
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.

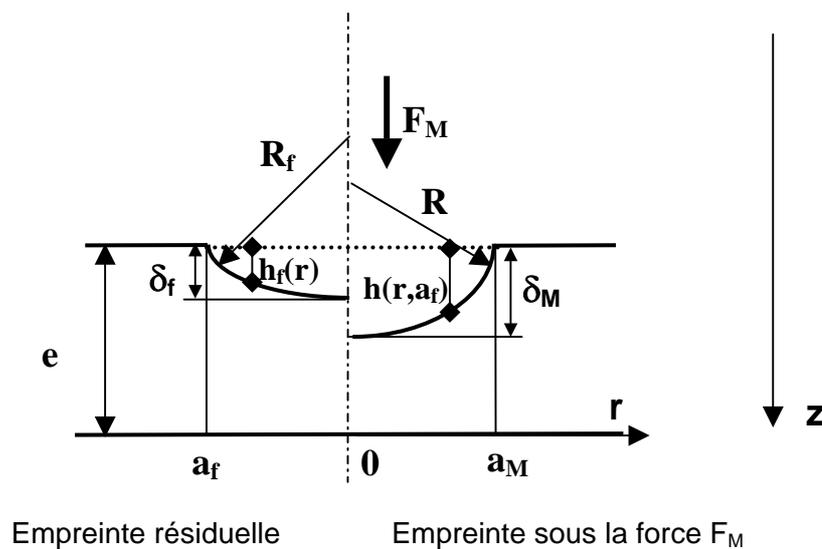


Figure 2. 1 : Schématisation de l'empreinte bille / papier sous une force maximale F_M et après contact

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 :

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

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 :

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

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 :

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

On a donc :

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

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 :

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

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 :

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

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 :

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

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 :

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

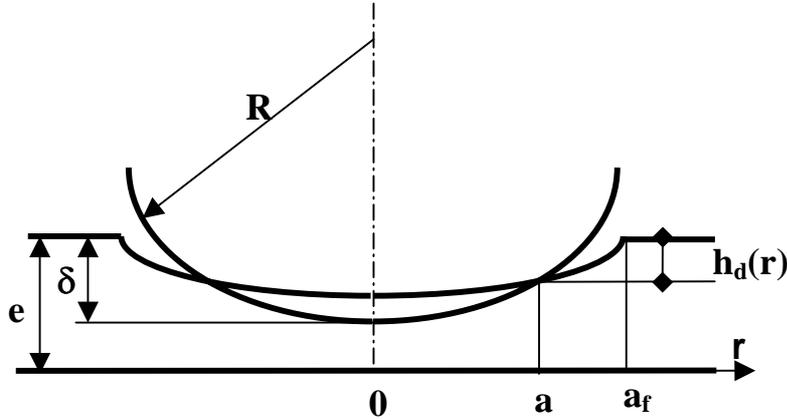


Figure 2. 2 : Schématisation de la décharge

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.

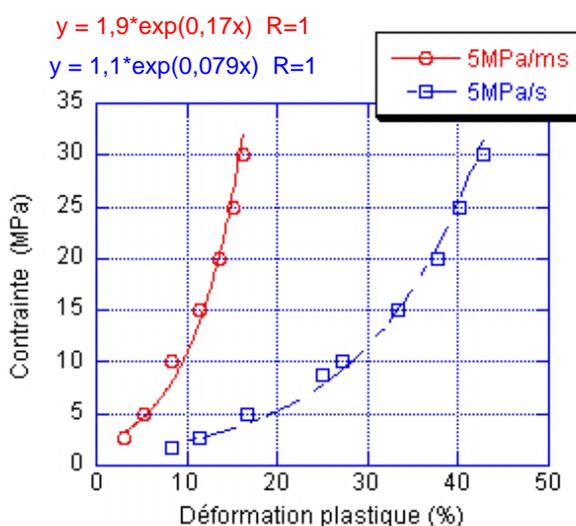


Figure 2. 3 : Détermination de la contrainte d'écoulement en fonction de la déformation plastique d'après les données de Feygin ([Feygin, 1999])

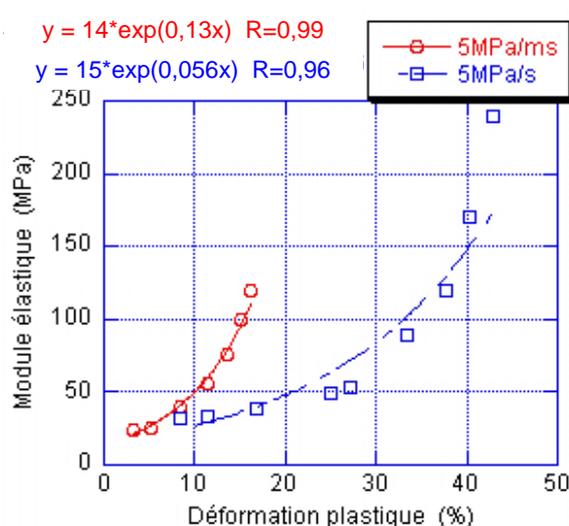


Figure 2. 4 : Détermination du module d'élasticité en fonction de la déformation plastique d'après les données de Feygin ([Feygin, 1999])

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.

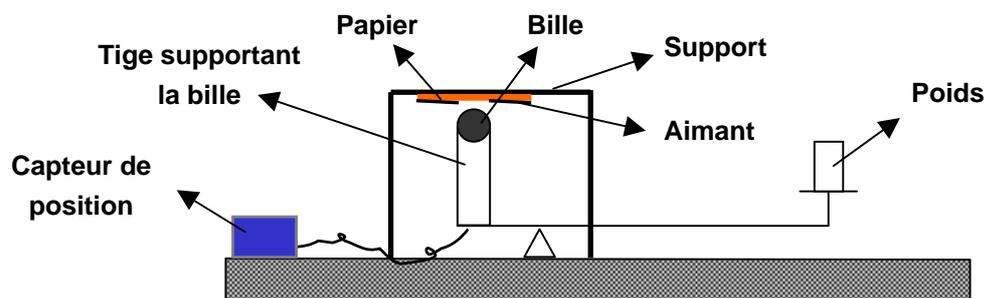


Figure 2. 5 : Schéma de l'essai de compression quasi-statique

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).

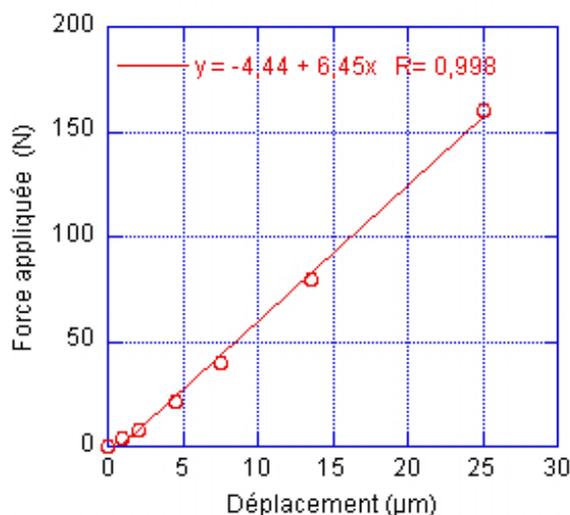


Figure 2. 6 : Courbe de cé dage du montage de l'essai de compression quasi-statique

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).

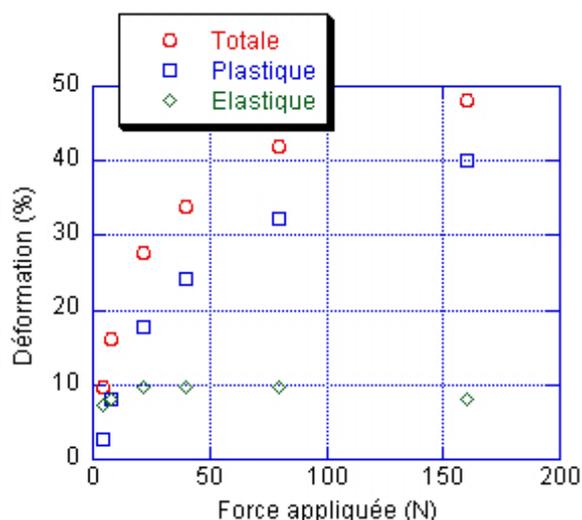


Figure 2. 7 : Essai de compression quasi-statique : Déformations d'un papier non couché (papier Kraft cf Tableau 2. 3) en fonction de la force appliquée – Bille métallique $R = 15$ mm

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.

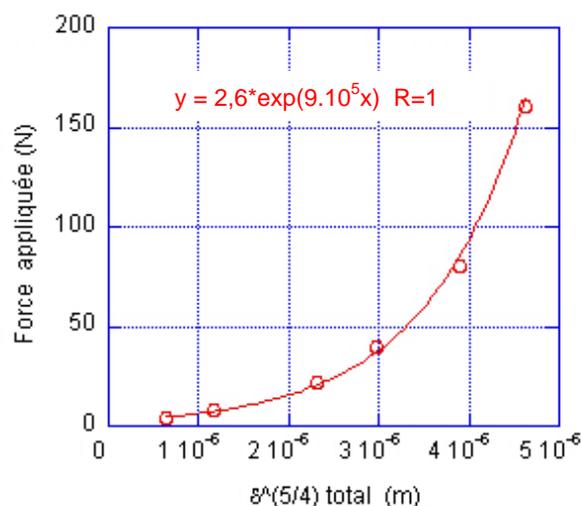


Figure 2. 8 : Courbe de la force en fonction de la pénétration portée à la puissance $n = 5/4$ – Papier Kraft (cf Tableau 2. 3) – Bille métallique $R = 15$ mm

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

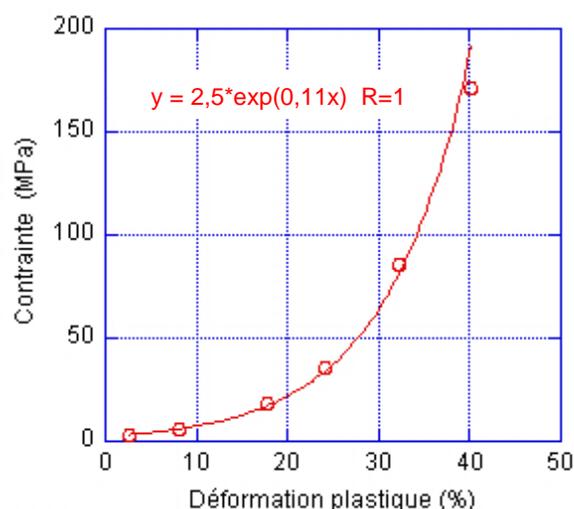


Figure 2. 9 : Contrainte en fonction de la déformation plastique (compression quasi-statique) – Papier Kraft (cf Tableau 2. 3) – Bille métallique $R = 15$ mm

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).

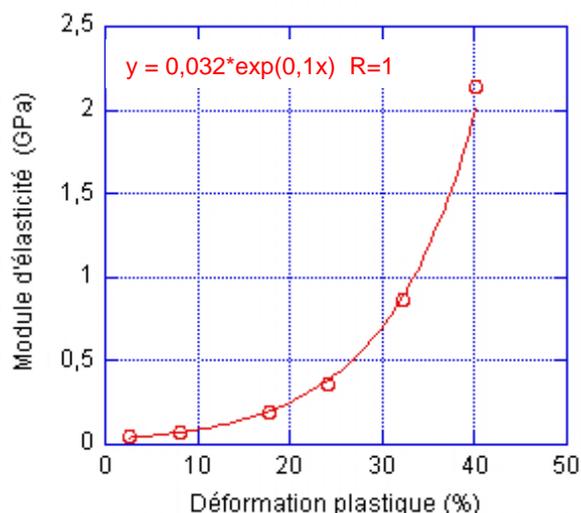


Figure 2. 10 : Module d'élasticité relaxé en fonction de la déformation plastique (compression quasi-statique) – Papier Kraft (cf Tableau 2. 3) – Bille métallique $R = 15\text{mm}$

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 $a \approx 0,9$ 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).

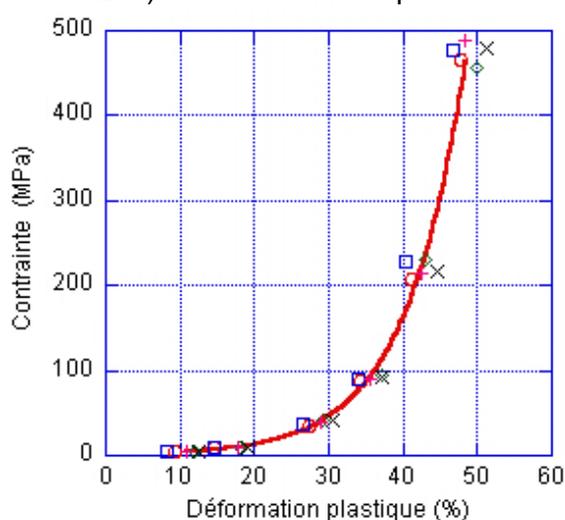


Figure 2. 11 : Essai de compression quasi-statique - Répétabilité de la contrainte

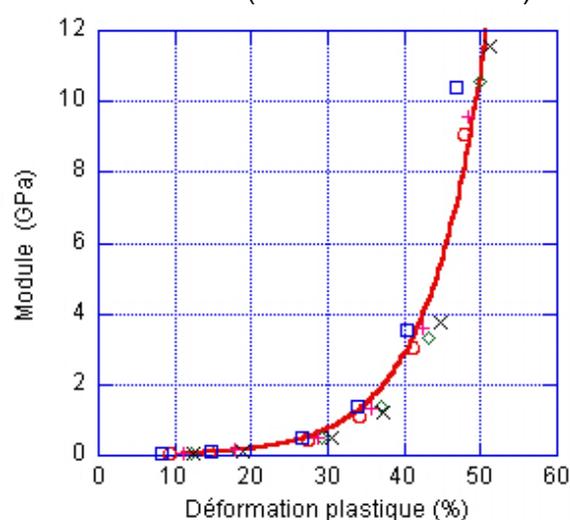


Figure 2. 12 : Essai de compression quasi-statique - Répétabilité du module

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.

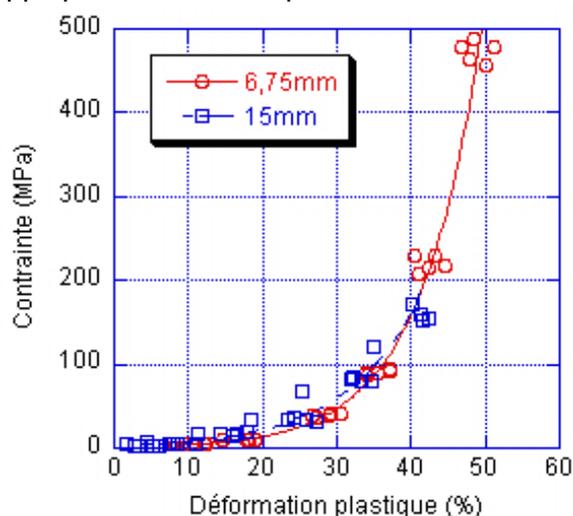


Figure 2. 13 : Influence du rayon de la bille sur la contrainte – Compression quasi-statique) – Papier Kraft (cf Tableau 2. 3)

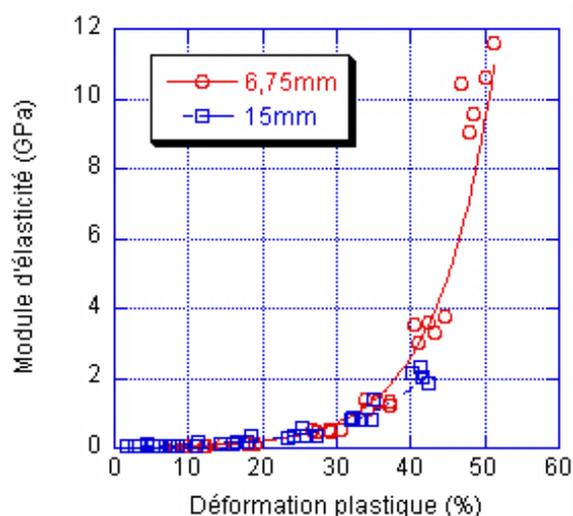


Figure 2. 14 : Influence du rayon de la bille sur le module – Compression quasi-statique) – Papier Kraft (cf Tableau 2. 3)

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.

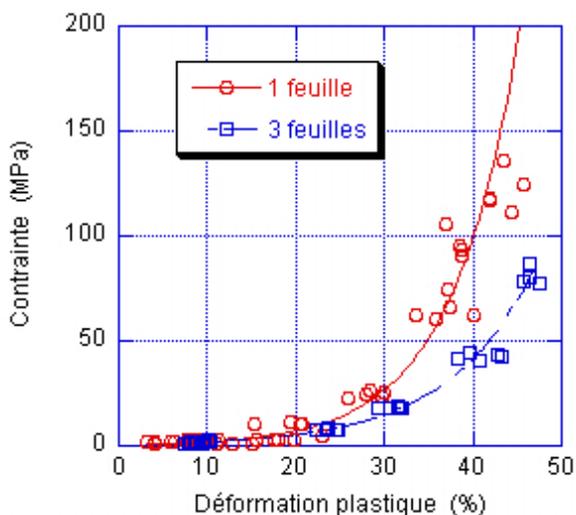


Figure 2. 15 : Influence du nombre de feuilles sur le comportement mécanique – Compression quasi-statique d'un papier non couché (Papier TMP cf Tableau 2. 3) – Bille métallique $R = 15\text{ mm}$

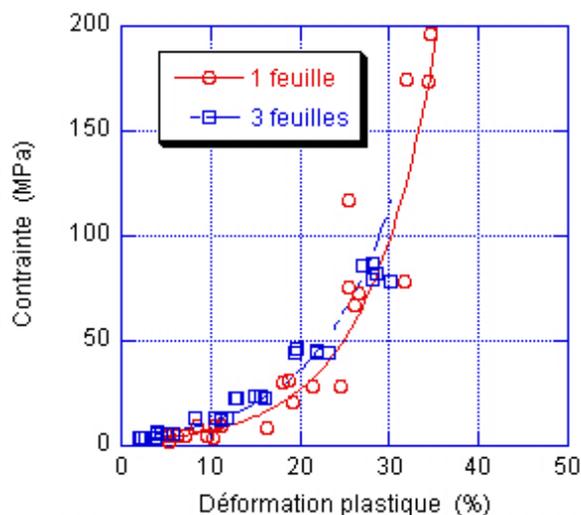


Figure 2. 16 : Influence du nombre de feuilles sur le comportement mécanique – Compression quasi-statique d'un papier pré-couché (cf Tableau 2. 6) – Bille métallique $R = 15\text{ mm}$

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).

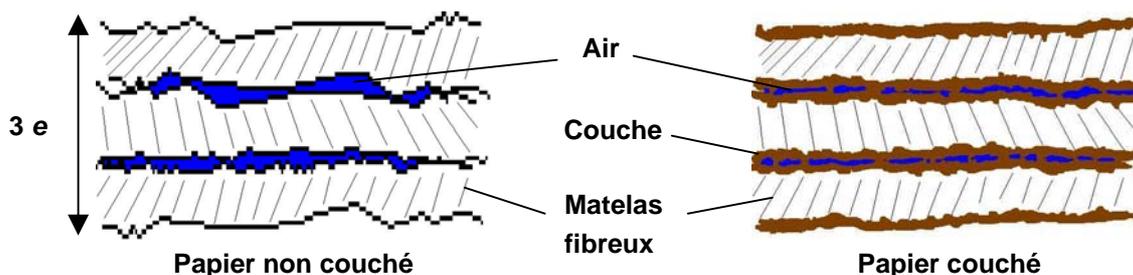


Figure 2. 17 : Schéma de la superposition de trois feuilles de papier

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).

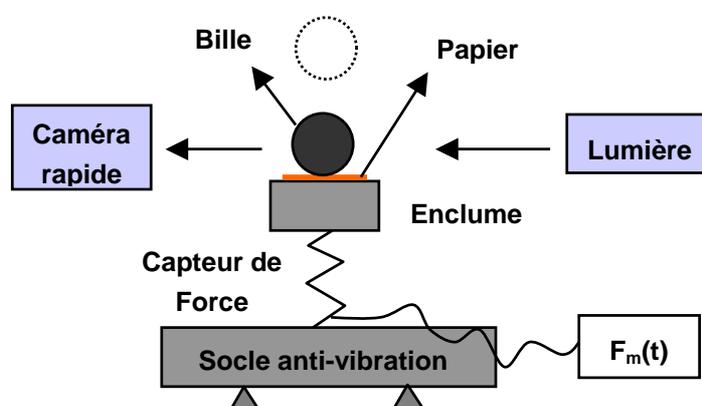


Figure 2. 18 : Montage de l'essai de chute de bille

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.

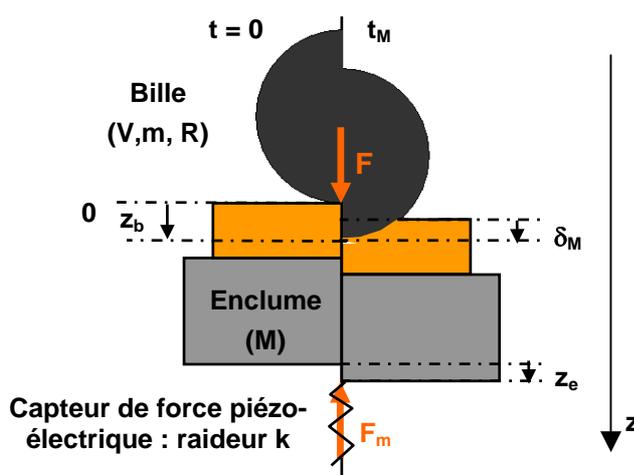


Figure 2. 19 : Schéma d'écrasement du papier lors de l'essai de chute de bille

- 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 :

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

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.

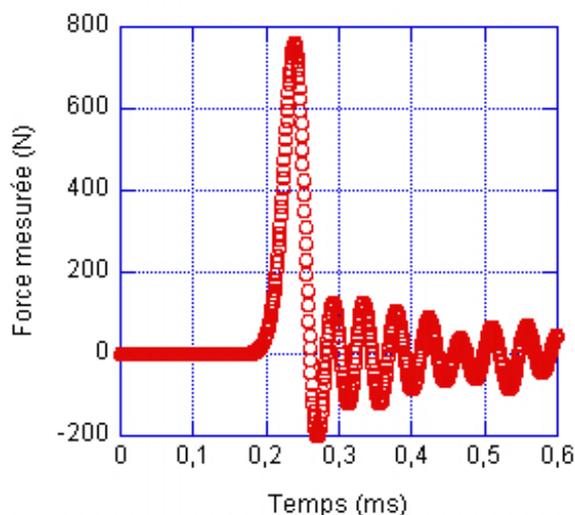


Figure 2. 20 : Force mesurée par le capteur de force en fonction du temps – Papier pré-couché (cf Tableau 2. 6) – Bille métallique $R = 6,75 \text{ mm}$ – Hauteur de chute $H_1 = 10 \text{ cm}$

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.

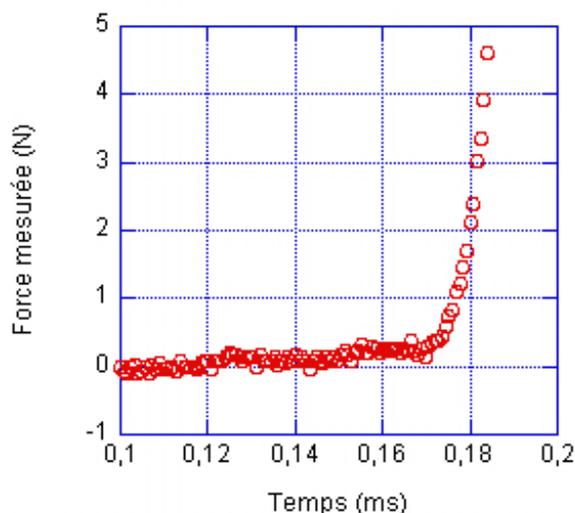


Figure 2. 21 : Début du pic de la force mesurée en fonction du temps (cf Figure 2. 20)

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.

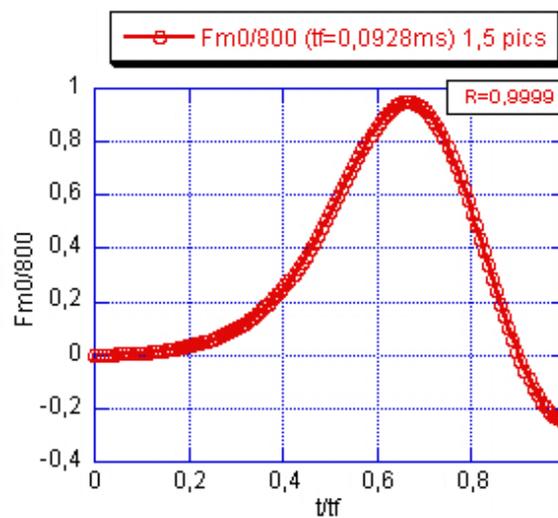


Figure 2. 22 : Régression polynomiale du pic de force durant l'impact – Papier pré-couché (cf Tableau 2. 6) – Bille métallique $R = 6,75 \text{ mm}$ – Hauteur de chute $H_1 = 10 \text{ cm}$

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 $65 \mu\text{m}$.

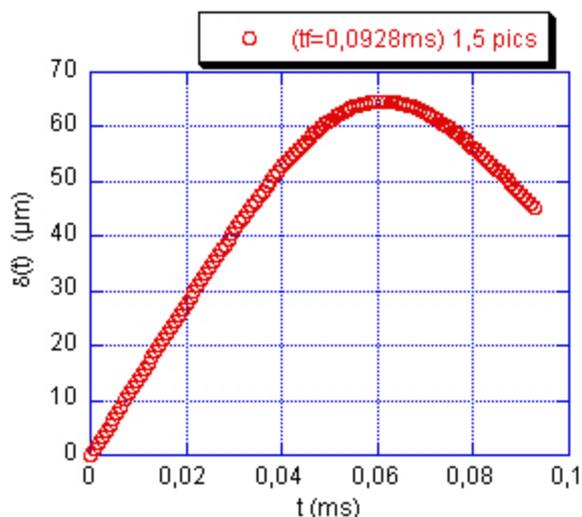


Figure 2. 23 : Pénétration de la bille dans le papier en fonction du temps – Papier pré-couché (cf Tableau 2. 6) – Bille métallique $R = 6,75 \text{ mm}$ – Hauteur de chute $H_1 = 10 \text{ cm}$

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.

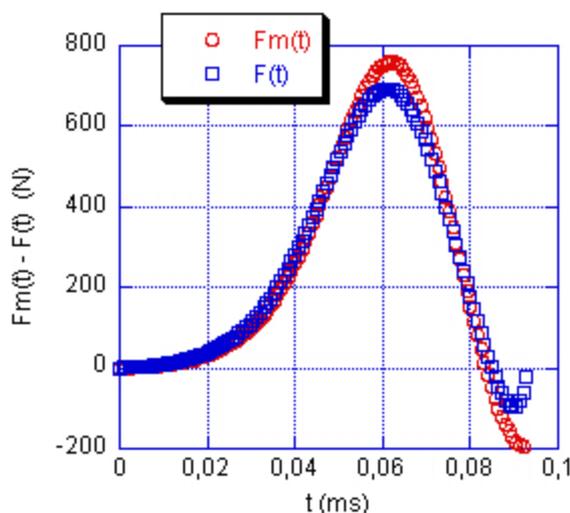


Figure 2. 24 : Détermination de la force réelle appliquée sur le papier à partir de la force mesurée – Papier pré-couché (cf Tableau 2. 6) – Bille métallique $R = 6,75 \text{ mm}$ – Hauteur de chute $H_1 = 10 \text{ cm}$

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]).

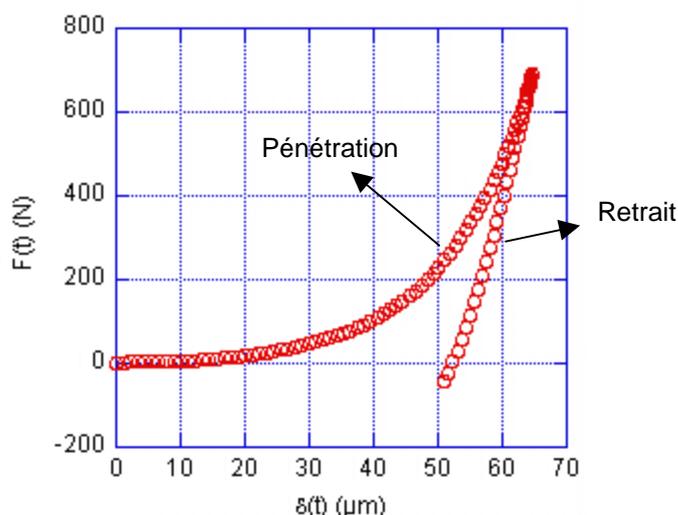


Figure 2. 25 : Force appliquée en fonction de la pénétration de la bille dans le papier – Papier pré-couché (cf Tableau 2. 6) – Bille métallique $R = 6,75 \text{ mm}$ – Hauteur de chute $H_1 = 10 \text{ cm}$

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.

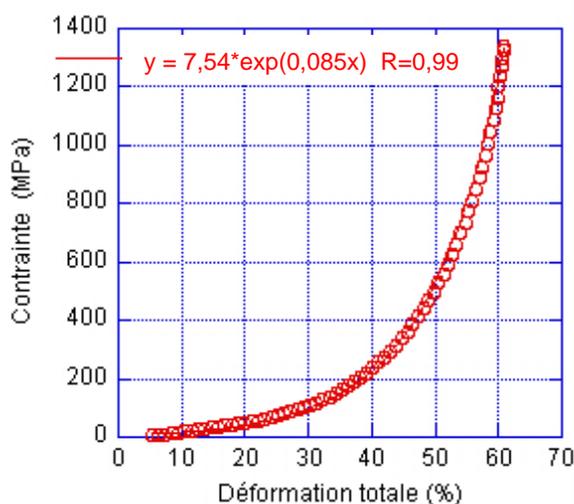


Figure 2. 26 : Contrainte en fonction de la déformation totale – Chute de bille métallique $R = 6,75 \text{ mm}$ – Papier pré-couché (cf Tableau 2. 6) – Hauteur de chute $H_1 = 10 \text{ cm}$

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.

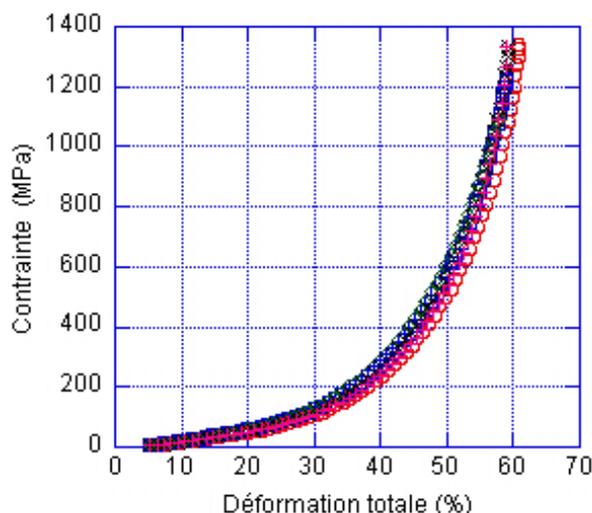


Figure 2. 27 : Contrainte en fonction de la déformation totale – Série de 5 essais – Chute de bille métallique $R = 6,75 \text{ mm}$ – Papier pré-couché (cf Tableau 2. 6) – Hauteur de chute $H_1 = 10 \text{ cm}$

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.

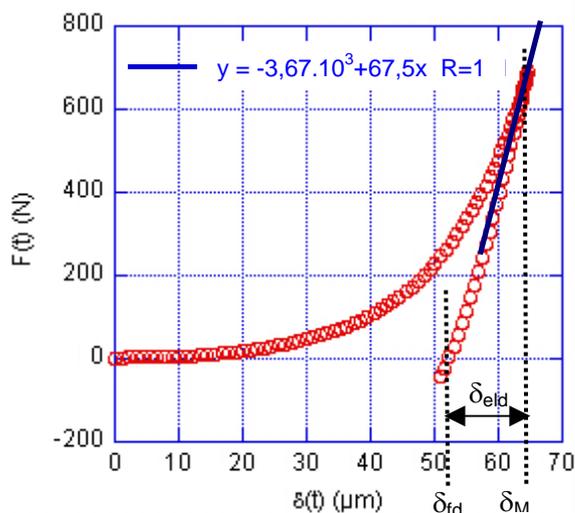


Figure 2. 28 : Evaluation de la pénétration résiduelle et du module d'élasticité moyen à un temps court à partir de la courbe $F(\delta)$ – Chute de bille métallique $R = 6,75 \text{ mm}$ – Papier pré-couché (cf Tableau 2. 6) – Hauteur de chute $H_1 = 10 \text{ cm}$

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.

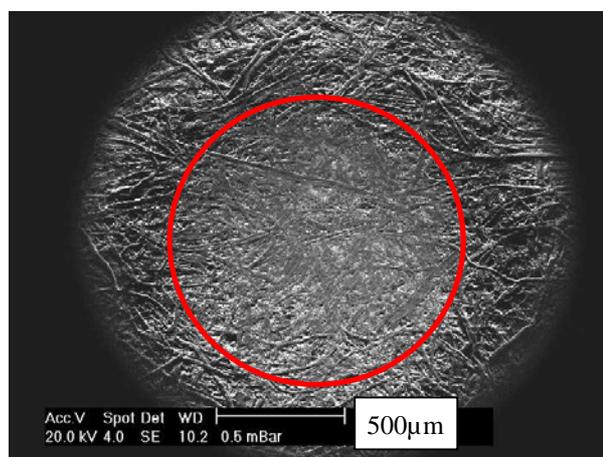


Figure 2. 29 : Observation de l'empreinte résiduelle de l'impact de la bille sur le papier TMP (cf Tableau 2. 3) (MEB)

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.

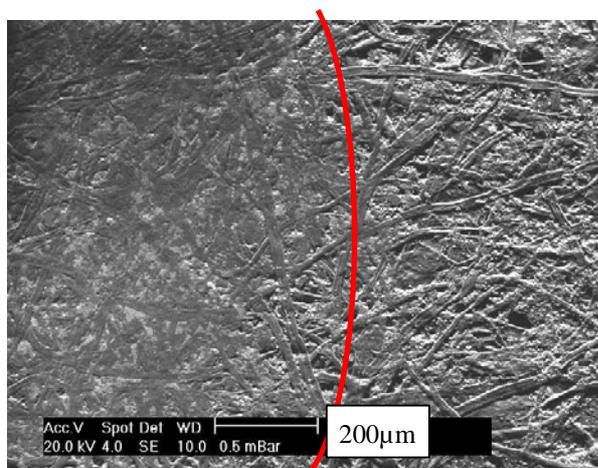


Figure 2. 30 : Observation de l’empreinte au bord du contact (MEB) – Papier TMP (cf Tableau 2. 3)

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.

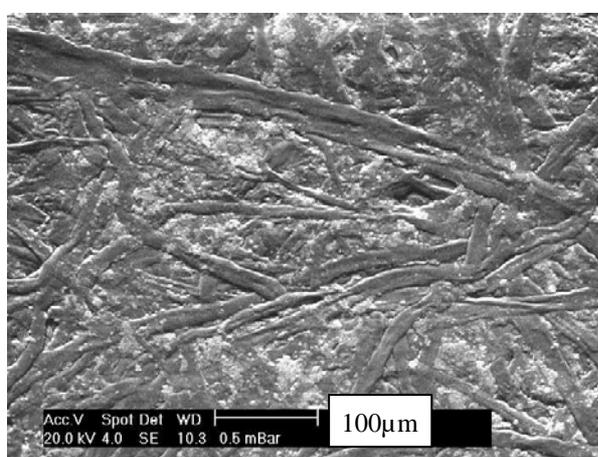


Figure 2. 31 : Observation de la surface du papier au centre de l’impact (MEB) – Papier TMP (cf Tableau 2. 3)

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.

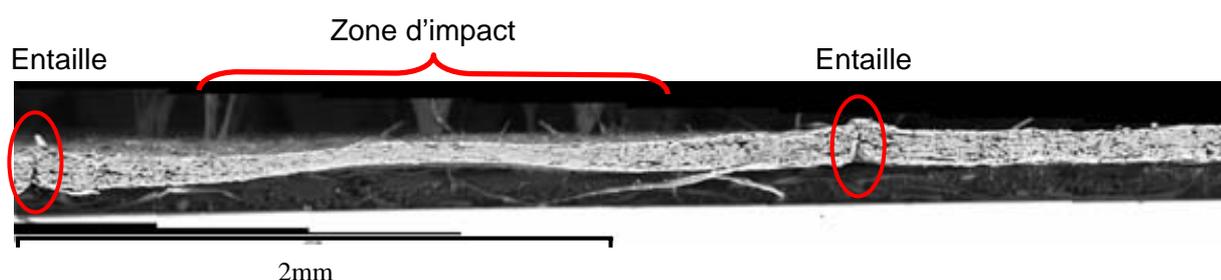


Figure 2. 32 : Observation de la coupe de la feuille de papier au centre de l'impact (MEB) – Papier TMP (cf Tableau 2. 3)

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.

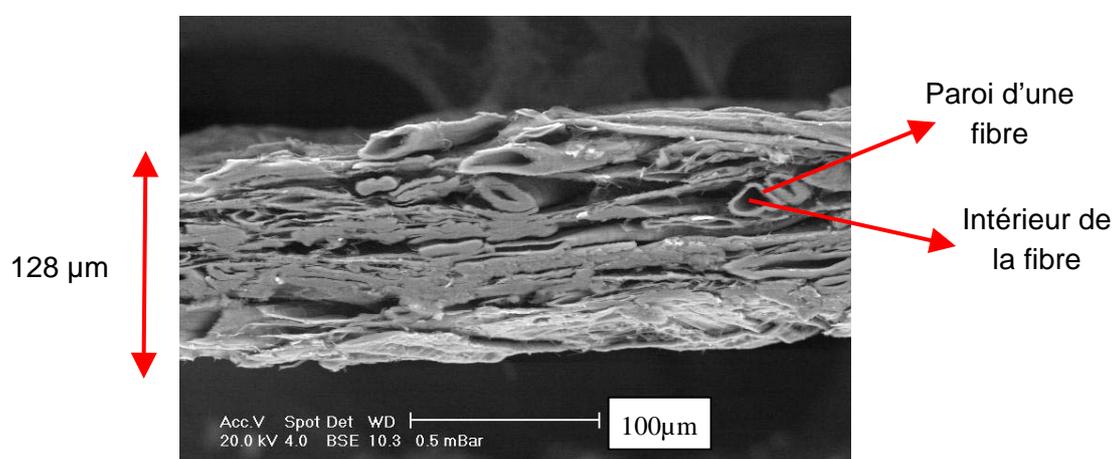


Figure 2. 33 : Observation de la coupe à l'extérieur de la zone de contact (MEB) – Papier TMP (cf Tableau 2. 3)

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%.

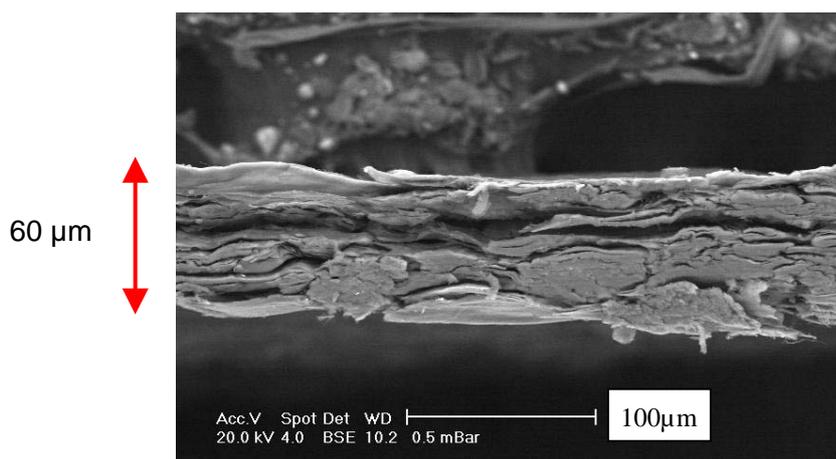


Figure 2. 34 : Observation de la coupe au centre de l'impact (MEB) – Papier TMP (cf Tableau 2. 3)

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).

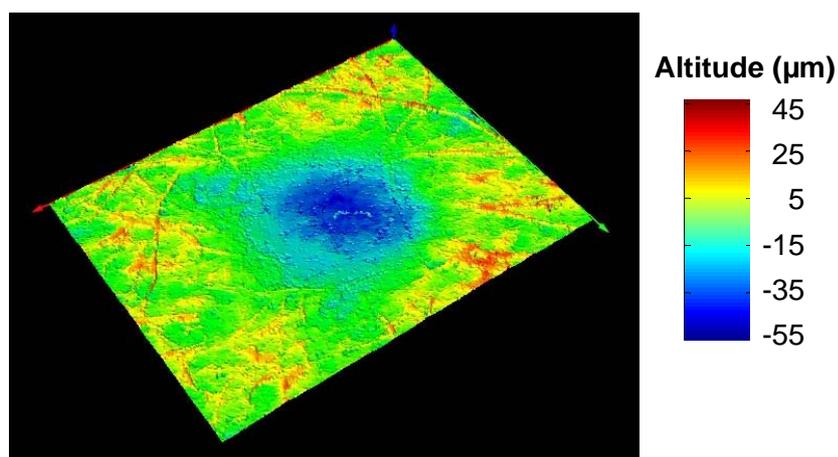


Figure 2. 35 : Topographie de la zone d'impact en vue 3D (Topo3D) – Dimension de la zone analysée : 2,7 x 2 mm – Papier TMP (cf Tableau 2. 3)

A l'extérieur du contact, les fibres cellulósiques 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 μm alors que celle de la zone A_2 est égale à 2,6 μm .

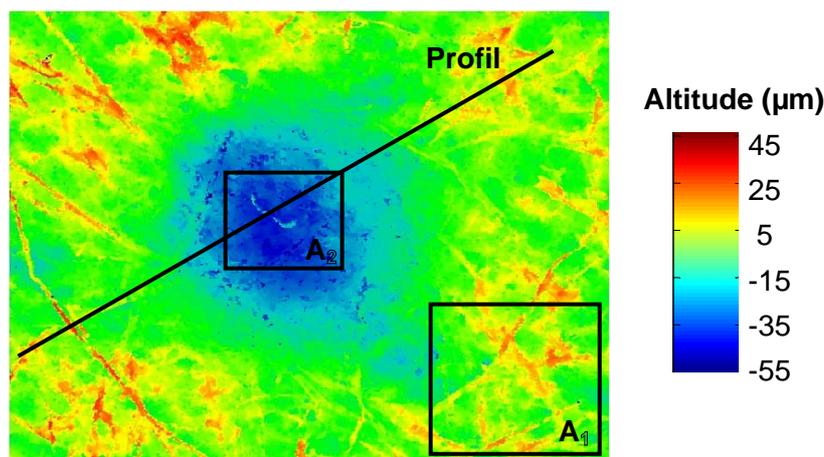


Figure 2. 36 : Topographie de la zone d'impact vue 2D (Topo3D) – Dimension de la zone analysée : 2,7 x 2 mm – Papier TMP (cf Tableau 2. 3)

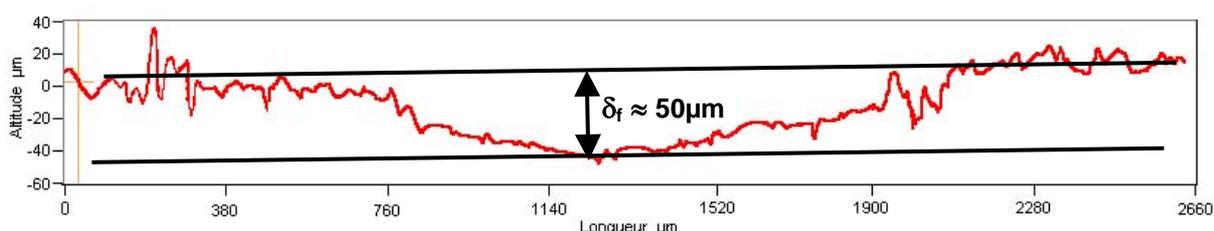


Figure 2. 37 : Profil de rugosité du papier au centre de l'impact (Topo3D) – Ligne indiquée sur la Figure 2. 36

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 $0,67 \text{ m/s}$.

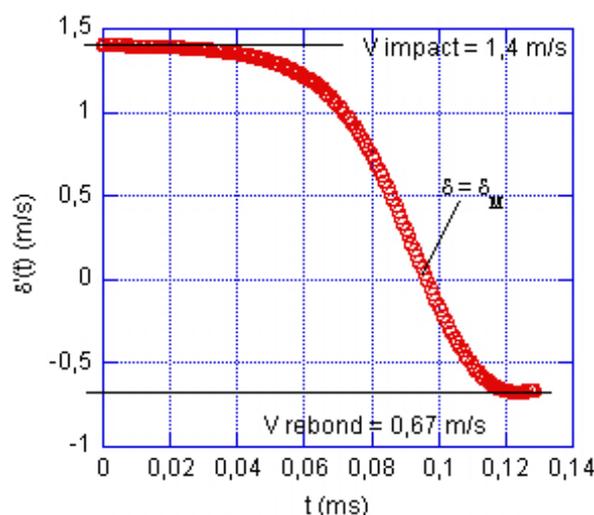


Figure 2. 39 : Vitesse de la bille durant l'impact estimée à partir du capteur de force – Papier TMP (cf Tableau 2. 3) – Bille métallique $R = 6 \text{ mm}$ – Hauteur de chute $H_1 = 10 \text{ cm}$

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.

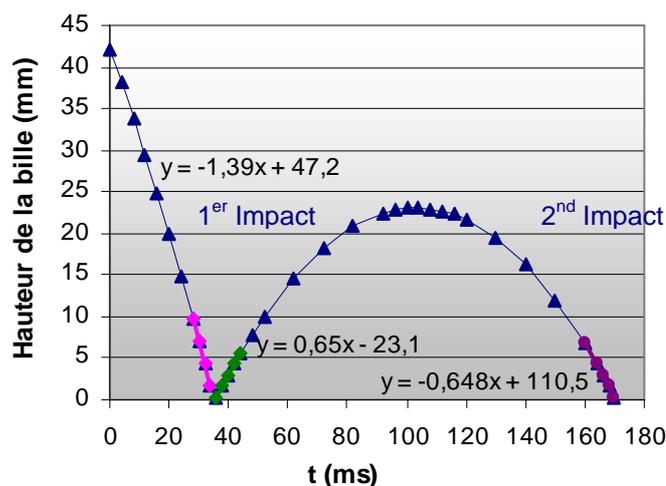


Figure 2. 40 : Trajectoire de la bille obtenue à partir de la caméra rapide – Papier TMP (cf Tableau 2. 3) – Bille métallique $R = 6 \text{ mm}$ – Hauteur de chute $H_1 = 10 \text{ cm}$

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.

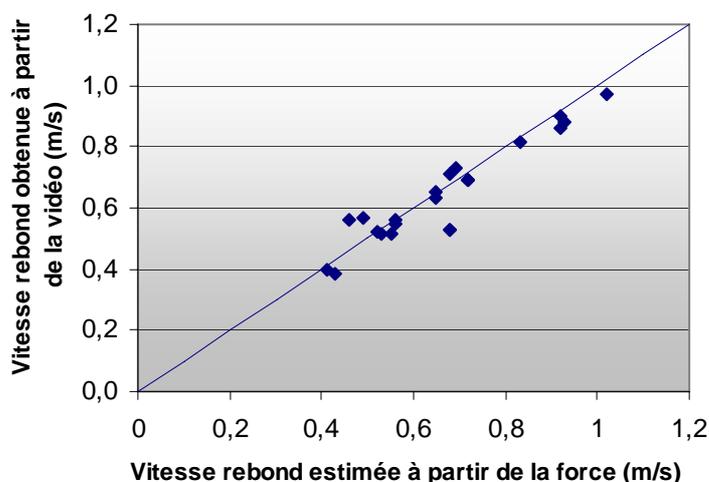


Figure 2. 41 : Comparaison des vitesses de rebond obtenues à partir du capteur de force et de la caméra rapide

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 $15 \mu\text{m}$.

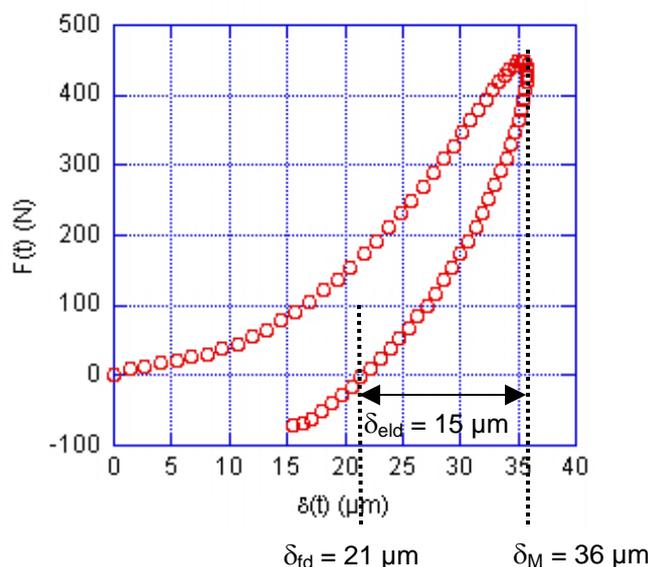


Figure 2. 42 : Force en fonction de la pénétration de la bille dans l'aluminium – Bille métallique $R = 6 \text{ mm}$ – Hauteur de chute $H_1 = 10 \text{ cm}$

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 $17 \mu\text{m}$.

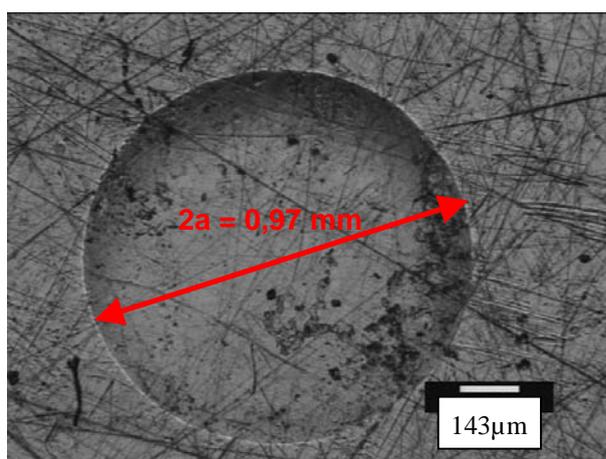


Figure 2. 43 : Observation au microscope optique de l'impact sur l'aluminium

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.

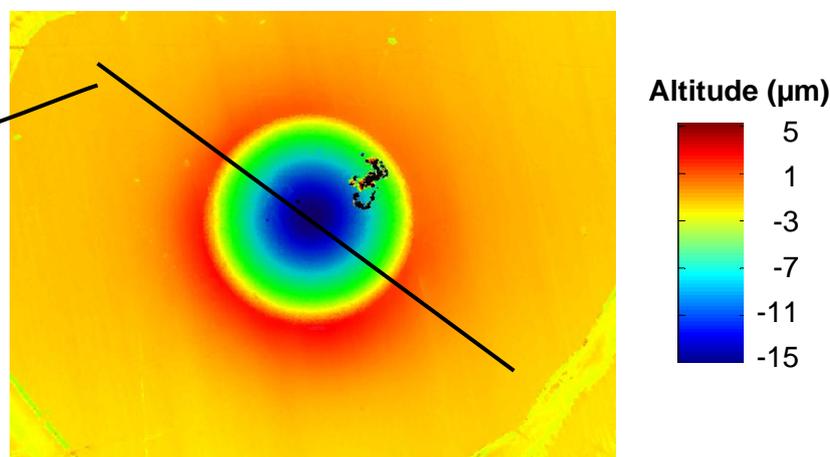


Figure 2. 44 : Observation au Topo3D de l'impact sur l'aluminium – Dimension de la zone analysée : 2,7 x 2 mm

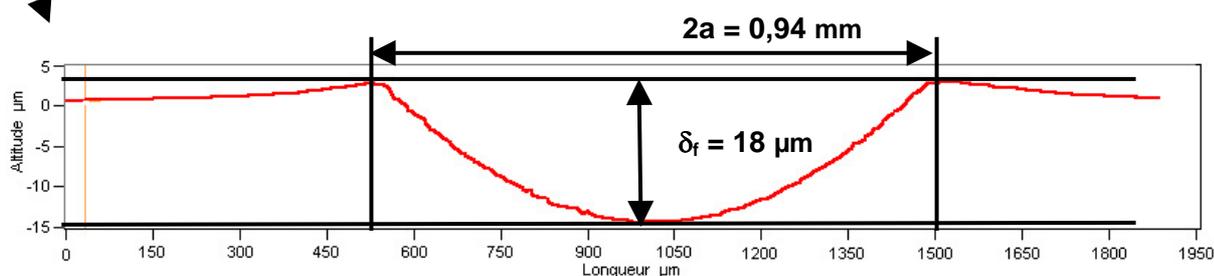


Figure 2. 45 : Profil de rugosité de l'aluminium au centre de l'impact – Ligne indiquée sur la Figure 2. 44

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).

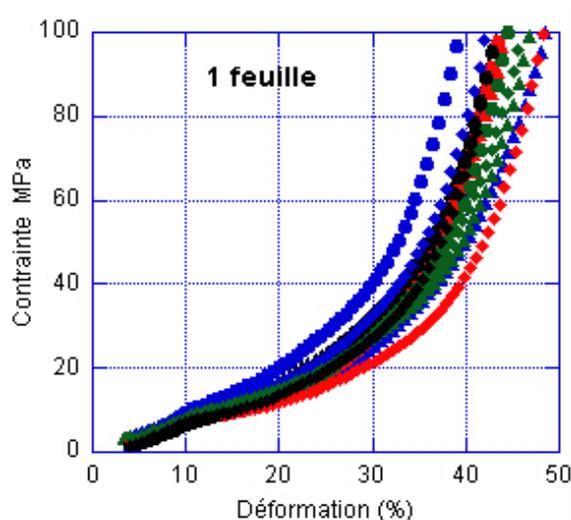


Figure 2. 46 : Essai de chute de bille sur une feuille de papier non couché (Papier TMP cf Tableau 2. 3) – M6mm – $H_1=10\text{cm}$

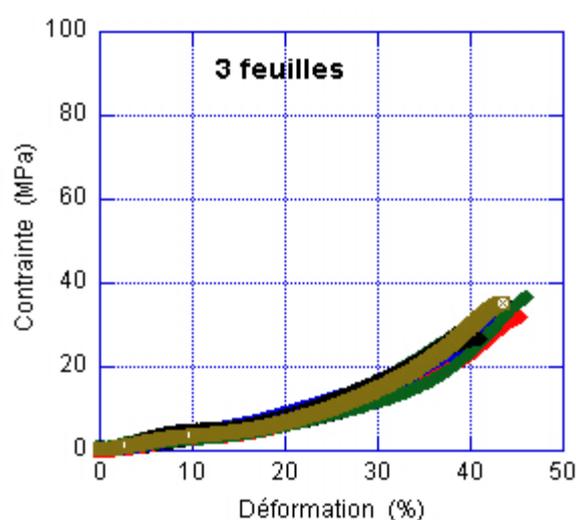


Figure 2. 47 : Essai de chute de bille sur trois feuilles de papier non couché (Papier TMP cf Tableau 2. 3) – M6mm – $H_1=10\text{cm}$

La Figure 2. 48 et la Figure 2. 49 présentent des images d'épaisseur 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'épaisseur d'une feuille de papier par rapport à celle sur 3 feuilles. Bien que le logiciel d'analyse d'épaisseur 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.

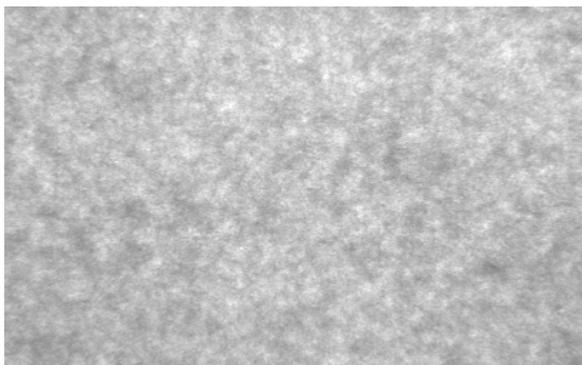


Figure 2. 48 : Image d'éclair d'une feuille d'un papier non couché (Papier TMP cf Tableau 2. 3) – Dimension : 12 x 7,5 cm

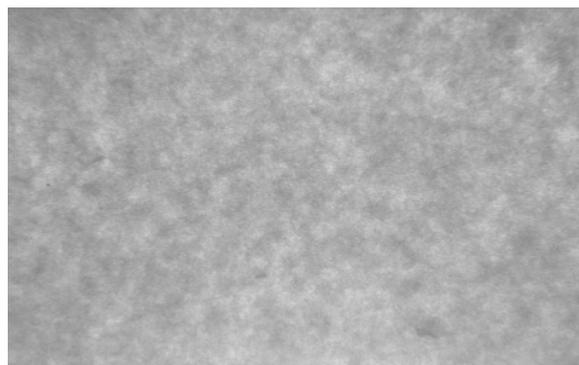


Figure 2. 49 : Image d'éclair de trois feuilles d'un papier non couché (Papier TMP cf Tableau 2. 3) - Dimension : 12 x 7,5 cm

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.

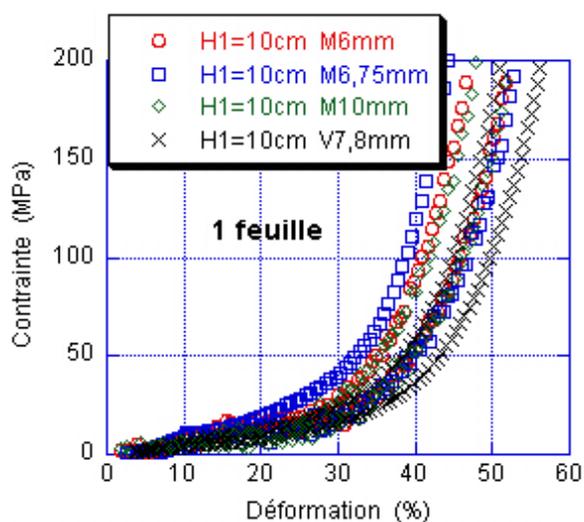


Figure 2. 50 : Influence de la bille sur la courbe contrainte / déformation (1 feuille) (Papier TMP cf Tableau 2. 3)

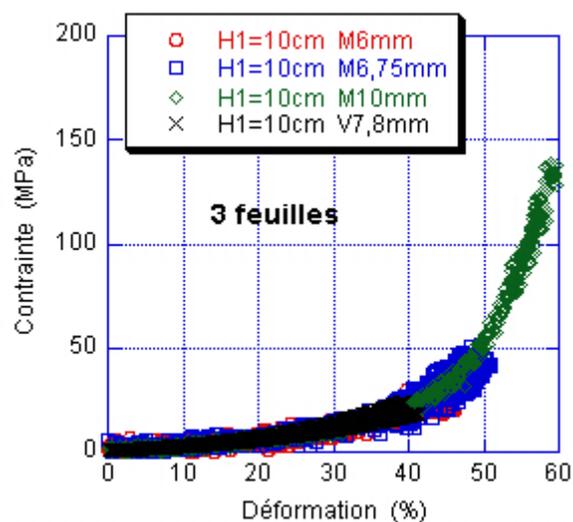


Figure 2. 51 : Influence de la bille sur la courbe contrainte / déformation (3 feuilles) (Papier TMP cf Tableau 2. 3)

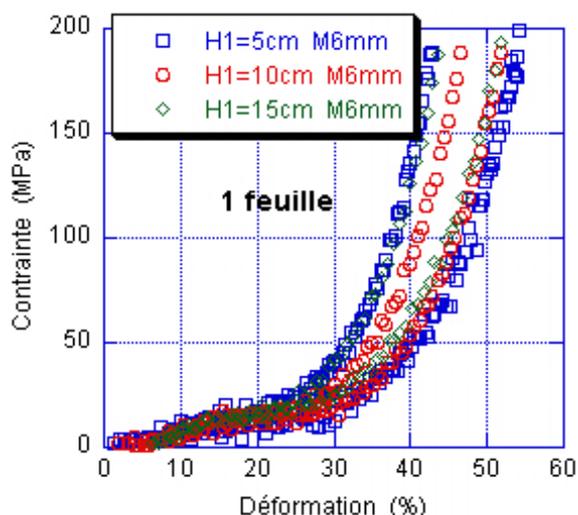


Figure 2. 52 : Influence de la hauteur de chute sur la courbe contrainte / déformation (1 feuille) (Papier TMP cf Tableau 2. 3)

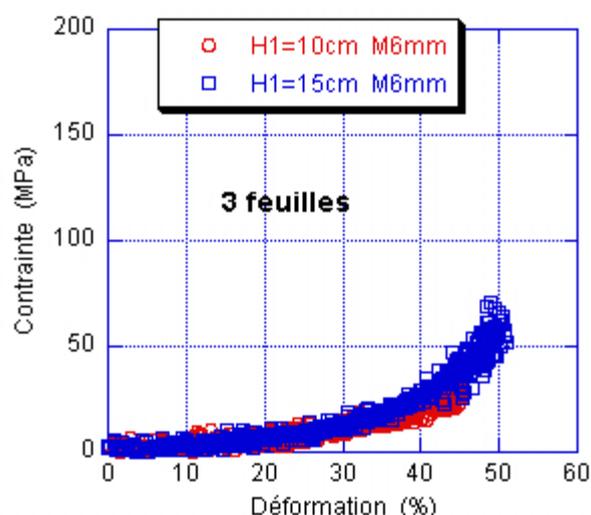


Figure 2. 53 : Influence de la hauteur de chute sur la courbe contrainte / déformation (3 feuilles) (Papier TMP cf Tableau 2. 3)

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.

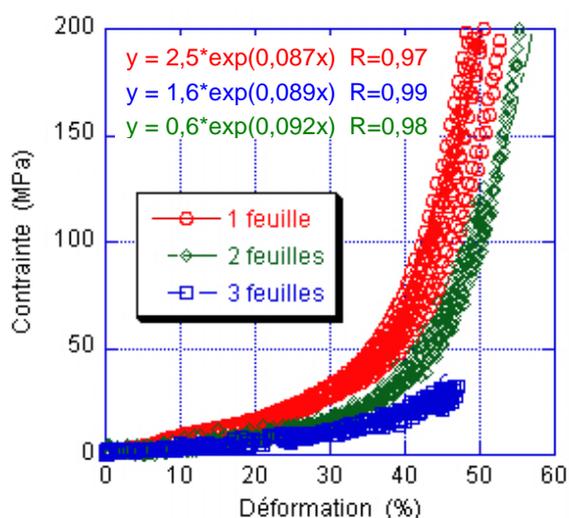


Figure 2. 54 : Influence du nombre de feuilles sur le comportement mécanique en dynamique d'un papier non couché (Papier TMP cf Tableau 2. 3) – M6mm – H₁=10cm

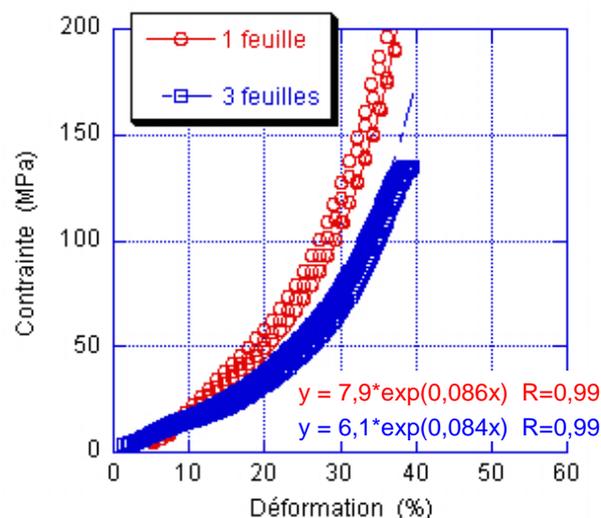


Figure 2. 55 : Influence du nombre de feuilles sur le comportement mécanique en dynamique d'un papier pré-couché (cf Tableau 2. 6) – M6mm – H₁=10cm

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 ($\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\delta}}{e}$) 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.

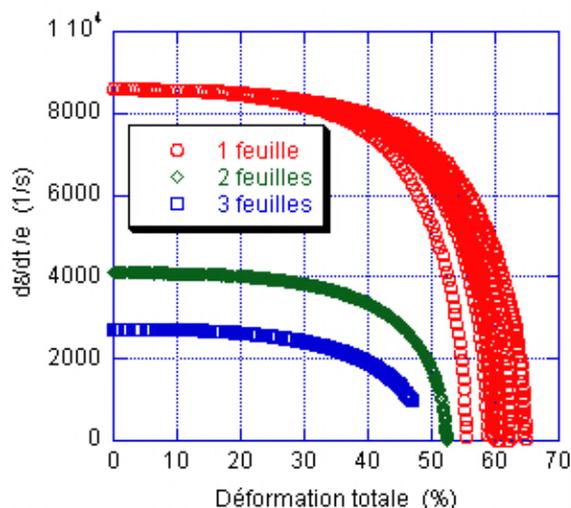


Figure 2. 56 : Vitesse de déformation en fonction de la déformation d'une, deux et trois feuilles de papier non couché (Papier TMP cf Tableau 2. 3) – M6mm – $H_1=10\text{cm}$

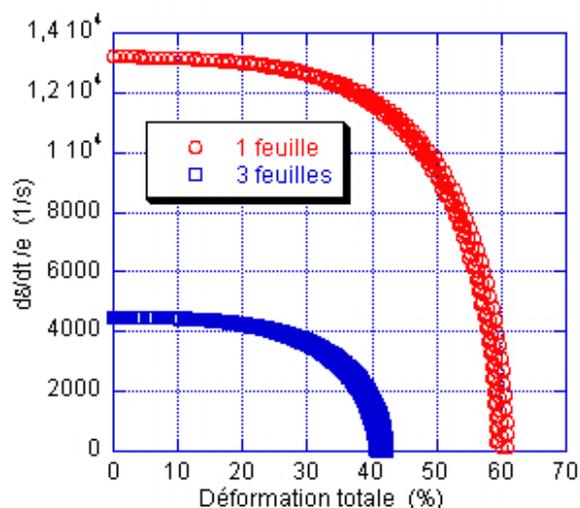


Figure 2. 57 : Vitesse de déformation en fonction de la déformation d'une et trois feuilles de papier pré-couché (cf Tableau 2. 6) – M6mm – $H_1=10\text{cm}$

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 :

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

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.

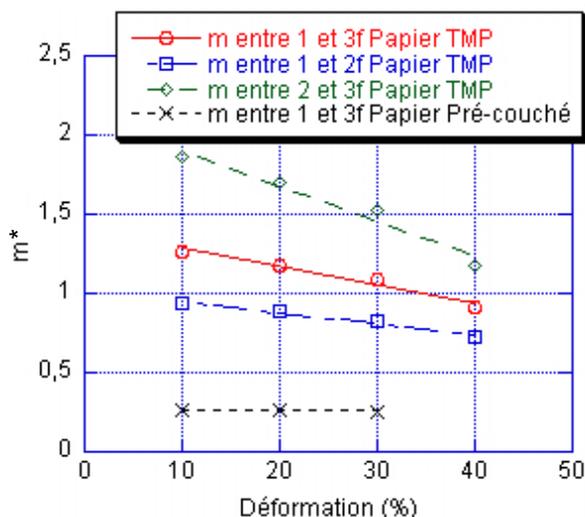


Figure 2. 58 : Paramètre de sensibilité à la vitesse de déformation m^* en fonction de la déformation totale – Papier non couché (TMP cf Tableau 2. 3) et Papier pré-couché (cf Tableau 2. 6) – $M_6\text{mm}$ – $H_1=10\text{cm}$

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 $R = 12,25 \text{ mm}$. 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).

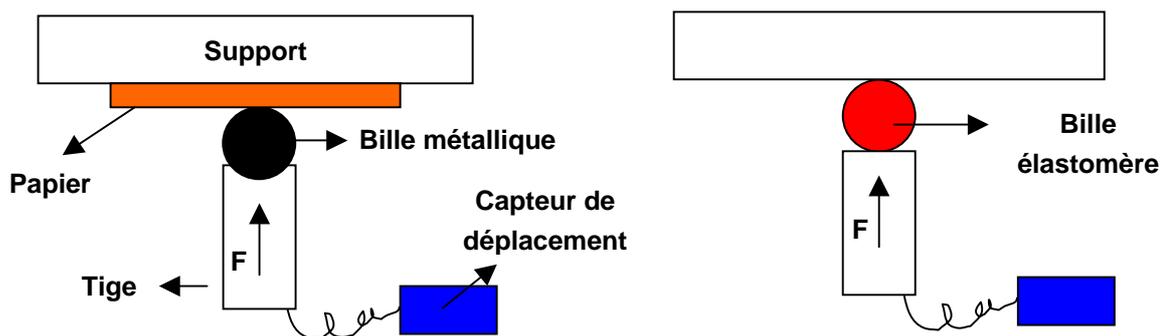


Figure 2. 59 : Schéma des modifications de l'essai de compression quasi-statique pour l'étude du comportement mécanique d'une bille élastomère

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.

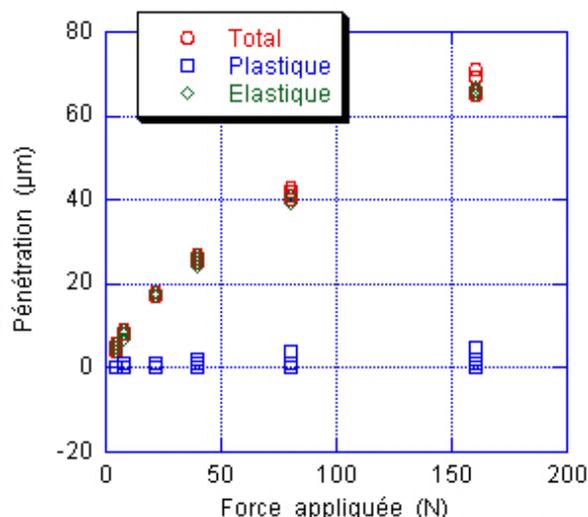


Figure 2. 60 : Déformation de la bille élastomère en fonction de la force – essai de compression quasi-statique

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.

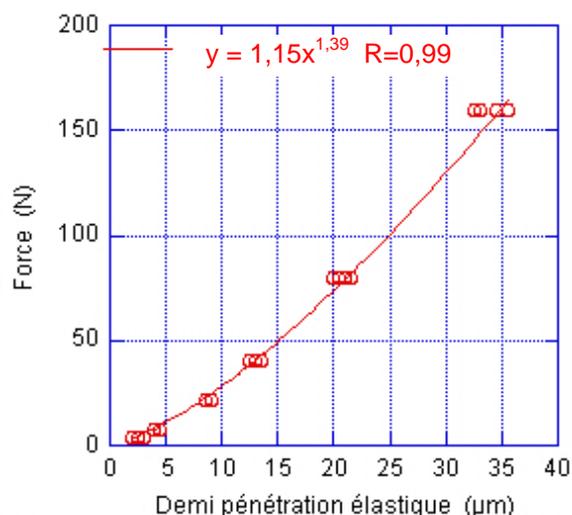


Figure 2. 61 : Force en fonction de la demi pénétration élastique

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.

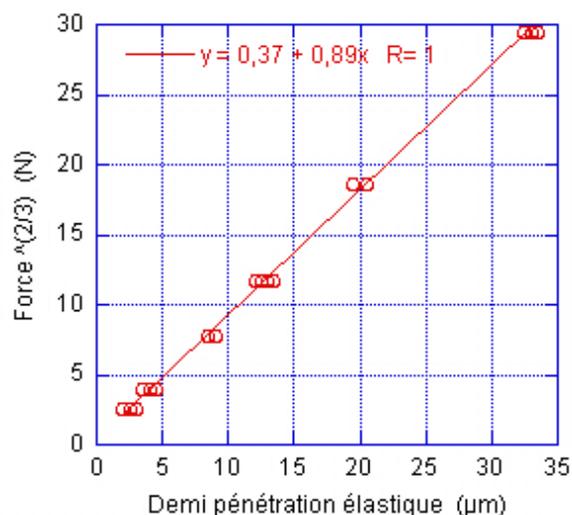


Figure 2. 62 : Force à la puissance 2/3 en fonction de la demi pénétration élastique

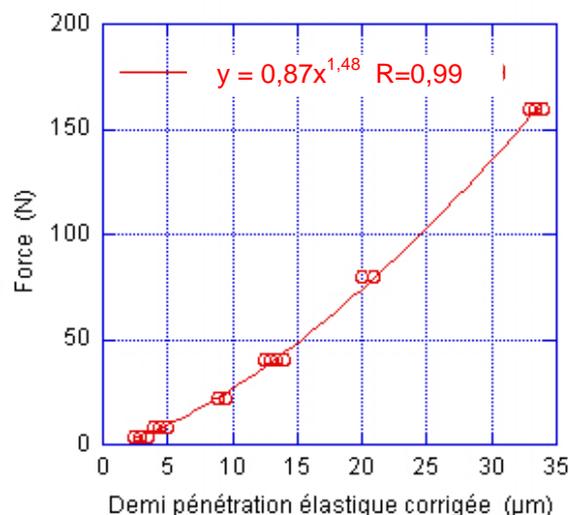


Figure 2. 63 : Force en fonction de la demi pénétration élastique corrigée

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.

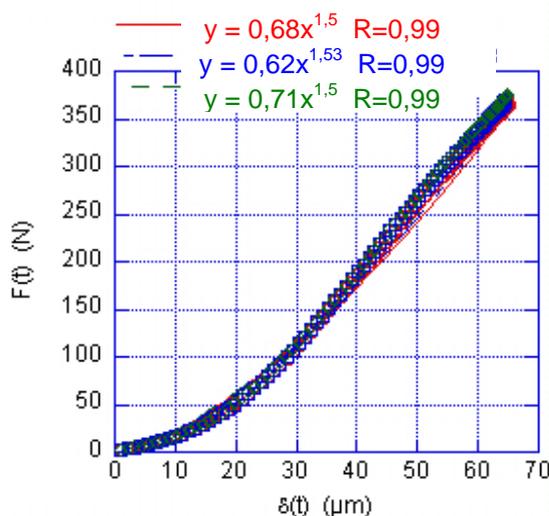


Figure 2. 64 : Force en fonction de la déformation de la bille élastomère – essai de chute

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.

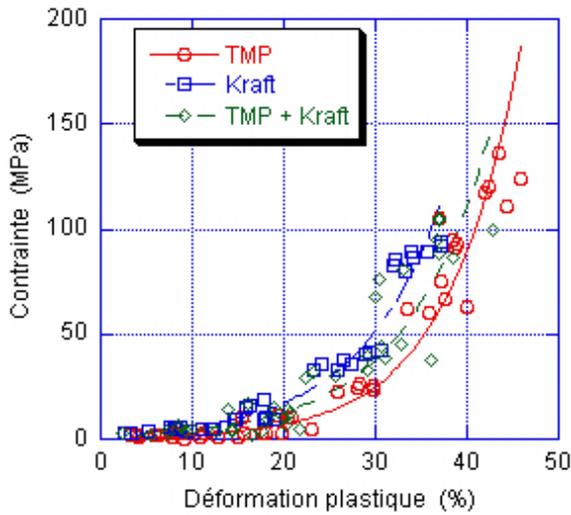


Figure 2. 65 : Essai de compression quasi-statique sur une feuille (M6,75 et M10) – Influence de la pâte sur la contrainte

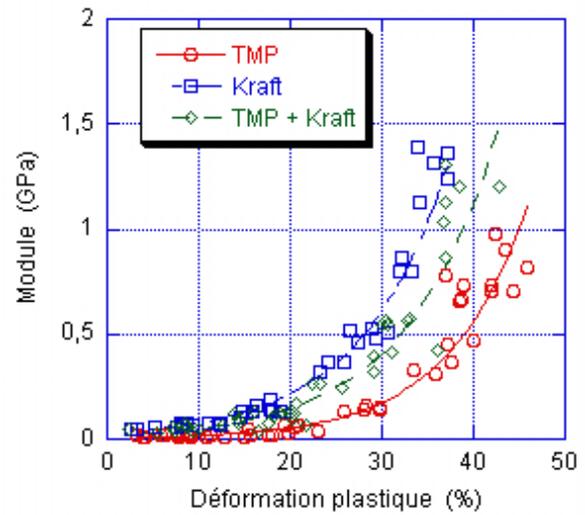


Figure 2. 66 : Essai de compression quasi-statique sur une feuille (M6,75 et M10) – Influence de la pâte sur le module

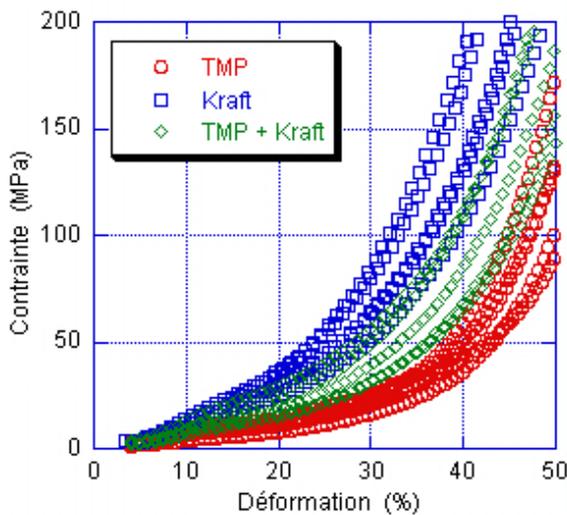


Figure 2. 67 : Essai de chute de bille sur une feuille (H1=10 cm V7,8 mm) – Influence de la pâte sur la contrainte

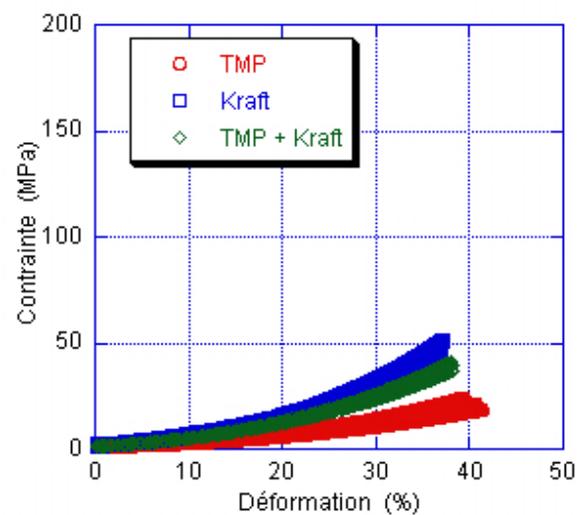


Figure 2. 68 : Essai de chute de bille sur trois feuilles (H1=10 cm V7,8 mm) – Influence de la pâte sur la contrainte

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.

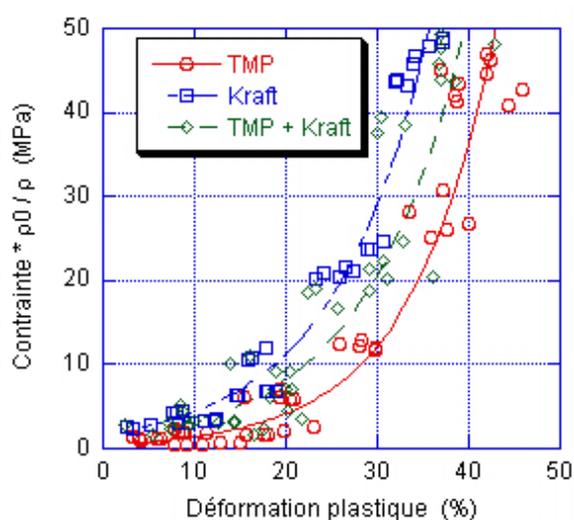


Figure 2. 69 : Prise en compte de l'évolution de la densité au cours de la compression quasi-statique sur la contrainte – Influence du type de pâte – M6,75 et M10

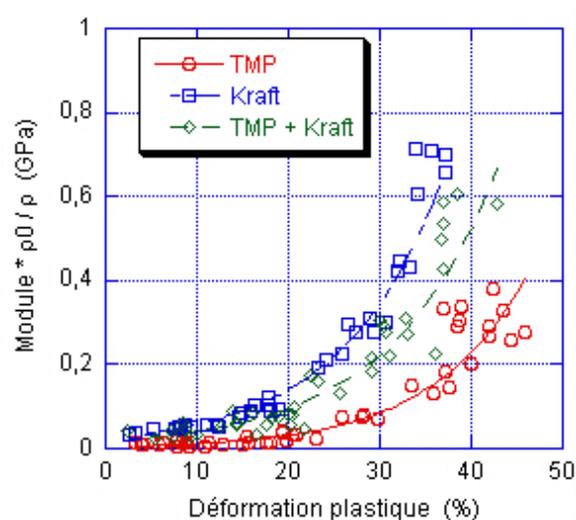


Figure 2. 70 : Prise en compte de l'évolution de la densité au cours de la compression quasi-statique sur le module – Influence du type de pâte – M6,75 et M10

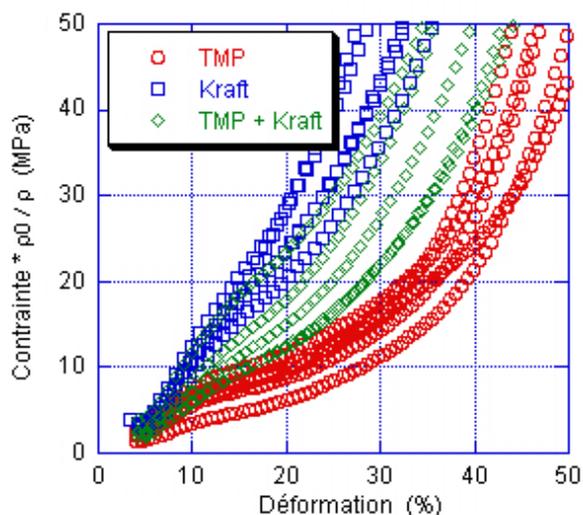


Figure 2. 71 : Prise en compte de l'évolution de la densité au cours de la compression dynamique sur la contrainte sur une feuille – Influence du type de pâte – H1=10 cm V7,8 mm

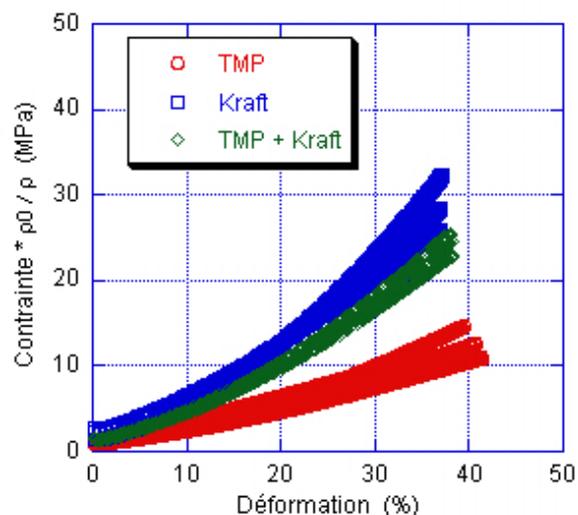


Figure 2. 72 : Prise en compte de l'évolution de la densité au cours de la compression dynamique sur a contrainte sur trois feuilles – Influence du type de pâte – H1=10 cm V7,8 mm

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.

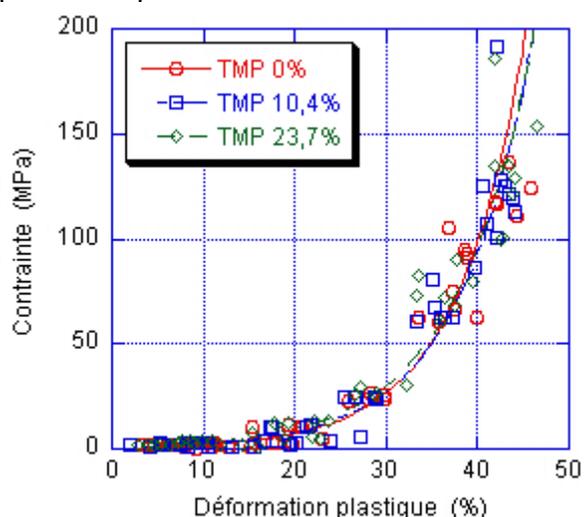


Figure 2. 73 : Essai de compression quasi-statique sur une feuille (M6,75 et M10) – Influence de la teneur en charge sur la contrainte

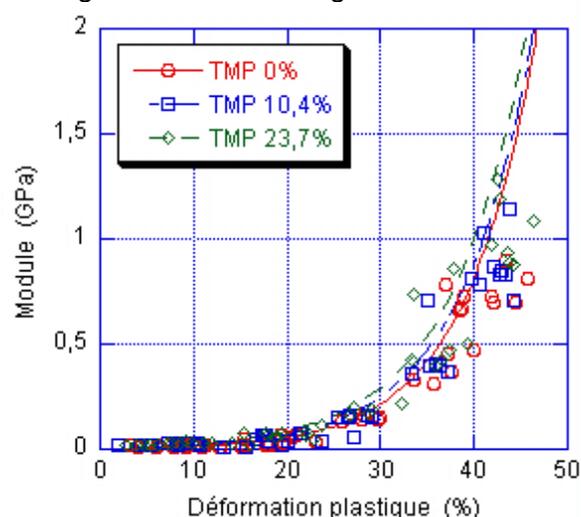


Figure 2. 74 : Essai de compression quasi-statique sur une feuille (M6,75 et M10) – Influence de la teneur en charge sur le module

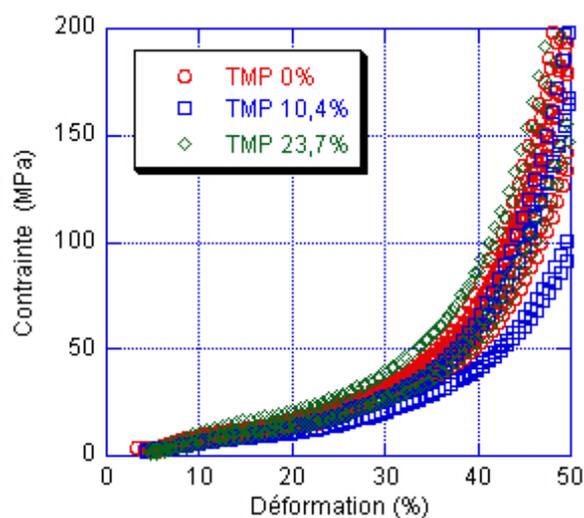


Figure 2. 75 : Essai de chute de bille sur une feuille (H1=10 cm M6 mm) – Influence de la teneur en charge sur la contrainte

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 cellulosiques 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.

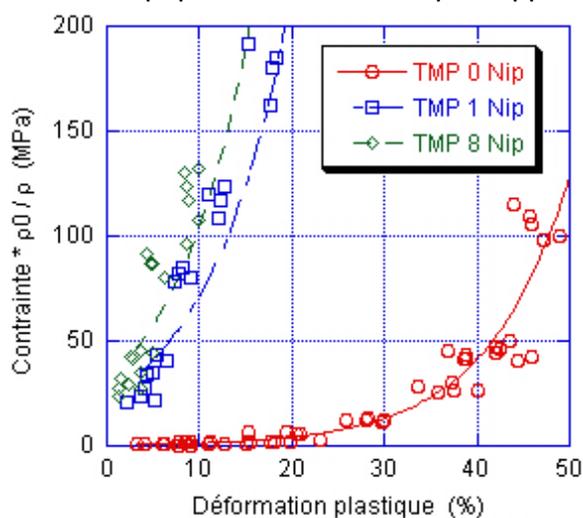


Figure 2. 76 : Essai de compression quasi-statique sur une feuille (M6,75 et M10) – Influence de la densité sur la contrainte

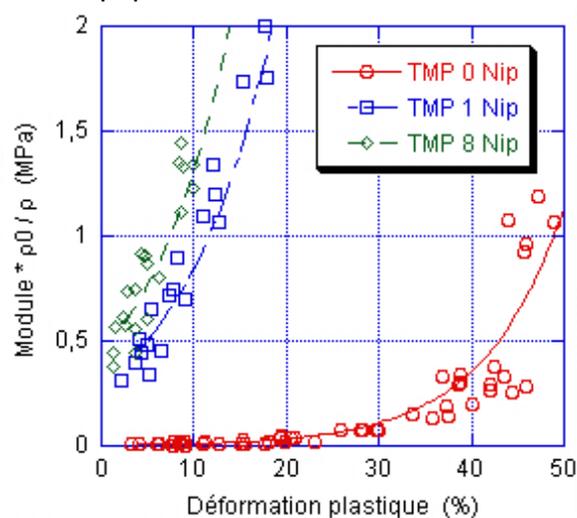


Figure 2. 77 : Essai de compression quasi-statique sur une feuille (M6,75 et M10) – Influence de la densité sur le module

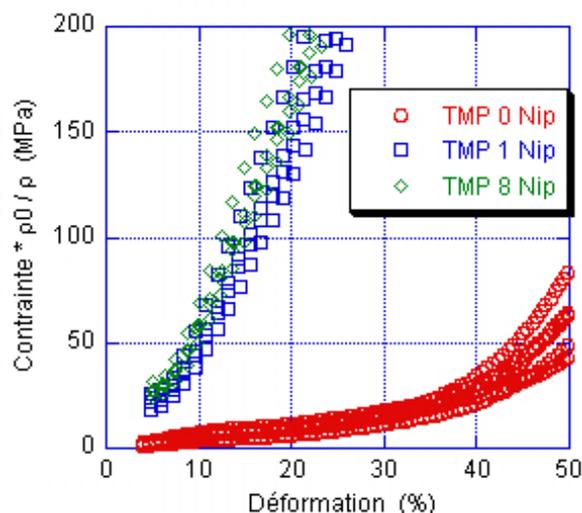


Figure 2. 78 : Essai de chute de bille sur une feuille ($H1=10$ cm $M6$ mm) – Influence de la densité sur la contrainte

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).

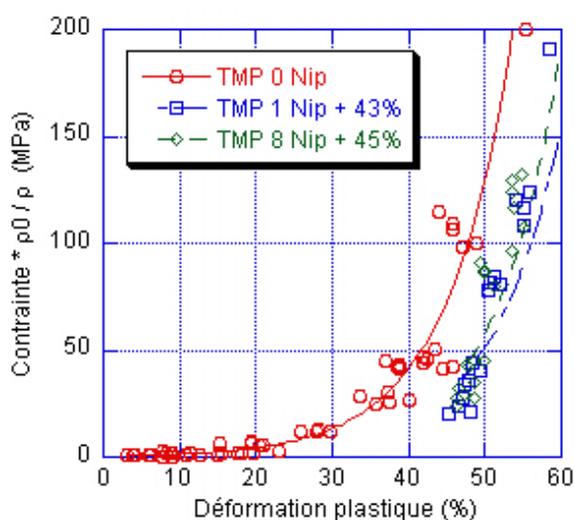


Figure 2. 79 : Prise en compte de la déformation plastique lors du calandrage sur la courbe contrainte / déformation – Compression quasi-statique ($M6,75$ et $M10$)

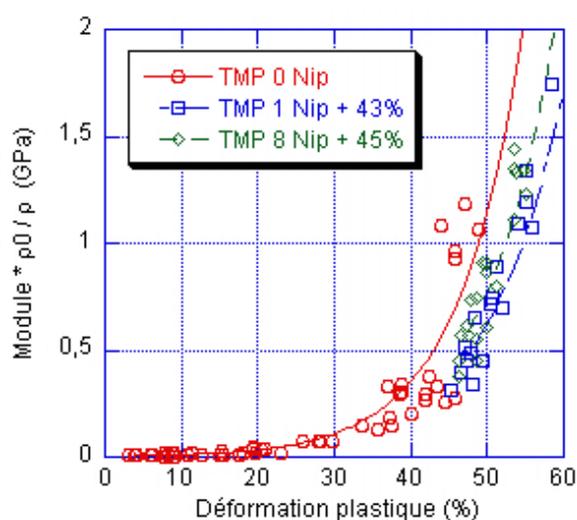


Figure 2. 80 : Prise en compte de la déformation plastique lors du calandrage sur la courbe module / déformation – Compression quasi-statique ($M6,75$ et $M10$)

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

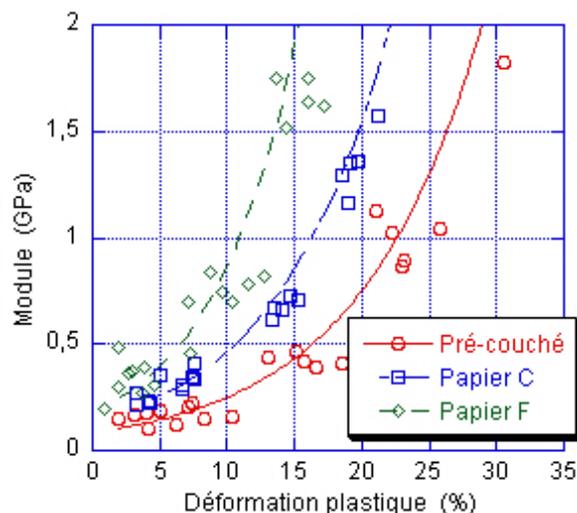
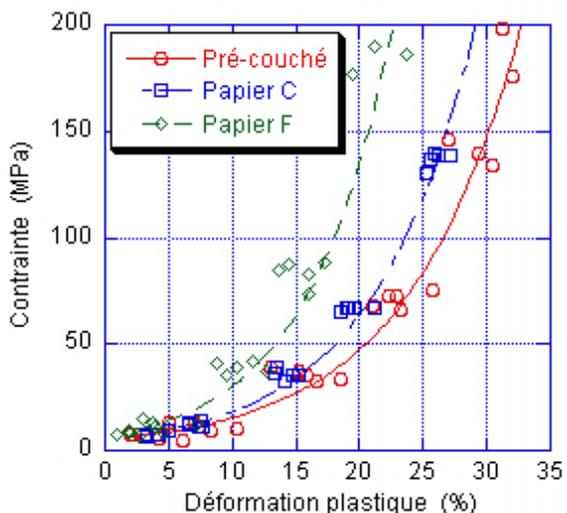


Figure 2. 81 : Essai de compression quasi-statique sur une feuille (M10) – Influence de la couche et du procédé d'application sur la contrainte

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

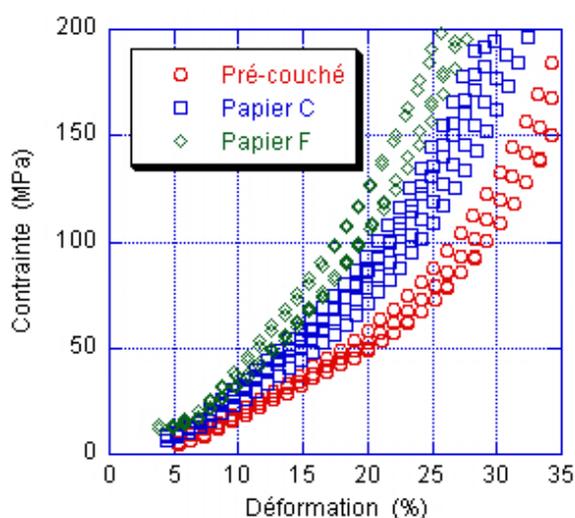


Figure 2. 83 : Essai de chute de bille sur une feuille (H1=10 cm M6 mm) – Influence de la couche et du procédé d'application sur la contrainte

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.

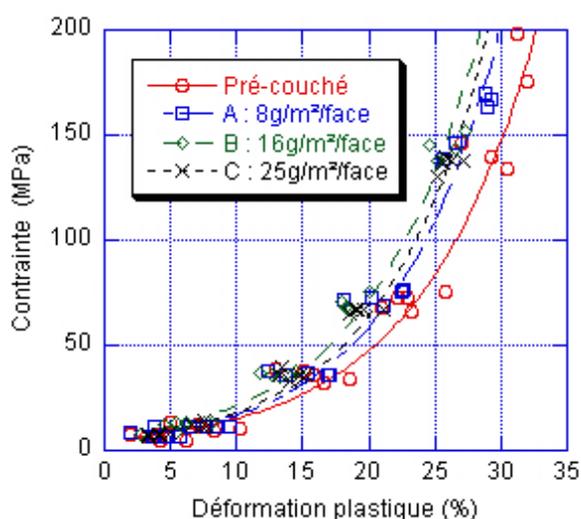


Figure 2. 84 : Essai de compression quasi-statique sur une feuille (M10) – Influence du poids de couche sur la contrainte

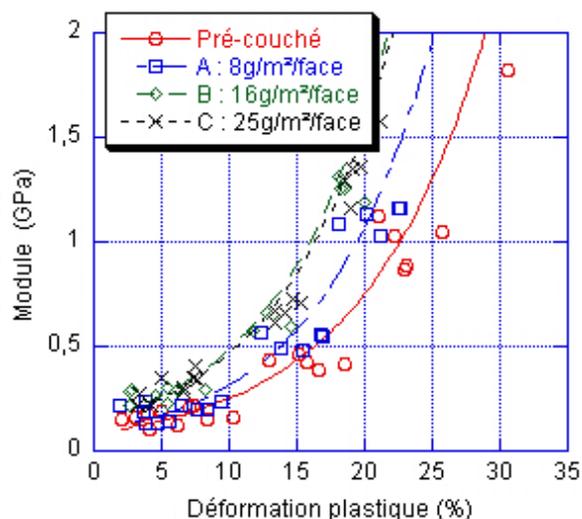


Figure 2. 85 : Essai de compression quasi-statique sur une feuille (M10) – Influence du poids de couche sur le module

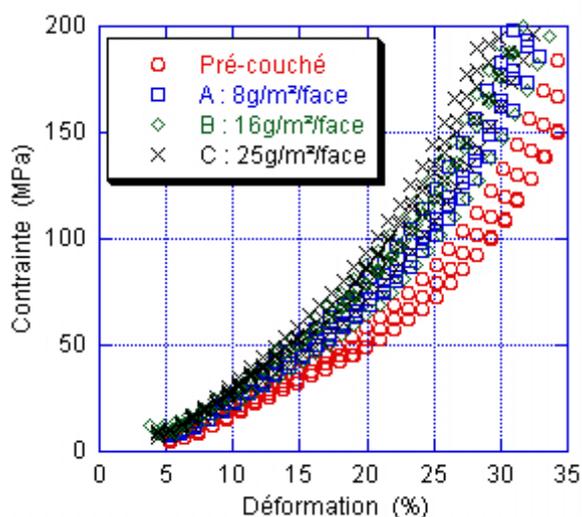


Figure 2. 86 : Essai de chute de bille sur une feuille (H1=10 cm M6 mm) – Influence du poids de couche sur la contrainte

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.

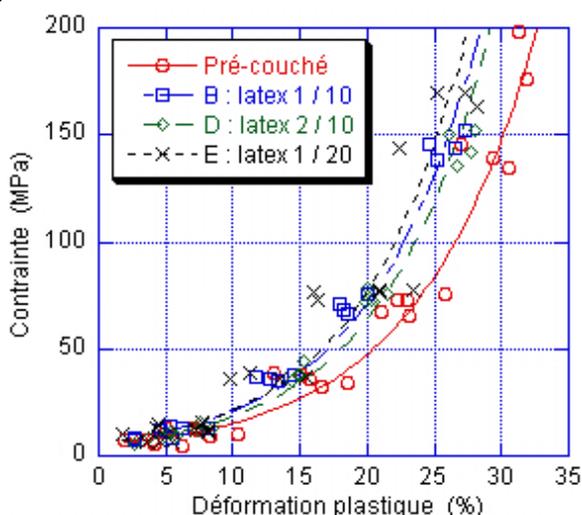


Figure 2. 87 : Essai de compression quasi-statique sur une feuille (M10) – Influence du latex (nature et quantité) sur la contrainte

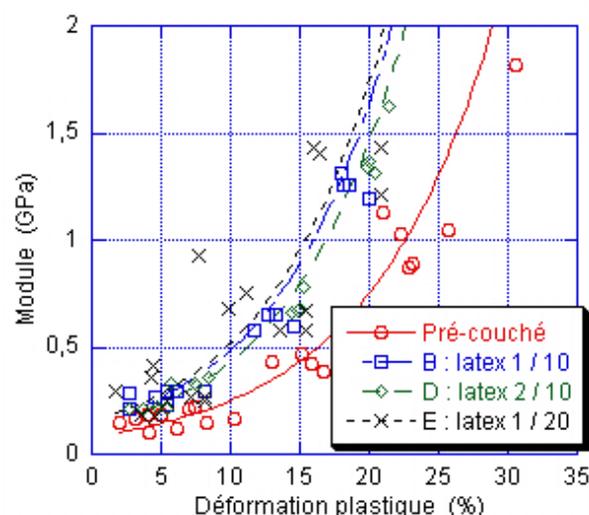


Figure 2. 88 : Essai de compression quasi-statique sur une feuille (M10) – Influence du latex (nature et quantité) sur le module

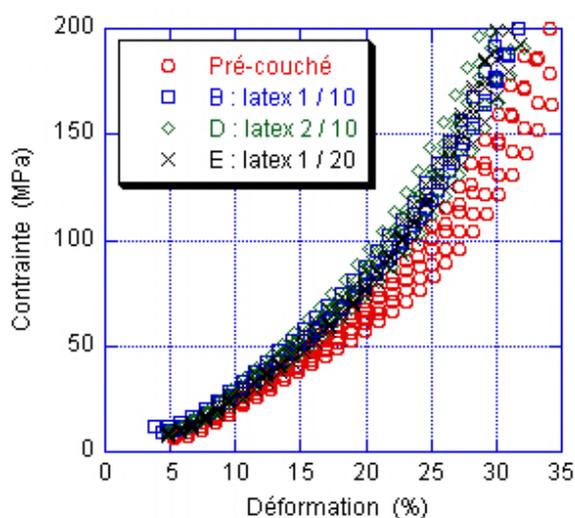


Figure 2. 89 : Essai de chute de bille sur une feuille (H1=10 cm M6 mm) – Influence du latex (nature et quantité) sur la contrainte

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. -

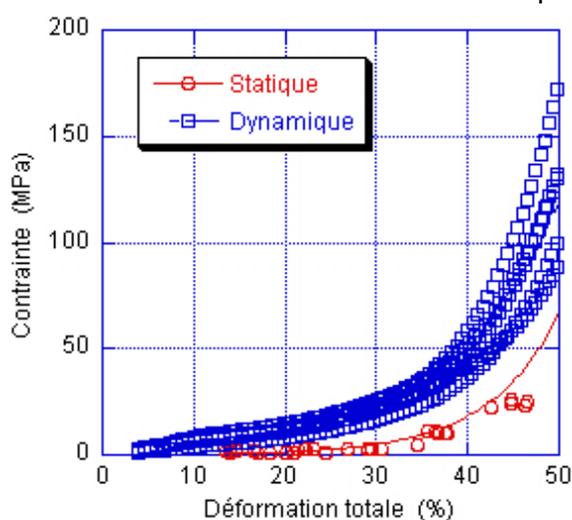


Figure 2. 90 : Contrainte en fonction de la déformation totale en compression statique et dynamique pour le papier TMP

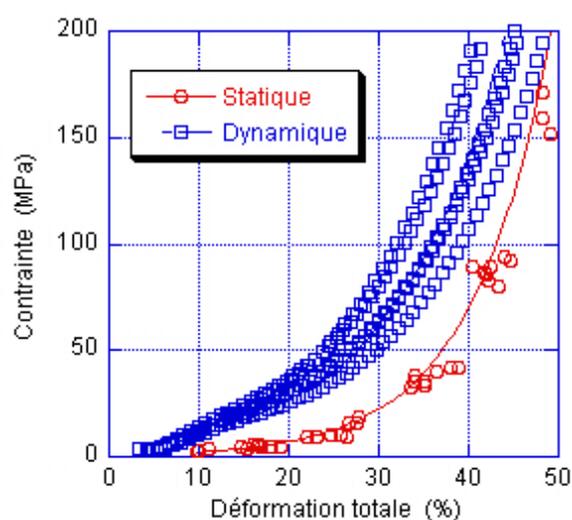


Figure 2. 91 : Contrainte en fonction de la déformation totale en compression statique et dynamique pour le papier Kraft

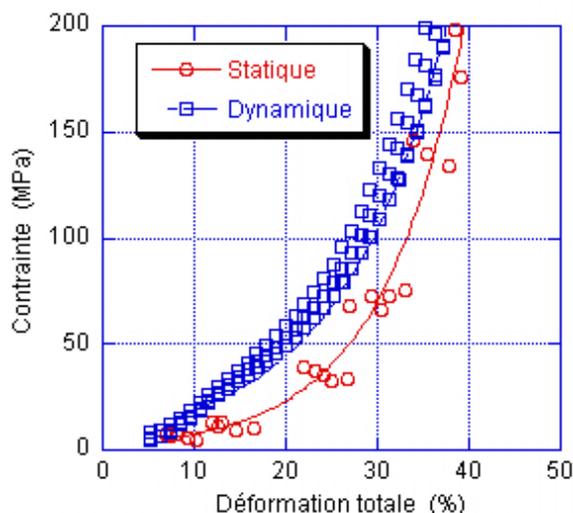


Figure 2. 92 : Contrainte en fonction de la déformation totale en compression statique et dynamique pour le papier pré-couché

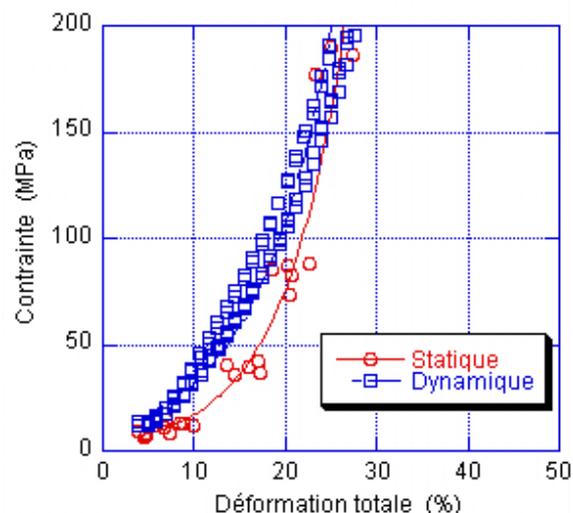


Figure 2. 93 : Contrainte en fonction de la déformation totale en compression statique et dynamique pour le papier couché F

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.