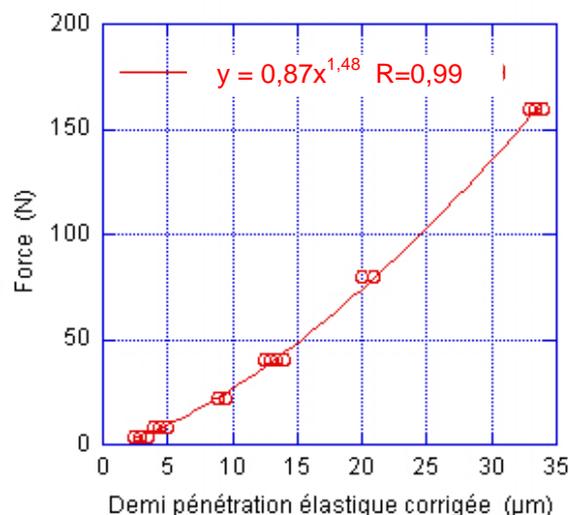
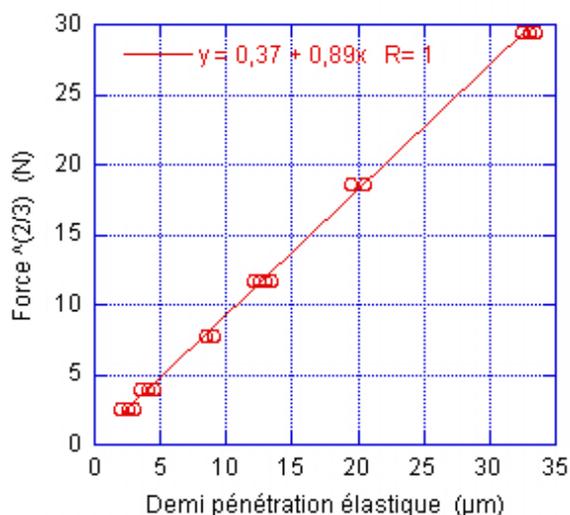


Figure 2. 62 : Force à la puissance 2/3 en fonction de la demi pénétration élastique

Figure 2. 63 : Force en fonction de la demi pénétration élastique corrigée

2.4.2. - Compression de la bille élastomère en dynamique

Pour compléter l'étude sur le comportement mécanique de la bille élastomère en dynamique, un essai de chute a été réalisé directement sur l'enclume. Comme pour la compression en statique, l'analyse mécanique de l'essai montre que la force est reliée à la déformation par une loi de type puissance avec un coefficient de 3/2 (Figure 2. 64). Le module équivalent calculé est de l'ordre de 4,8 GPa, légèrement plus faible que celui obtenu en statique.

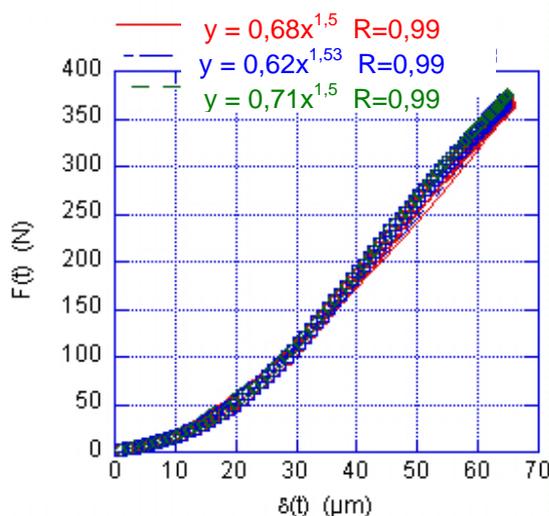


Figure 2. 64 : Force en fonction de la déformation de la bille élastomère – essai de chute

L'étude du comportement mécanique de la bille élastomère permet donc également de confirmer la validité des deux essais de compression développés. Nous allons donc appliquer ces essais au matériau qui nous intéresse.

2.5. - Application à l'étude du comportement mécanique des papiers

2.5.1. - Influence de la nature pâte

Comme nous l'avons vu dans la partie 1.1.1.1, la fabrication de la pâte à papier peut se faire de deux manières : mécaniquement ou chimiquement. Afin de déterminer l'influence du type de pâte sur le comportement mécanique du papier, trois papiers non chargés ont été testés : un papier avec une pâte ayant subi principalement un traitement mécanique (TMP), un papier ayant une pâte purement chimique (Kraft) et un papier ayant un mélange des deux pâtes précédentes (TMP + Kraft). Les caractéristiques des papiers sont données dans le Tableau 2. 3.

Papier	TMP	Kraft	TMP + Kraft
Epaisseur (μm)	163	126	135
Grammage (g/m^2)	81,9	78,5	77,9
Masse volumique ρ_0 (kg/m^3)	503	621	578
Porosité (%)	67,3	59,7	62,5
Type de pâte	mécanique	chimique	mélange

Tableau 2. 3 : Caractéristiques des papiers élaborés à partir de différentes pâtes

La masse volumique (ρ_0) est égale au rapport entre le grammage et l'épaisseur. La porosité a été calculée selon la formule :

$$\text{Porosité} = \left(1 - \frac{\rho_0}{(1 - \tau)\rho_{\text{cellulose}} + \tau\rho_{\text{charge}}} \right) * 100 \quad \text{Équation 2. 39}$$

Avec τ la teneur en charge

Dans les papiers testés, le taux de charge est nul et la masse volumique de la cellulose est égale à $1540 \text{ kg}/\text{m}^3$. Par ailleurs, les essais de chute de bille et de compression quasi-statique ont été réalisés à température et humidité ambiantes. L'humidité des papiers est donc différente en fonction de la nature de la pâte. La Figure 2. 65 et la Figure 2. 66 présentent les résultats des essais de compression quasi-statique sur l'influence du type de pâte (une feuille). La Figure 2. 67 et la Figure 2. 68 présentent ceux des essais de compression dynamique sur une feuille et trois feuilles.

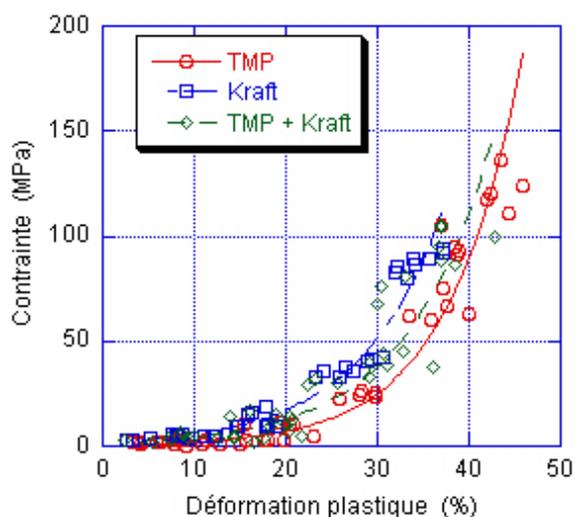


Figure 2. 65 : Essai de compression quasi-statique sur une feuille (M6,75 et M10) – Influence de la pâte sur la contrainte

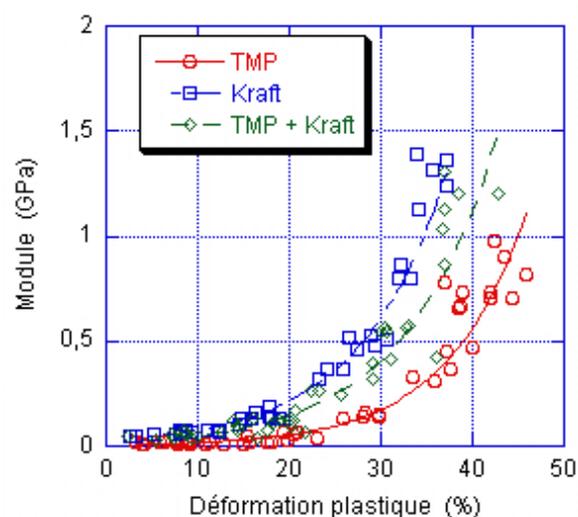


Figure 2. 66 : Essai de compression quasi-statique sur une feuille (M6,75 et M10) – Influence de la pâte sur le module

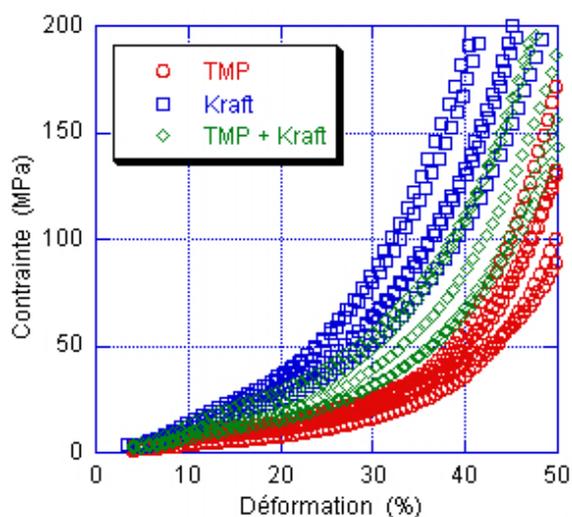


Figure 2. 67 : Essai de chute de bille sur une feuille (H1=10 cm V7,8 mm) – Influence de la pâte sur la contrainte

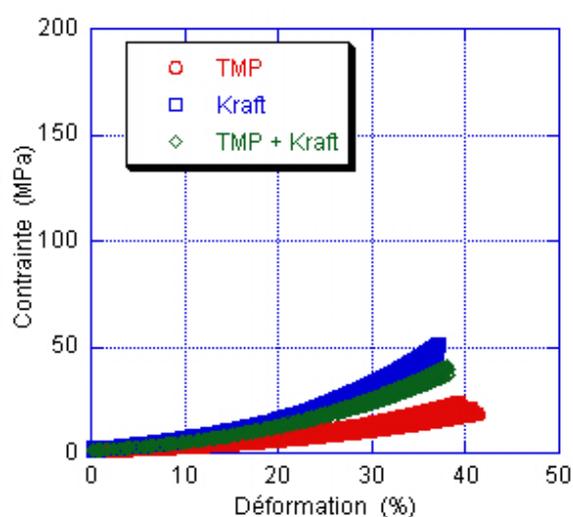


Figure 2. 68 : Essai de chute de bille sur trois feuilles (H1=10 cm V7,8 mm) – Influence de la pâte sur la contrainte

Quelles que soient les vitesses de sollicitation, les courbes montrent que pour une même contrainte, le papier contenant de la pâte principalement mécanique se déforme davantage que celui contenant de la pâte purement chimique. Le papier de composition mixte en pâte a une déformation intermédiaire. Ce résultat confirme celui obtenu à des faibles vitesses de compression par Bristow ([Bristow *et al.*, 1986]) et présenté dans la partie 1.1.3. Il montre par ailleurs que le comportement est identique à des vitesses de sollicitation proches de celles du calandrage. La déformation importante du papier fabriqué à partir de la pâte mécanique pour une même contrainte est encore plus marquée sur les essais

dynamiques réalisés sur 3 feuilles de papier superposées. Les essais en compression quasi-statique indiquent que le module est plus sensible au type de pâte que la contrainte.

Les résultats précédents présentent le comportement mécanique des papiers fabriqués à partir de différentes pâtes. Cependant, le Tableau 2. 3 montrent que la masse volumique (ρ_0) et la porosité diffèrent en fonction des papiers. Rodal ([Rodal, 1989]) a introduit dans son modèle phénoménologique la contrainte de Kirchoff prenant en compte le rapport entre la densité initiale et la densité finale du papier (cf partie 1.3.2.2). Etant donné que les essais de compression statique et dynamique permettent de déterminer l'épaisseur du papier au cours de la compression, la contrainte et le module ont été multipliés par le rapport entre la masse volumique initiale et la masse volumique au cours de l'essai ($\rho = \text{grammage} / \text{épaisseur au cours de l'essai}$), (Figure 2. 69, Figure 2. 70, Figure 2. 71 et Figure 2. 72). Ce mode de représentation permet de mettre encore plus en évidence l'influence du type de pâte sur le comportement mécanique. Il semble par ailleurs plus complet puisqu'il prend en compte un autre paramètre (la densité). Notons également que le rapport de masse volumique est inférieur à 1. Ainsi, les niveaux de contrainte et de module pour une même déformation sont plus faibles par rapport à la première représentation (Figure 2. 65, Figure 2. 66, Figure 2. 67 et Figure 2. 68).

Cette partie a mis en évidence un comportement mécanique différent pour les trois papiers fabriqués à partir de différentes pâtes. Cependant, l'humidité relative d'un papier fabriqué à partir d'une pâte mécanique est plus importante que celle d'un papier fabriqué à partir d'une pâte chimique ([Peel, 1999]). Ce facteur peut être à l'origine des différences observées. L'humidité et la température d'un papier sur son comportement mécanique sera rediscuté dans la partie 3.4.1.

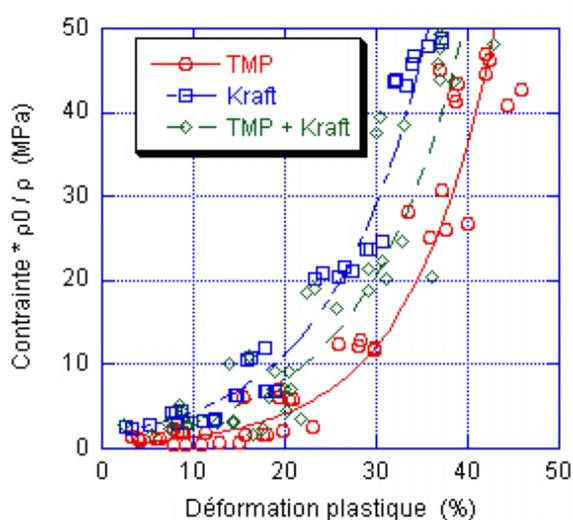


Figure 2. 69 : Prise en compte de l'évolution de la densité au cours de la compression quasi-statique sur la contrainte – Influence du type de pâte – M6,75 et M10

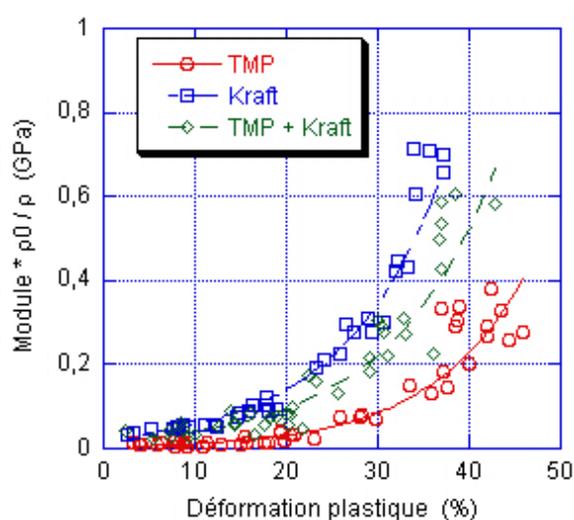


Figure 2. 70 : Prise en compte de l'évolution de la densité au cours de la compression quasi-statique sur le module – Influence du type de pâte – M6,75 et M10

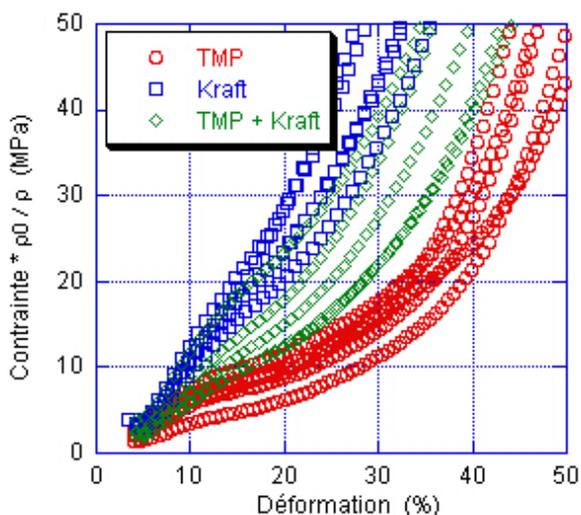


Figure 2. 71 : Prise en compte de l'évolution de la densité au cours de la compression dynamique sur la contrainte sur une feuille – Influence du type de pâte – H1=10 cm V7,8 mm

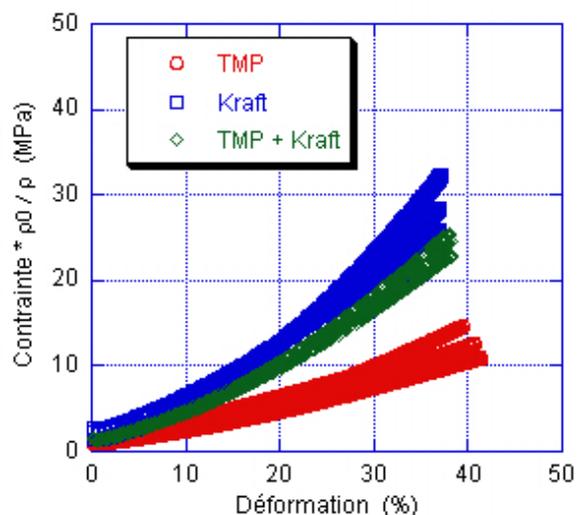


Figure 2. 72 : Prise en compte de l'évolution de la densité au cours de la compression dynamique sur a contrainte sur trois feuilles – Influence du type de pâte – H1=10 cm V7,8 mm

2.5.2. - Influence de la teneur en charges

Après l'opération de raffinage, des charges minérales et des agents de rétention peuvent être introduits dans la pâte à papier (cf partie 1.1.2). Le papier TMP étudié dans la partie 2.5.1. - a été fabriqué avec différentes teneurs en charge (10,4 et 23,7 pourcentage massique). Le Tableau 2. 4 présente les caractéristiques des papiers. La porosité a été calculée à partir de l'Équation 2. 39 en prenant 2650 kg/m^3 pour la masse volumique des charges (CaCO_3).

Papier	TMP 0%	TMP 10,4%	TMP 23,7%
Epaisseur (μm)	163	158	144
Grammage (g/m^2)	81,9	79,0	77,1
Masse volumique ρ_0 (kg/m^3)	503	500	535
Porosité (%)	67,3	69,7	70,6
Taux de charge (%)	0	10,4	23,7

Tableau 2. 4 : Caractéristiques des papiers contenant différentes teneurs en charge

Les essais de chute de bille et de compression quasi-statique ont été réalisés à température et humidité ambiantes. Les résultats en statique (Figure 2. 73 et Figure 2. 74) et en dynamique (Figure 2. 75) montrent que les courbes de contrainte et de module en fonction de la déformation se superposent quelle que soit la teneur en charge. Par ailleurs, contrairement aux papiers élaborés à partir des pâtes différentes, la masse volumique et la porosité des papiers sont du même ordre de grandeur. La prise en compte de l'évolution de la densité au cours de la compression aboutit aux mêmes courbes.

Les charges étant plus dures que le matelas fibreux, la contrainte et le module devraient être plus importants dans un papier chargé. Cependant, les papiers testés sont très poreux. Les déformations atteintes ne sont peut être pas suffisantes pour arriver à des porosités quasi-nulles et donc induire une influence significative des charges.

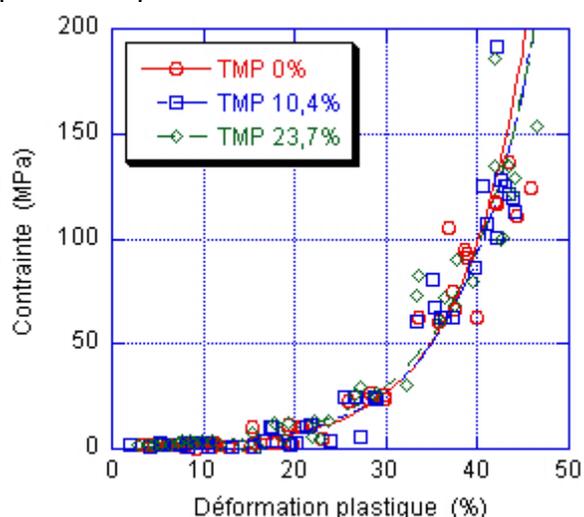


Figure 2. 73 : Essai de compression quasi-statique sur une feuille (M6,75 et M10) – Influence de la teneur en charge sur la contrainte

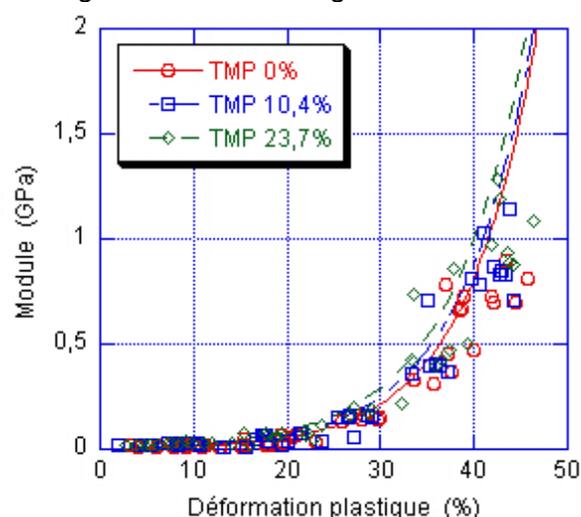


Figure 2. 74 : Essai de compression quasi-statique sur une feuille (M6,75 et M10) – Influence de la teneur en charge sur le module

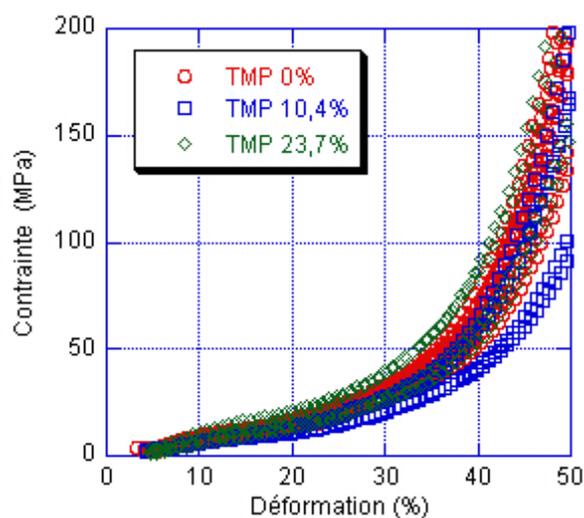


Figure 2. 75 : Essai de chute de bille sur une feuille (H1=10 cm M6 mm) – Influence de la teneur en charge sur la contrainte

2.5.3. - Influence de la densité initiale du papier

Dans la partie 2.5.1. -, les grandeurs mécaniques ont été multipliées par le rapport entre la masse volumique initiale et la masse volumique au cours de l'essai afin de comparer des papiers n'ayant pas la même densité. Dans le but de mieux étudier l'influence de l'état

de densification du papier sur le comportement mécanique, plusieurs papiers ont été calandrés une fois et huit fois, puis leur comportement mécanique a été comparé à celui du papier initial. Les papiers ont été calandrés au laboratoire dans une configuration soft nip associant un rouleau métallique et un rouleau élastomère. La température du rouleau métallique était de 90°C et la charge appliquée de 2 tonnes, correspondant à une force linéique de 65kN/m. Le Tableau 2. 5 donne les caractéristiques d'un des papiers testés en fonction du nombre de passages de la feuille dans le nip de la calandre. Il s'agit du papier non chargé, élaboré à partir d'une pâte TMP (cf Tableau 2. 3). En comparant les épaisseurs des papiers calandrés, nous pouvons déduire que la déformation plastique a lieu quasiment lors du premier calandrage. Les passages successifs de la feuille de papier dans le nip n'ont entraîné qu'une faible densification supplémentaire.

Papier	TMP 0 Nip	TMP 1 Nip	TMP 8 Nip
Epaisseur (μm)	163	93	90
Masse volumique ρ_0 (kg/m^3)	503	880	910
Porosité (%)	67,3	42,9	40,9
Passage dans	0 nip	1 nip	8 nips

Tableau 2. 5 : Caractéristiques du papier TMP non chargé avant et après un ou huit nips

Les essais de chute de bille et de compression quasi-statique ont été réalisés à température et humidité ambiantes. La Figure 2. 76, la Figure 2. 77 et la Figure 2. 78 mettent en évidence en statique et en dynamique la sensibilité des propriétés mécaniques à la densification du papier. En effet, dès le premier passage dans le nip, les fibres cellulósiques sont fortement déformées plastiquement. La feuille du papier étant plus dense, une contrainte nettement plus élevée est nécessaire pour obtenir la même déformation. Par ailleurs, les résultats en statique montrent une légère augmentation de la contrainte et du module du papier calandré 8 fois par rapport à ceux du papier calandré une seule fois.

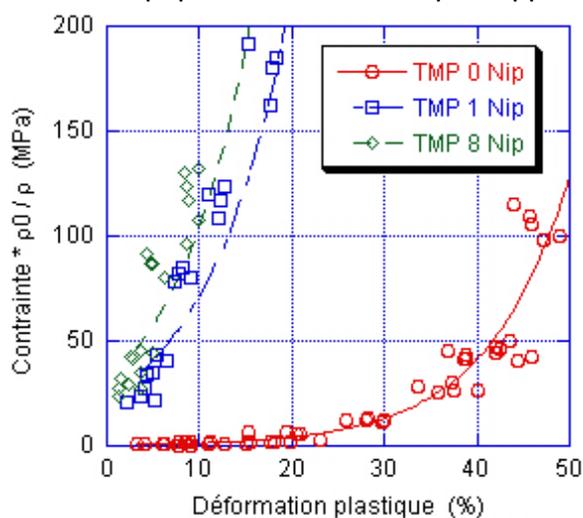


Figure 2. 76 : Essai de compression quasi-statique sur une feuille (M6,75 et M10) – Influence de la densité sur la contrainte

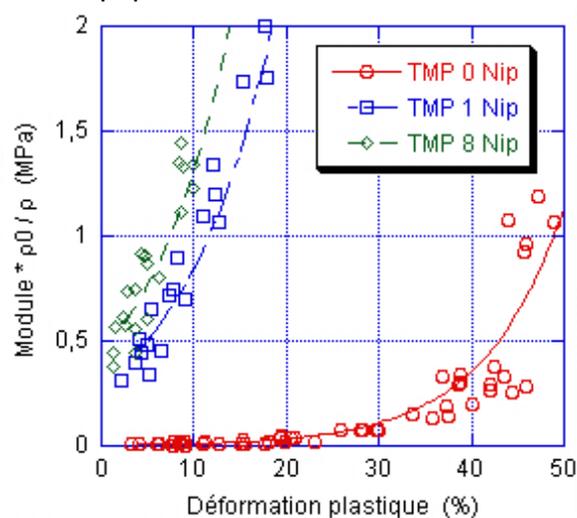


Figure 2. 77 : Essai de compression quasi-statique sur une feuille (M6,75 et M10) – Influence de la densité sur le module

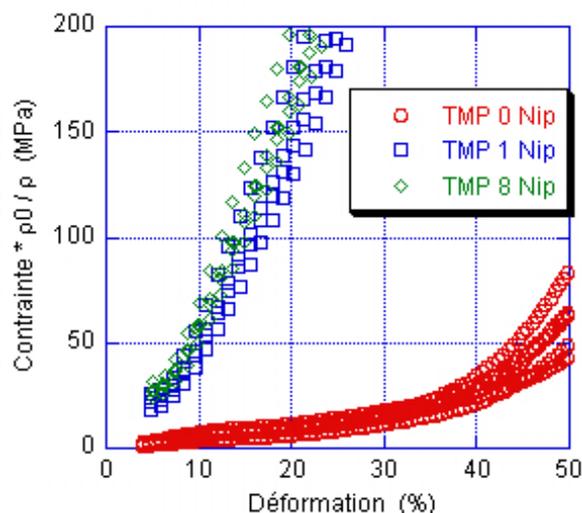


Figure 2. 78 : Essai de chute de bille sur une feuille ($H1=10$ cm $M6$ mm) – Influence de la densité sur la contrainte

Nous pouvons également remarquer que le passage de la feuille de papier dans un nip induit une déformation plastique de l'ordre de 43% et de 45% pour huit nips. Les propriétés mécaniques des papiers calandrés semblent assez comparables à celles atteintes par le papier initial après environ 43% d'écrasement (Figure 2. 79 pour la contrainte et Figure 2. 80 pour le module).

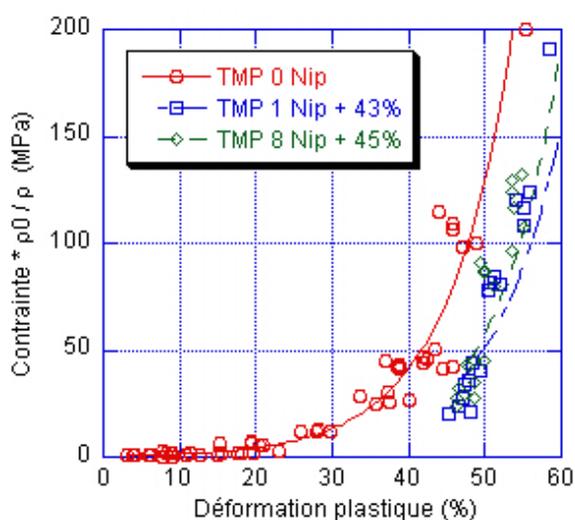


Figure 2. 79 : Prise en compte de la déformation plastique lors du calandrage sur la courbe contrainte / déformation – Compression quasi-statique ($M6,75$ et $M10$)

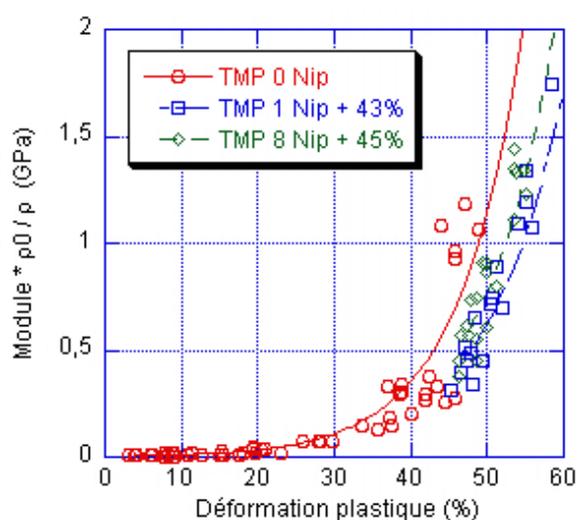


Figure 2. 80 : Prise en compte de la déformation plastique lors du calandrage sur la courbe module / déformation – Compression quasi-statique ($M6,75$ et $M10$)

2.5.4. - Influence de la couche

Certains papiers, notamment dans l'impression – écriture, nécessitent une surface lisse et brillante. Les papiers sont alors couchés puis calandrés. La composition des sauces de couchage et les procédés d'application ont été décrits dans la partie 1.1.4. Afin de déterminer l'influence de la couche sur le comportement mécanique, différents papiers ont été couchés puis testés à l'aide des essais de laboratoire de compression. Le papier qui a servi de support à la couche est le papier pré-couché (6 g/m²/face) déjà présenté dans la partie 2.1.1.1. - en statique et 2.3.6. - en dynamique. Il s'agit d'un papier industriel qui a été récupéré avant l'opération de couchage afin de faire varier différents paramètres :

- Le procédé de couchage
- Le poids de couche
- Le liant (nature et nombre de parts)

Le Tableau 2. 6 présente les caractéristiques et les modes d'élaboration des différents papiers couchés.

Le papier F est un papier couché fourni par le fabricant du papier pré-couché. C'est la raison pour laquelle il manque certaines données. Etant donné qu'il s'agit d'un papier industriel, divers additifs ont dû être ajoutés dans la sauce de couchage. Ce papier (F) est couché en deux déposes (1^{ère} de 13 g/m²/face et 2^{nde} de 12 g/m²/face). La sauce est projetée par un jet sur le papier puis l'excès de sauce est éliminé par une lame lissante. Pour les papiers A, B, C, D et E, la sauce est déposée en excès par un rouleau applicateur puis le surplus est raclé par une lame rigide. La pression appliquée par la lame sur le papier est ajustée afin d'obtenir différentes déposes.

Les latex 1 et 2 sont deux types de styrène-butadiènes dont les propriétés viscoélastiques diffèrent. Le nombre de parts de liant est calculé par rapport au nombre de parts de pigments secs qui est toujours égal à 100. L'extrait sec est calculé à partir de la relation :

$$\text{extrait sec (\%)} = 1 - \frac{\text{masse de la sauce} - \text{masse de matière sèche}}{\text{masse de la sauce}} \quad \text{Équation 2. 40}$$

Les essais de chute de bille et de compression quasi-statique ont été réalisés à température et humidité ambiantes.

Papier	Pré-couché	A	B	C	D	E	F	
Epaisseur (μm)	106	110	117	128	115	117	120	
Grammage (g/m^2)	85	102,4	116,8	135,2	116,9	116,9	135	
Masse volumique ρ_0 (kg/m^3)	802	931	998	1056	1017	999	1125	
Poids de couche ($\text{g}/\text{m}^2/\text{face}$)	6	6 + 8	6 + 16	6 + 25	6 + 16	6 + 16	6 + 25	
Nature du liant		Latex 1	Latex 1	Latex 1	Latex 2	Latex 1	?	
Nombre de parts de liant		10	10	10	10	20	?	
Procédé de couchage		Rouleau applicateur + lame raclante					Jet (jet flow) + lame lissante	
Dépose en 1 ou 2 fois		1					2	
Extrait sec (%)		≈ 68					≈ 71	

Tableau 2. 6 : Caractéristiques et mode d'élaboration des papiers couchés

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

La Figure 2. 81, la Figure 2. 82 et la Figure 2. 83 présentent les résultats des essais de compression en statique et dynamique réalisés sur le papier pré-couché et les papiers C et F (dépose de $25\text{g}/\text{m}^2/\text{face}$ par un procédé différent). Les courbes montrent que les papiers couchés atteignent une déformation inférieure à celle du papier pré-couché pour la même contrainte appliquée. Cette déformation est cependant différente entre les deux papiers couchés : la déformation du papier couché à l'aide du système « rouleau applicateur + lame raclante » est plus importante que celle du papier couché à l'aide du système « jet (jet flow) + lame lissante ». Ce comportement est plus apparent sur la courbe contrainte / déformation obtenue en statique (Figure 2. 81) que celle en dynamique (Figure 2. 83). La courbe de module / déformation plastique (Figure 2. 82) montre également l'influence du procédé de couchage. Par ailleurs, nous pouvons également noter que les concentrations en pigments (extrait sec) des deux sauces de couchage ont un écart absolu de 3%, ce qui peut influencer le comportement mécanique des papiers.

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

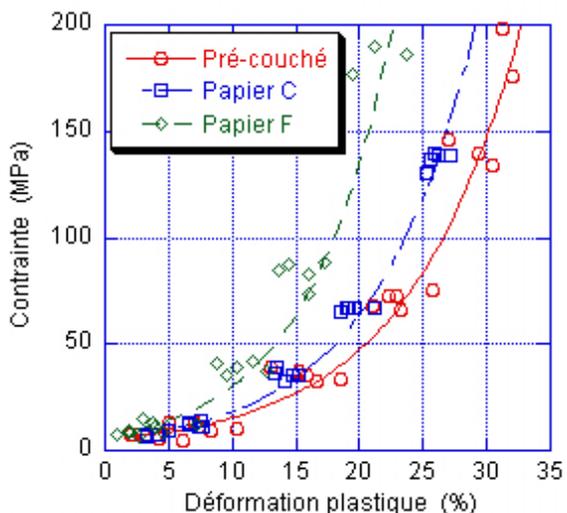


Figure 2. 81 : Essai de compression quasi-statique sur une feuille (M10) – Influence de la couche et du procédé d'application sur la contrainte

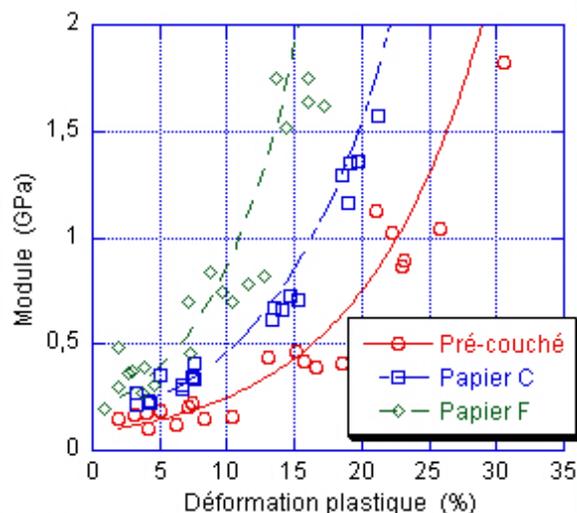


Figure 2. 82 : Essai de compression quasi-statique sur une feuille (M10) – Influence de la couche et du procédé d'application sur le module

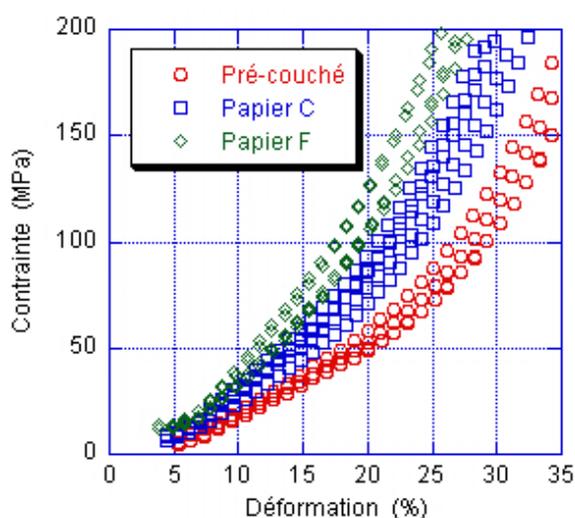


Figure 2. 83 : Essai de chute de bille sur une feuille (H1=10 cm M6 mm) – Influence de la couche et du procédé d'application sur la contrainte

2.5.4.2. - Influence du poids de couche

L'étude de l'influence du poids de couche sur le comportement mécanique des papiers a été réalisée sur les papiers A, B et C couchés par un système « rouleau applicateur + lame raclante ». Les résultats obtenus sur les papiers couchés en statique (Figure 2. 84 et Figure 2. 85) et en dynamique (Figure 2. 86) montrent que les courbes contrainte / déformation sont assez peu influencées par le poids de couche, bien que la déformation soit inférieure à celle

du papier pré-couché, pour une même contrainte appliquée. La présence d'une couche sur le papier semble donc entraîner une diminution de la déformation, à contrainte imposée. Par contre, l'augmentation du poids de couche ne semble pas engendrer de manière significative, une diminution supplémentaire de la déformation (variations dans la gamme d'incertitude de la mesure). Les courbes de module / déformation montrent un comportement légèrement différent : l'augmentation de la dépose semble entraîner une augmentation du module jusqu'à un certain poids de couche. En effet, on observe sur la Figure 2. 85 une superposition des courbes des papiers B (16 g/m²/face) et C (25 g/m²/face). Par contre, la courbe du papier A (8 g/m²/face) est comprise entre celle du papier pré-couché et celles des papiers B et C.

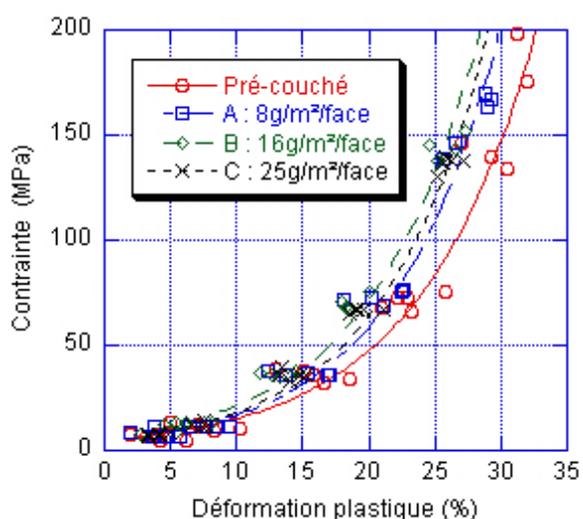


Figure 2. 84 : Essai de compression quasi-statique sur une feuille (M10) – Influence du poids de couche sur la contrainte

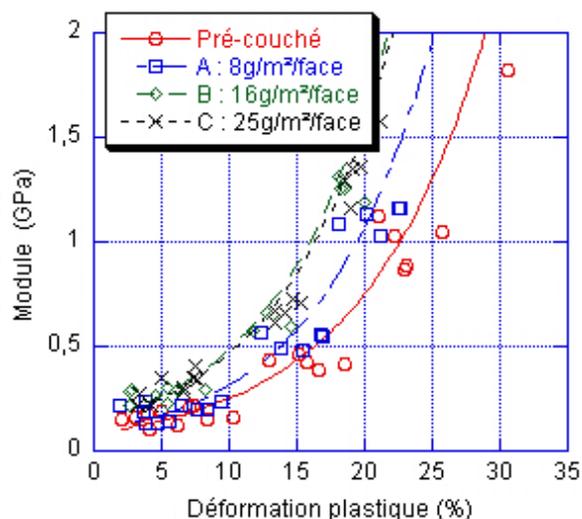


Figure 2. 85 : Essai de compression quasi-statique sur une feuille (M10) – Influence du poids de couche sur le module

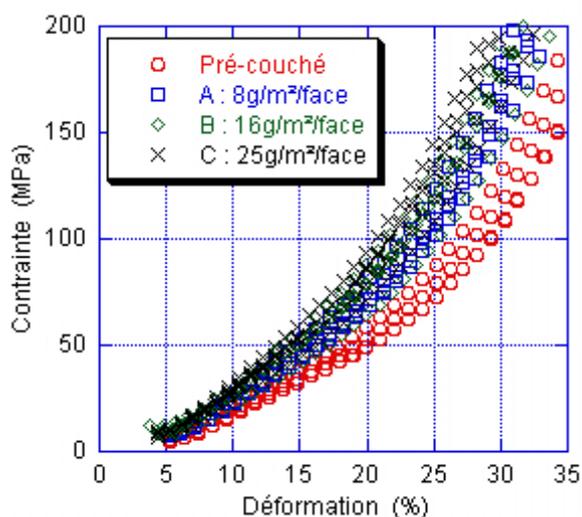


Figure 2. 86 : Essai de chute de bille sur une feuille (H1=10 cm M6 mm) – Influence du poids de couche sur la contrainte

2.5.4.3. - Influence du liant

L'influence du liant (nature du latex et quantité) sur le comportement mécanique des papiers a été étudiée sur les papiers B, D et E couchés par un système « rouleau applicateur + lame raclante » et ayant une dépose de 16 g/m²/face. Comme pour le poids de couche, les courbes contrainte / déformation en statique (Figure 2. 87) et en dynamique (Figure 2. 89) sont très proches les unes des autres pour les papiers couchés. Elles montrent également une déformation légèrement plus faible que celle du papier pré-couché pour une même contrainte. De même, la courbe de module / déformation plastique (Figure 2. 88) ne montre pas d'influence significative des deux types de latex testés ou de la différence entre 10 et 20 parts de latex.

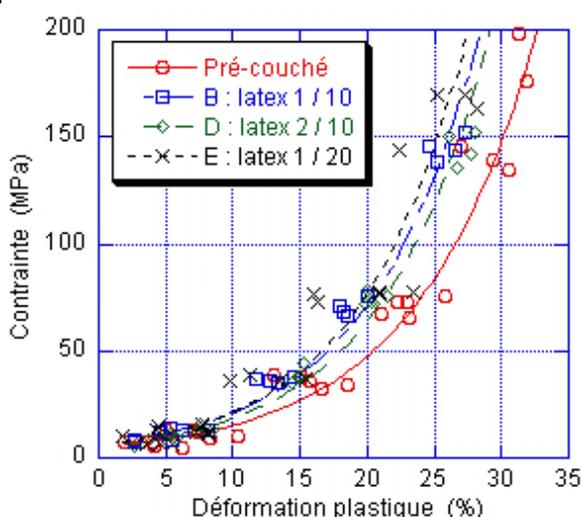


Figure 2. 87 : Essai de compression quasi-statique sur une feuille (M10) – Influence du latex (nature et quantité) sur la contrainte

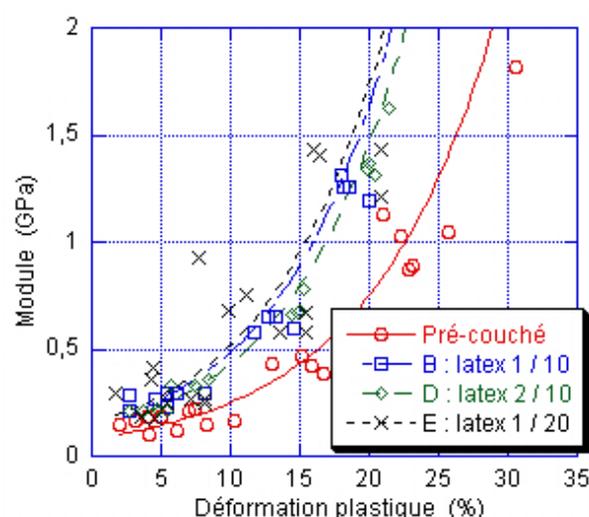


Figure 2. 88 : Essai de compression quasi-statique sur une feuille (M10) – Influence du latex (nature et quantité) sur le module

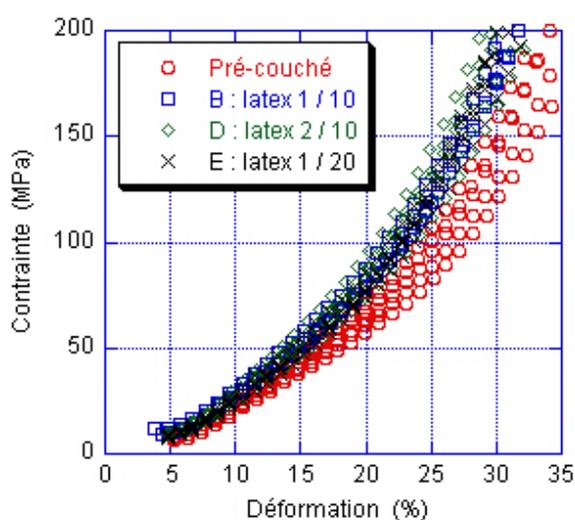


Figure 2. 89 : Essai de chute de bille sur une feuille (H1=10 cm M6 mm) – Influence du latex (nature et quantité) sur la contrainte

Les résultats obtenus sur les papiers couchés à partir des essais de laboratoire de compression peuvent être résumés par les points suivants :

- L'ensemble « papier pré-couché + couche » peut être apparenté à un matériau composite plus difficile à déformer que le papier pré-couché seul, du fait de la présence de charges minérales dans la couche ;
- Le procédé de couchage ou la concentration en pigments semblent influencer le comportement mécanique des papiers couchés ;
- Le poids de couche, de 8 à 25g/m², a assez peu d'influence sur la courbe contrainte / déformation ; par contre, celui-ci a une influence plus nette sur la courbe module / déformation ;
- La nature des latex et de nombre de parts testés (10 et 20 parts) ne semblent pas d'après les essais réalisés, influencer le comportement mécanique des papiers couchés.

Ces résultats seront recommandés et discutés dans la partie 3.4.4 portant sur le calandrage de ces mêmes papiers couchés.

2.5.5. - Influence de la vitesse de sollicitation

L'influence des différents paramètres (type de pâte, couche...) sur le comportement mécanique du papier a été présentée pour des sollicitations quasi-statiques et dynamiques. L'objectif des précédents paragraphes était de montrer l'influence d'élaboration d'un paramètre du papier quelle que soit la vitesse de sollicitation. Dans cette partie, nous allons au contraire comparer les résultats obtenus à partir des essais de compression quasi-statique et de chute de bille pour certains papiers :

- Le papier élaboré à partir d'une pâte TMP et le papier fabriqué à partir d'une pâte Kraft. Ces deux papiers ont été présentés dans le Tableau 2. 3 et étudiés dans la partie 2.5.1. -.
- Le papier pré-couché et le papier couché F. Ces deux papiers ont été présentés dans le Tableau 2. 6 et étudiés dans la partie 2.5.4. -

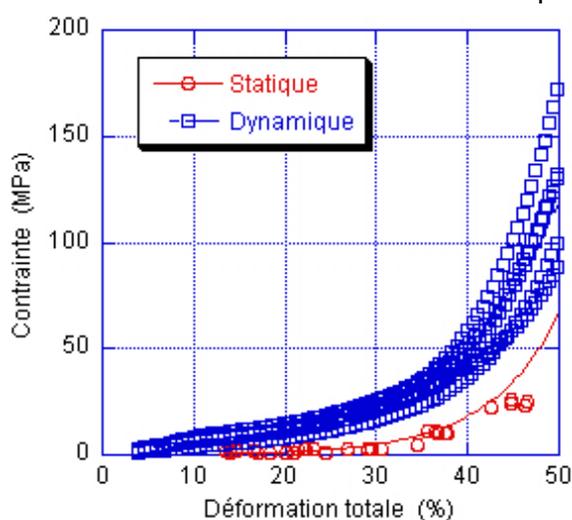


Figure 2. 90 : Contrainte en fonction de la déformation totale en compression statique et dynamique pour le papier TMP

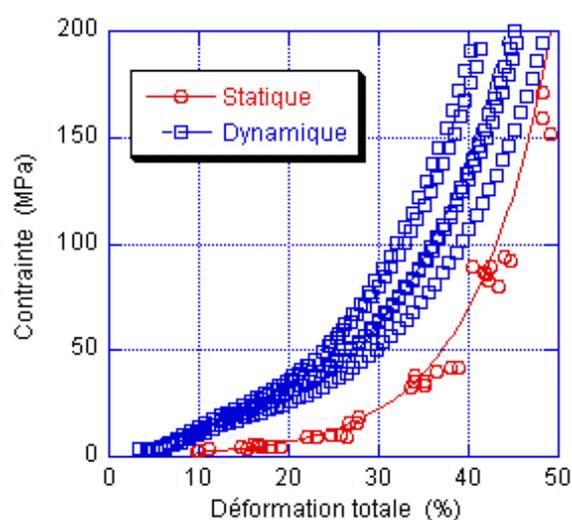


Figure 2. 91 : Contrainte en fonction de la déformation totale en compression statique et dynamique pour le papier Kraft

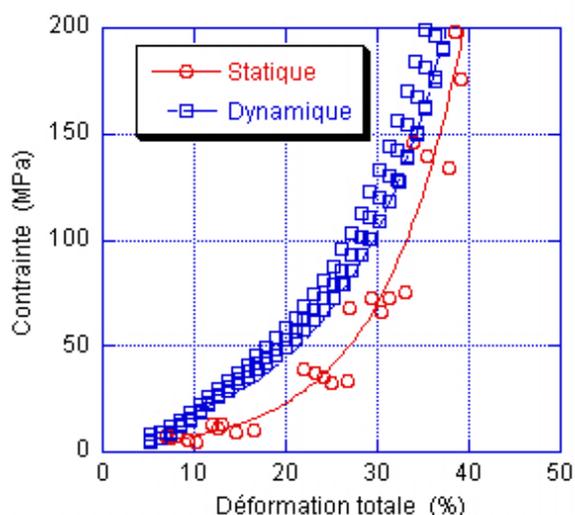


Figure 2. 92 : Contrainte en fonction de la déformation totale en compression statique et dynamique pour le papier pré-couché

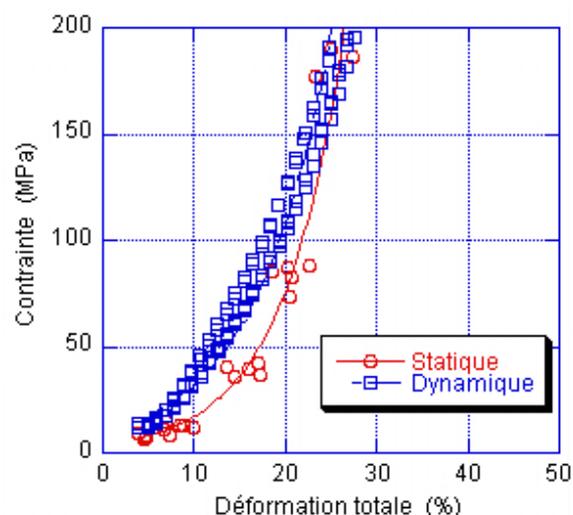


Figure 2. 93 : Contrainte en fonction de la déformation totale en compression statique et dynamique pour le papier couché F

Les courbes de contrainte / déformation totale obtenues montrent que plus la vitesse de sollicitation est grande, plus la contrainte croît rapidement avec la déformation et ce quel que soit le papier (type de pâte, couché ou non couché). Ce résultat confirme celui obtenu à partir de la ré-interprétation des essais de compression réalisés par Feygin ([Feygin, 1999]) (partie 2.1.4. -) : plus le papier est sollicité rapidement, plus il est difficile de le déformer. Par ailleurs, les données expérimentales des deux essais peuvent être approchées par des courbes de type exponentiel.

2.5.6. - Conclusions sur le comportement mécanique des papiers

Les essais de compression quasi-statique et dynamique ont été élaborés afin d'étudier le comportement mécanique du papier. Différents papiers ont été testés et nous avons mis en évidence plusieurs points :

- Le comportement mécanique du papier en sollicitation statique et dynamique, révélé par ces essais, est qualitativement analogue à celui déduit des essais de Feygin ([Feygin, 1999]) : croissance de type exponentiel de la contrainte et du module avec la déformation.
- Le type de pâte influe sur le comportement mécanique : 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. L'humidité relative des papiers fabriqués à partir d'une pâte mécanique ou chimique peut être à l'origine des différences observées ;
- La teneur en charges n'a pas montré, pour les papiers testés, d'influence sur le comportement mécanique ;
- Le couchage offre au papier une couche mince, adhérente et plus dure que le matelas fibreux. La déformation des papiers couchés apparaît alors inférieure à celle d'un papier non couché. Par ailleurs, le procédé de couchage influencerait davantage le comportement mécanique du papier que la composition ou la quantité de couche ;

- Au cours du calandrage ; les fibres cellulosiques subissent une déformation plastique importante. Le papier devient plus dense et sa courbe contrainte / déformation croit plus rapidement que celle du papier non calandré. Le comportement du papier calandré est assez similaire à celui du papier non calandré après une compression produisant une déformation plastique comparable à celle induite par le calandrage.
- La comparaison des résultats obtenus par les essais quasi-statiques et dynamiques montre qu'à forte vitesse de sollicitation, le papier est plus difficile à déformer qu'à faible vitesse.

Certains de ces points seront re-discutés dans le chapitre 3 portant sur les essais de calandrage et dans le chapitre 5 de synthèse.

Chapitre 3 : 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.

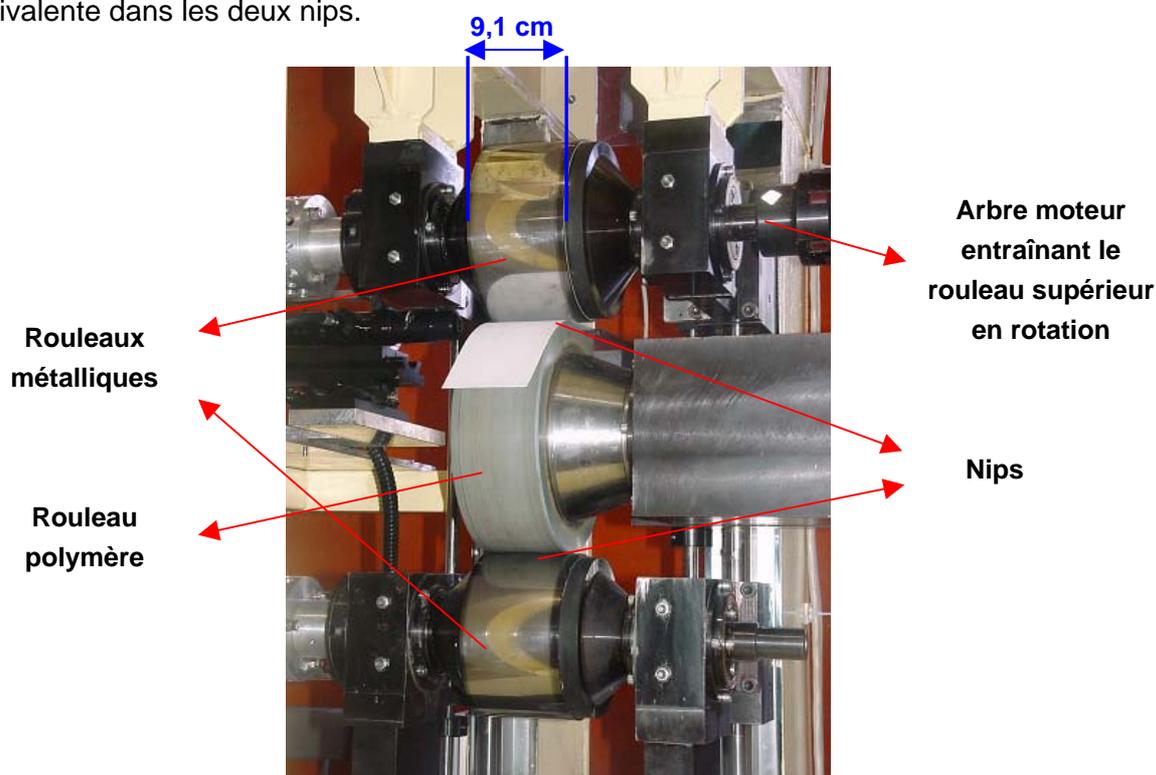


Figure 3. 2 : Vue des trois rouleaux de la calandre pilote formant deux « soft » nips en mode feuille à feuille

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.

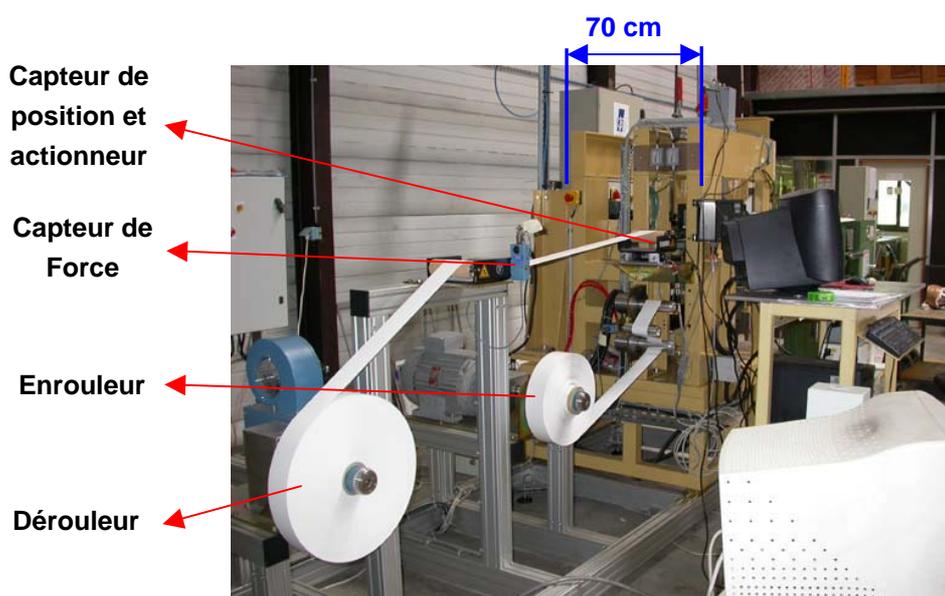


Figure 3. 4 : Vue générale du défilement de la bande de papier en mode bobine

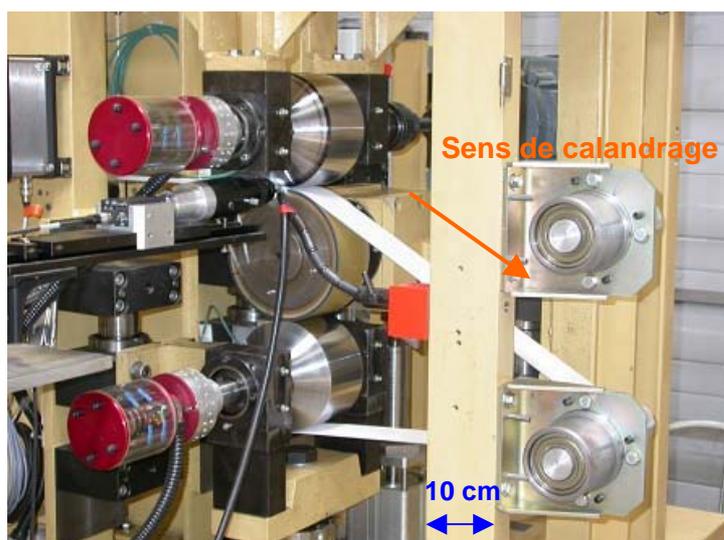


Figure 3. 5 : Vue générale des rouleaux en mode bobine et le passage d'une bande de papier dans un nip

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).

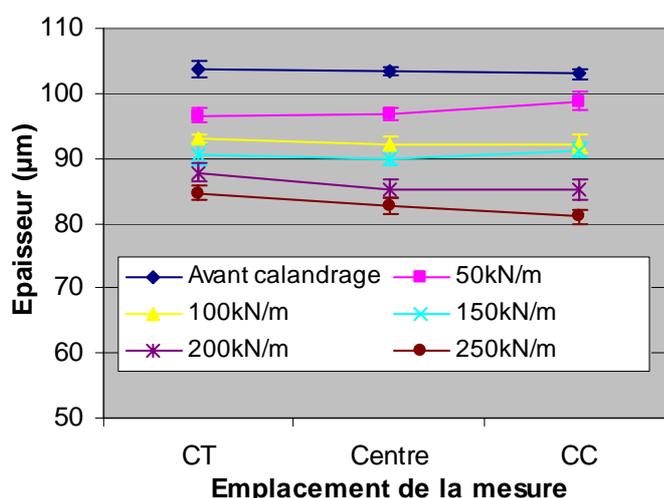


Figure 3. 6 : Mesure de l'épaisseur du papier pré-couché (cf Tableau 2.6), calandré à différentes forces linéiques – Micromètre sur toute la laize – Température du rouleau métallique : 100°C – Vitesse de rotation : 400 tr/min – Rouleau polymère de dureté 91ShD – CT : Coté Transmission ; CC : Coté Conducteur

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%.

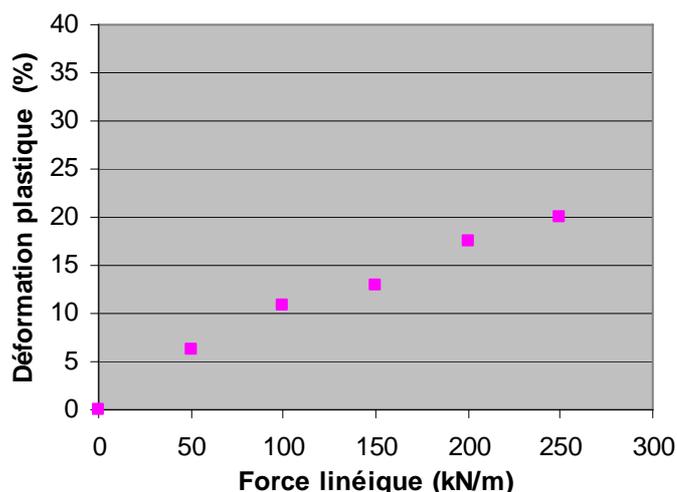


Figure 3. 7 : Déformation plastique du papier pré-couché (cf Tableau 2.6) en fonction de la force linéique à partir du micromètre – Condition de calandrage : cf Figure 3. 6

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.

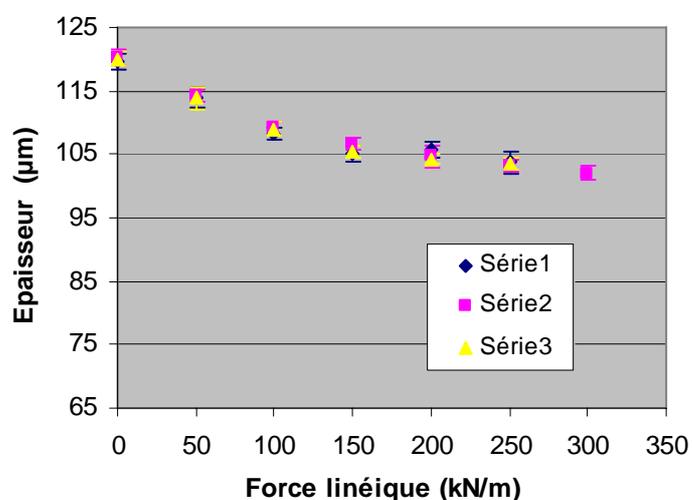


Figure 3. 8 : Reproductibilité des mesures d'épaisseur du papier F (cf Tableau 2.6) calandré à différentes forces linéiques – Micromètre – 3 séries – Température du rouleau métallique : 100°C – Vitesse de rotation : 400 tr/min

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.

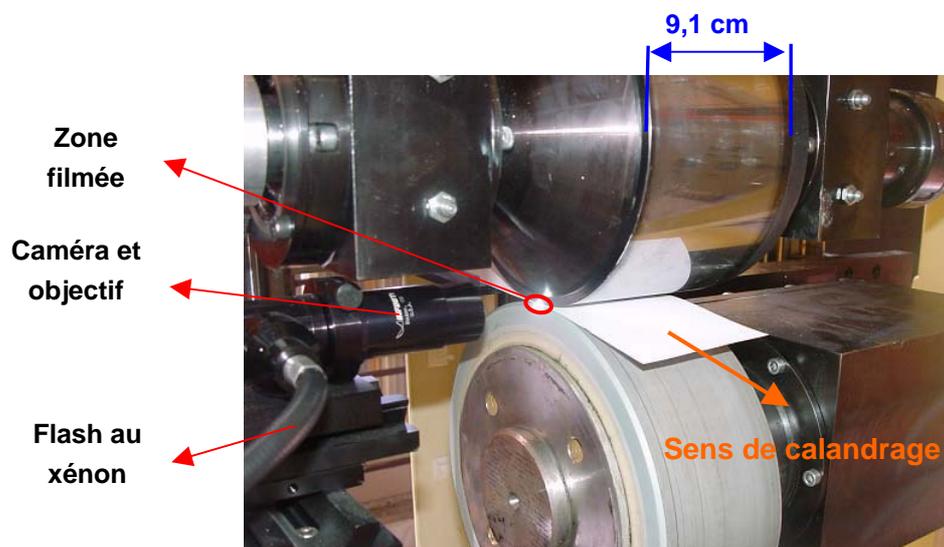


Figure 3. 9 : Système optique permettant de mesurer l'épaisseur du papier dans le nip

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).

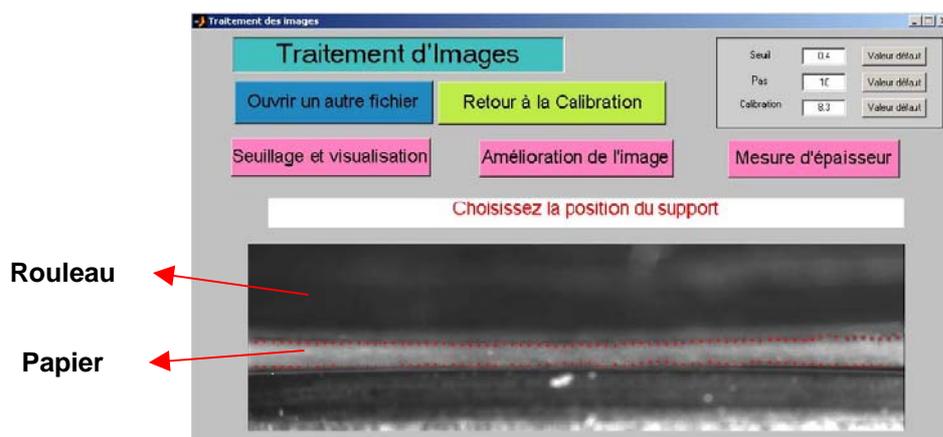


Figure 3. 10 : Interface du programme développé sous Matlab pour analyser les images et les épaisseurs de papier dans le nip

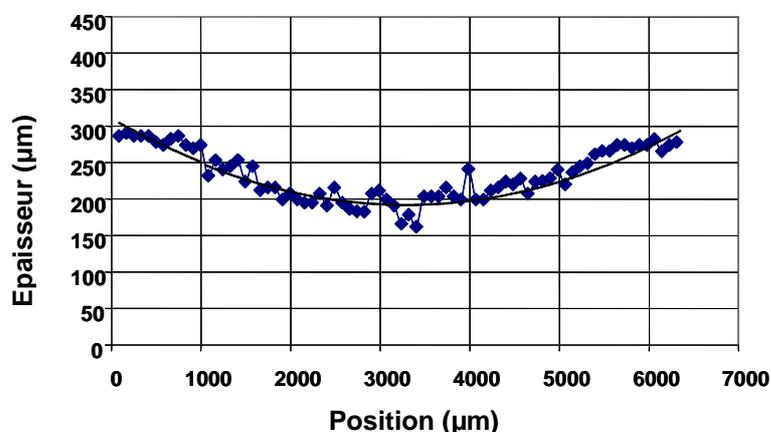


Figure 3. 11 : Profil d'épaisseur du papier au niveau du nip en mode feuille à feuille (Papier d'épaisseur initiale 300µm)

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.

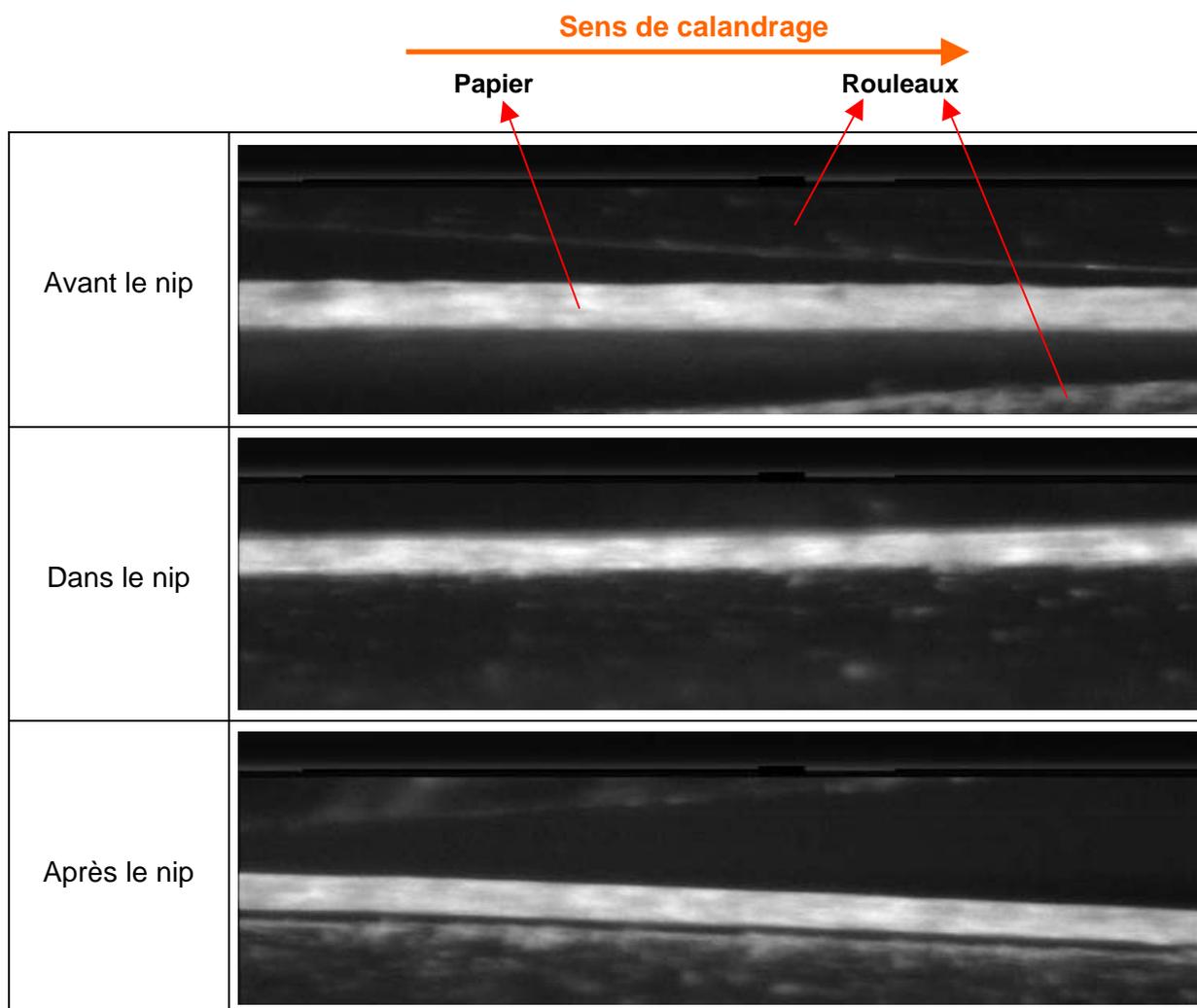


Figure 3. 12 : Images obtenues par le système optique lors du calandrage du papier pré-couché (cf Tableau 2.6) en mode bobine à 400 tr/min – Dimension : 2,6 x 0,6 mm

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.

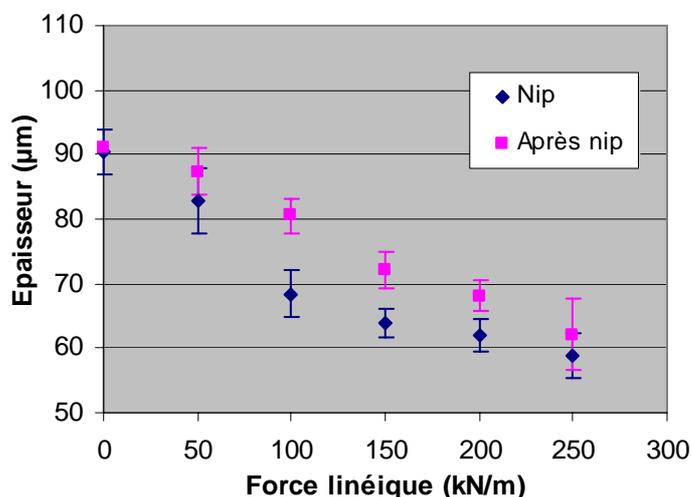


Figure 3. 13 : Mesure de l'épaisseur du papier pré-couché (cf Tableau 2.6), calandré à différentes forces linéiques – Système optique – Température du rouleau métallique : 100°C – Vitesse de rotation : 400 tr/min

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%.

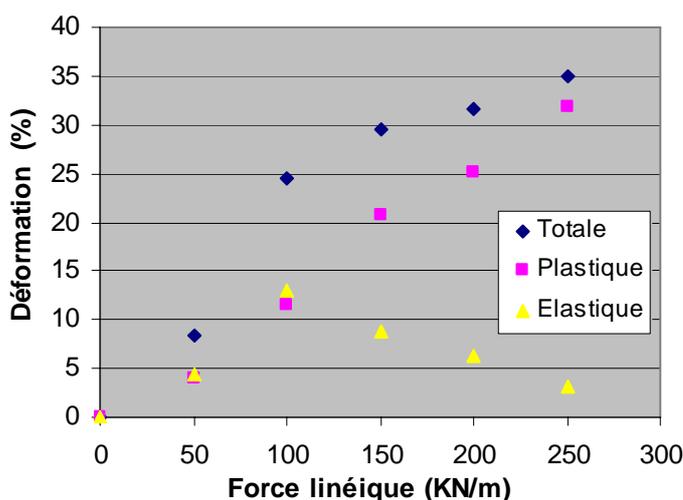


Figure 3. 14 : Evaluation de la déformation du papier pré-couché (cf Tableau 2.6) avec la force linéique – Système optique – Conditions de calandrage : cf Figure 3. 13

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.

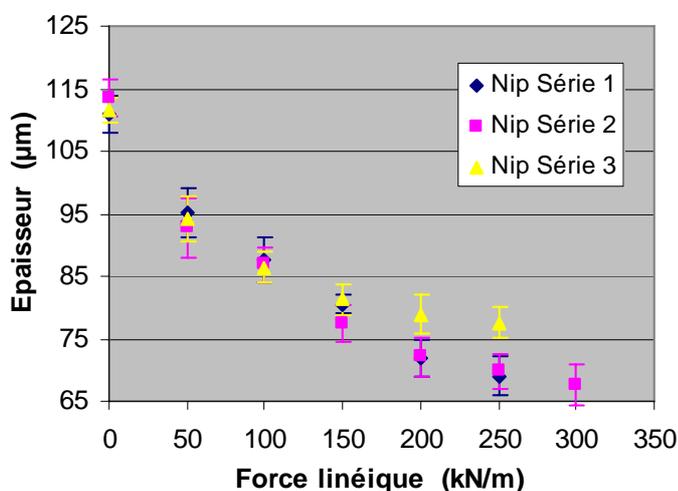


Figure 3. 15 : Reproductibilité des mesures d'épaisseur dans le nip du papier F (cf Tableau 2.6) calandré à différentes forces linéiques – Système optique – 3 séries – Température du rouleau métallique : 100°C – Vitesse de rotation : 400 tr/min

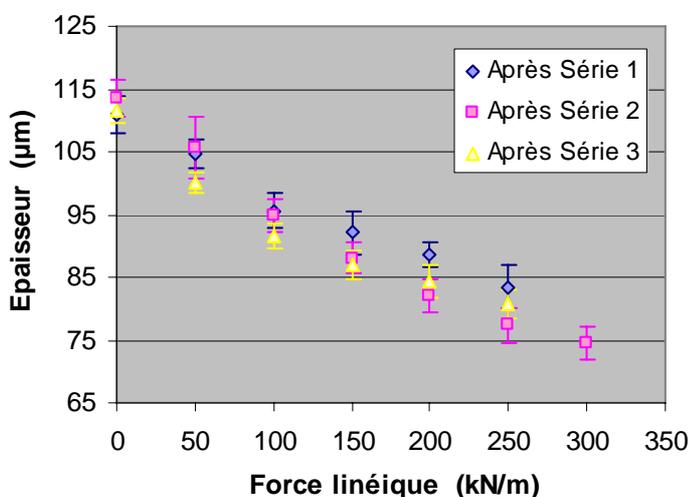


Figure 3. 16 : Reproductibilité des mesures d'épaisseur après le nip du papier F (cf Tableau 2.6) calandré à différentes forces linéiques – Système optique – 3 séries – Conditions de calandrage : cf Figure 3. 15

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.

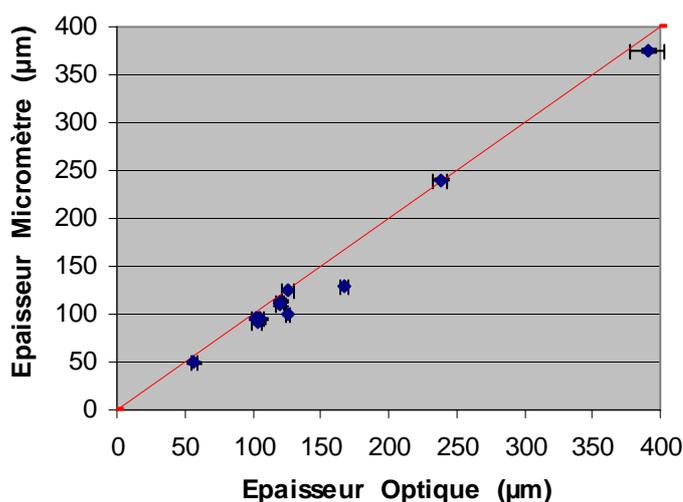


Figure 3. 17 : Comparaison des épaisseurs de différents papiers non calandrés obtenues par les deux méthodes

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 ([Crotofino, 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.

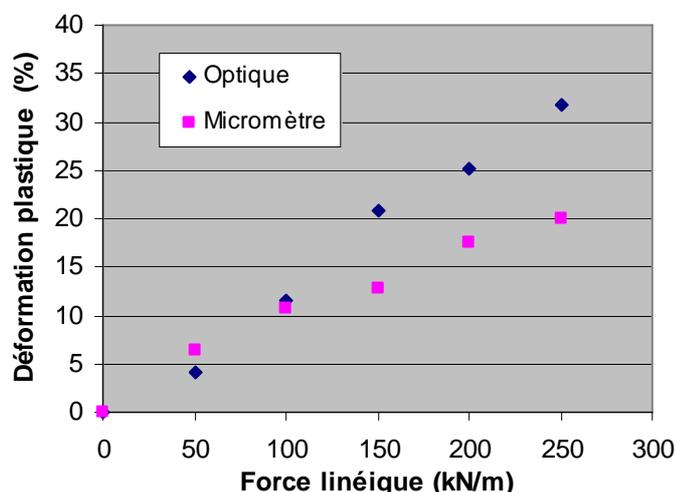


Figure 3. 18 : Comparaison des déformations plastiques obtenues par les deux méthodes de mesure d'épaisseur sur le papier pré-couché (cf Tableau 2.6)

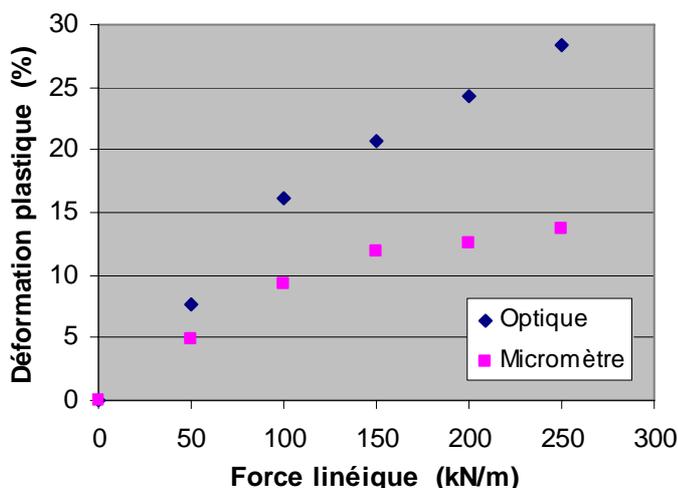


Figure 3. 19 : Comparaison des déformations plastiques obtenues par les deux méthodes de mesure d'épaisseur sur le papier F (cf Tableau 2.6)

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).

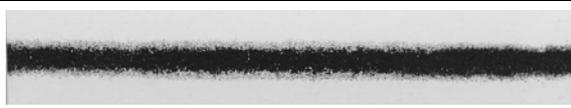
Force linéique (kN/m)	Empreinte carbone en statique	Largeur de nip (mm)
50		3,2
100		3,4
150		4,1
200		4,4
250		4,7
300		4,8

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.

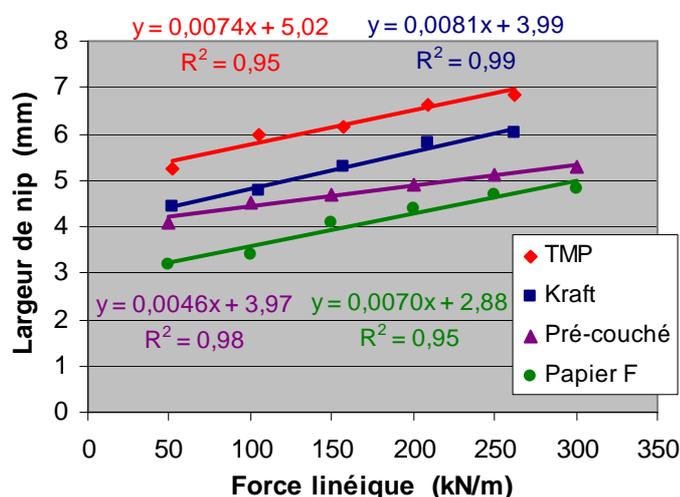


Figure 3. 20 : Largeur de nip mesurée en statique en fonction de la force linéique pour différents papiers (cf Tableau 2.3 et Tableau 2.6) – Soft nip

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

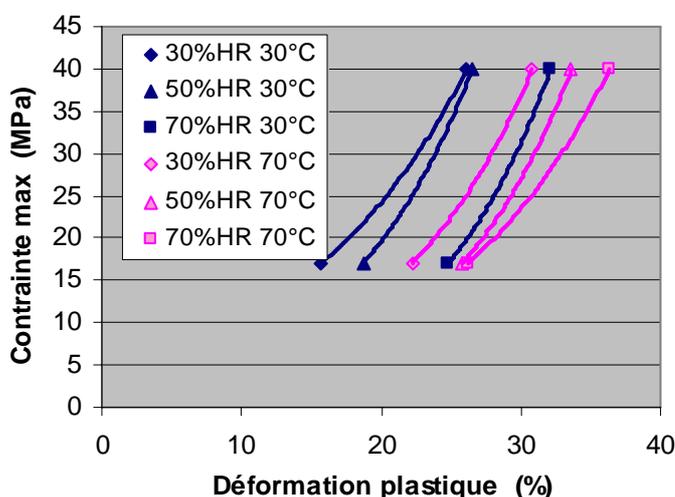


Figure 3. 21 : Influence du conditionnement et du préchauffage du papier TMP (cf Tableau 2.3) sur le comportement mécanique – Température rouleau : 100°C

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.

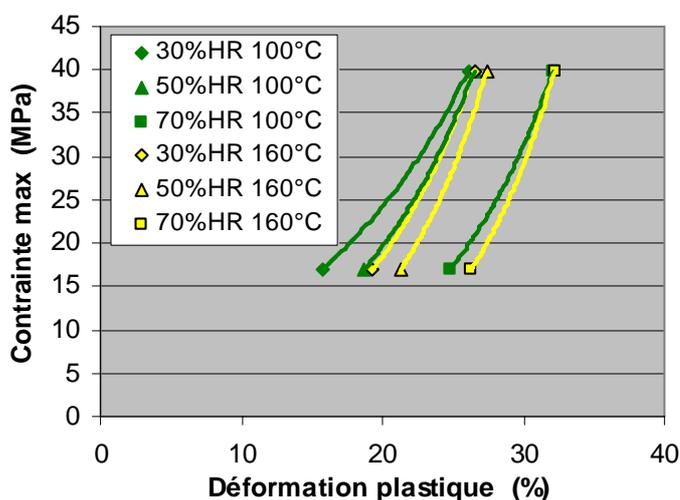


Figure 3. 22 : Influence de la température du rouleau métallique sur le comportement mécanique du papier TMP (cf Tableau 2.3) à une température de feuille de 30°C et pour différentes humidités

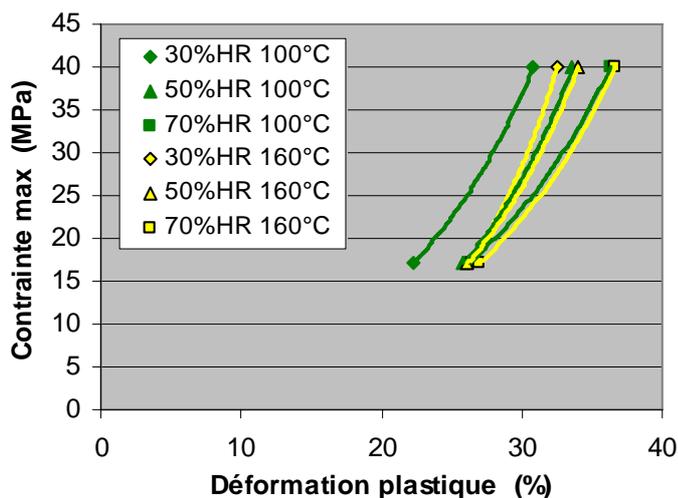


Figure 3.23 : Influence de la température du rouleau métallique sur le comportement mécanique du papier TMP (cf Tableau 2.3) à une température de feuille de 70°C et pour différentes humidités

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).

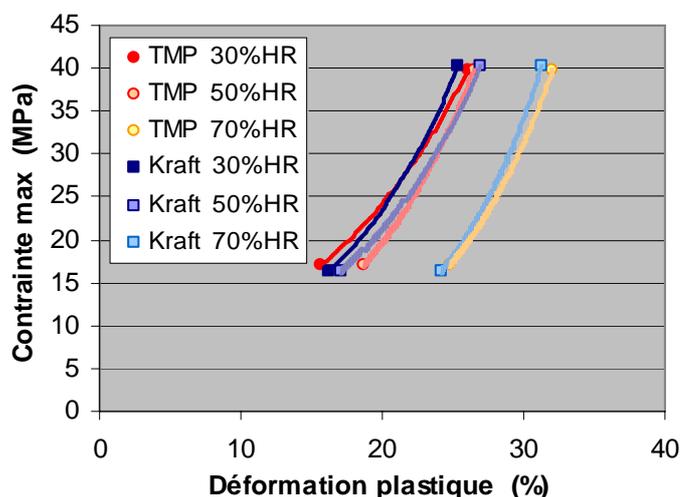


Figure 3. 24 : Influence de la nature de la pâte sur le comportement mécanique du papier (TMP et Kraft cf Tableau 2.3) à une température de feuille de 30°C et pour différentes humidités – Température du rouleau métallique 100°C

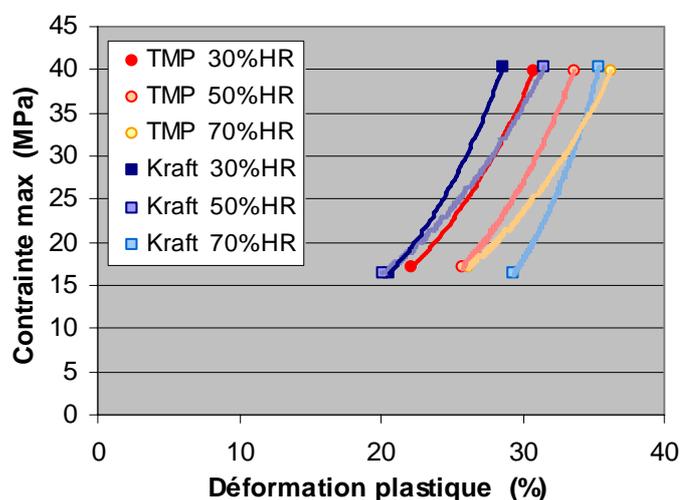


Figure 3. 25 : Influence de la nature de la pâte sur le comportement mécanique du papier (TMP et Kraft cf Tableau 2.3) à une température de feuille de 70°C et pour différentes humidités – Température du rouleau métallique 100°C

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

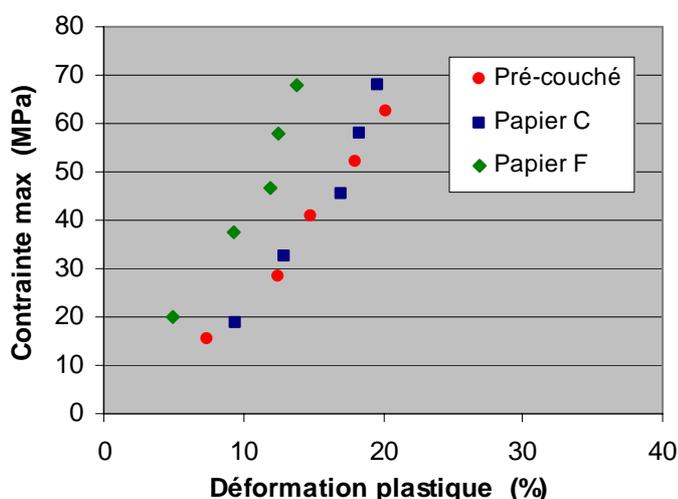


Figure 3. 26 : Influence de la couche et du procédé de couchage sur le comportement mécanique du papier (cf Tableau 2.6) – Epaisseur mesurée par le micromètre

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.

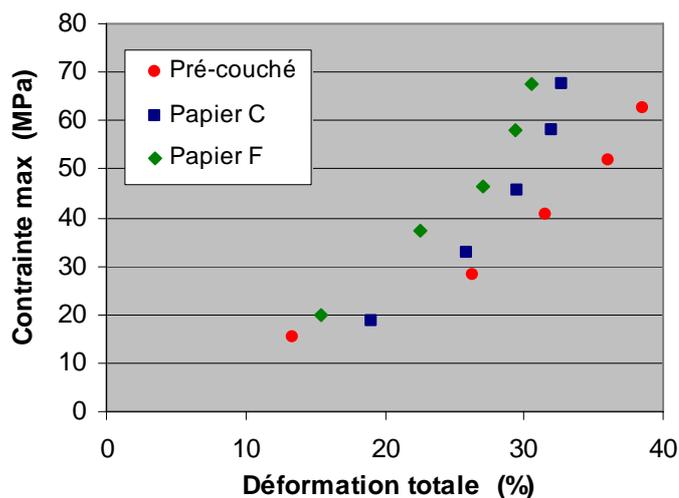


Figure 3. 27 : Influence de la couche et du procédé de couchage sur le comportement mécanique du papier (cf Tableau 2.6) – Epaisseur dans le nip mesurée par le système optique

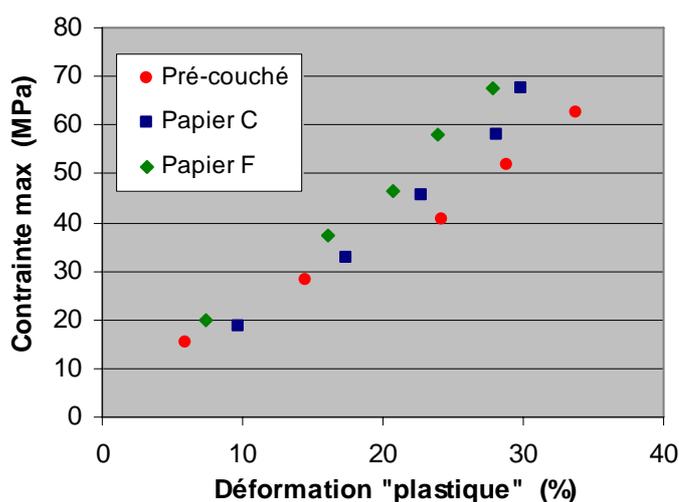


Figure 3. 28 : Influence de la couche et du procédé de couchage sur le comportement mécanique du papier (cf Tableau 2.6) – Epaisseur après le nip mesurée par le système optique

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).

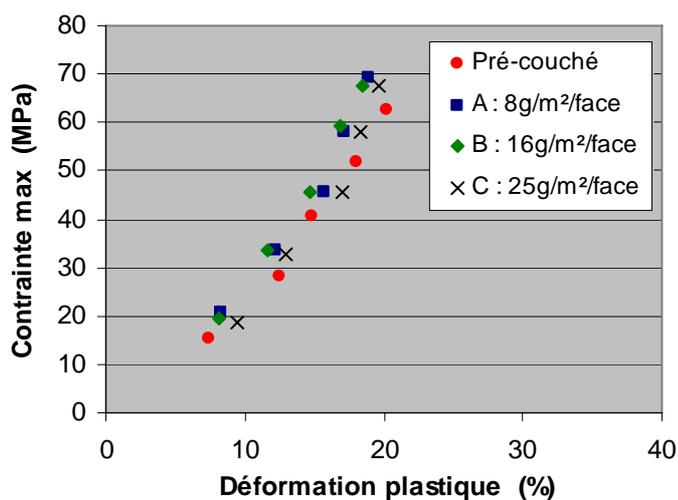


Figure 3. 29 : Influence du poids de couche sur le comportement mécanique du papier (cf Tableau 2.6) – Epaisseur mesurée par le micromètre

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.

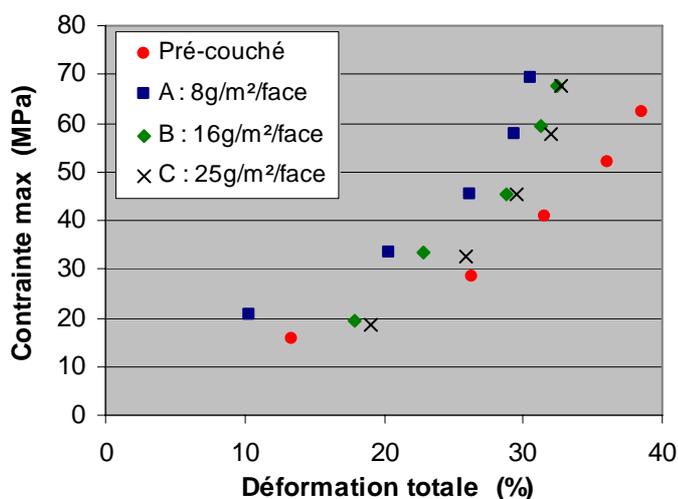


Figure 3. 30 : Influence du poids de couche sur le comportement mécanique du papier (cf Tableau 2.6) – Epaisseur dans le nip mesurée par le système optique

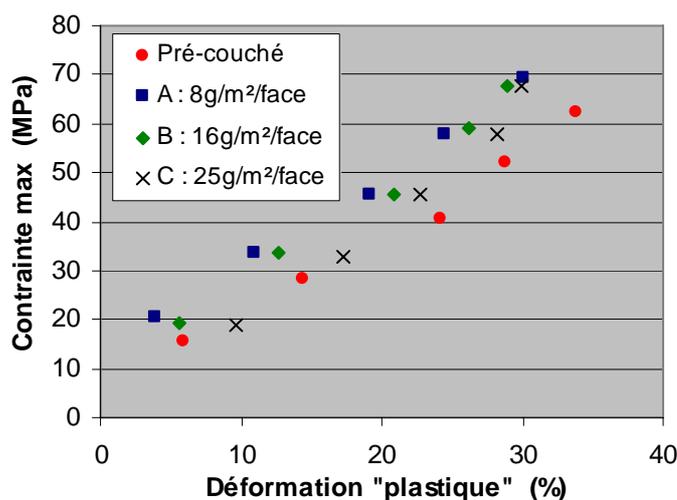


Figure 3. 31 : Influence du poids de couche sur le comportement mécanique du papier (cf Tableau 2.6) – Epaisseur après le nip mesurée par le système optique

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.

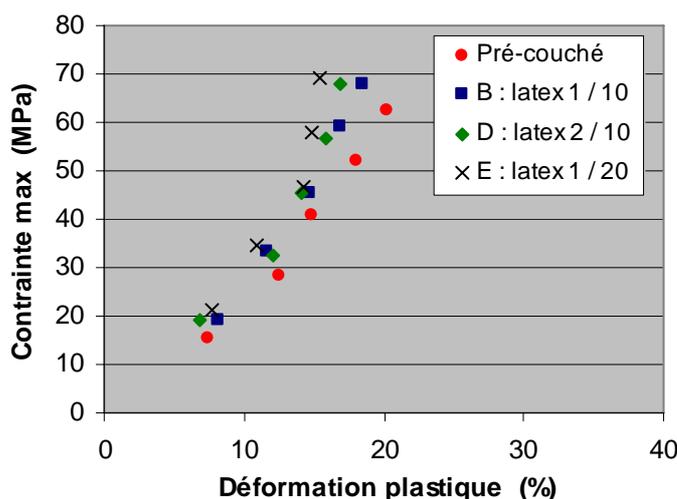


Figure 3. 32 : Influence du liant (nature et quantité) sur le comportement mécanique du papier (cf Tableau 2.6) – Epaisseur mesurée par le micromètre

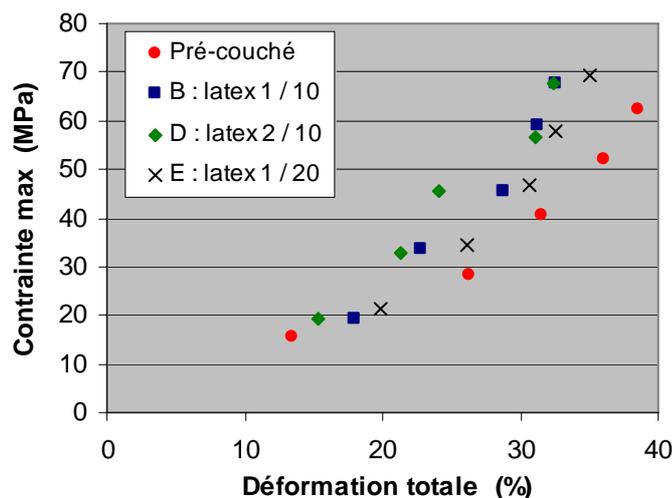


Figure 3. 33 : Influence du liant (nature et quantité) sur le comportement mécanique du papier (cf Tableau 2.6) – Epaisseur dans le nip mesurée par le système optique

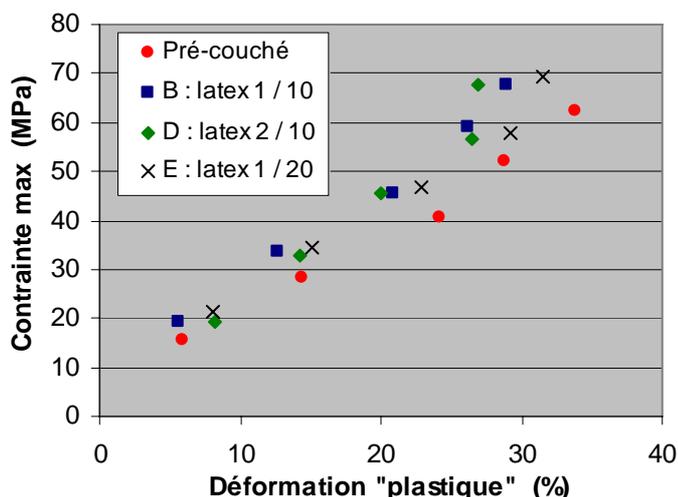


Figure 3. 34 : Influence du liant (nature et quantité) sur le comportement mécanique du papier (cf Tableau 2.6) – Epaisseur après le nip mesurée par le système optique

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

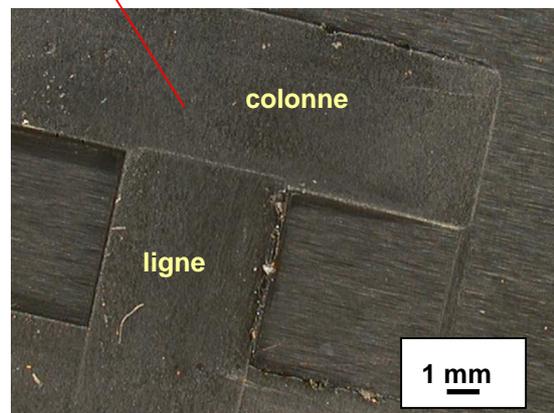
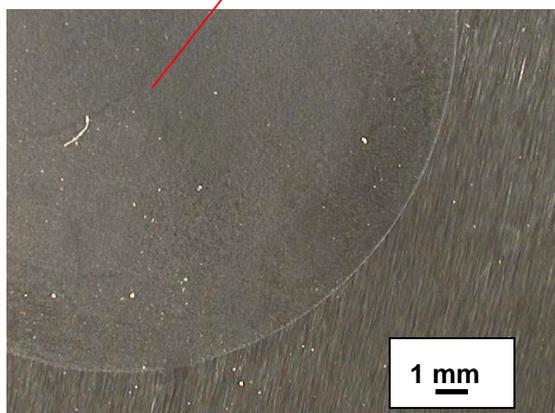


Figure 3. 35 : Observation au microscope d’empreinte silicone d’un disque

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.

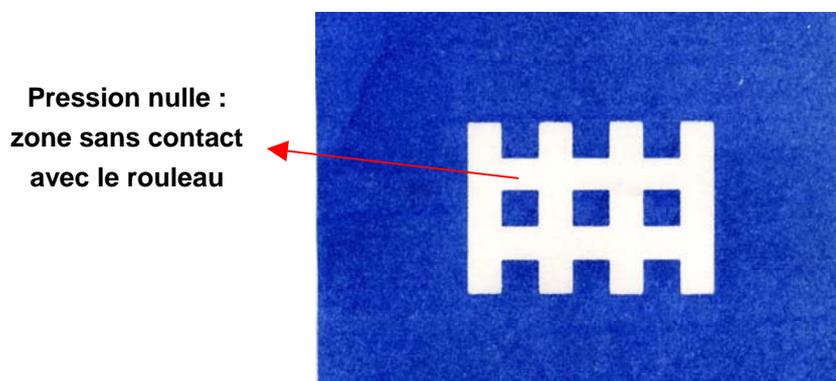


Figure 3. 37 : Empreinte carbone du quadrillage (profondeur 1mm) sur le papier F calandré à une force linéique de 250 kN/m et une vitesse de 200 tr/min – Dimension totale : 75 x 55 mm

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.

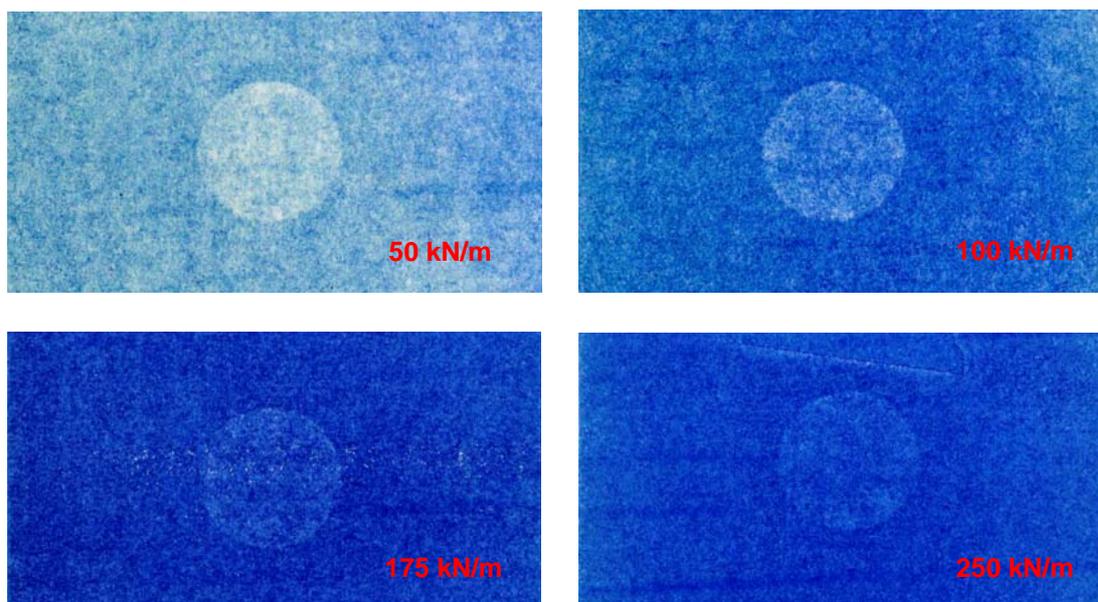


Figure 3. 38 : Empreintes carbonées du disque de profondeur $27\ \mu\text{m}$ sur le papier F calandré à différentes forces linéiques et une vitesse de $200\ \text{tr}/\text{min}$ (à froid) – Dimension totale : $75 \times 40\ \text{mm}$

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.

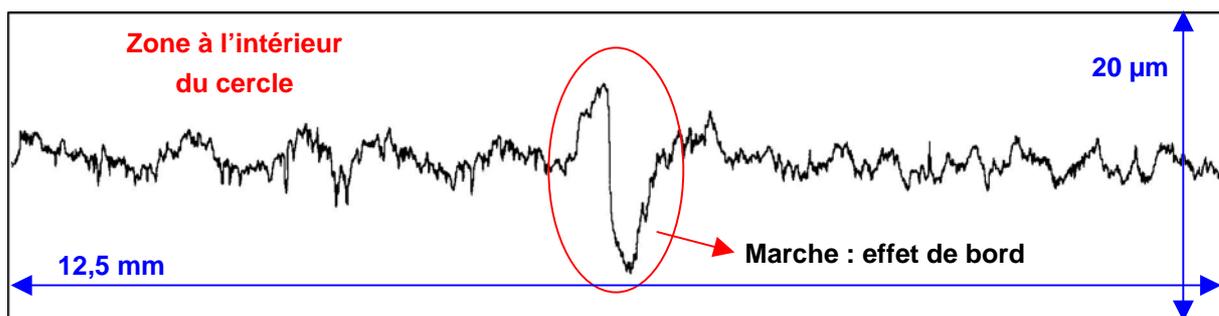


Figure 3. 39 : Profil de rugosité sur le papier F dans la zone du disque de profondeur $27\ \mu\text{m}$ (Perthometer) – Température du rouleau métallique : 100°C – Force linéique : $100\ \text{kN/m}$ – Vitesse de calandrage : $200\ \text{tr/min}$



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.

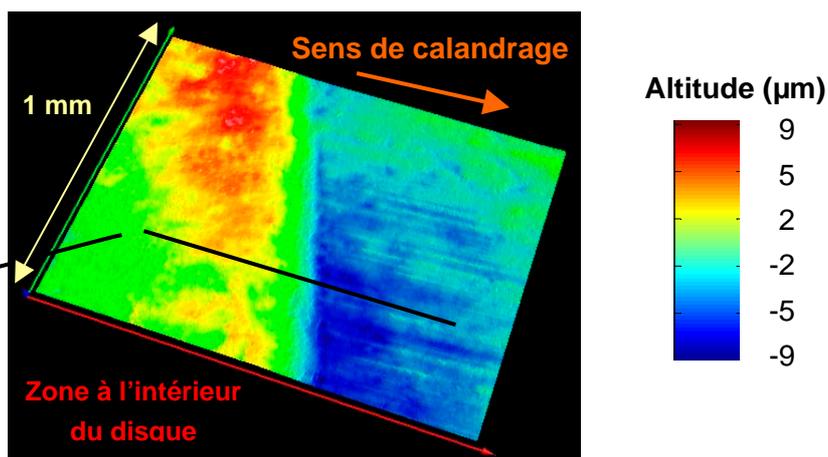


Figure 3. 41 : Topographie du papier F dans la zone du disque de profondeur $27 \mu\text{m}$ – Vue 3D (Topo3D) – Dimension de la zone analysée : $1,4 \times 1 \text{ mm}$ – Température du rouleau métallique : 100°C – Force linéique : 100 kN/m – Vitesse de calendrage : 200 tr/min

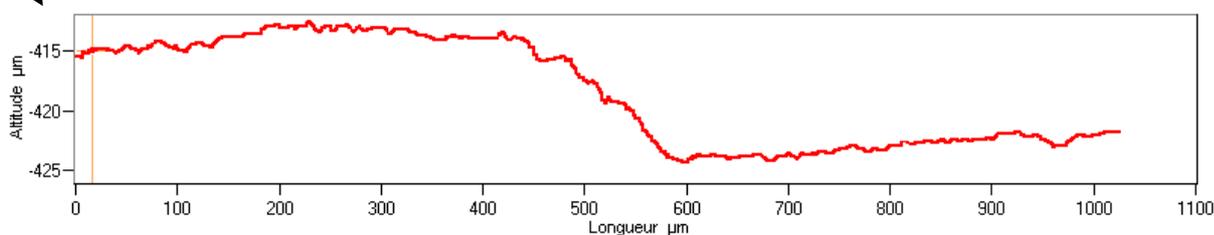


Figure 3. 42 : Profil du papier F de part et d'autre de la zone du disque – Figure 3. 41

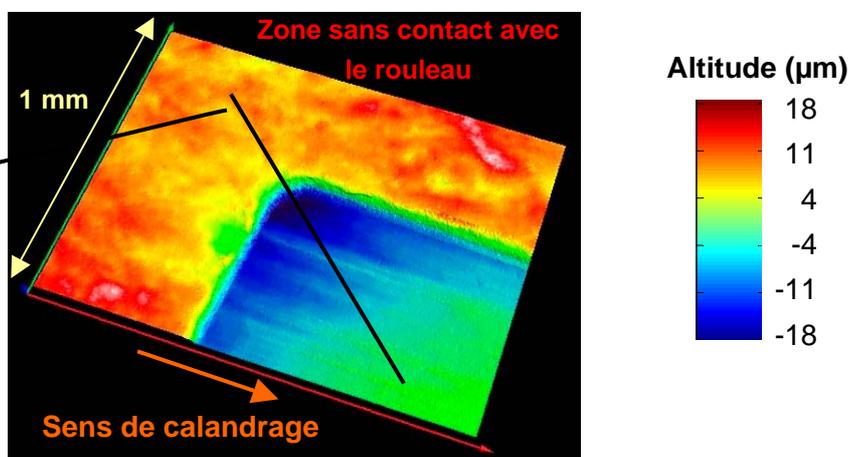


Figure 3. 43 : Topographie du papier F dans la zone du quadrillage - Vue 3D (Topo3D) – Dimension de la zone analysée : $1,4 \times 1 \text{ mm}$ – Conditions de calendrage : Figure 3. 41

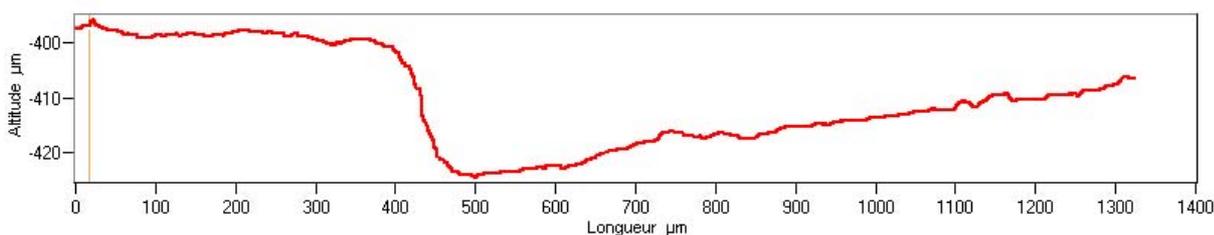


Figure 3. 44 : Profil du papier F sur la zone du quadrillage – Figure 3. 43

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.

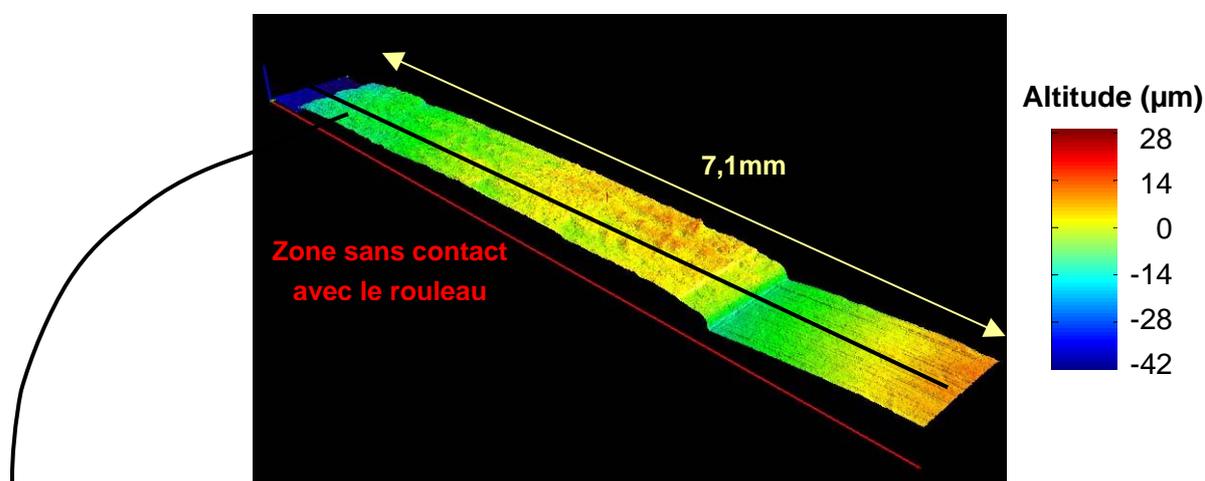


Figure 3. 45 : Topographie du papier F dans la zone du quadrillage (zone sans contact avec le rouleau) - Vue 3D (Multi acquisition au Topo3D) – Dimension : 7,1 x 0,8 mm

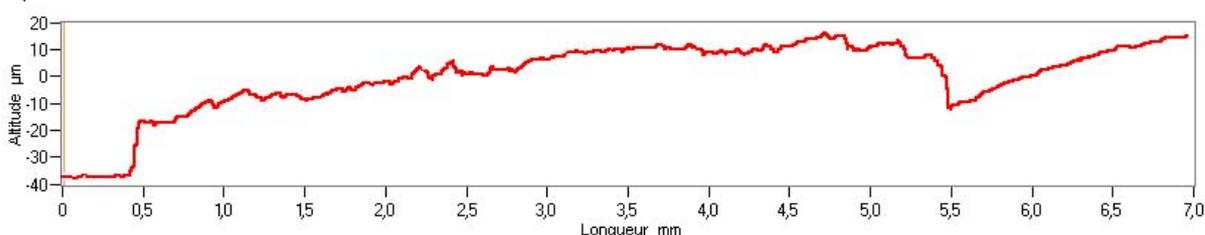


Figure 3. 46 : Profil du papier F sur la zone du quadrillage en contact sans le rouleau

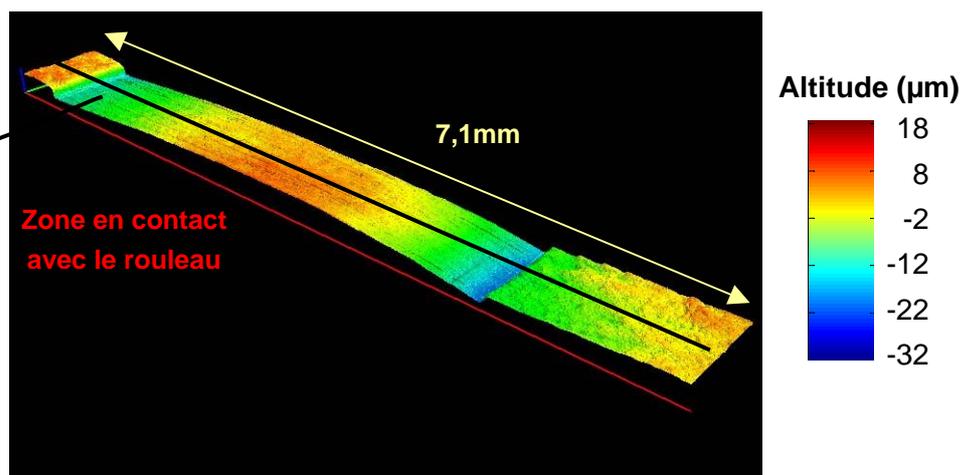


Figure 3. 47 : Topographie du papier F dans la zone du quadrillage (zone en contact avec le rouleau) - Vue 3D (Multi acquisition au Topo3D) – Dimension : 7,1 x 0,8 mm

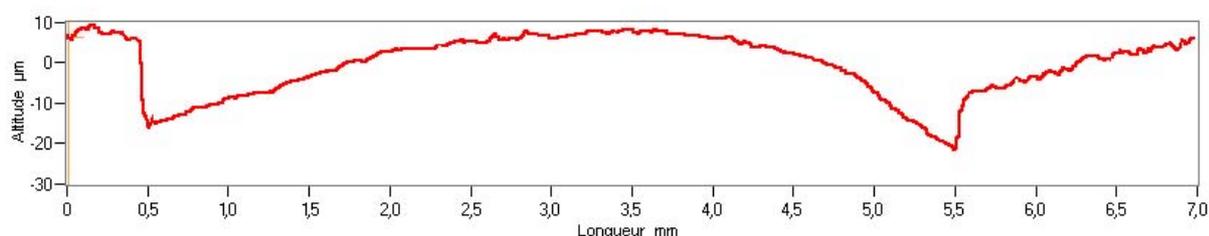


Figure 3. 48 : Profil du papier F sur la zone du quadrillage en contact avec le rouleau

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.

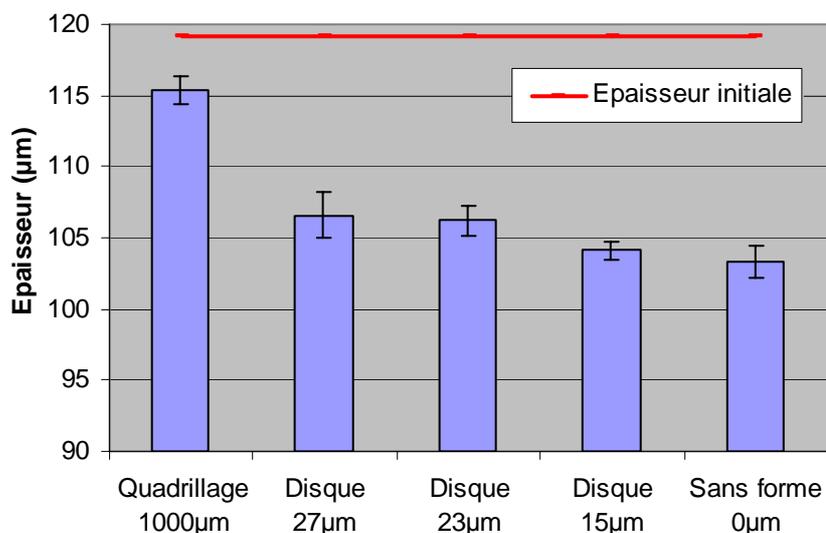


Figure 3. 49 : Mesure d'épaisseur au micromètre dans les 5 zones du papier F – Calandrage réalisé à une vitesse de 200 tr/min, une charge linéique de 100 kN/m et une température du rouleau de 100°C

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.

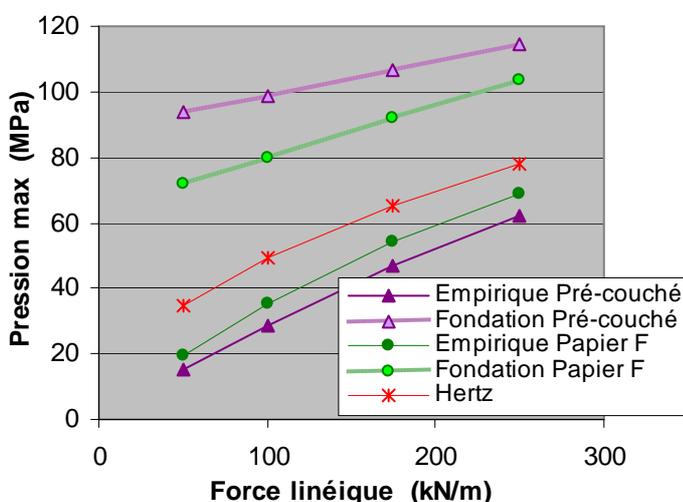


Figure 3. 50 : Pression maximale au centre du nip en fonction de la force linéique obtenue par différents calculs pour le papier pré-couché et le papier F – Essai sur la calandre pilote

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 :

$$E_m = \frac{R_{eq} P_{max}}{l_{nip}} \tag{Equation 3. 7}$$

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 :

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

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.

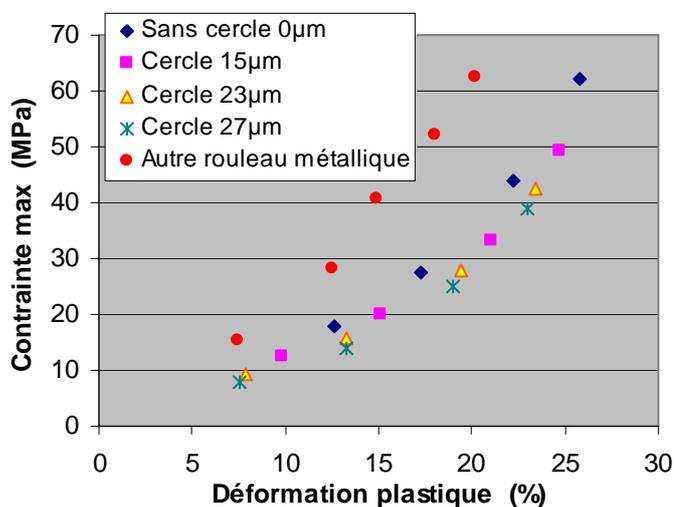


Figure 3. 51 : Application de la méthode basée sur le modèle de fondation pour déterminer la courbe contrainte / déformation du papier pré-couché – Vitesse de calandrage : 200 tr/min – Température du rouleau métallique : 100°C – Autre rouleau métallique : données

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.

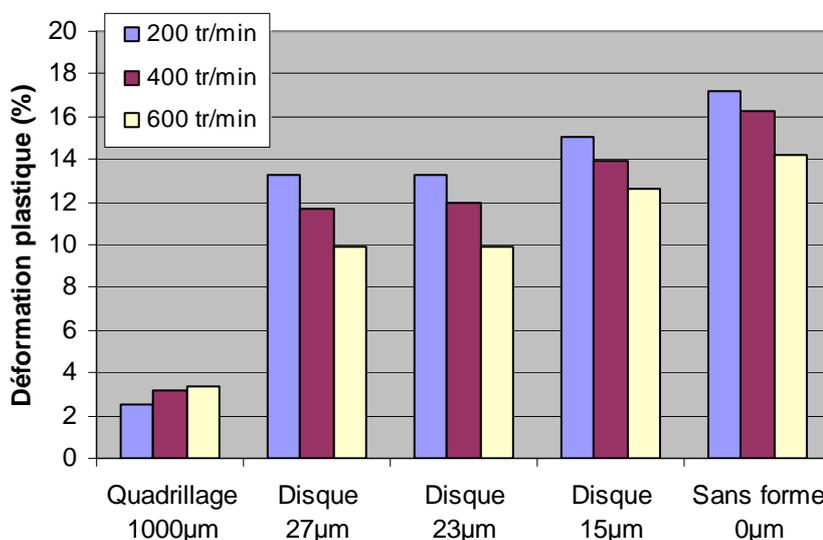


Figure 3. 52 : Influence de la vitesse de calandrage sur le déformation du papier pré-couché dans les 5 zones – Température du rouleau métallique : 100°C – Force linéique : 100 kN/m

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.

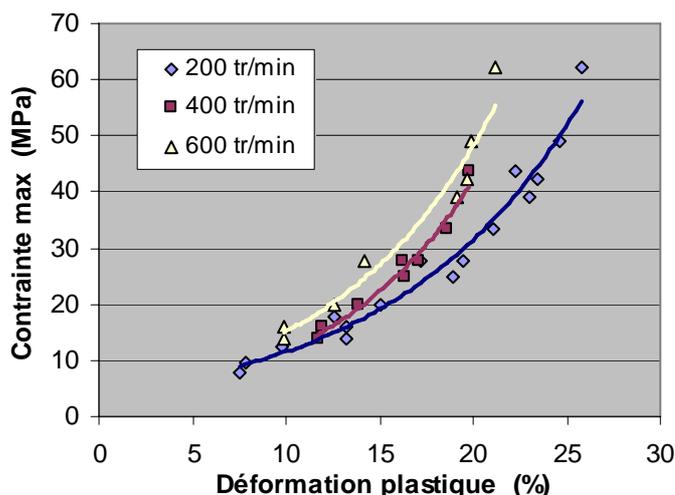


Figure 3. 53 : Courbes de contrainte / déformation pour trois vitesses de calandrage pour le papier pré-couché déduite des essais avec le rouleau métallique gravé de disques –
Température du rouleau : 100°C

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).

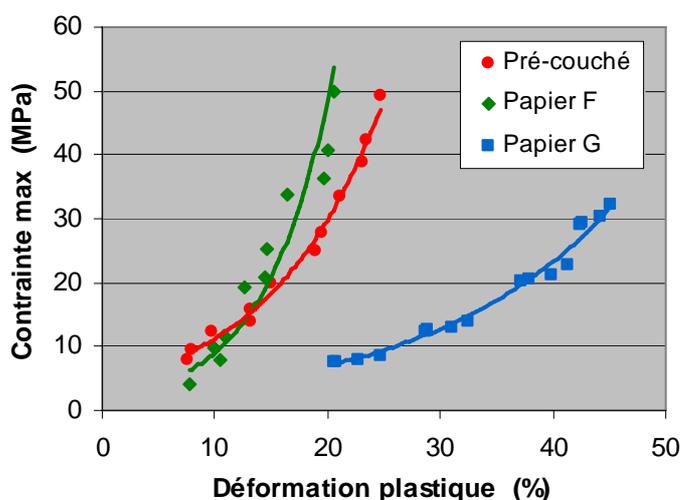


Figure 3. 54 : Courbes de contrainte / déformation pour les différents papiers – Température du rouleau : 100°C – Vitesse de calandrage : 200 tr/min

3.5.4. - Conclusion

Les essais avec le rouleau ayant les formes géométriques ont permis de mettre en évidence le transfert des écarts de forme sur le papier. Nous avons pu constater qu'il n'y avait pas de glissement du papier dans le nip car la forme est parfaitement reproduite sur le papier. Par ailleurs, une analyse mécanique basée sur le modèle de fondation a été proposée pour estimer les pressions de contact sur les disques correspondantes et ainsi compléter les courbes contrainte / déformation. Les résultats permettent de conforter ceux déjà obtenus à partir des essais de laboratoire ou de calandrage (influence de la vitesse de sollicitation et de la compressibilité du papier).

Chapitre 4 : Etude du contact rouleau – papier lors du calandrage

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

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

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

4.1. - Etude de l'adhésion rouleau – papier

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

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

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

4.1.1. - Essai de roulement sur le plan incliné

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

4.1.1.1. - Description et Principe

Principe

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

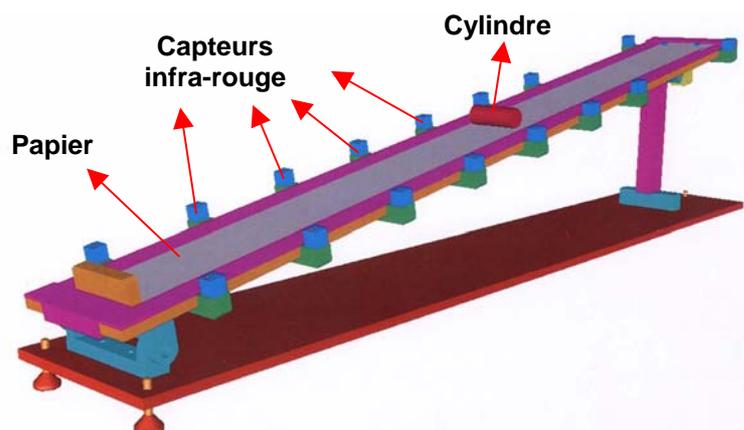


Figure 4. 1 : Schéma de l'essai de roulement sur le plan incliné

Bibliographie

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

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

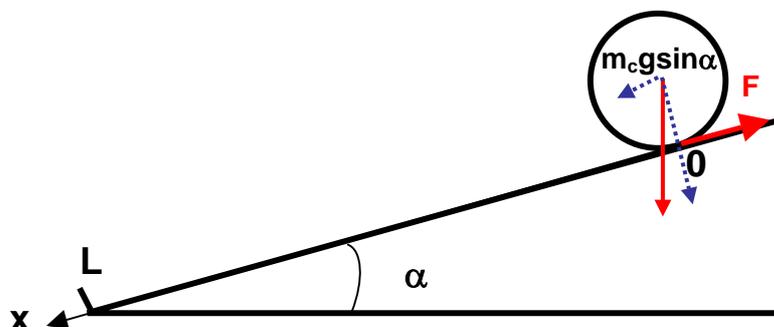


Figure 4. 2 : Bilan des forces sur l'essai de roulement sur le plan incliné

Interprétation mécanique de l'essai

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

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

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

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

Conditions expérimentales

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

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

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

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

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

Papiers testés

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

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

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

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

4.1.1.2. - Analyse de l'essai

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

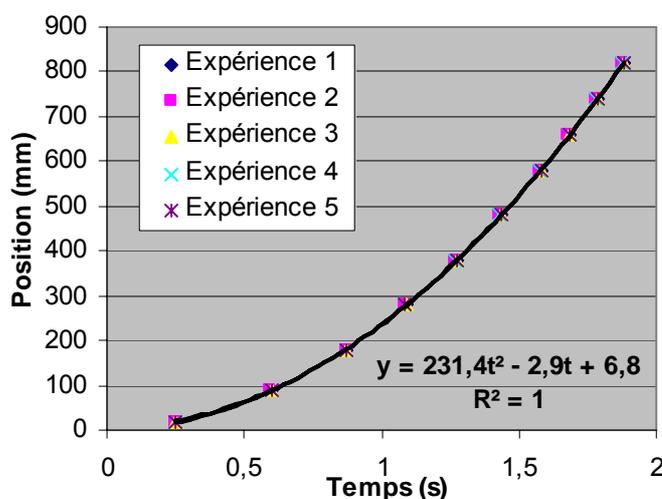


Figure 4. 3 : Trajectoire du cylindre dans l'essai de roulement – Papier support H (Tableau 4. 2) – Cylindre 2 (Tableau 4. 1) – angle $\alpha = 4,4^\circ$

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

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

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

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

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

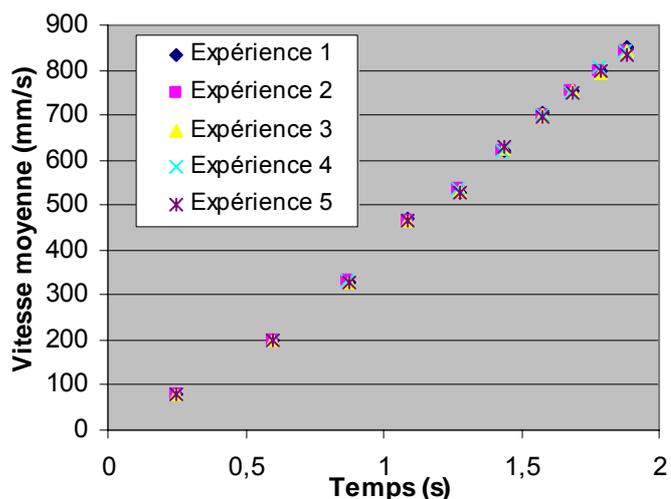


Figure 4. 4 : Courbes de la vitesse moyenne du cylindre 2 (Tableau 4. 1) en fonction du temps – Papier support H (Tableau 4. 2) – angle $\alpha = 4,4^\circ$

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

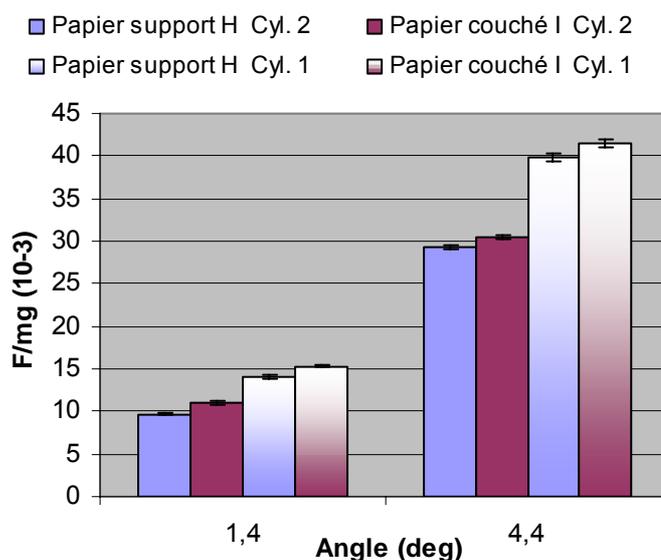


Figure 4. 5 : Coefficients de frottement pour le papier support H et le papier couché I (Tableau 4. 2) – Cylindre 1 et 2 (Tableau 4. 1) – Angle $\alpha : 1,4^\circ$ et $4,4^\circ$ – Température : 20°C

Les résultats montrent que :

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

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

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

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

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

4.1.1.3. - Influence de la température du papier

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

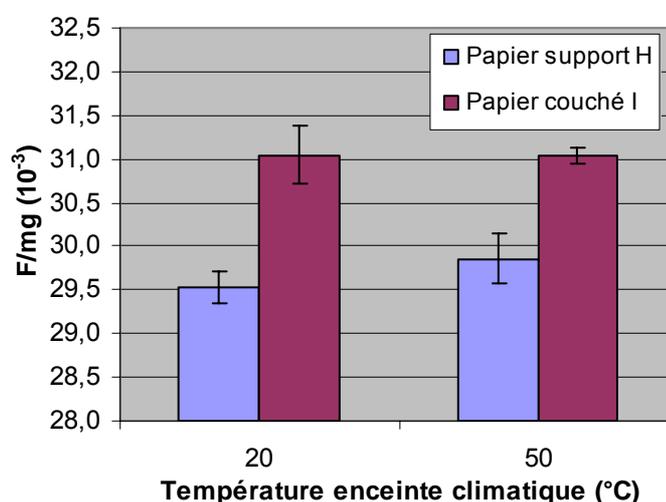


Figure 4. 6 : Coefficients de frottement en fonction de la température des papiers H et I
(Tableau 4. 2) – Cylindre 2 (Tableau 4. 1) – Angle α : 4,4°

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

4.1.1.4. - Influence de la température du cylindre

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

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

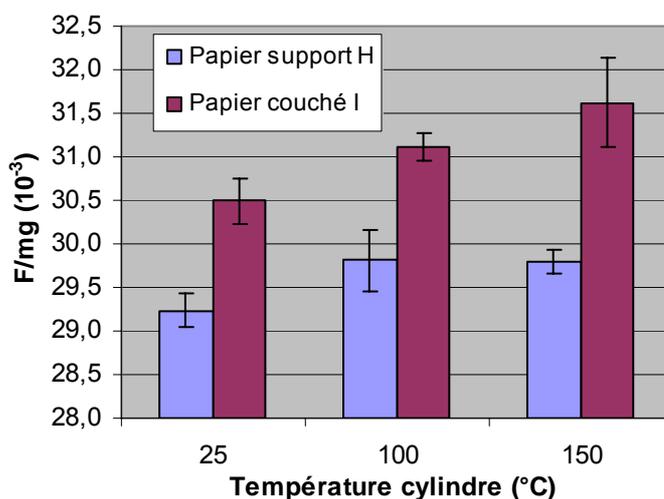


Figure 4. 7 : Coefficients de frottement en fonction de la température des cylindres – Papier H et I (Tableau 4. 2) – Cylindre 2 (Tableau 4. 1) – Angle $\alpha : 4,4^\circ$ – Température : 20°C

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

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

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

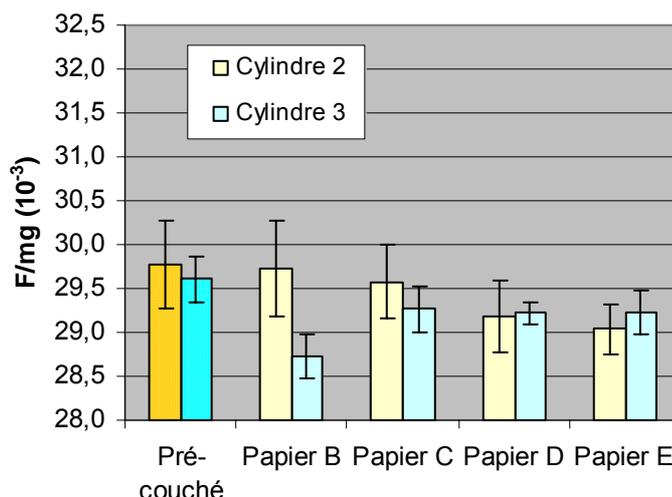


Figure 4. 8 : Coefficients de frottement pour différents papiers et leur papier pré-couché (Tableau 2.6) – Cylindre 2 et 3 (Tableau 4. 1) – Angle α : 4,4° – Température : 20°C

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

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

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

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

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

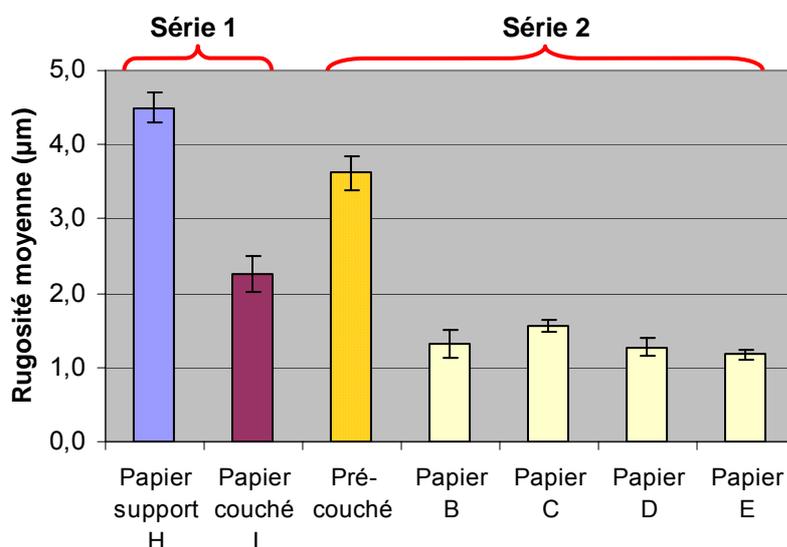


Figure 4. 9 : Rugosité moyenne des papiers avant calandrage

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

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

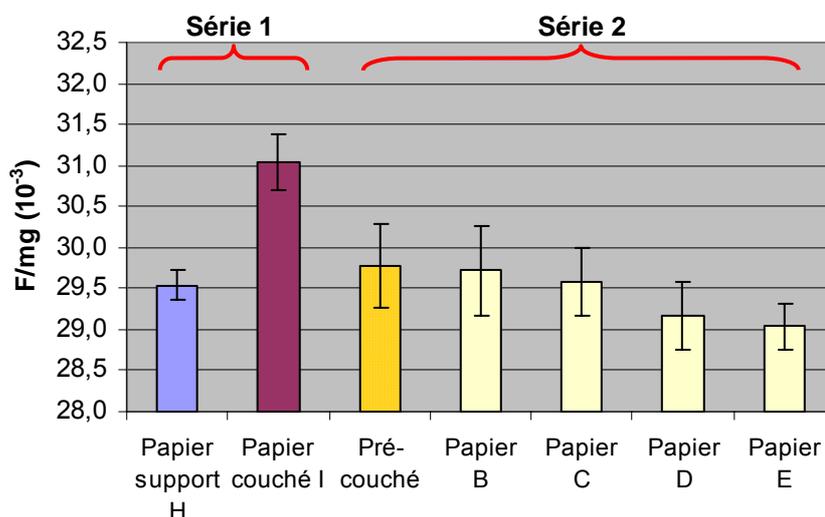


Figure 4. 10 : Coefficient de frottement des séries 1 et 2 – Cylindre 2 (Tableau 4. 1) –
Angle α : $4,4^\circ$ – Température : 20°C

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

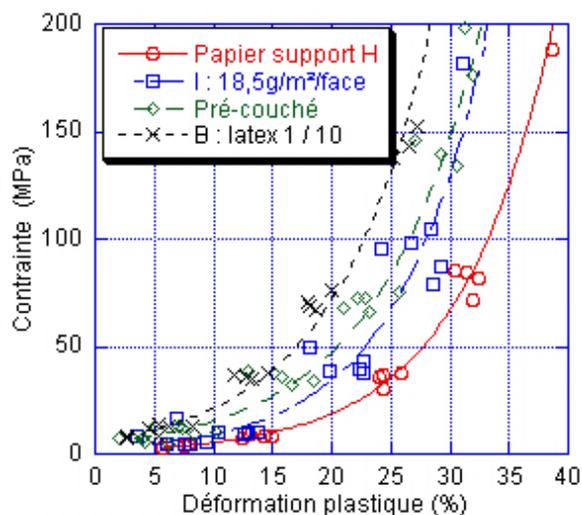


Figure 4. 11 : Essai de compression quasi-statique sur une feuille (M10)

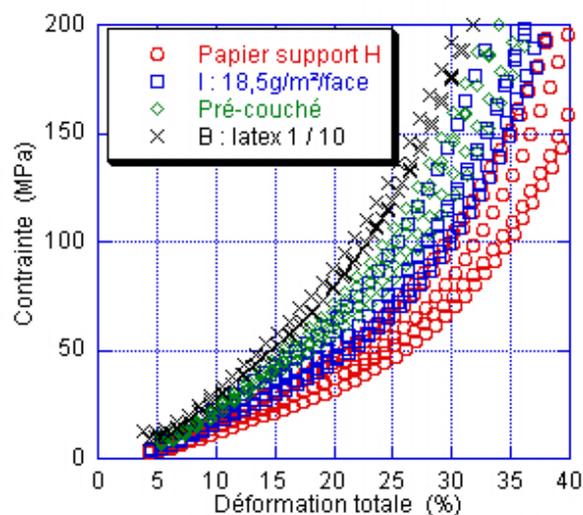


Figure 4. 12 : Essai de chute de bille sur une feuille (H1=10 cm M6 mm)

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

4.1.2. - Essai de calandrage

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

4.1.2.1. - Description et Principe

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

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

Les paramètres de calandrage ont été les suivants :

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

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

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

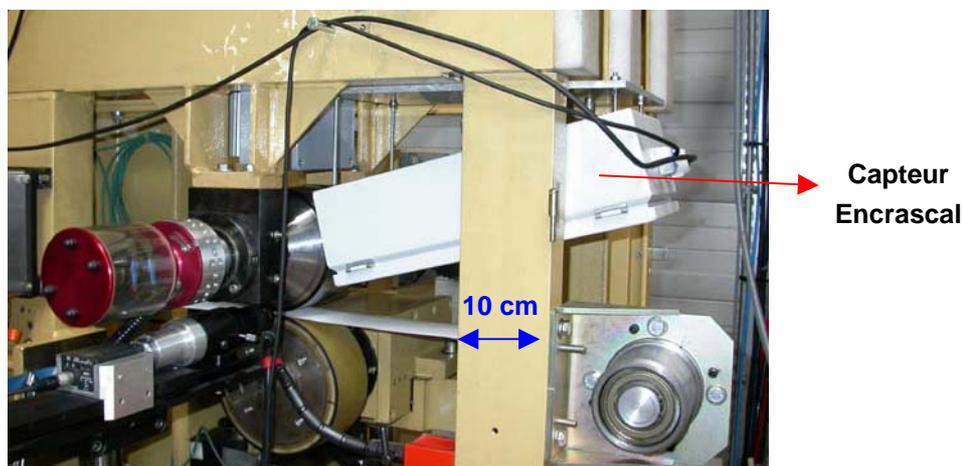


Figure 4. 13 : Position du capteur Encrascal sur la calandre pilote

4.1.2.2. - Résultats

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

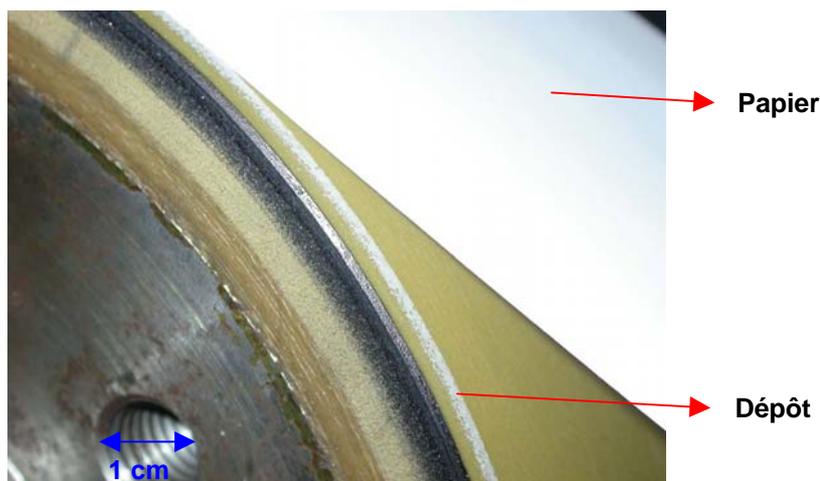


Figure 4. 14 : Dépôt observé sur le bord du rouleau polymère

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



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

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

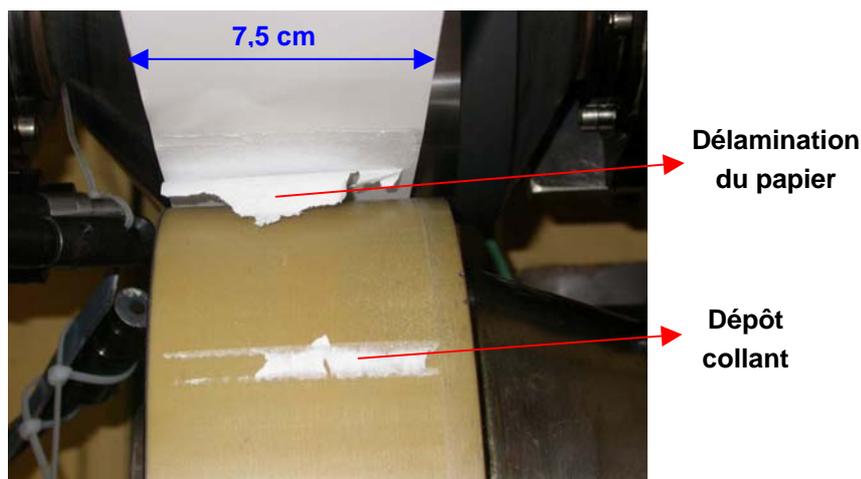


Figure 4. 16 : Dépôt de type collant sur le rouleau polymère et délamination du papier au démarrage de la bobine lors d'essai à une température du rouleau métallique de 260°C



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

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

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

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

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

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

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

Il serait intéressant de poursuivre ce travail :

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

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

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

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

4.2.1. - Description de l'étude

4.2.1.1. - Présentation du papier utilisé

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

4.2.1.2. - Objectif

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

4.2.1.3. - Conditions expérimentales

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

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

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

4.2.2. - Influence du nombre de nips

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

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

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

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

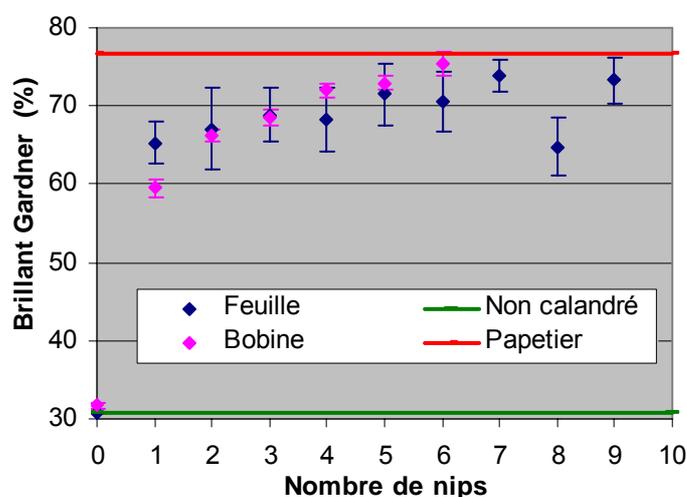


Figure 4. 18 : Mesure de brillant Gardner – Influence du nombre de nips – Force linéique : 100 kN/m – Température du rouleau métallique : 100°C

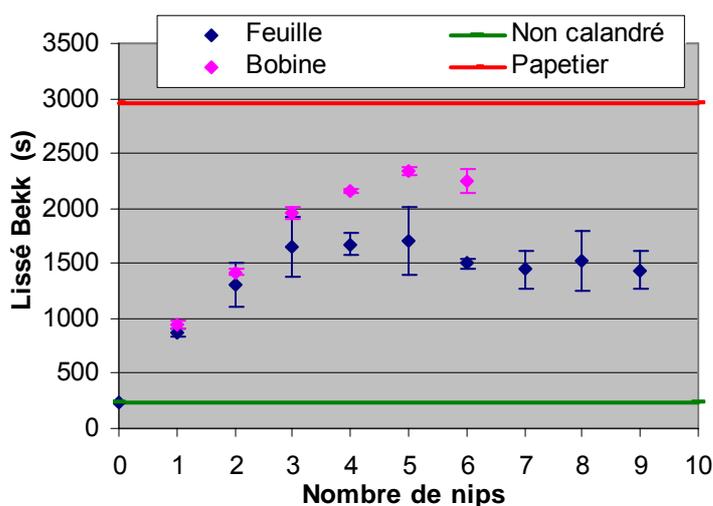


Figure 4. 19 : Mesure du lissé Bekk – Influence du nombre de nips – Force linéique : 100 kN/m – Température du rouleau métallique : 100°C

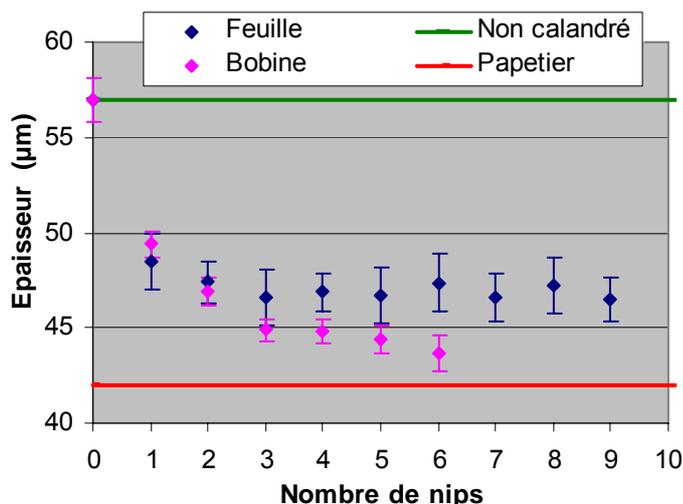


Figure 4. 20 : Mesure de l'épaisseur – Influence du nombre de nips – Force linéique : 100 kN/m – Température du rouleau métallique : 100°C

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

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

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

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

4.2.3. - Influence de la force linéique

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

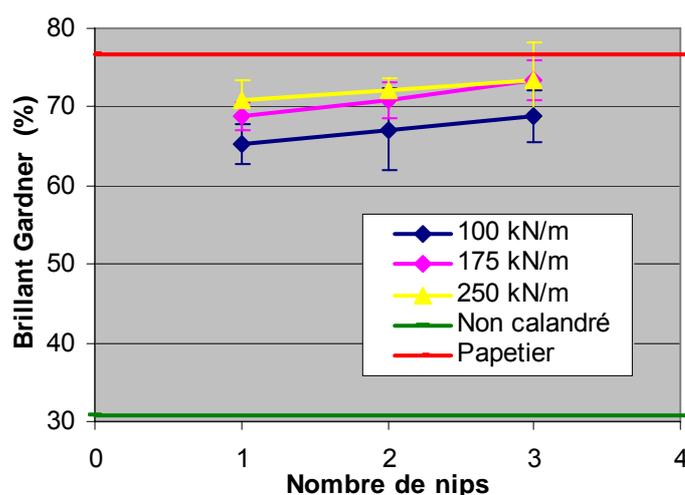


Figure 4. 21 : Mesure de brillant Gardner – Influence de la force linéique – Température du rouleau métallique : 100°C

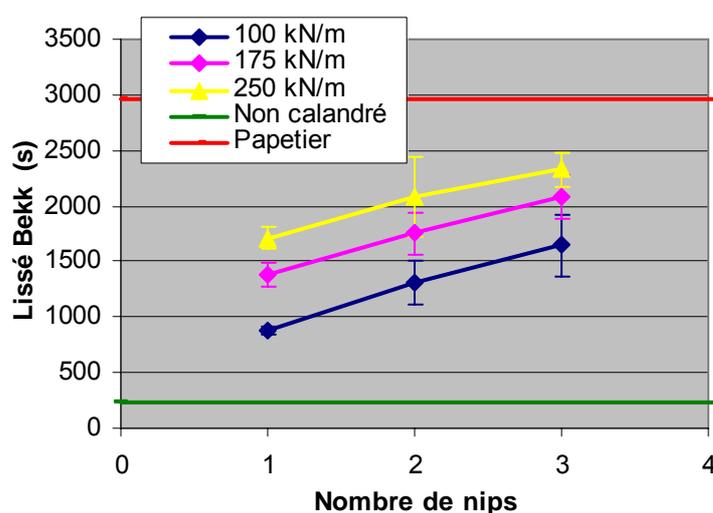


Figure 4. 22 : Mesure du lissé Bekk – Influence de la force linéique – Température du rouleau métallique : 100°C

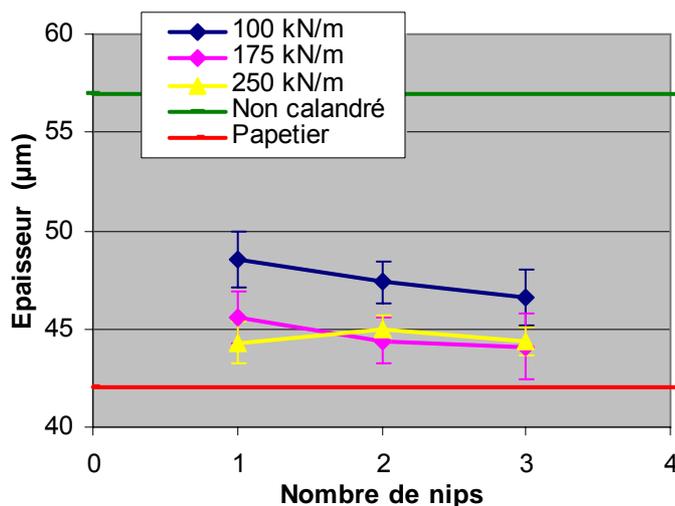


Figure 4.23 : Mesure de l'épaisseur – Influence de la force linéique – Température du rouleau métallique : 100°C

Les résultats montrent d'une manière générale, que l'augmentation de la force linéique entraîne une amélioration du brillant (Figure 4.21) et du lissé (Figure 4.22) associée à une diminution de l'épaisseur (Figure 4.23). Nous pouvons noter que le comportement en fonction de la force linéique est analogue à celui induit par l'augmentation du nombre de nips : Augmenter la force linéique ou passer dans des nips successifs engendrent une compression supplémentaire, caractérisée par une diminution plus importante de l'épaisseur et une augmentation du brillant et du lissé de la surface du papier. Cependant, nous pouvons constater que l'augmentation de la force linéique de 175 à 250 kN/m n'a quasiment pas entraîné de déformation supplémentaire et que l'amélioration du brillant est nettement moins importante que celle du lissé. Ce comportement est différent de celui observé lors de l'augmentation de la force linéique de 100 à 175 kN/m pour le brillant et l'épaisseur des papiers. Les résultats montrent donc que dans un premier temps, l'augmentation de la force linéique permet une amélioration du brillant et du lissé. Puis, à partir d'un certain niveau de compression du papier, l'augmentation de la force linéique entraîne principalement une amélioration du lissé sans pour autant engendrer une réduction supplémentaire de l'épaisseur du papier.

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

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

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

4.2.4. - Influence de la température du rouleau métallique

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

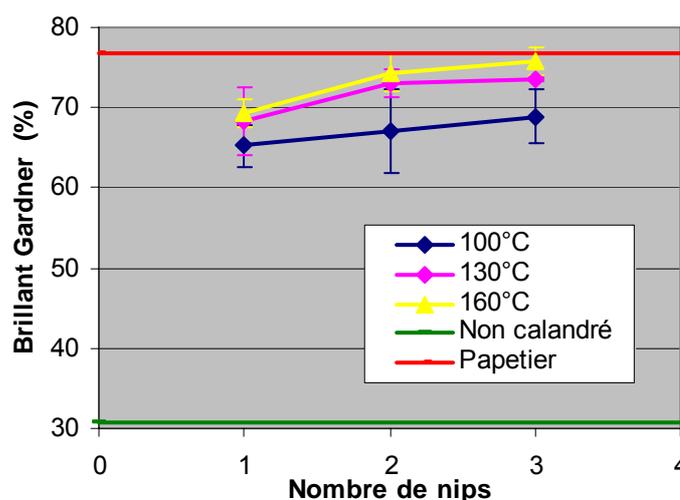


Figure 4. 24 : Mesure de brillant Gardner – Influence de la température du rouleau métallique
– Force linéique : 100 kN/m

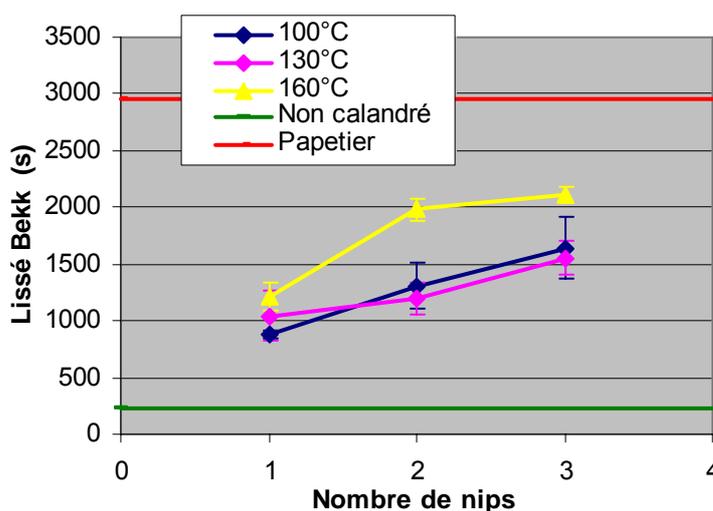


Figure 4. 25 : Mesure du lissé Bekk – Influence de la température du rouleau métallique –
Force linéique : 100 kN/m

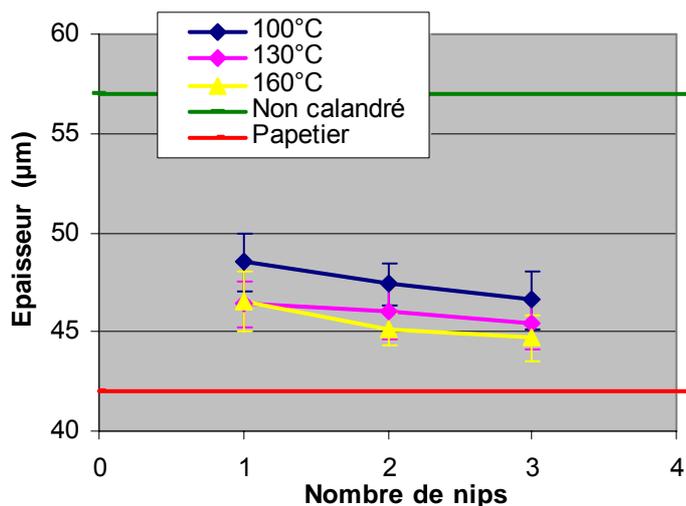


Figure 4.26 : Mesure de l'épaisseur – Influence de la température du rouleau métallique –
Force linéique : 100 kN/m

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

4.2.5. - Condition la plus critique

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

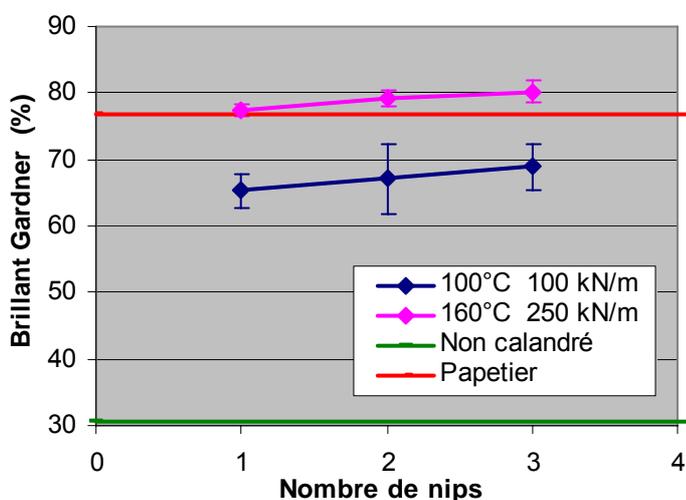


Figure 4.27 : Mesure de brillant Gardner – Condition la plus critique

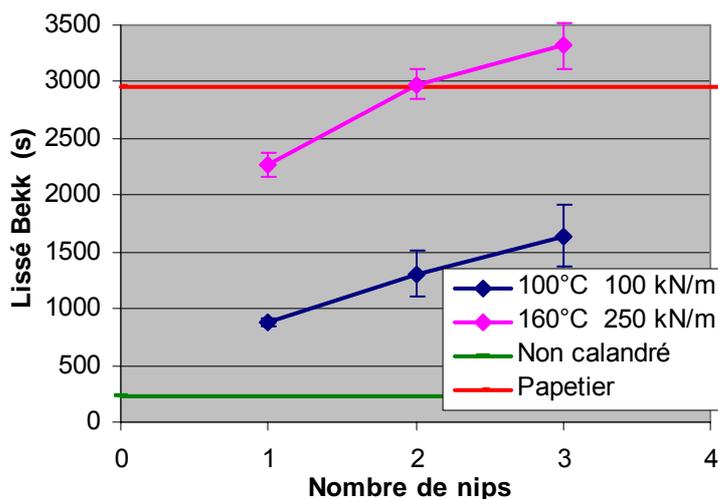


Figure 4. 28 : Mesure du lissé Bekk – Condition la plus critique

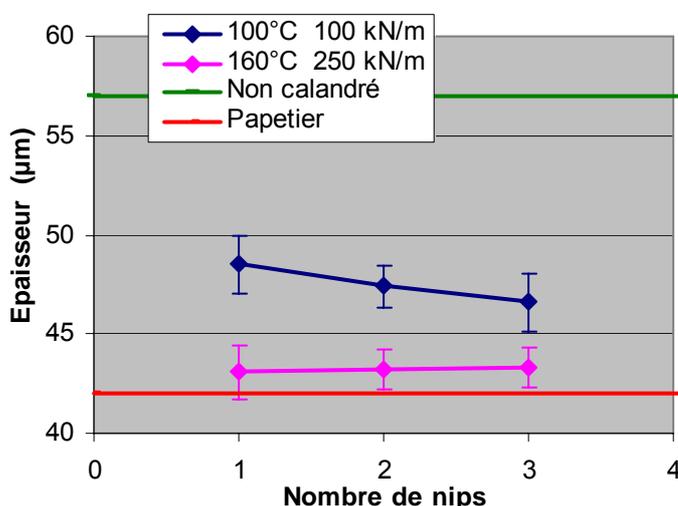


Figure 4. 29 : Mesure de l'épaisseur – Condition la plus critique

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

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

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

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

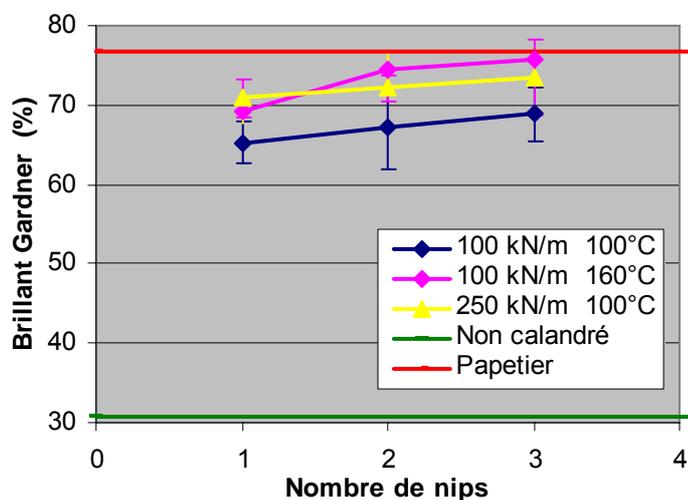


Figure 4. 30 : Influence de la force linéique et de la température du rouleau métallique sur le brillant Gardner

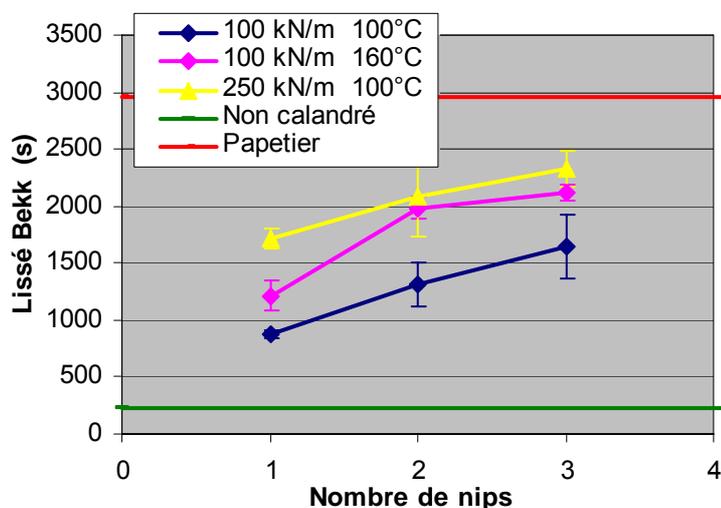


Figure 4. 31 : Influence de la force linéique et de la température du rouleau métallique sur le lissé Bekk

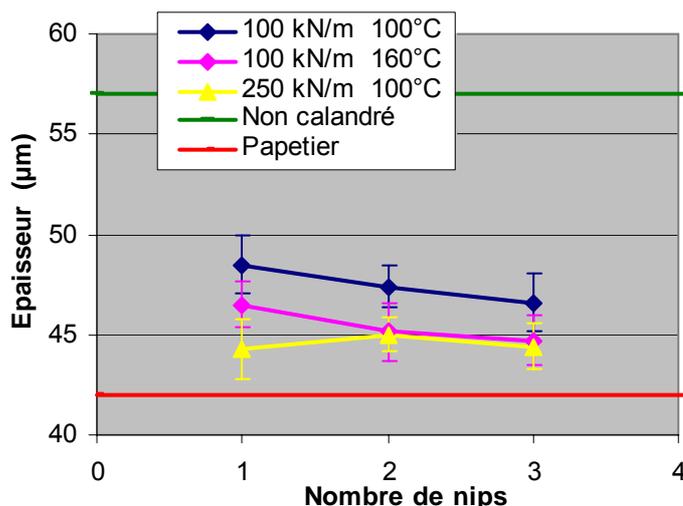


Figure 4. 32 : Influence de la force linéique et de la température du rouleau métallique sur l'épaisseur

A partir des comparaisons, nous pouvons penser que :

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

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

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

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

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

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

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

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

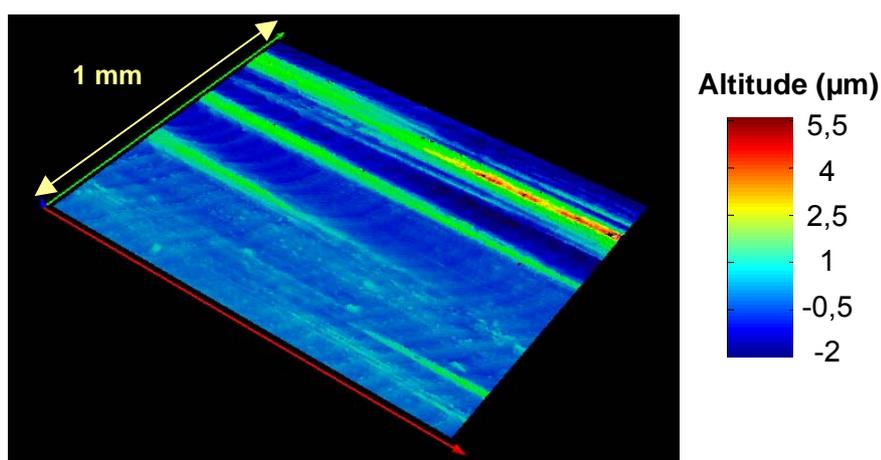


Figure 4. 33 : Topographie d'une empreinte silicone de la surface d'un rouleau métallique, endommagé, de la calandre pilote (Topo3D) – Dimension : 1,4 x 1 mm

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

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

4.3.1. - Description de l'étude

Présentation du rouleau

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

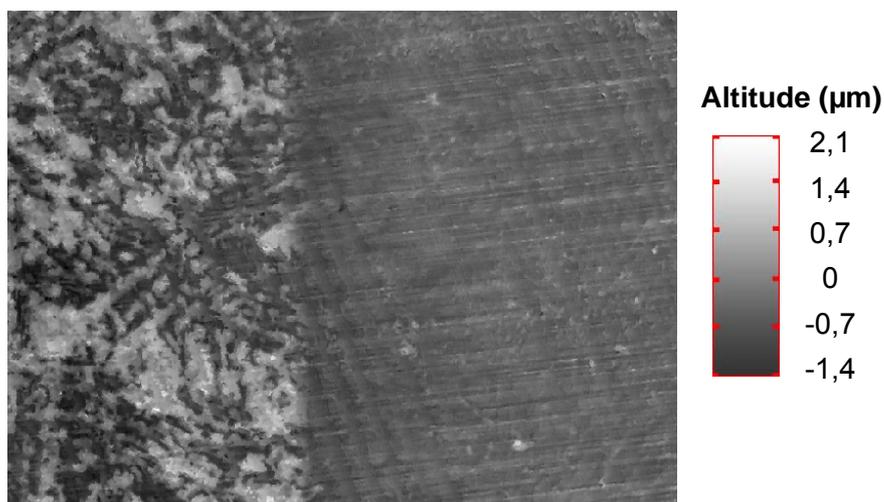


Figure 4. 34 : Topographie d'une empreinte de la surface du rouleau avec les trois rugosités
– Zone de rugosité 0,1 μm (à droite) et 0,4 μm (à gauche) – Dimension : 1,3 x 1 mm

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

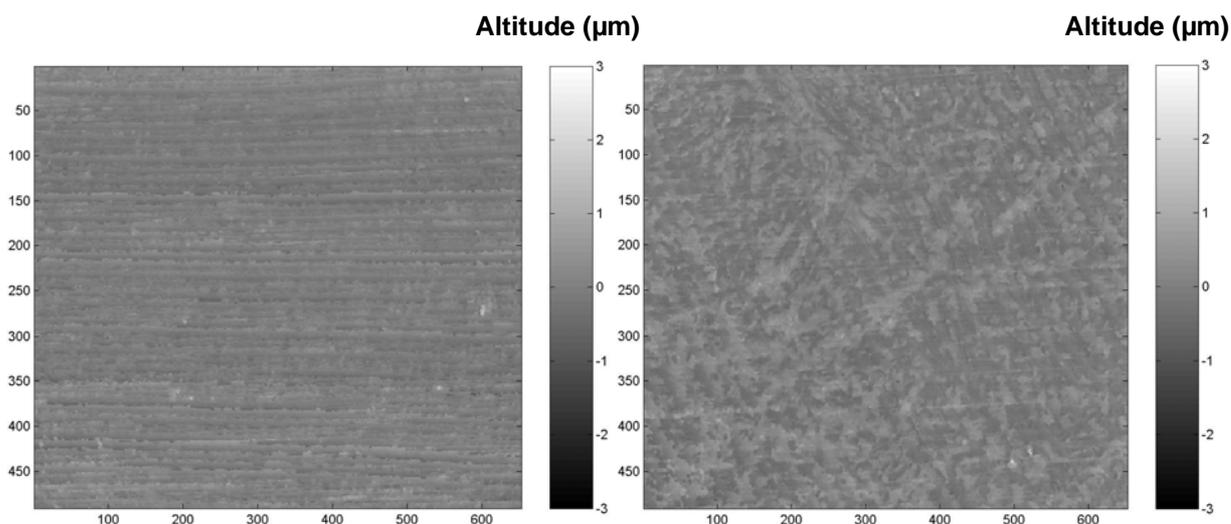


Figure 4. 35 : Topographie de l'empreinte silicone dans une zone de rugosité moyenne de $0,1 \mu\text{m}$ – Dimension : $1,3 \times 1 \text{ mm}$

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

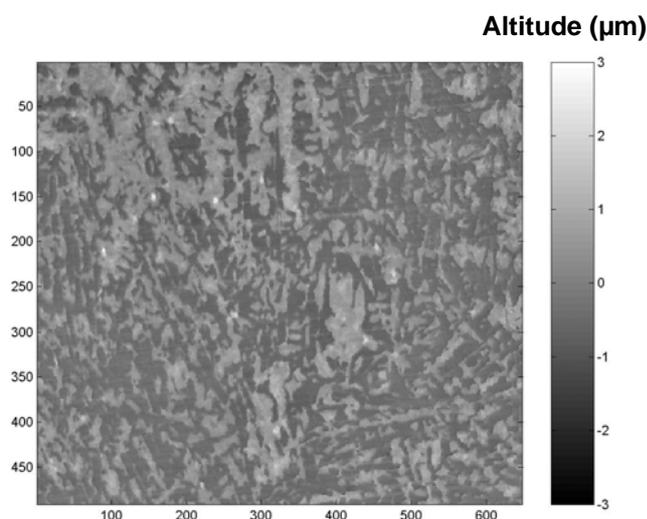


Figure 4. 37 : Topographie de l'empreinte silicone dans une zone de rugosité moyenne de $0,4 \mu\text{m}$ – Dimension : $1,3 \times 1 \text{ mm}$

Contexte et objectif

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

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

Conditions expérimentales

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

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

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

4.3.2. - Etude de la topographie des papiers calandrés

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

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

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

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

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

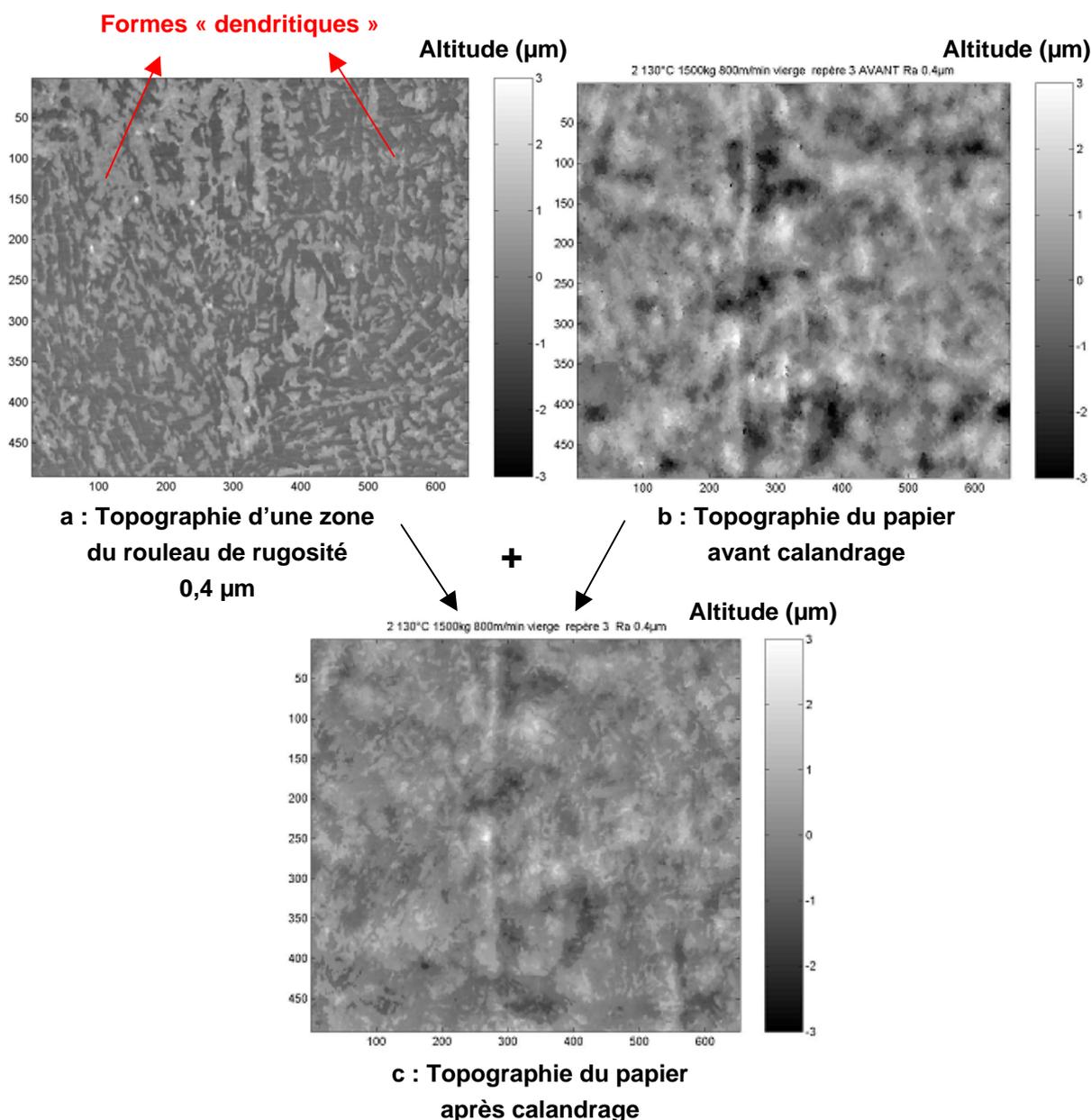


Figure 4. 38 : Analyse locale du transfert de l'état de surface du rouleau au papier : a : Topographie du rouleau ; b : Topographie du papier avant calandrage ; c : Topographie du papier après calandrage – Dimension : $1,3 \times 1 \text{ mm}$

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

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

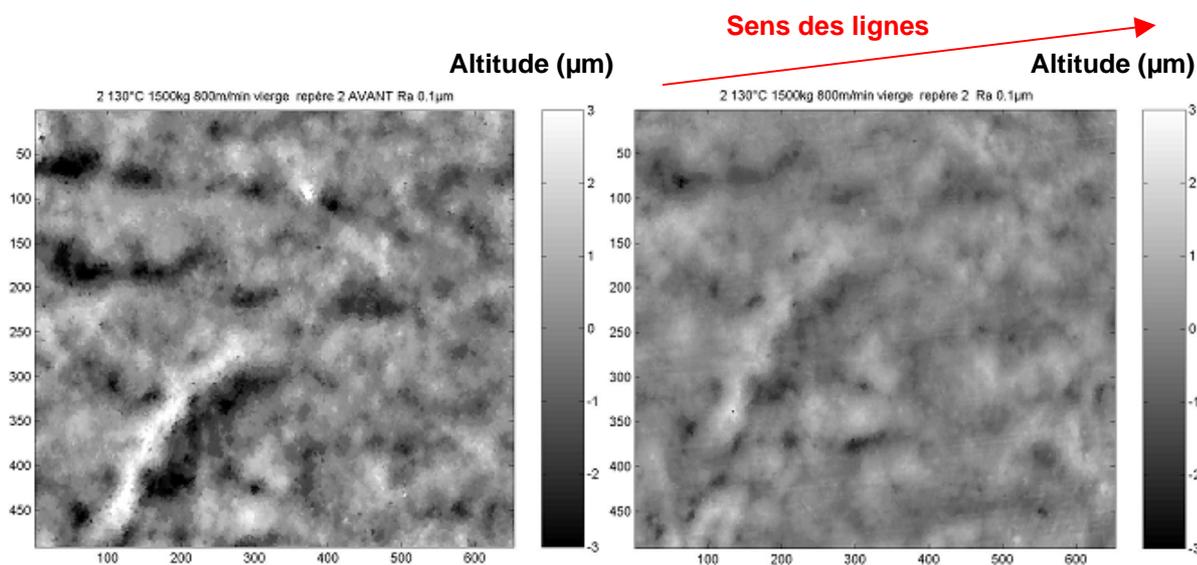


Figure 4. 39 : Topographie du papier dans une zone repérée avant calandrage

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

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

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

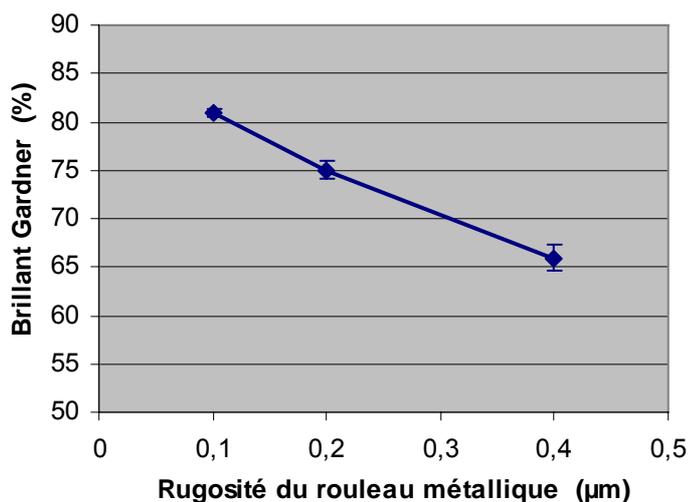


Figure 4. 41 : Evolution du brillant Gardner avec la rugosité du rouleau métallique sur les papiers calandrés F – Température du rouleau métallique : 130°C – Force linéique : 200 kN/m – Vitesse de calandrage : 800 tr/min

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

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

4.3.3.1. - Influence de la température du rouleau métallique

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

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

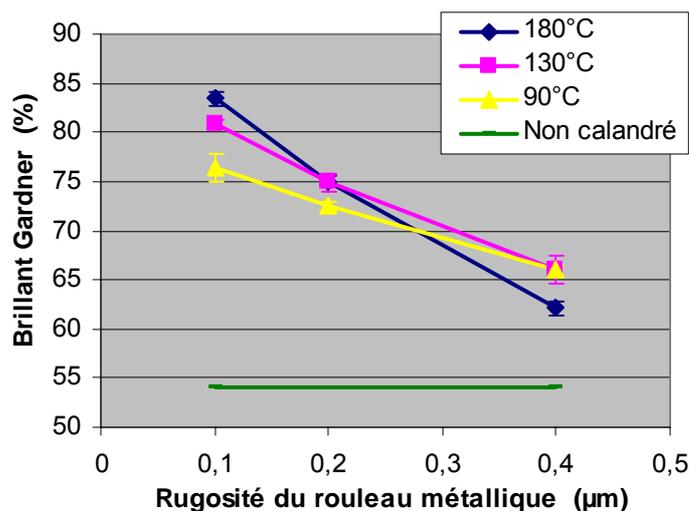


Figure 4. 42 : Evolution du brillant Gardner avec la rugosité du rouleau métallique – Influence de la température du rouleau – Force linéique : 200 kN/m – Vitesse de calandrage 800 tr/min

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

4.3.3.2. - Influence de la vitesse de calandrage

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

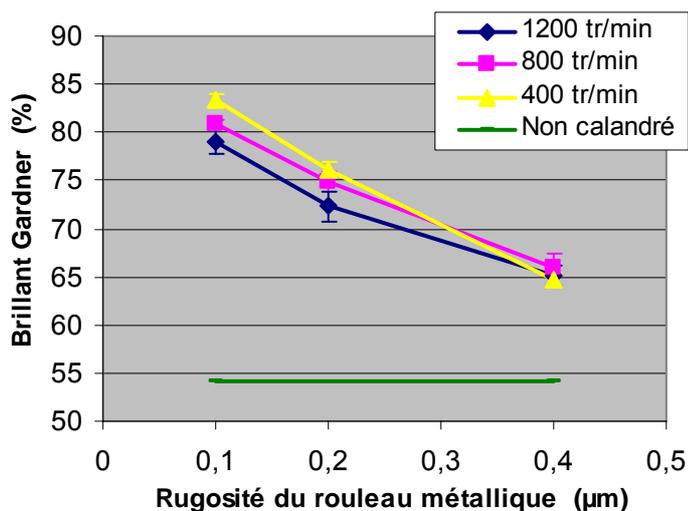


Figure 4. 43 : Evolution du brillant Gardner avec la rugosité du rouleau métallique – Influence de la vitesse de calendrage – Température du rouleau métallique : 130°C – Force linéique : 200 kN/m

4.3.3.3. - Influence de la force linéique

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

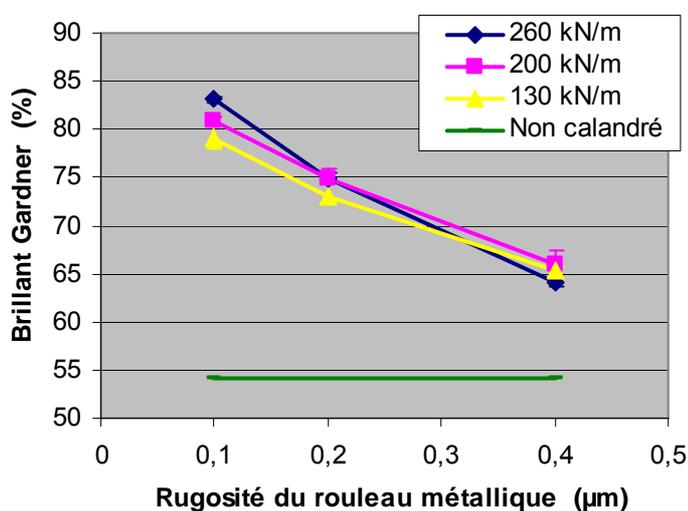


Figure 4. 44 : Evolution du brillant Gardner avec de la rugosité du rouleau métallique – Influence de la force linéique – Température du rouleau métallique : 130°C – Vitesse de calendrage : 800 tr/min

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

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

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

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

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

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

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

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

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

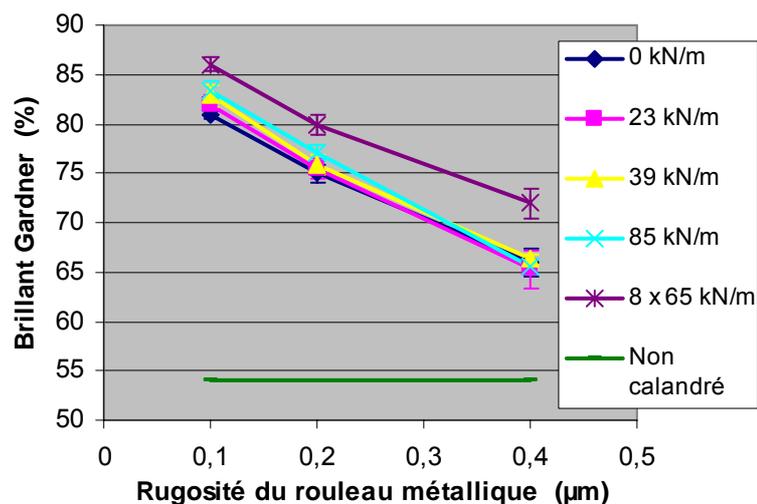


Figure 4. 45 : Evolution du brillant Gardner avec la rugosité du rouleau sur les papiers initialement pré-calandrés puis calandrés avec le rouleau aux différentes rugosités – Influence du pré-calandrage – Température du rouleau métallique : 130°C – Force linéique : 200 kN/m – Vitesse de calandrage : 800 tr/min

Nous constatons comme pour les essais faisant varier d'autres paramètres de calandrage que plus le rouleau est lisse, plus le brillant des papiers est élevé. Par ailleurs, si on excepte les essais de pré-calandrage répétés à 65 kN/m, le pré-calandrage ne semble pas avoir une influence très marquée sur le brillant final des papiers. Ceci aurait tendance à signifier que l'état de densification initial du papier influe peu sur le transfert de l'état de surface du rouleau au papier.

Nous avons introduit une variable qui correspond à l'amélioration du brillant uniquement à partir du calandrage avec le rouleau aux trois rugosités :

$$\text{Amélioration Brillant} = \frac{\text{Brillant calandrage} - \text{Brillant pré-calandrage}}{\text{Brillant calandrage}} \times 100$$

La Figure 4. 46 présente les résultats obtenus pour les différents pré-calandrages. Nous constatons que l'amélioration la plus importante est obtenue sur le papier le moins dense. Par ailleurs, les papiers de forte densité montrent une amélioration du brillant négative lors du contact avec le rouleau de rugosité 0,4 µm. Cela signifie que le calandrage avec la zone du rouleau de forte rugosité a dégradé la surface du papier déjà brillant en raison du pré-calandrage. L'influence de l'état de surface du rouleau sur le brillant du papier est donc évidente. Par contre, comme pour la Figure 4. 45, les résultats montrent que l'état de densification initial du papier influe peu sur le transfert de l'état de surface du rouleau au papier car les courbes de la Figure 4. 46 sont toutes parallèles les unes aux autres.

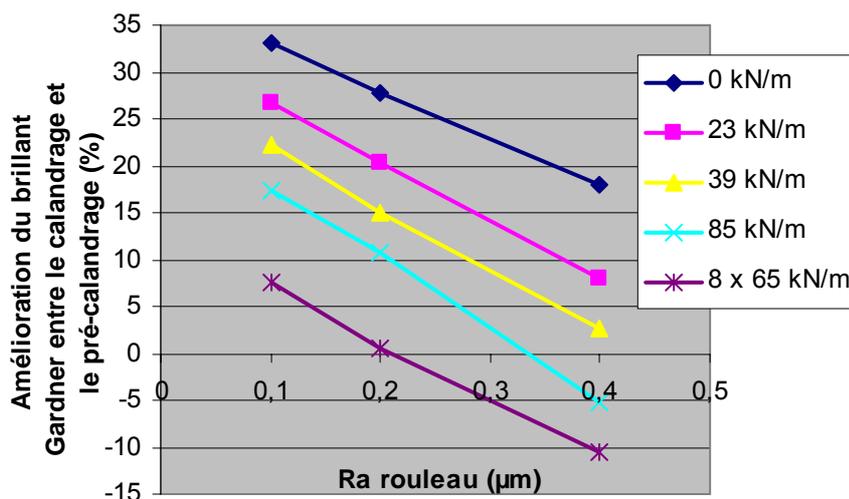


Figure 4. 46 : Evolution de l'amélioration du brillant Gardner avec la rugosité du rouleau métallique – Influence du pré-calendrage – Température du rouleau métallique : 130°C – Force linéique : 200 kN/m – Vitesse de calendrage : 800 tr/min

4.3.4. - Conclusions sur le transfert de rugosité

Cette étude a porté sur l'influence de l'état de surface du rouleau sur les caractéristiques de surface du papier. Les principales conclusions de cette étude sont :

- Le transfert de l'état de surface du rouleau au papier se produit à une échelle locale (inférieure au millimètre). Ce résultat a été montré par l'analyse de la topographie du papier avant et après calendrage. Par ailleurs, il confirme celui obtenu à partir du rouleau avec les formes géométriques où aucun glissement avait été mis en évidence à plus grande échelle (diamètre des cercles : 20 mm).
- L'influence de l'état de surface du rouleau sur le brillant du papier est évidente : 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 calendrage.
- L'augmentation de la température du rouleau favorise la déformation de la surface du papier, ce qui favorise également le transfert de l'état de surface du rouleau au papier.
- La diminution de la vitesse de calendrage augmente le temps de contact rouleau / papier et améliore ainsi le transfert de chaleur, ce qui favorise également le transfert de l'état de surface.
- L'augmentation de la force linéique entraîne une compression du papier plus importante, favorisant également le transfert de l'état de surface du rouleau au papier.
- Les essais avec un pré-calendrage montrent que le calendrage avec un rouleau rugueux engendrent une dégradation de l'état de surface d'un papier déjà brillant. Par contre, l'état de densification initial du papier n'influe pas sur le transfert de rugosité.

Chapitre 5 : Synthèse

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 calendres 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.

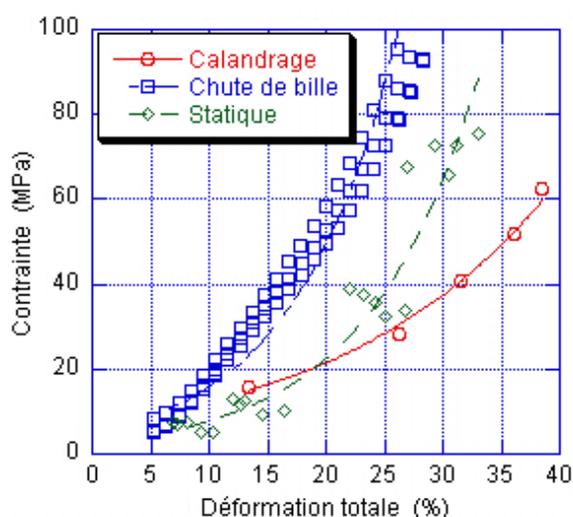


Figure 5. 1 : Comparaison des courbes contrainte / déformation totale obtenues à partir des deux essais de laboratoire et des essais de calandrage (méthode optique) pour le papier Pré-couché (Tableau 2.6)

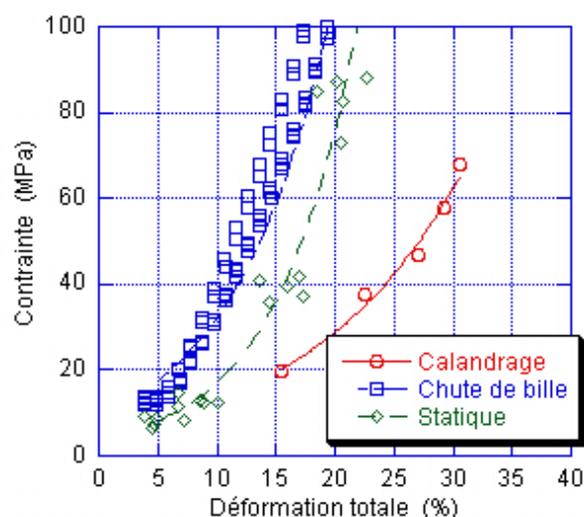


Figure 5. 2 : Comparaison des courbes contrainte / déformation totale obtenues à partir des deux essais de laboratoire et des essais de calandrage (méthode optique) pour le papier couché F (Tableau 2.6)

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.

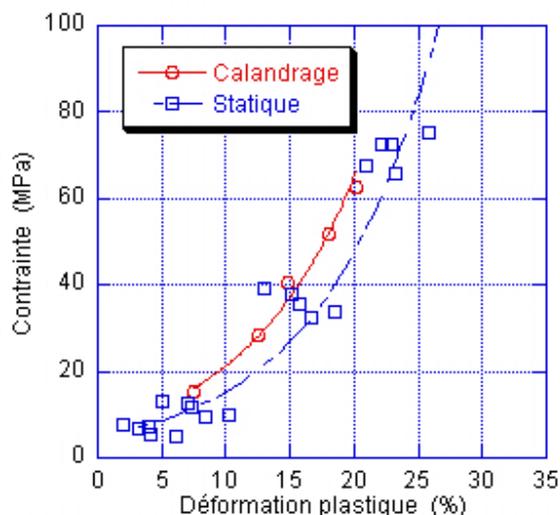


Figure 5. 3 : Comparaison des courbes contrainte / déformation plastique obtenues à partir de l'essai de compression quasi-statique et des essais de calandrage (méthode micromètre) pour le papier Précouché (Tableau 2.6)

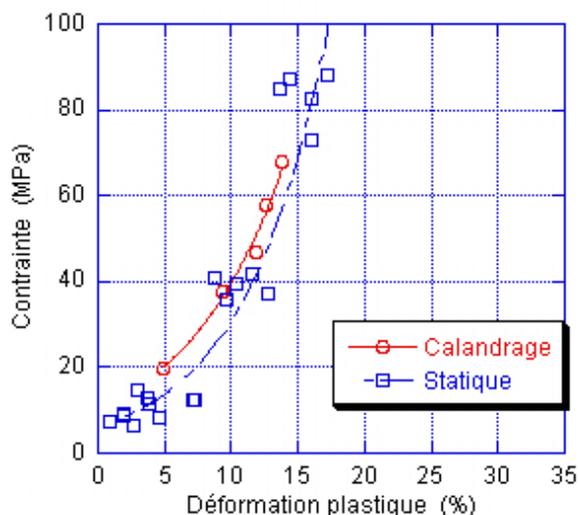


Figure 5. 4 : Comparaison des courbes contrainte / déformation plastique obtenues à partir de l'essai de compression quasi-statique et des essais de calandrage (méthode micromètre) pour le papier couché F (Tableau 2.6)

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.

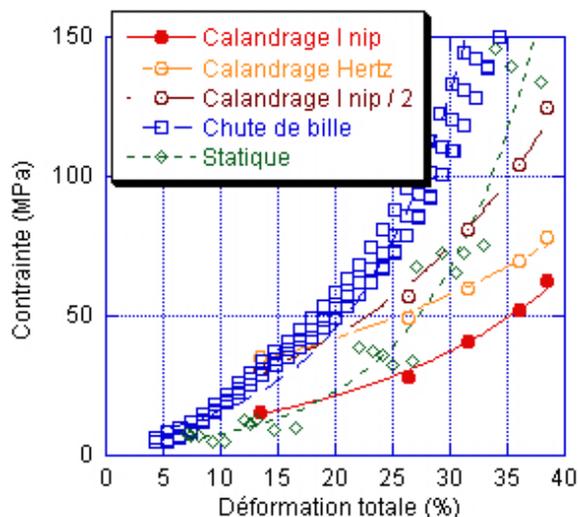


Figure 5. 5 : Comparaison essai de laboratoire / essai de calandrage – Résultats de la Figure 5. 1 avec d'autres calculs de la contrainte pour les essais de calandrage

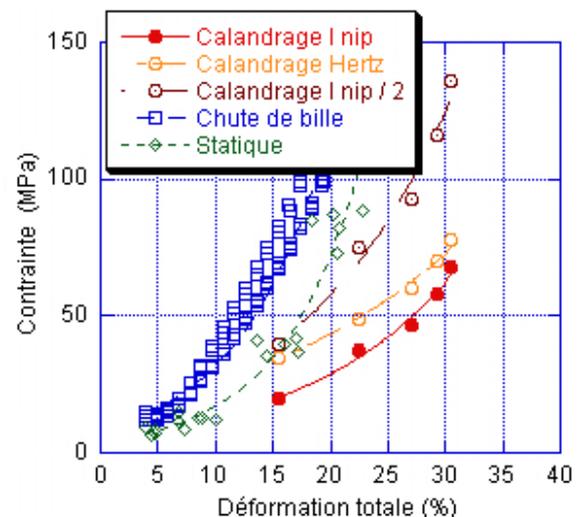


Figure 5. 6 : Comparaison essai de laboratoire / essai de calandrage – Résultats de la Figure 5. 2 avec d'autres calculs de la contrainte pour les essais de calandrage

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.

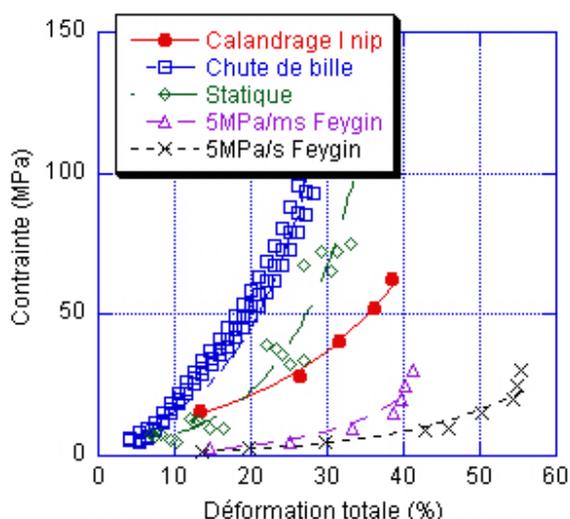


Figure 5. 7 : Comparaison entre les courbes de contrainte / déformation obtenues pour le papier pré-couché (cf Tableau 2.6) par les différentes méthodes et les courbes de contrainte / déformation obtenues à partir de la ré-interprétation des résultats de Feygin ([Feygin, 1999]) sur un papier d'impression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

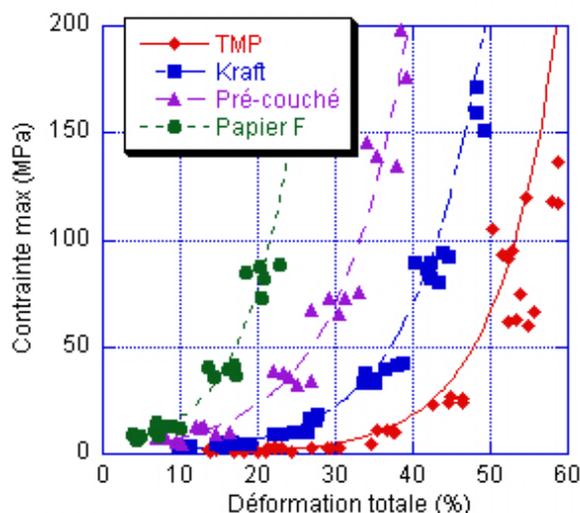


Figure 5. 8 : Courbes de contrainte / déformation totale obtenues à partir des essais de compression quasi-statique pour différents papiers

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.

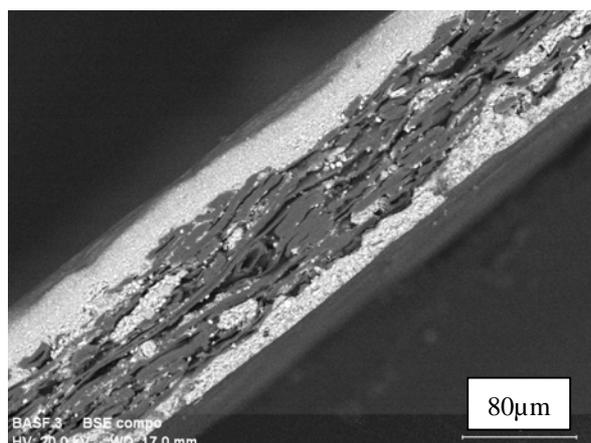


Figure 5. 9 : Observation au MEB de la coupe du papier C – Rouleau applicateur + lame raclante

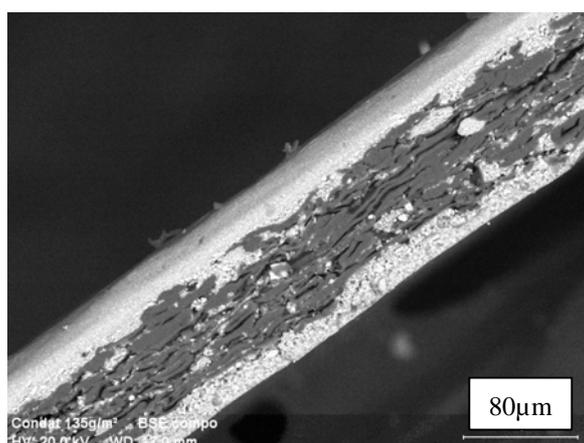


Figure 5. 10 : Observation au MEB de la coupe du papier F – Jet (jet flow) + lame lissante

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.

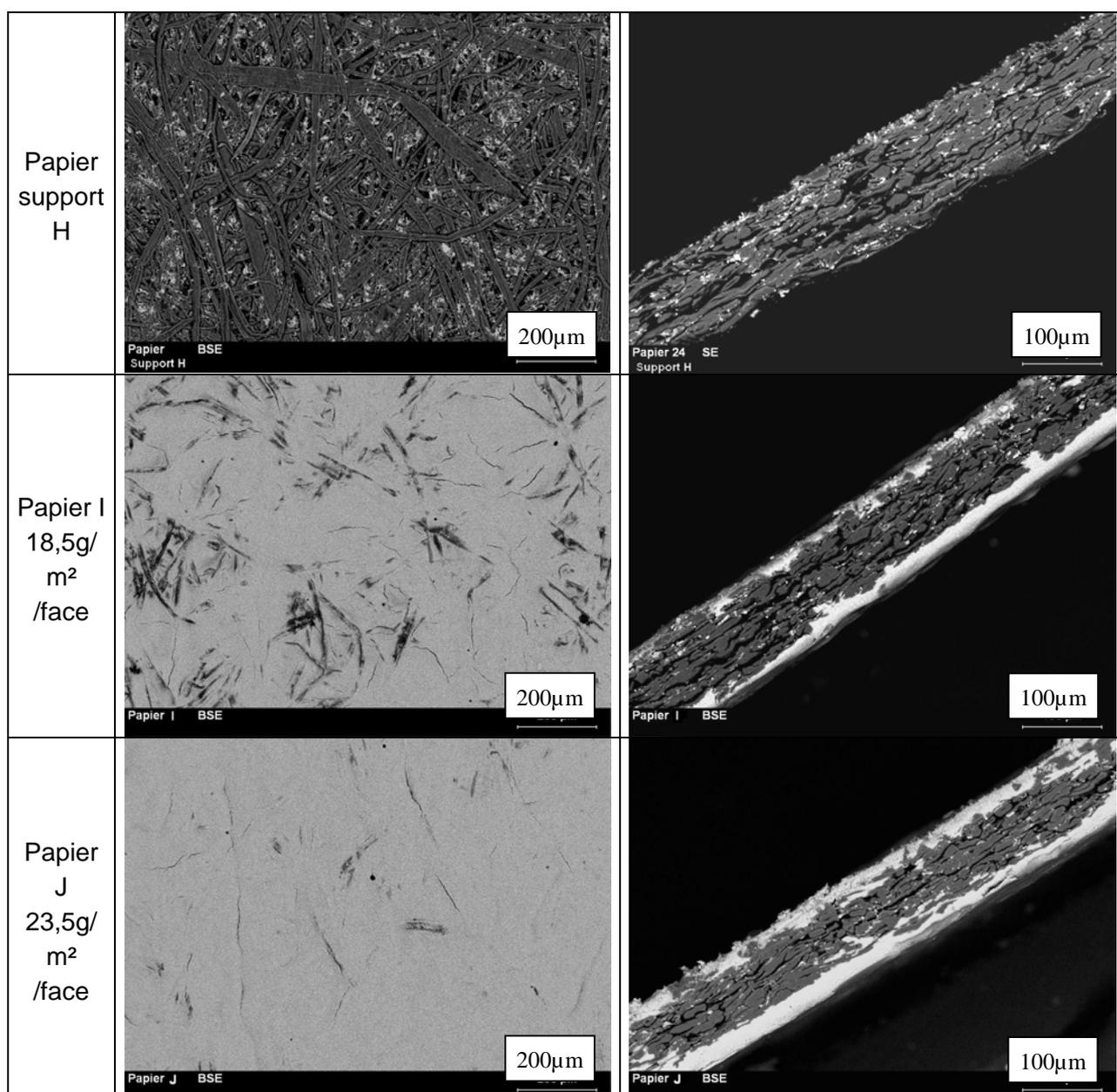


Figure 5. 11 : Observation au MEB de la surface et de la coupe des papiers couchés I et J et de leur papier support H – lame réservoir

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.

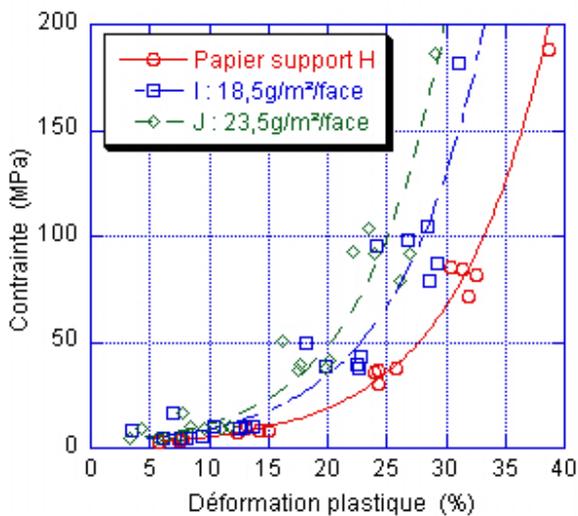


Figure 5. 12 : Essai de compression quasi-statique sur une feuille (M10) – Influence de la couche sur la contrainte

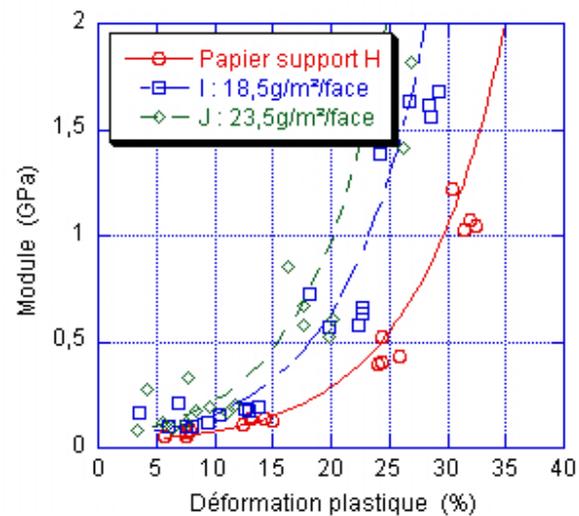


Figure 5. 13 : Essai de compression quasi-statique sur une feuille (M10) – Influence de la couche sur le module

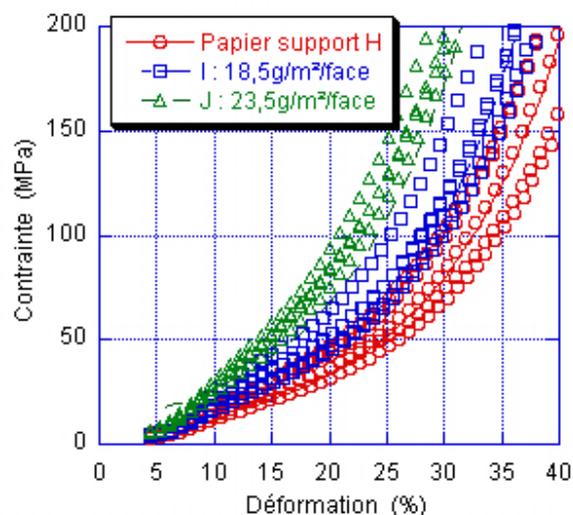


Figure 5. 14 : Essai de chute de bille sur une feuille (H1=10 cm M6 mm) – Influence de la couche sur la contrainte

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.

Conclusion générale et perspectives

Le calandrage est la dernière étape du procédé de fabrication du papier permettant de modifier les caractéristiques de la feuille. Les papetiers cherchent généralement par cette opération à améliorer l'état de surface du papier tout en conservant l'épaisseur la plus importante possible. Ces deux objectifs étant antagonistes, une étude sur la compréhension des phénomènes mécaniques et physico-chimiques du contact rouleau / papier dans un nip de calandrage s'avérait nécessaire. Nous avons alors développé des essais de laboratoire et réalisé des essais de calandrage afin d'une part de caractériser le comportement mécanique du papier lors du procédé et d'autre part étudier les interactions de surface entre le papier et le rouleau.

Le premier chapitre de la thèse a permis de faire un état des pratiques industrielles et des connaissances. Le second et le troisième chapitre présentent l'étude du comportement mécanique du papier à partir d'essais de laboratoire d'indentation sphérique et d'essais de calandrage. Le quatrième chapitre a porté sur le contact rouleau – papier et sur les interactions de surface. Le cinquième chapitre a été un travail de synthèse qui a abouti aux principales conclusions suivantes :

- Les deux essais de laboratoire en compression (chute de bille et compression quasi-statique) et les essais de calandrage ont permis à partir de leur interprétation mécanique, de déterminer des grandeurs intrinsèques au papier et d'établir des relations contrainte d'écoulement / déformation et module d'élasticité / déformation. Ce mode de représentation est rarement présent dans la littérature. Si quantitativement, on observe des différences entre ces courbes, différences dues au moins en partie à la difficulté d'évaluer la contrainte dans des essais de calandrage, qualitativement, les essais de laboratoire et de calandrage montrent des évolutions similaires de ces courbes avec la formulation du papier. Nous avons montré en effet, que ces grandeurs sont sensibles à la formulation du papier (type de pâte, couche, état de densification), au conditionnement du papier (température, humidité). Par ailleurs, les paramètres de calandrage conditionnent le temps de séjour du papier dans le nip, le transfert de chaleur entre les rouleaux et le papier, et le profil de pression appliqué sur le papier dans le nip. Les essais montrent que ces paramètres influencent le comportement mécanique des papiers. Enfin, nous avons proposé un modèle permettant d'évaluer la largeur du nip en statique à partir des essais de compression quasi-statique. L'application numérique de ce modèle a donné des largeurs de nip proches de celles révélées à l'aide d'un papier carbone.
- Un essai de roulement sur un plan incliné et des essais de calandrage dans des conditions extrêmes ont permis de réaliser une étude de l'adhésion entre la surface des papiers et les rouleaux. D'autre part, l'amélioration des caractéristiques de surface (lissé, brillant) et la modification du papier dans son épaisseur (compressibilité) ont été reliées à partir d'une étude sur l'optimisation des conditions de calandrage. Enfin, une étude sur le transfert de l'état de surface du rouleau au papier confirme qu'il n'y a pas de glissement significatif dans le nip et que l'état de surface du rouleau a une grande influence sur le brillant des papiers.

De nombreuses perspectives peuvent être données à ce travail, et nous en avons citées quelques unes au cours de la rédaction du mémoire. Nous présentons ici celles qui nous paraissent les plus importantes.

Que ce soit au niveau du comportement mécanique du papier ou des interactions de surface, les températures à cœur et en surface du papier s'avèrent être des paramètres très importants. Un paramètre influençant semble être l'écart entre la température de déformation et la température de transition vitreuse des fibres de cellulose, laquelle dépend du degré d'humidité du papier. Nous avons vu que la température jouait également sur l'humidité du papier. Il serait intéressant d'affiner le travail réalisé en ayant une meilleure maîtrise de ces deux paramètres. Les essais de laboratoire de compression pourraient notamment être réalisés dans une enceinte régulée en température et en humidité. Les essais de roulement sur le plan incliné ont été réalisés soit, dans une enceinte climatique jusqu'à une température de 50°C, soit à température ambiante en chauffant les cylindres. Des capteurs infra-rouges ayant une plage d'utilisation en température plus importante et un système de chauffage du cylindre jusqu'à une température de 200°C pourraient être des modifications très intéressantes à apporter au montage. Une étude plus poussée sur la re-humidification de la surface des papiers et l'utilisation de cylindres de nature différente (en fonte ou en chrome par exemple) avec un état de surface équivalent à un poli miroir pourraient également être envisagées. Tout ceci permettrait de se rapprocher des conditions industrielles de calandrage et de préciser les interactions de surface par mesure de l'effet sur les coefficients de frottements en fonction de couple « nature du cylindre / composition superficielle du papier ».

Au niveau des essais de calandrage, une meilleure maîtrise de la température et de l'humidité du papier peuvent également être envisagée. Quelques essais ont été réalisés sur des bobines de papier chauffées dans une étuve. Une étude plus poussée pourrait être réalisée sur l'influence du type de papier, le temps de séjour dans l'étuve et la perte en température du papier entre l'étuve et le dérouleur ou entre l'étuve et le nip. Par ailleurs, des systèmes de re-humidification (boite vapeur, spray d'eau) et chauffage du papier (radian infra-rouge) pourraient être installés sur la calandre pilote afin d'étudier leur influence sur le comportement mécanique des papiers, sur l'amélioration de l'état de surface et sur la création de dépôt sur les rouleaux. L'analyse thermomécanique du calandrage devrait être développée pour mieux estimer l'interprétation des essais de calandrage, les essais de compression de laboratoire pouvant servir d'appui à cette modélisation.

Enfin, nous avons proposé un modèle de comportement mécanique des papiers couchés où l'épaisseur du matelas fibreux conditionne la déformation du papier. Des observations de la coupe de papier ont été réalisées au microscope électronique à balayage mais nous n'avons pu réellement mettre en évidence une différence d'épaisseur du matelas fibreux en fonction du système de couchage utilisé. Une meilleure préparation de l'échantillon à l'aide d'un enrobage en résine suivi d'une découpe à l'ultra microtome serait une piste à explorer pour étudier l'influence du système de couchage sur la déformation du matelas fibreux et ainsi confirmer le modèle de comportement mécanique proposé.

Références bibliographiques

[**Barquins 1980**] : Barquins M., « Etude théorique et expérimentale de la cinétique de l'adhérence des élastomères », Thèse d'état, Université Pierre et Marie Curie, p.193, Paris 6, France, 1980

[**Bristow *et al.*, 1986**] : Bristow J.A., Kolseth P., « Paper structure and properties », Chapter 8 « The paper surface in relation to the network », Swedish Forest Products Research Laboratory / STFI Stockholm, Sweden, p.390, Marcel Dekker, INC. New York, 1986

[**Browne *et al.*, 1994**] : Browne T.C., Crotogino R.H., Douglas W.J.M., « Measurement of Paper Strain in the Nip of an Experimental Calender », Journal of Pulp and Paper Science, vol.20, n°9, pp.J266-J270, September 1994

[**Browne *et al.*, 2001**] : Browne T.C., Crotogino R.H., « Future directions in calendering research », 12th Fundamental Research Symposium, vol.2, pp.1001-1036, Oxford, United-Kingdom, September 2001

[**Carlsson *et al.*, 2002**] : Carlsson R., Salminen P., Wikstrom M., « Influence of latex binder viscoelastic properties on high temperature calendering runnability », Coating and graphic arts conference and trade fair, p.11, Orlando, USA, Mai 2002

[**Cepi, 2005**] : Confederation of european paper industries, disponible sur internet : <URL : <http://www.cepi.org/Content/Default.asp?pageid=101>>, visité le 24 novembre 2007

[**Ceretti, 2003**] : Darque-Ceretti E., Felder E. « Adhésion et Adhérence », CNRS Edition, Paris, France, 2003

[**Chapman *et al.*, 1969**] : Chapman D.L.T., Peel J.D., « Calendering Processes and the Compressibility of Paper (Part 1) », Paper Technology, vol.10, n°2, pp.116-124, 1969

[**Colley *et al.*, 1972**] : Colley J., Peel J.D., « Calendering Processes and the Compressibility of Paper (Part 2) », Paper Technology, vol.13, pp.350-357, 1972

[**Crotogino, 1980**] : Crotogino R.H., « Towards a Comprehensive Calendering Equation », Transaction of the Technical Section, Pulp and Paper Canada, vol.6, n°4, pp.TR89-TR94, 1980

[**CTP, 2004**] : Compte rendu du Programme Général de Recherche 2004 du CTP, « Scale up procedure between CTP's high speed lab calender and commercial calenders », CR n°4463, p.96, 2004

[Ferry, 1961] : Ferry J.P., « Viscoelastic Properties of Polymers », J. Wiley & Sons Inc., p.482, New York, USA, 1961

[Feygin, 1999] : Feygin V.B., « Modeling Paper Strain in a Calender Nip », TAPPI Journal, vol.82, n°8, pp.183-188, 1999

[Guérin, 2000] : Guérin D., « Étude du calandrage des papiers LWC pour impression en héliogravure », Thèse, Laboratoire génie des procédés papetiers, INPG, p.228, Grenoble, France, Juin 2000

[Guérin *et al.*, 2005] : Guérin D., Morin V., Chaussy D., Tourette E., Darque-Ceretti E., Felder E., « Influence of paper on calender nip pressure distribution »; 22nd PTS Coating Symposium, Baden Baden, Allemagne, Septembre 2005

[Gullichsen *et al.*, 1999] : Gullichsen J., Paulapuro H., Lehtinen E., « Papermaking science and technology 11. Pigment coating and surface sizing of paper », published by Fapet, Finnish Paper Engineers Association, TAPPI, pp.810, Helsinki, Finland, 1999

[Heeschen *et al.*, 2004] : Heeschen B., Carlsson R., Wan G., Mallard C., « On-line measurement of calender roll deposits », Coating and graphic arts conference and exhibit, Baltimore, USA, Mai 2004

[Hestmo *et al.*, 2000] : Hestmo R H., Lamvik M., « Simulation of calendering mechanics », The Nordic conference on paper calendering, paper 1, p.15, Trondheim, Norway, 19-20 June 2000

[Hiorns *et al.*, 1998] : Hiorns A.G., Elton N.J., Coggon L., Parsons D.J., « Analysis of Differences in Coating Structure Induced Through Variable Calendering Condition », 1998 TAPPI Coating Papermakers Conference Proceedings, TAPPI Press, pp.583-602, Atlanta, USA, 1998

[Hovda *et al.*, 1999] : Hovda E., Irgens F., « Non-linear modeling of paper in a hard-nip calender », 1999 Finishing and Converting Conference and Trade Fair, pp.153-158, Memphis, USA, 3-7 October 1999

[Hovda *et al.*, 2000] : Hovda E, Irgens F, « Non-linear thermo-mechanical modeling of paper », The Nordic conference on paper calendering, paper 2, pp.11, Trondheim, Norway, 19-20 June 2000

[Hovda, 2001] : Hovda E., « Thermo-mechanical modeling of paper compression in a calender nip », Doktor ingenioravhandling 2001:103, Norwegian University of Science and Technology, pp.104, Trondheim, Norway, November 2001

[Hovda *et al.*, 2004] : Hovda E., Irgens F., « Thermomechanical modeling of paper compression in a calender nip » (abstract only), 2004 Progress in paper physics seminar : proceedings, Edited by Gregersen O W, pp.186-188, Trondheim, Norway, 21-24 June 2004

[Ionides et al., 1981] : Ionides G.N., Mitchell J.G., Curzon F.L., « A Theoretical Model of Paper Response to Compression », Pulp and Paper Canada, vol.82, n°3, pp.TR1-TR5, March 1981

[Jokio, 1999] : Jokio M., « Papermaking Part 3, Finishing », published by Fapet Oy, Helsinki, Finland, 1999

[Johnson, 1985] : Johnson K.L., « Contact in Mechanics », Cambridge University Press, p.450, New York, USA, 1985

[Kaelble, 1971] : Kaelble D.H., « Physical chemistry of adhesion », published by Wiley-Interscience, p.507, New York, USA, 1971

[Kan et al., 1996] : Kan C.S., Kim L.H., Lee D.I., Van Gilder R.L., « Viscoelastic Properties of Paper Coatings : Structure/Property Relationship to End Use Performance », 1996 TAPPI Coating Conference Proceedings, TAPPI Press, pp.49-60, Atlanta, USA, 1996

[Kendall, 1975] : Kendall K., « Rolling friction and adhesion between smooth solids », Wear, Volume 33, Issue 2, pp. 351-358, July 1975

[Kerekes, 1976] : Kerekes R.J., « Speed and Loading Effects in a Calender Nip », Transactions of the Technical Section, Pulp and Paper Canada, vol.2, n°3, pp.88-91, September 1976

[Lamminmäki et al., 2005] : Lamminmaki T., Forsstrom U., Tienari M., Saharinen E., Mikkila J., Koskelainen J., « Calendering of coated paper at high speeds and temperatures », Nordic Pulp and Paper Research Journal, vol.20, no. 3, pp.354-360, 2005

[Larsson et al., 2006] : Larsson M., Engstrom G., Vidal D., Zou X., « Compression of coating structures during calendering », 2006 TAPPI advanced coating fundamentals symposium, Session 6, pp.19, Turku, Finland, 8-10 February 2006

[Lif et al., 1997] : Lif J.O., Wikström M., Fellers C., Rigdahl M., « Deformation of Paper Structure During Calendering as Measured by Electronic Speckle Photography », Journal of Pulp and Paper Science, vol.23, n°10, pp.J481-J486, October 1997

[Lepoutre et al., 1978] : Lepoutre P., Means G., « Supercalendering and Coating Properties », TAPPI Journal, vol. 61, n°11, pp.85-87, November 1978

[Maugis, 2000] : Maugis D., « Contact adhesion and rupture of elastic solids », Edité par Springer Verlag, Berlin Heidelberg, Allemagne, 2000

[Meinecke, 1985] : Meinecke A., « Working with the machine calender », Wochenblatt für Papierfabrikation, vol. 113, n°22, pp.858-862, November 1985

[Moreau, 1994] : Moreau S., « Structure des couches pigmentaires, étude de leur séchage », Thèse, Laboratoire génie des procédés papetiers, INPG, p.284, Grenoble, France, Novembre 1994

[Mikkilä et al., 2002] : Mikkila J., Jarvinen H., Starck P., Lahelin M., Lofgren B., « Deformation of coating layer in calendering », Wochenblatt für Papierfabrikation, vol.130, n°20, pp.1328-1332, October 2002

[Oliver et al., 1992] : Oliver W.C., Pharr G.M., « An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensor indentations experiments », Journal of Materials Research, Vol.7, n°6, June 1992

[Osaki et al., 1981] : Osaki S., Fujii Y., Kiichi T., « Z-Direction Compressive Properties of Paper », TAPPI, CPPA, Papermaking Conference, pp.125-127, Tokyo, Japan, 20-22 October 1981

[Pawlak et al., 1995] : Pawlak J.J., Keller D.S., « Relationships between the local apparent density, sheet roughness, and z-direction compressive characteristics », International Paper Physics conference, Victoria, Canada, pp.37-45, September 2003

[Peel, 1999] : Peel J.D., « Paper science and paper manufacture », published by Angus Wilde Publication Inc., Vancouver, Canada, 1999

[Pérez, 1996] : Pérez J.P., « Optique, fondements et applications », 5^{ème} édition, Edition Masson, p.602, Paris, France, 1996

[Petit-conil, 1995] : Petit-conil M., « Principes de préparation de pâtes chimiothermomécaniques de bois de résineux et de feuillus », Thèse, Laboratoire génie des procédés papetiers, INPG, p.381, Grenoble, France, Avril 1995

[Pfeiffer, 1970] : Pfeiffer J.D., « The finishing action of a supercalendering nip », TAPPI Finishing Conference, Portland, USA, 1970

[Pfeiffer, 1992] : Pfeiffer J.D., « Shear stress and replication in calendering », TAPPI Finishing and Converting Conference, TAPPI Press, pp.29-36, Atlanta, USA, 1992

[Popil, 1989] : Popil R.E., « The Calendering Creep Equation – a Physical Model », Fundamentals of Papermaking, Transactions of the 9th Fundamental Research Symposium, pp.1077-1101, Cambridge, United Kingdom, September 1989

[Rättö, 1998] : Rättö P., « Platen Press and Calendering Studies on Paper – A Model to Estimate Deformation in the Thickness Direction », Licentiate Thesis, Royal Institute of Technology, p.44, Stockholm, Sweden, 1998

[Rättö *et al.*, 1998] : Rättö P., Rigdahl M., « The deformation behaviour in the thickness direction of paper subjected to a short pressure pulse », *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, vol. 13, n°3, pp.180-185, September 1998

[Rättö *et al.*, 2001] : Rättö P., Rigdahl M., « The influence of temperature on the compression behaviour of paper in the thickness direction », *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, vol. 16, n°3, pp.178-182, 2001

[Robertson, 1998] : Robertson R.A., « Flexible High Speed Calendering of High Quality Coated Papers », 1998 TAPPI Coating/Papermakers Conference Proceedings, TAPPI Press, pp.941-955, Atlanta, USA, 1998

[Rodal, 1989] : Rodal J.J.A., « Soft-nip calendering of paper and paperboard », *TAPPI Journal*, vol.72, n°5, pp.177-186, Mai 1989

[Rodal, 1993-a] : Rodal J.J.A., « Exploring volume change, angular distortion in a calendering nip », *Pulp & Paper*, vol.57, n°10, pp.47-49, 52-54, October 1993

[Rodal, 1993-b] : Rodal J.J.A., « Paper deformation in a calendering nip », 1993 Finishing and Converting Conference, pp.321-349, New Orleans, USA, October 1993

[Salmen *et al.*, 1977] : Salmen N.L., Back E.L., « The influence of water on the glass transition temperature of cellulose », *Fibre-Water Interactions in papermaking*, Vol.2, Transactions of the Symposium held at Oxford, United Kingdom, BPBIF, September 1977

[Tabor, 1951] : Tabor D., « The hardness of metals », published by Clarendon Press, Oxford, United-Kingdom, 1951

[Tabor, 1955] : Tabor D., « The mechanism of rolling friction : the elastic range », *Proceedings, Royal Society*, A229, pp.198-220, 1955

[Tourette, 2007] : Tourette E., Darque-Ceretti E., Felder E., Guérin D., « Etude par simulation expérimentale du comportement mécanique du papier au cours du calandrage », *ATIP*, vol.61, n°4, pp.6-18, Octobre 2007

[Vallette *et al.*, 1989] : Vallette P., de Choudens C., « Le bois, la pâte, le papier »; 2^{ème} édition, Centre Technique du Papier, p.192, Grenoble, France, 1989

[Vreeland *et al.*, 1989] : Vreeland J.H., Jewett K.B., Ellis E.R., « Substrata Thermal Moulding, a Breakthrough in the Understanding and Practice of the Hot Calendering of Paper », 1989 TAPPI Coating Conference Proceedings, TAPPI Press, pp.179-195, Atlanta, USA, 1989

[Vyorykka *et al.*, 2006] : Vyorykka J., Fogden A., Daicic J., Ernstsson M., Jaaskelainen A-S., « Characterization of paper coatings : review and future possibilities », 2006 TAPPI

advanced coating fundamentals symposium, Session 3, p.26, Turku, Finland, 8-10 February 2006

[Wikström *et al.*, 1997] : Wikström M., Nylund T., Rigdahl M, « Calendering of Coated Paper and Board in an Extended Soft Nip », Nordic Pulp and Paper Research Journal, vol.12, n°4, pp.289-298, 1997

[Wikström *et al.*, 1999] : Wikström M., Mäkelä P., Rigdahl M, « Influence of Temperature and Type of Coating Latex on the Out-of-Plane Compression Behaviour of Coating Layers », 1999 TAPPI Advanced Coating Fundamental Symposium Proceedings, TAPPI Press, pp.201-212, 1999

[Wikström *et al.*, 2002] : Wikstrom M., Bouveng M., Rigdahl M., Hiorns A.G., « Impact of high temperature and soft nip calendering on the pore structure of the coating layer », Nordic Pulp and Paper Research Journal, vol.17, n°2, pp.147-152, 2002

[Zakaib *et al.*, 1998] : Zakaib S.M., Heaven E.M., Vyse R., « Paper Quality Improvements on Conventional Calenders by Hot Calendering with Tandem Calcoils », Pulp and Paper Canada, vol.99, n°5, pp.57-62, 1998

Glossaire des termes papetiers

BRILLANT : Taux de réflexion d'un rayon lumineux sous une certaine incidence sur la surface d'un papier ou d'un carton.

CALANDRAGE : Opération effectuée au moyen d'une calandre sur le papier séché au moins partiellement, et destiné à en améliorer l'état de surface. Cette opération permet, également, dans une certaine mesure, de régulariser l'épaisseur du matériau. NF Q 01-005.

CHARGES : Matières non fibreuses, généralement d'origines minérales, incorporées dans la pâte au cours de la fabrication du papier. NF Q 01-005.

CONDITIONNEMENT : Opération qui consiste à amener le papier ou le carton à un état d'humidité et de température en équilibre avec une atmosphère ambiante spécifiée. NF Q 01-005. Les conditionnements normalisés utilisés pour les papiers sont 23°C et 50 % HR (le plus courant, normé ISO), 20°C et 65 % HR (peu usité), 27°C et 65 % HR (toléré).NF Q 03-010.

CÔTÉ CONDUCTEUR : Coté opposé au coté transmission d'une machine à papier ou d'une calandre.

CÔTÉ FEUTRE : Face d'une feuille de papier opposée à la face toile. NF Q 01-005. Cette dénomination ne s'applique pas pour les machines double-toiles.

CÔTÉ TOILE : Face d'une feuille de papier qui a été en contact avec la toile de la machine à papier. NF Q 01-005.

COTÉ TRANSMISSION : Coté d'une machine à papier ou d'une calandre où sont installées les transmissions des différents rouleaux.

CTMP : (Chemical Thermo Mechanical Pulp) : Pâte de type TMP ou l'imprégnation se fait avec des réactifs chimiques.

DOUCHE VAPEUR : Procédé permettant d'appliquer de la vapeur d'eau sur la feuille de papier avant le nip.

ÉGOUTTABILITÉ : C'est la vitesse à laquelle l'eau peut être extraite d'une suspension aqueuse de pâte filtrée à travers une toile et le matelas fibreux en formation. Généralement mesuré en degré SR (cf définition °SR)

ÉPAIR : Aspect de la structure de la feuille de papier observée en lumière diffuse. (NF Q 01-005). Ce terme désigne la répartition des fibres dans le plan de la feuille. On parle d'épair nuageux pour définir une feuille présentant des variations de masse fibreuse dans le plan importantes. Cette grandeur sert à qualifier la qualité de la formation de la feuille.

FLOCS : Amas de fibres dans une feuille de papier.

FORMEUR : Unité de formation de la feuille. Regroupe l'ensemble des outils nécessaires à la formation d'un matelas fibreux à partir d'une suspension diluée de fibres.

GRAMMAGE : Masse de papier rapportée à une surface unitaire en g/m². NF Q 01-005 et NF Q 03-019.

HUMIDITÉ : Quantité d'eau contenue dans un matériau. En pratique, elle est considérée comme le rapport entre la perte de masse d'une éprouvette desséchée suivant la méthode normalisée et sa masse au moment de l'échantillonnage, rapport normalement exprimé en pourcentage. NF Q 01-005 et NF Q 03-003. Cette humidité est parfois appelée humidité en l'état pour la différencier de l'humidité absolue (quantité d'eau par rapport à la masse sèche de papier).

HR, HUMIDITÉ RELATIVE : Rapport exprimé en % de la teneur effective de l'air en vapeur d'eau à la teneur de l'air en vapeur d'eau à la saturation, dans les mêmes conditions de pression et de température.

LAIZE : Largeur de la bande de papier.

MACHINABILITÉ : Facilité avec laquelle du papier peut être fabriqué, couché ou imprimé.

MAIN : Volume massique du papier exprimé en cm³/g.

NIP : Zone de pincement entre deux rouleaux.

PAPIER AVEC BOIS : D'après la norme qui différencie les papiers avec peu de bois, avec bois et avec beaucoup de bois, il s'agit d'un papier contenant 30 à 60 % de pâte chimique et 70 à 40 % de pâte mécanique, thermomécanique ou mi-chimique. NF Q 01-007. Mais généralement ce terme est employé pour désigner les trois types de papier cités ci-avant, c'est à dire un papier contenant plus de 5% de pâte mécanique, thermomécanique ou mi-chimique.

PAPIER JOURNAL : Papier destiné à l'impression des journaux, papier non couché contenant essentiellement de la pâte thermomécanique ou désencrée contenant une faible quantité de charges.

PAPIER LWC : (Light Weight Coated) papier couché mince. Papier de grammage inférieur ou égal à 72 g/m² et dont la masse de couche par face est inférieure à 10 g/m². NF Q 26-001.

PAPIER PURE CELLULOSE : Papier avec 100 % de pâte chimique. NF Q 01-007.

PAPIER SANS BOIS : Papier avec moins de 5 % de pâte mécanique, thermomécanique ou mi-chimique. NF Q 01-007.

PAPIER SC : (SuperCalendered). Papier non couché, avec bois, fortement chargé et supercalandré.

PARTS : Pour le calcul des formulations de sauces de couchage, les parts représentent les quantités de matière en masse sèche utilisées. Par convention, le nombre de parts total des pigments est toujours égal à 100.

PÂTE AU BISULFITE : Pâte chimique dont la cuisson se fait dans une liqueur de bisulfite.

PÂTE CHIMIQUE : Pâte obtenue en éliminant de la matière fibreuse par un traitement chimique, par exemple la cuisson, une très grande proportion de ses composants non cellulosiques ; un traitement mécanique ultérieur n'est pas nécessaire pour disperser les fibres. NF Q 01-007.

PÂTE KRAFT : Pâte chimique dont la cuisson se fait dans une liqueur contenant de la soude caustique et des sulfures de sodium.

PÂTE MÉCANIQUE : Pâte à papier obtenue à partir de diverses matières premières, essentiellement bois, par des moyens entièrement mécaniques. NF Q 01-007.

PÂTE MI-CHIMIQUE : Pâte dont la délignification est seulement partielle

PPS : (Parker Print Surf) appareil de mesure de la rugosité de surface d'un papier. Les résultats sont donnés en profondeur de creux (en μm) équivalent.

RAFFINAGE : Opération qui permet de fibriller, d'hydrater et de couper les fibres afin de développer les propriétés ultérieures de la feuille consolidée.

SAUCE DE COUCHAGE : Le sauce de couchage, ou bain d'enduction, est une dispersion de pigments, de liants et d'additifs dans de l'eau. NF Q 01-005.

SENS MARCHE : Sens du papier correspondant à celui du déplacement de la bande sur la machine. NF Q 01-005.

SENS TRAVERS : Dans le plan du papier, sens perpendiculaire au sens marche. NF Q 01-005.

°SR : Indice Schopper-Riegler de détermination de l'égouttabilité d'une pâte. La valeur de cet indice dépend de l'état de surface et du gonflement des fibres et est utile pour évaluer l'importance des traitements mécaniques subis par la pâte. Les degrés SR sont compris entre 0 et 100 °SR et considérés fiables entre 10 et 90°SR. NF Q 50-003.

TMP : (Thermo Mechanical Pulp) Pâte thermomécanique. Pâte obtenue par imprégnation de bois à l'eau chaude, puis étuvage sous pression et finalement traitement mécanique à chaud et sous pression pour séparer les fibres. NF Q 01-007.

Nomenclature

Les principales notations utilisées dans le manuscrit sont les suivantes :

Lettres latines

a	Rayon de la zone d'impact
a_M	Rayon maximal de la zone d'impact
a_f	Rayon final de la zone d'impact
e	Epaisseur du papier
e_{ini}	Epaisseur du papier avant calandrage
e_{fin}	Epaisseur du papier après calandrage
E	Module d'élasticité (module d'Young)
E_{eq}	Module équivalent
F	Force
F_M	Force maximale
F_m	Force mesurée
h	Pénétration de la bille dans le papier
H_1	Hauteur de chute
k	Raideur du capteur de piézo-électrique
l_{nip}	Largeur du nip d'un calandre
m	Masse de la bille
M	Masse de l'enclume
m^*	Paramètre de sensibilité à la vitesse
P	Pression moyenne
P_{lin}	Force normale linéique
$p(x)$	Pression à la position x
R	Rayon d'un rouleau d'une calandre ou d'un cylindre ou d'une bille
R_{eq}	Rayon équivalent
t	Temps
t_M	Temps maximal
T_g	Température de transition vitreuse
V	Vitesse de calandrage
V_0	Vitesse initiale d'impact

Lettres grecques

δ	Pénétration de la bille au centre de l'impact
$\tan\delta$	Rapport entre le module visqueux et le module élastique
ε	Déformation
ε_n	Déformation dans le nip
ε_p	Déformation plastique (permanente)
ε_e	Déformation élastique
$\dot{\varepsilon}$	Vitesse de déformation

ν	Coefficient de Poisson
θ	Température du papier
σ_0	Contrainte d'écoulement
ρ	Masse volumique
ρ_0	Masse volumique
σ	Contrainte de Cauchy
σ_K	Contrainte de Kirchoff

Annexes

Annexe 1 : Tableaux récapitulatifs de tous les papiers utilisés

Annexe 2 : Techniques de mesure des caractéristiques papetières

Annexe 3 : Etude de l'influence du conditionnement et de la température de préchauffage sur le comportement mécanique du papier TMP et du papier Kraft – Essai de calandrage

Annexe 4 : Etude de l'influence de la température du rouleau métallique sur le comportement mécanique du papier Kraft – Essai de calandrage

Annexe 5 : Etude de l'influence de la pâte sur le comportement mécanique du papier – Essai de calandrage

Annexe 6 : Résultats des essais de compression quasi-statique sur les papiers : pré-couché (106 μm), papier F (120 μm) et papier G (391 μm)

Annexe 7 : Mesure de rugosité des papiers calandrés avec le rouleau ayant différentes rugosités à des températures de 90, 130 et 180°C

Annexe 8 : Temps de contact des essais de chute de bille et de calandrage

Annexe 1 : Tableaux récapitulatifs de tous les papiers utilisés

Influence du type de pâte

Papier	TMP	Kraft	TMP + Kraft
Epaisseur (μm)	163	126	135
Grammage (g/m^2)	81,9	78,5	77,9
Masse volumique ρ_0 (kg/m^3)	503	621	578
Porosité (%)	67,3	59,7	62,5
Type de pâte	mécanique	chimique	mélange

Influence de la teneur en Charges

Papier	TMP 0%	TMP 10,4%	TMP 23,7%
Epaisseur (μm)	163	158	144
Grammage (g/m^2)	81.9	79.0	77.1
Masse volumique ρ_0 (kg/m^3)	503	500	535
Porosité (%)	67,3	69,7	70,6
Taux de charge (%)	0	10,4	23,7

Influence de la densité des papiers

Papier	TMP 0 Nip	TMP 1 Nip	TMP 8 Nip
Epaisseur (μm)	163	93	90
Masse volumique ρ_0 (kg/m^3)	503	880	910
Porosité (%)	67,3	42,9	40,9
Passage dans	0 nip	1 nip	8 nip

Papier G : non couché, élaboré à partir d'une pâte CTMP et d'épaisseur 391 μm

Papier étiquette : papier couché une face (8 g/m^2), de grammage 50 g/m^2 et d'épaisseur non calandré 57 μm

Influence de la couche

Papier	Pré-couché	A	B	C	D	E	F	
Epaisseur (μm)	106	110	117	128	115	117	120	
Grammage (g/m^2)	85	102,4	116,8	135,2	116,9	116,9	135	
Masse volumique ρ_0 (kg/m^3)	802	931	998	1056	1017	999	1125	
Poids de couche ($\text{g}/\text{m}^2/\text{face}$)	6	6 + 8	6 + 16	6 + 25	6 + 16	6 + 16	6 + 25	
Nature du liant		Latex 1	Latex 1	Latex 1	Latex 2	Latex 1	?	
Nombre de part de liant		10	10	10	10	20	?	
Procédé de couchage		Rouleau applicateur + lame raclante					Jet (jet flow) + lame lissante	
Dépose en 1 ou 2 fois		1					2	
Extrait sec (%)		≈ 68					≈ 71	

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

Annexe 2 : Techniques de mesure des caractéristiques papetières

1. - Mesure de l'épaisseur d'un papier

L'épaisseur d'un papier est mesurée à l'aide d'un micromètre. La feuille de papier est déposée contre un support plat puis une pression de 100 kPa est appliquée sur une zone circulaire de superficie 200 mm². Généralement, au bout de 2 à 5 secondes, l'épaisseur indiquée devient stable. Dix mesures sont réalisées afin d'avoir une épaisseur moyenne et un écart type. La norme ISO534 se réfère à la mesure d'épaisseur d'une feuille de papier.

2. - Mesure du brillant Gardner d'un papier

L'appareil Gardner envoie un rayon lumineux d'incidence 75° et récupère le rayon réfléchi dans la direction spéculaire. La longueur d'onde du rayon est de 0,55 µm. Afin de mesurer le brillant, on procède par comparaison : On étalonne l'appareil avec un objet de réflectance connue : une plaque de verre noir poli, d'indice de réfraction 1,54 est généralement utilisée. Pour un rayon d'incidence de 75°, cet étalon réfléchit environ 26% de la lumière incidente dans la direction spéculaire. L'appareil indique alors une valeur de brillant de 100%. Lorsqu'un échantillon de papier est placé sous l'appareil, le brillant est alors donné instantanément. A titre d'exemple, un échantillon qui réfléchit spéculairement 13% de la lumière incidente, aura un brillant de 50%. La surface d'analyse est d'environ 195 mm². Dix mesures sont généralement effectuées pour avoir un brillant moyen avec son écart type. Les normes ISO8254-1 et -2 correspondent aux mesures de brillant spéculaire.

3. - Mesure du lissé Bekk d'un papier

Le lissé Bekk est une méthode utilisée dans le milieu papetier pour mesurer la rugosité d'un papier. Elle repose sur un principe de fuite d'air. Le lissé Bekk est le temps nécessaire à l'écoulement d'un volume d'air de 10 cm³, sous une différence de pression de 0,5 bar entre une surface plane de l'éprouvette et une surface plane en verre et en forme d'anneau d'une superficie de 10 cm² (Figure 1). Le lissé Bekk dépend de la forme, du volume total et de la répartition des espaces de vide entre la surface de l'échantillon et un plan idéal théorique. Plus l'échantillon de papier est lisse, plus la valeur du lissé Bekk est importante. L'unité de mesure est en seconde. Dix mesures sont généralement effectuées pour avoir un lissé Bekk moyen avec son écart type. Un lissé Bekk de l'ordre de 10 à 20 s correspond à un papier très rugueux. La norme ISO5627 correspond à la détermination du lissé par la méthode Bekk.

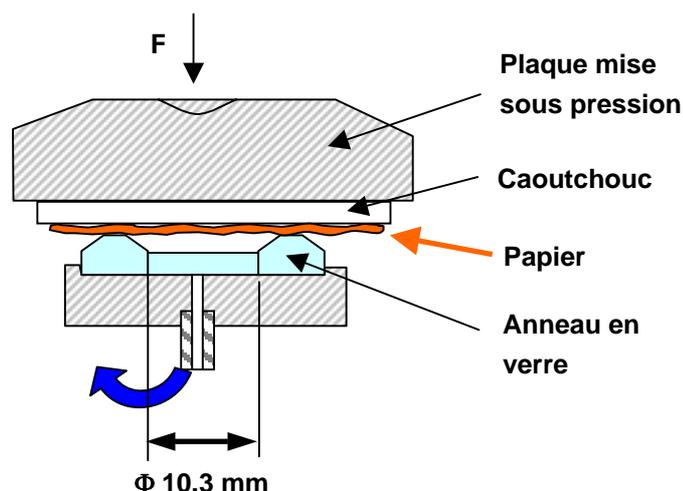


Figure 1 : Principe de la mesure du lissé Bekk

4. - Mesure de la rugosité Bendtsen d'un papier

La technique de mesure de la rugosité Bendtsen repose comme le lissé Bekk, sur un principe de fuite d'air. La rugosité Bendtsen est une mesure du débit d'air passant entre une tête de mesure circulaire plate et une feuille de papier sous une pression de 1,47 kPa. La surface de mesure est d'environ 780 mm² (Figure 2). Au bout de 5 secondes, le débitmètre donne une valeur d'air échappé qui s'exprime en millilitre par minute. Dix mesures sont généralement effectuées pour avoir une rugosité Bendtsen moyenne avec son écart type. Cette méthode est fiable pour des papiers qui sont plutôt rugueux, c'est à dire dans la gamme 30 à 1500 ml/min. La norme ISO8791-2 correspond à la détermination de la rugosité à partir de la méthode Bendtsen.

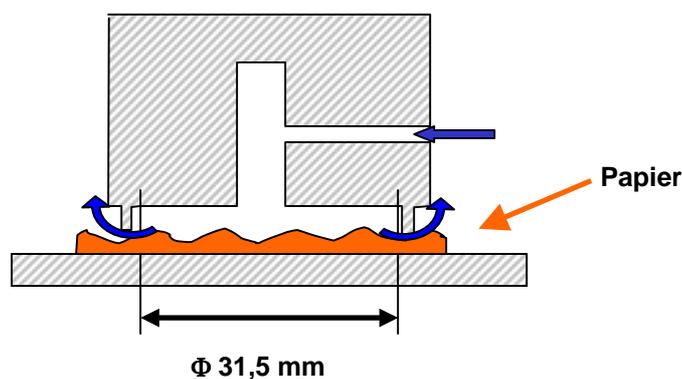


Figure 2 : Principe de mesure de la rugosité Bendtsen

5. - Mesure de l'épaisseur d'un papier

L'épaisseur d'un papier est caractérisé en regardant la lumière transmise à travers un échantillon. Un logiciel permet par la suite d'analyser les images et d'évaluer la répartition des fibres dans la feuille. La présence d'agrégat de fibres (flocs) peut alors être mise en évidence et quantifiée. La surface généralement observée est de 12 x 12 cm. La norme NF Q 01-005 se rapporte à la mesure de l'épaisseur.

Annexe 3 : Etude de l'influence du conditionnement et de la température de préchauffage sur le comportement mécanique du papier TMP et du papier Kraft – Essai de calandrage

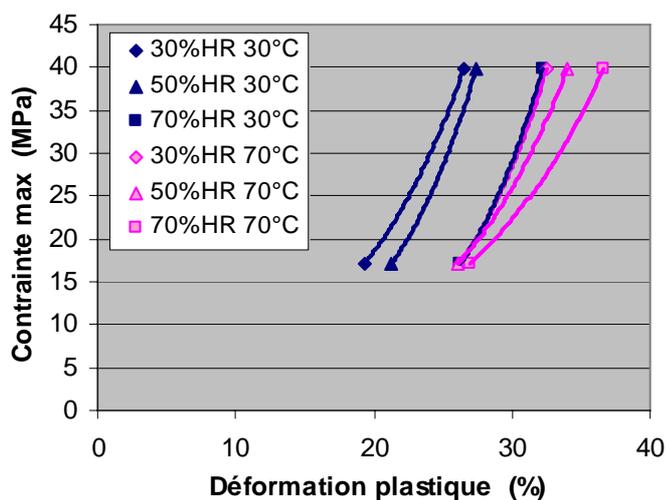


Figure 3 : Influence du conditionnement et du préchauffage du papier TMP calandré à une température de rouleau de 160°C sur le comportement mécanique

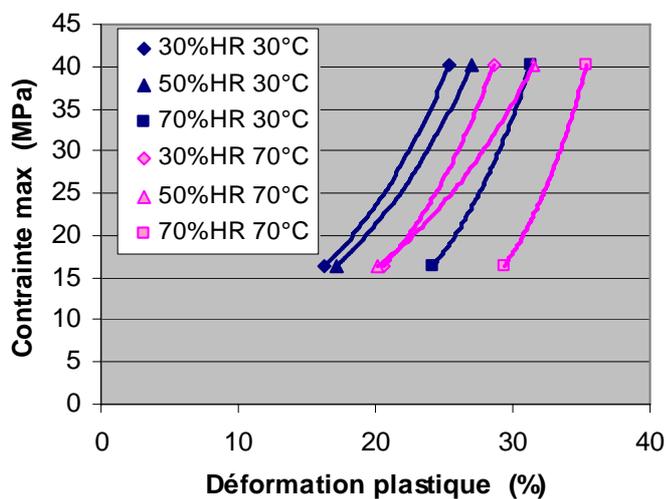


Figure 4 : Influence du conditionnement et du préchauffage du papier Kraft calandré à une température de rouleau de 100°C sur le comportement mécanique

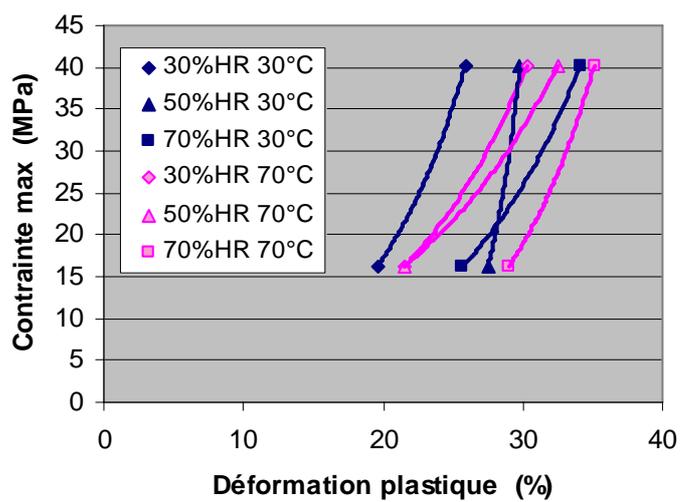


Figure 5 : Influence du conditionnement et du préchauffage du papier Kraft calandré à une température de rouleau de 160°C sur le comportement mécanique

Annexe 4 : Etude de l'influence de la température du rouleau métallique sur le comportement mécanique du papier Kraft – Essai de calandrage

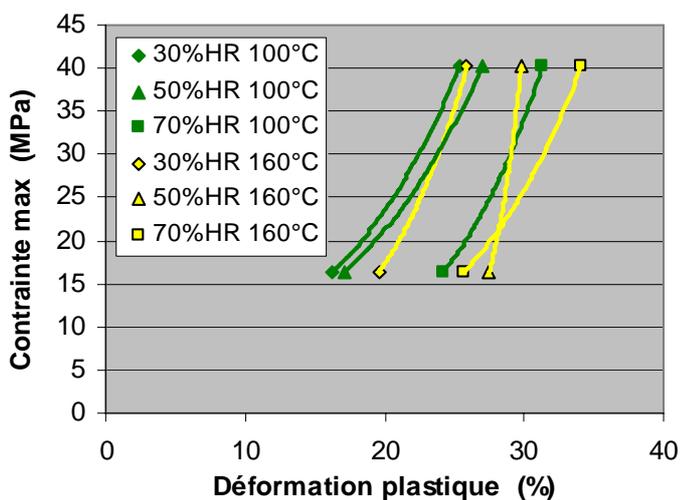


Figure 6 : Influence de la température du rouleau sur le comportement mécanique du papier Kraft à une température de feuille de 30°C et pour différentes humidités

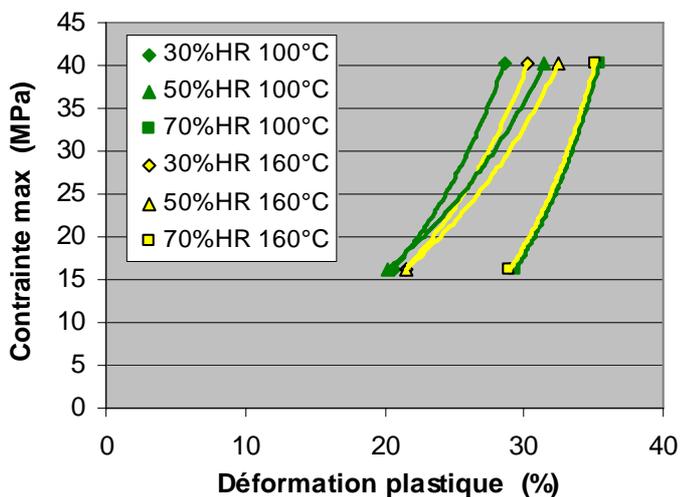


Figure 7 : Influence de la température du rouleau sur le comportement mécanique du papier Kraft à une température de feuille de 70°C et pour différentes humidités

Annexe 5 : Etude de l'influence de la pâte sur le comportement mécanique du papier – Essai de calandrage

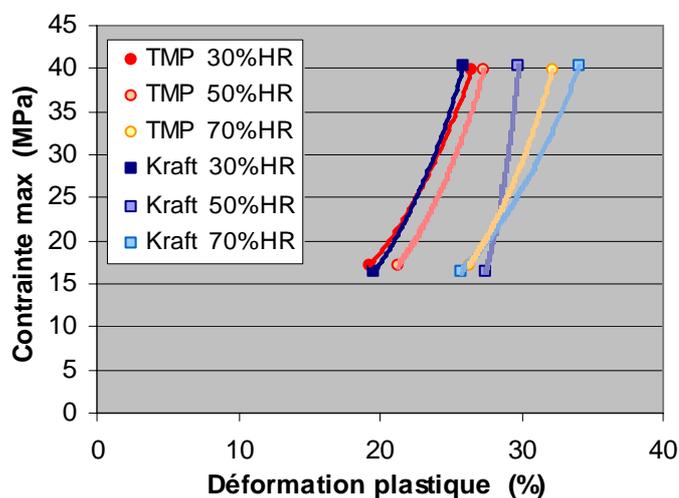


Figure 8 : Influence de la pâte sur le comportement mécanique du papier calandré à une température de rouleau de 160°C, pour une température de feuille de 30°C et différentes humidités

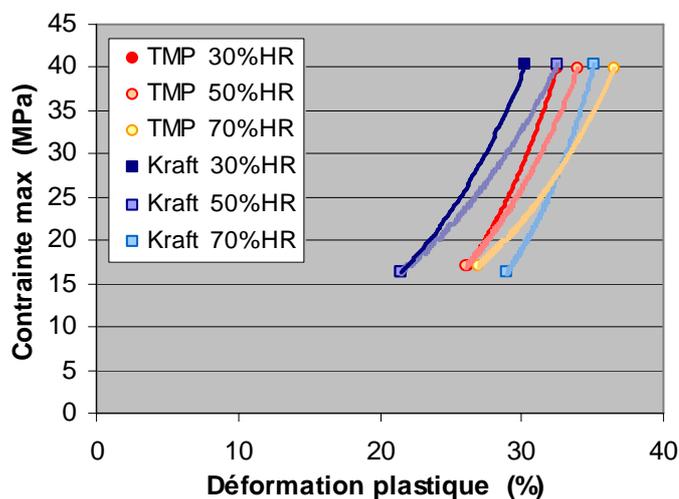


Figure 9 : Influence de la pâte sur le comportement mécanique du papier calandré à une température de rouleau de 160°C, pour une température de feuille de 70°C et différentes humidités

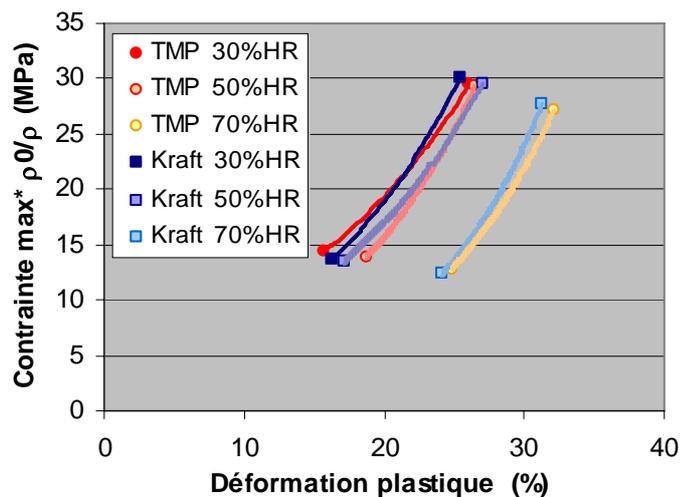


Figure 10 : Influence de la pâte sur le comportement mécanique du papier calandré à une température de rouleau de 100°C, pour une température de feuille de 30°C et différentes humidités – Prise en compte du rapport des masses volumiques

Annexe 6 : Résultats des essais de compression quasi-statique sur les papiers : pré-couché (106 μm), papier F (120 μm) et papier G (391 μm)

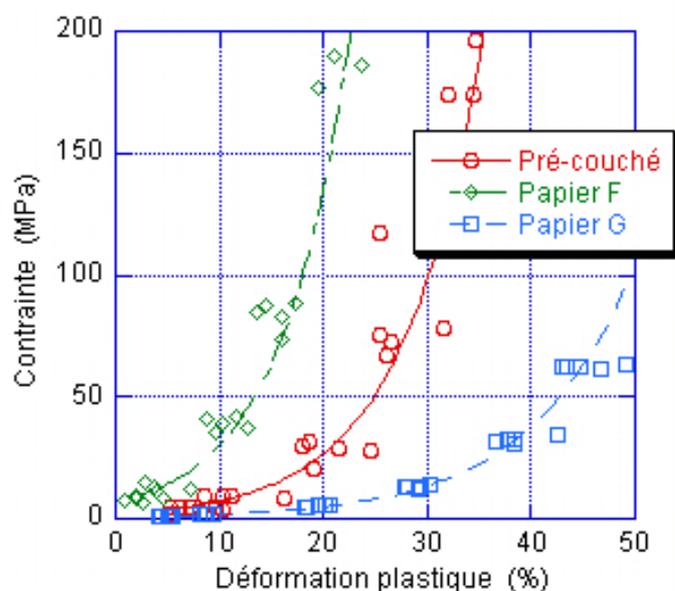


Figure 11 : Essai de compression quasi-statique sur une feuille ($H1=10\text{ cm}$ $M10\text{ mm}$) – Influence du papier sur la contrainte

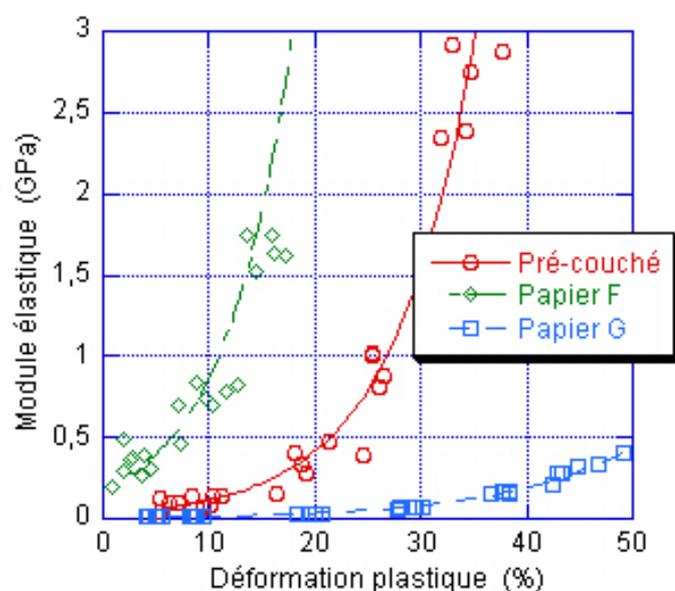


Figure 12 : Essai de compression quasi-statique sur une feuille ($H1=10\text{ cm}$ $M10\text{ mm}$) – Influence du papier sur le module

Annexe 7 : Mesure de rugosité des papiers calandrés avec le rouleau ayant différentes rugosités à des températures de 90, 130 et 180°C

Les rugosités moyennes ont été obtenues à partir du Topo3D en analysant trois surfaces pour chaque zone et chaque température.

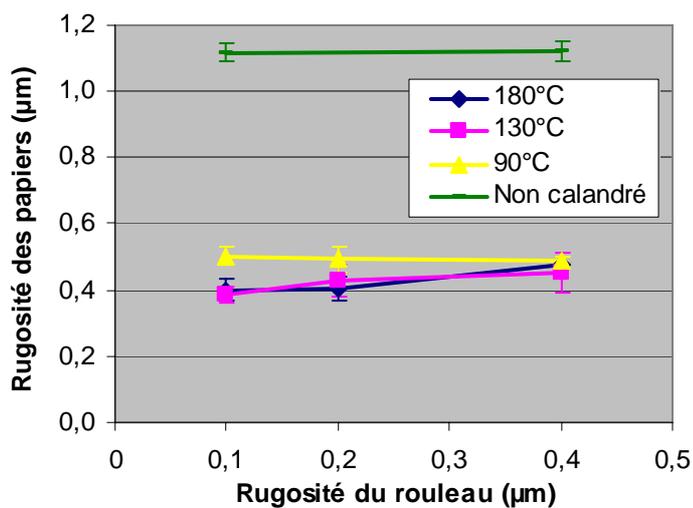


Figure 13 : Mesure de rugosité moyenne à partir du Topo3D en fonction de la rugosité du rouleau – Influence de la température du rouleau métallique – Charge linéique : 200 kN/m – Vitesse de calandrage : 800tr/min – Rouleau élastomère de dureté 91ShD – Température du papier : 30°C

Annexe 8 : Temps de contact des essais de chute de bille et de calandrage

Essai de chute de bille

Influence du type de pâte :

Bille V7,8 H1=10cm

Papier	Temps de contact (ms)	
	1 feuille	3 feuilles
TMP	0,12	0,27
TMP + Kraft	0,10	0,21
Kraft	0,09	0,19

Influence du taux de charge :

Bille V7,8 H1=10cm

Papier	Temps de contact (ms)	
	1 feuille	3 feuilles
TMP 0%	0,12	0,27
TMP 10%	0,12	0,27
TMP 24%	0,12	0,27

Influence de l'état de densification :

Bille M6 H1=10cm

Papier	Temps de contact (ms)	
	1 feuille	3 feuilles
TMP 0 Nip	0,12	0,32
TMP 1 Nip	0,07	
TMP 8 Nip	0,07	

Influence de la couche :

Bille M6,75 H1=10cm

Papier	Temps de contact (ms)	
	1 feuille	
Pré-couché	0,09	
Papier A	0,08	
Papier B	0,09	
Papier C	0,09	
Papier D	0,08	
Papier E	0,08	
Papier F	0,08	

Essai de calandrage

Charge linéique (kN/m)	Temps de contact (ms) pour une vitesse de 400tr/min						
	Pré-couché	Papier A	Papier B	Papier C	Papier D	Papier E	Papier F
50	1,15	0,87	0,93	0,96	0,93	0,84	0,90
100	1,26	1,07	1,07	1,10	1,10	1,04	0,96
150	1,32	1,18	1,18	1,18	1,18	1,15	1,15
200	1,38	1,24	1,21	1,24	1,26	1,24	1,24
250	1,43	1,29	1,32	1,32	1,32	1,29	1,32
300	1,49	1,38	1,35		1,38	1,29	1,35

Etude mécanique et physico-chimique du contact rouleau / papier lors du calandrage

Le calandrage consiste à faire passer, à grande vitesse, la feuille de papier entre au moins deux rouleaux, soumis à une force normale et chauffés, afin d'améliorer l'état de surface. Ce passage durant un temps inférieur à la milliseconde et sous une pression de quelques dizaines de MPa produit aussi une diminution de l'épaisseur du papier. Cette thèse étudie le comportement mécanique du papier dans un nip de calandre (zone d'emprise entre les deux rouleaux) et les interactions de surface rouleau / papier. Son objectif est de permettre une optimisation des conditions de calandrage. Différents papiers destinés à l'impression - écriture sont étudiés (couché, non couché).

Deux essais d'indentation sphérique de feuille de papier (chute de bille et compression quasi-statique) ont été développés et des essais de calandrage ont été réalisés. Les temps de sollicitation lors de l'essai de chute de bille sont comparables à ceux rencontrés dans un nip. L'analyse mécanique des essais permet d'établir des courbes contrainte / déformation et de suivre l'évolution du module d'élasticité « statique » avec la déformation plastique. Ces grandeurs mécaniques s'avèrent sensibles à la formulation et au conditionnement du papier, ainsi qu'au temps de sollicitation. Un modèle mécanique permet d'évaluer à partir des essais de compression quasi-statique, la largeur du nip dans des conditions statiques.

L'adhésion entre la surface des papiers et les rouleaux est étudiée à partir un essai de roulement sur un plan incliné et des essais de calandrage. Les essais de calandrage ont également permis de relier l'amélioration des caractéristiques de surface (brillant, lissé) à la réduction d'épaisseur du papier et de préciser comment l'état de surface du rouleau se transfère sur le papier.

Mots clés : calandrage, papier, comportement mécanique, essais d'indentation, adhésion rouleau / papier, propriétés de surface

Paper / roll contact in calenders : a mechanical and physico-chemical study

Calendering consists of running a sheet of paper at high pressure and speed (contact time less than 1 ms) between at least two heated rolls so as to improve the paper surface quality. However, this operation reduces paper thickness. Our study focused on the mechanical behaviour of paper in the nip and on the surface interactions between the paper and the rolls. Different grades of printing and writing paper were studied (coated, un-coated).

Two spherical indentation tests on paper samples were developed (falling ball and quasi-static compression) and calendering trials were performed. The contact time in the falling ball test is equivalent to that in calendering. The mechanical interpretation of these tests and trials allows us to obtain stress / strain curves and the evolution of « static » elastic modulus with the permanent deformation. The mechanical variables are influenced by the paper formulation, conditioning and time of solicitation. Using the quasi-static compression test, a model permits to evaluate the nip width in static conditions.

The adhesion between the paper surface and the rolls is studied with a rolling friction test and calendering trials. Calendering trials enable to link the improvement of paper surface properties (gloss, smoothness) to the thickness reduction and to specify how the roll surface roughness is transferred onto the paper.

Key words : calendering, paper, mechanical behaviour, indentation tests, paper / roll adhesion, surface properties