

### 3.1 Introduction

La présente étude permet de caractériser le comportement à l'indentation de deux types de sandwichs (aluminium-aluminium et acier-Polyuréthane) par l'essai d'impact et d'indentation, en faisant varier certains paramètres structuraux (matériaux et densité de l'âme) et expérimentaux (la géométrie de l'impacteur et la vitesse).

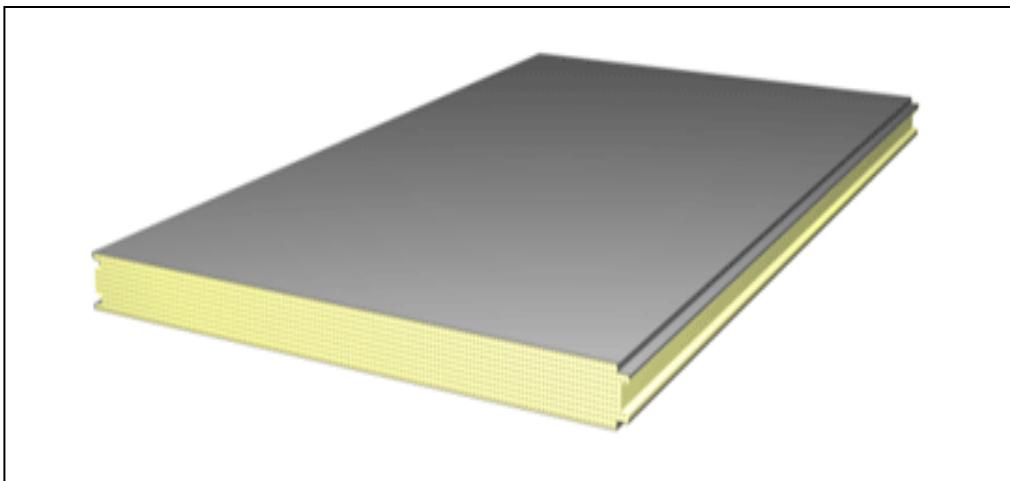
### 3.2 Présentation des matériaux étudiés

Les matériaux étudiés dans le cadre de ce travail sont des sandwichs:

- Sandwich à âme en mousse.
- Sandwich à âme en aluminium.

#### 3.2.1 Sandwich à âme en mousse

La structure du matériau sandwich à âme en polyuréthane utilisé dans cette étude est fournie par la société GROUPE RAHMANI et destiné à la couverture et au bardage et à la frigorifique. La mousse polyuréthane rigide injectée en continu entre les parements métalliques sa Masse volumique:  $40 \text{ Kg/m}^3$ ; Conductivité thermique  $0.022 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$ ; les peaux en acier de nuance S320. La découpe des échantillons de dimension  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  a été faite à l'aide d'un disque.


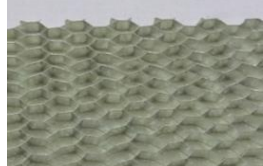



**Figure 3.1:** Sandwich à âme en mousse.

### 3.2.2 Sandwiches à âme en aluminium

Les paramètres géométriques des âmes du sandwich sont illustrés par le tableau (3.1) :

**Tableau 3.1:** Paramètres géométriques des âmes des sandwichs utilisés

Sigle	Taille de la cellule (mm)	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	Épaisseur des parois (μm)	photo
Alu-Alu Fs268	3.2	130	60	
Alu-Alu Fs272	9.6	55	80	
Alu-Alu Fs276	19.2	29	80	

Ces sandwichs sont fournis par Euro-Composites [7] et destinés à l'industrie aéronautique. La structure des âmes en nid d'abeille de sandwich est constituée d'alvéoles bidimensionnelles placées dans le plan de sandwich dont les peaux sont en Aluminium (AlMg3). Les âmes en nids d'abeilles, de différentes densités.

Les propriétés mécaniques et physiques des matériaux des âmes et des peaux sont illustrées par les tableaux (3.2 - 3.3 - 3.4).

**Tableau 3.2 : Propriétés mécaniques des âmes [7] :**

Ame ECM	Matériaux Alu-Alu		
	Fs268	Fs272	Fs276
Densités de l'âme [kg/m <sup>3</sup> ]	130	55	29
Taille de la cellule [m m]	3.2	9.6	19.2
Epaisseur de parois de cellules [μ m]	60	80	80
Résistance au cisaillement (direction L) [MPa]	5.47	1.48	0.66
Module de cisaillement (direction L) [MPa]	523	253	201
Résistance au cisaillement (direction W) [MPa]	3.36	0.88	0.32
Module de cisaillement (direction W) [MPa]	311	170	54
Résistance à la compression [MPa]	11.55	2.75	0.69

**Tableau 3.3 : Propriétés mécaniques des peaux [7] :**

Module de Young [MPa]	Résistance à la rupture [MPa]	Résistance à la traction [MPa]	Elongation à rupture (%)
70000	268	367	13

**Tableau 3.4 : Propriétés physiques d'aluminium [7] :**

Masse volumique de fusion [g/cm <sup>3</sup> ]	Intervalle de fusion [°C]	Coefficient de poisson	Conductivité thermique [W/m°C]
2,73	640-655	0,33	180

### 3.3 Machine d'essais d'impact

Tous les essais d'impact et d'indentation ont été effectués sur une machine de traction-compression Zwick/Roell (figure 3.2) au niveau de l'institut optique et mécanique de précision – univ-Setif 1-, à une vitesse de 0.5mm/minute.

Cette machine est constituée d'un bâti supportant une traverse mobile sur laquelle est montée, une cellule de charge de 100kN. Un ordinateur connecté à la machine permet de contrôler la valeur de la charge appliquée à tout instant. Les éprouvettes sont appuyées sur toute leur surface sur un support plat (figure 3.2). Les déplacements et les charges correspondantes ont été enregistrés dans un ordinateur d'acquisition de données.

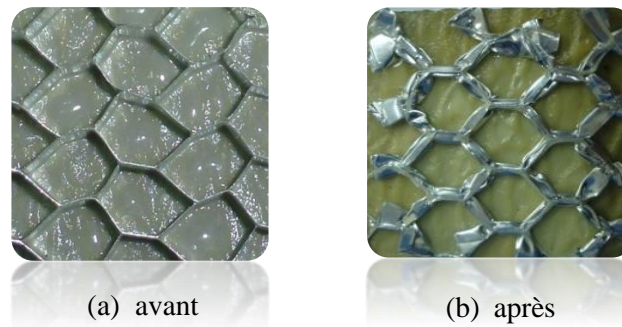


*Figure 3.2: La machine de traction-compression Zwick/Roell.*

### 3.4 Description de l'essai de compression

L'essai de compression a été effectué sur une machine de traction-compression Zwick/Roell selon la norme ASTM C393-62, à une vitesse de 0.5mm/minute.

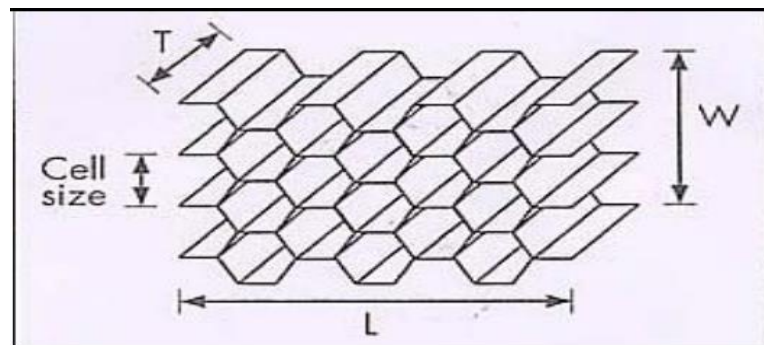
L'éprouvette en nid d'abeille d'aluminium (Fs 272, densité 55 kg/m<sup>3</sup>) avec une seule peau ayant 7 cellules (taille : 9.6mm) est prise en faisant très soigneusement la découpe de façon à ce que l'on ait des arêtes complètes sur les bords. Elle comporte 28 arêtes (figure 3.3). Le résultat de l'essai de compression est présenté dans la figure 3.3.



**Figure 3.3 :** L'essai de compression d'un pain de NIDA en Aluminium.

### 3.5 Description de l'essai d'impact

Les échantillons utilisés de dimension (250mm x 100 mm) sont découpés, suivant les directions appropriées, à partir de panneaux sandwich (250mm x 500mm). Les directions sont celles usuelles des nids d'abeille : direction W ou direction L (figure 3.4). La découpe des échantillons a été faite à l'aide d'une scie à ruban.

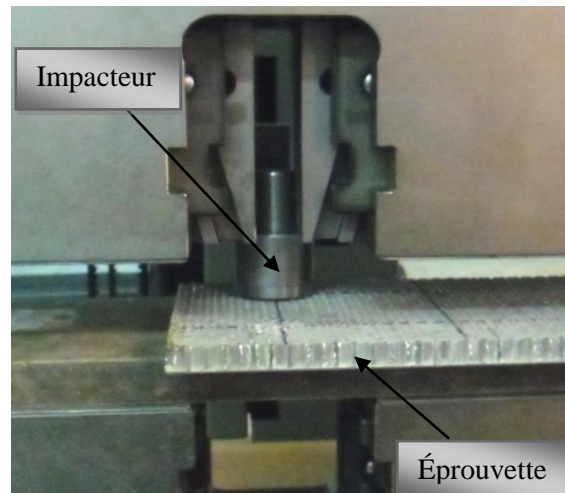


**Figure 3.4 :** Configuration longitudinale  $L$  et transversale  $W$  des cellules de l'âme.

L'essai d'impact a été fait avec des impacteurs de différentes formes (conique, sphérique avec des différents rayons) sur l'âme. Les âmes testées en nids d'abeilles en aluminium (55 et 130 kg/m<sup>3</sup>) de différentes densités. Une seule peau métallique en Aluminium d'épaisseurs 0.6 mm va être utilisée.

Les impacteurs ont été montés sur le dispositif des mors de fixation de la machine de traction (figure 3.2 et 3.5). La pénétration de l'impacteur a été mesurée par les capteurs de déplacement. Les résultats obtenus (déplacements et charges) de l'essai d'impact sont enregistrés dans un ordinateur d'acquisition de données.

Deux essais pour chaque type d'impacteurs sont effectués pour connaître la répétitivité de l'essai.

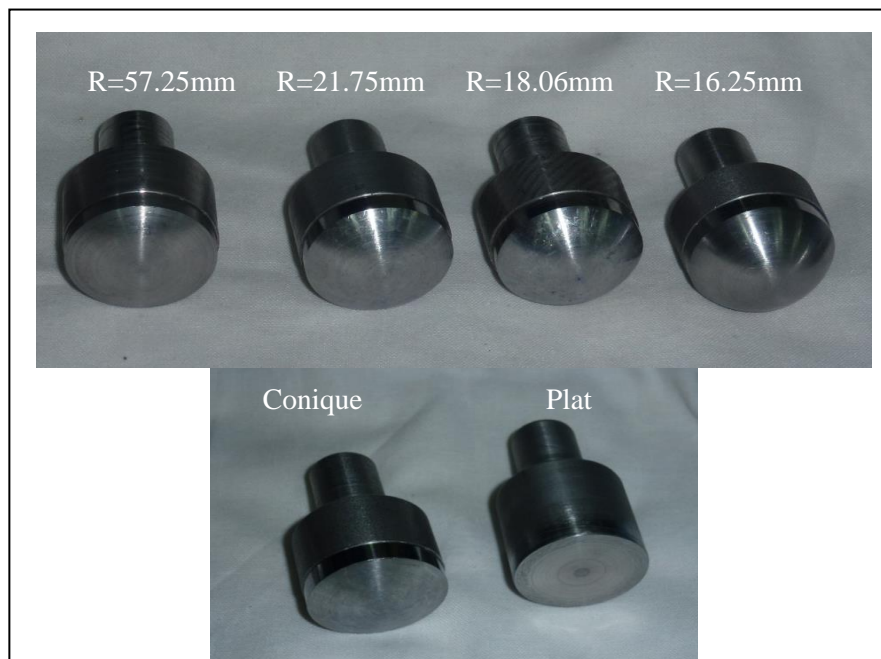


*Figure 3.5 : Montage d'essai d'impact.*

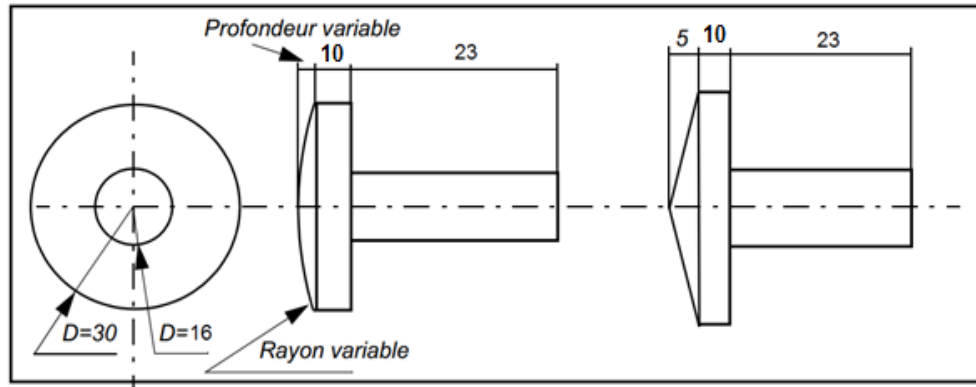
### 3.6 Conception des impacteurs adaptable à la machine de traction

Les 6 impacteurs ont été conçus et réalisés avec différentes formes en acier doux (figure 3.6 et 3.7). Les dimensions géométriques de ces impacts sont données par la figure 3.7 .

- ❖ Plat
- ❖ Conique ;
- ❖ Sphérique (16.25, 18.06, 21.75 et 57.25 mm).



*Figure 3.6 : Les différents impacteurs utilisés.*



**Figure 3.7 :** Dessin et dimensions géométrique des impacteurs.

Le diamètre extérieur de l'impacteur est de 30 mm pour que la surface endommagée finale soit la même pour tous les essais. Le rayon de la partie sphérique est calculé pour avoir un enfoncement final de 2, 6, 8 et 10 mm ce qui donne finalement 57.25, 21.75, 18.06 et 16.25mm pour les rayons hémisphériques. L'impacteur conique est aussi de diamètre 30 mm et a pour profondeur 5 mm.

### 3.7 Description des essais d'indentation sur structures sandwichs à âme en nid d'abeille

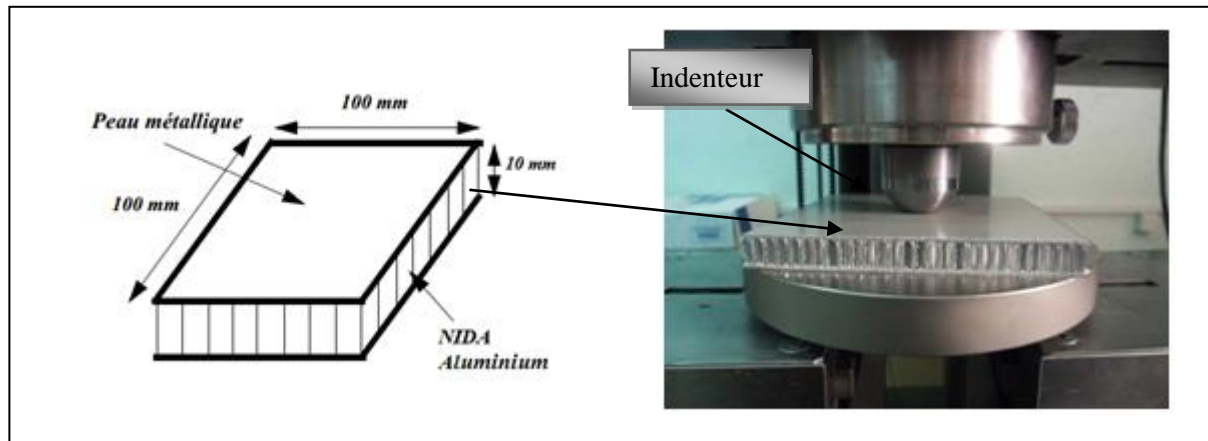
Des éprouvettes sandwichs en Aluminium de taille (100 mm x 100 mm) sont utilisés. Deux peaux en Aluminium d'épaisseurs 0,6 mm vont être utilisées.

Trois éprouvettes de même densité ( $29 \text{ kg/m}^3$ ) sont indentées en utilisant trois différents indenteurs (figure 3.8) :

- ❖ Sphérique de rayon 16.25 mm ;
- ❖ Conique ;
- ❖ Plat.

Les essais d'indentations sont réalisés avec une vitesse d'écrasement de 0,5 mm/min pour pouvoir considérer que le chargement est quasi-statique. L'effort de compression est mesuré par la cellule de force de la machine *Zwick/Roell*.

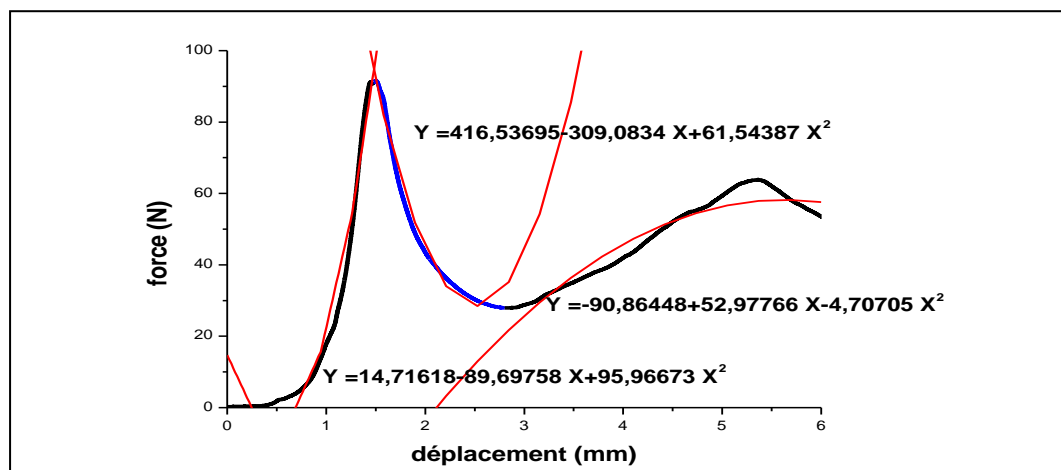




**Figure 3.8 :** Montage et éprouvette d'essai.

La pénétration (l'indentation) maximale de l'impacteur est contrôlée pour les 3 essais jusqu'à l'obtention d'une empreinte résiduelle ou bien une déchirure parfaitement visible de la peau supérieure.

On a observé que la courbe force/écrasement est pratiquement linéaire pendant la première partie du chargement, un flambement précoce des parois des cellules a suggéré que l'essentiel de l'effort de compression est repris par les arêtes verticales du nid d'abeille. D'ailleurs, la chute de force observée correspond précisément au flambage de celle-ci et à la création du premier plissement.



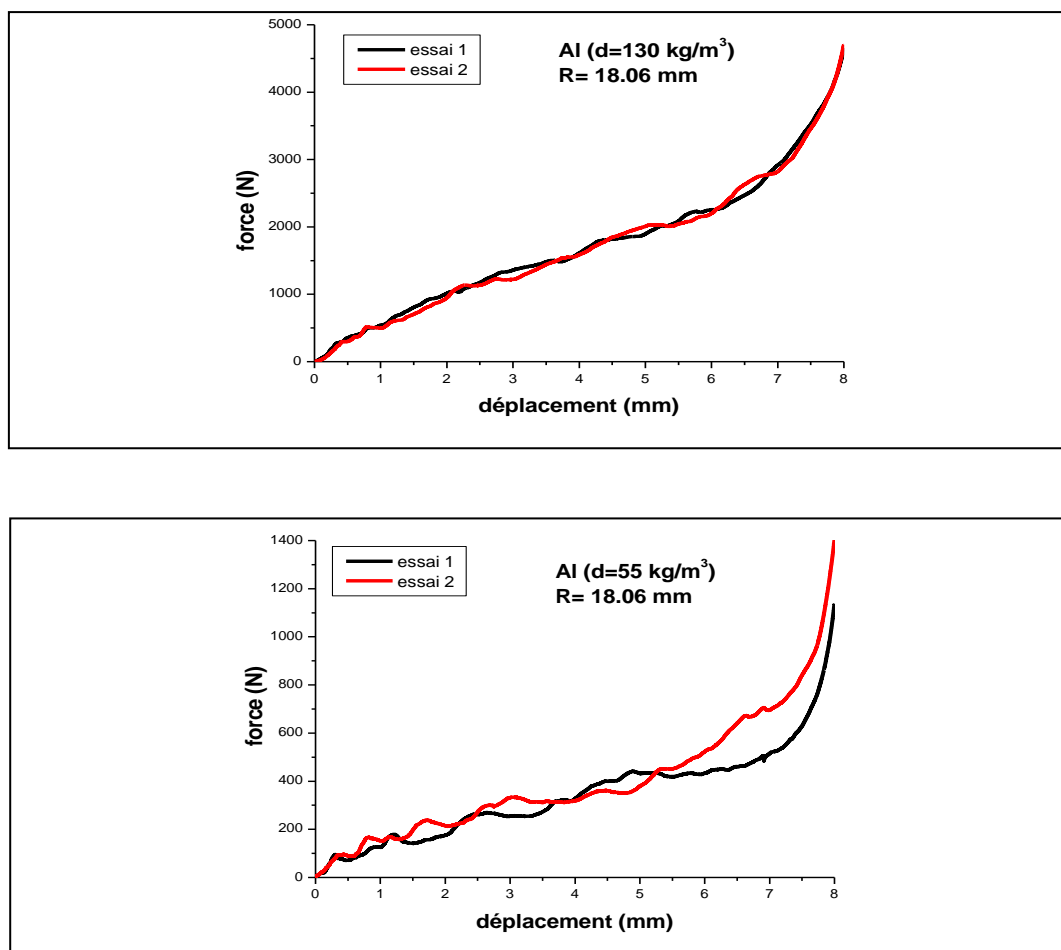
**Figure 3.9 :** Courbe force/déplacement d'une arête et discrétisation polynomiale associée.



### 3.8 Résultats des essais d'impact sur l'âme en nid d'abeille

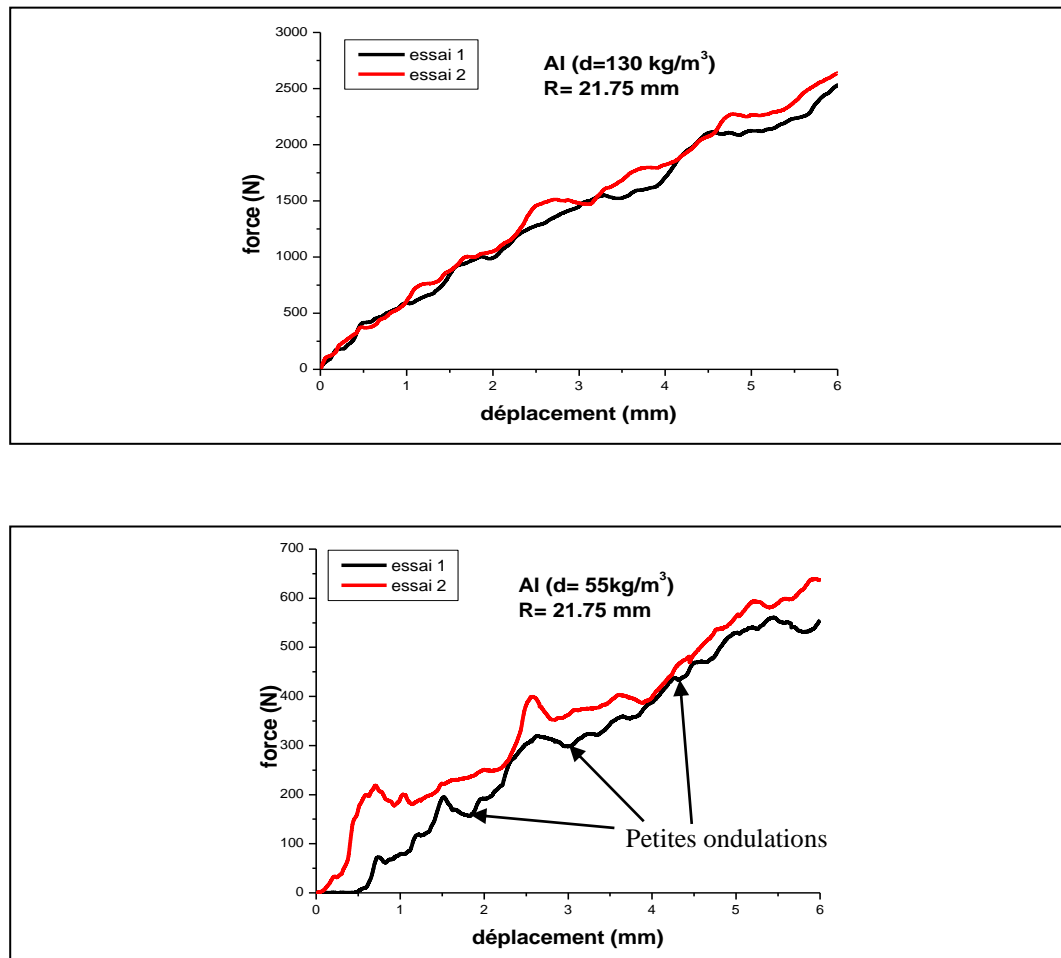
#### 3.8.1 Comparaison des résultats des essais d'impact pour chaque impacteur

Les résultats d'essais d'impact avec différents impacteurs sont présentés sur les figures 3.11 à 3.14 . Une première observation tirée de la lecture de ces graphiques est que l'allure générale des courbes est semblable. Une bonne répétabilité des essais pour chaque impacteur est observée. La figure 3.11 illustre les courbes force/déplacement de l'essai d'impact avec l'impacteur sphérique de rayon 18.06mm sur des éprouvettes en aluminium (de densité 55 et 130 kg/m<sup>3</sup>) .



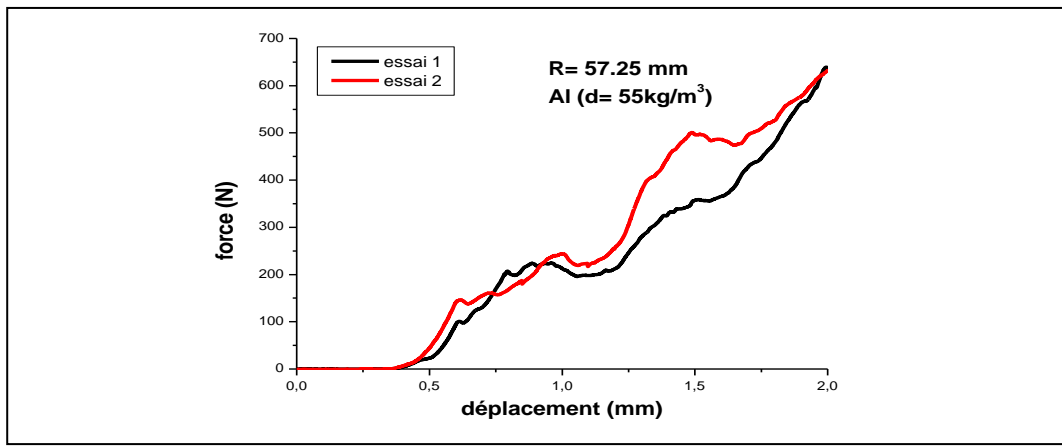
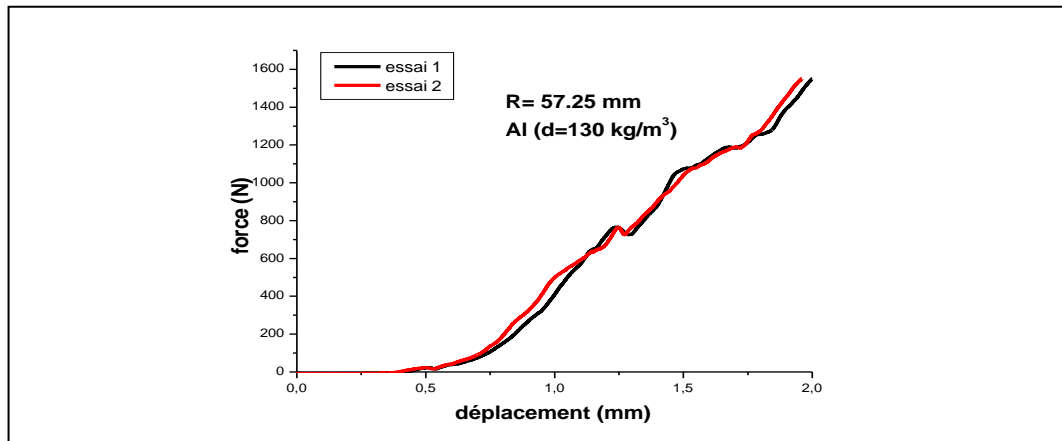
**Figure 3.11 :** Résultats d'essais avec indenteur sphérique 18.06 mm pour différentes densités de l'âme.

La figure 3.12 illustre les courbes force/déplacement de l'essai d'impact avec l'impacteur sphérique de rayon 21.75mm sur les mêmes éprouvettes. Les petites ondulations observées correspondent au passage de la charge critique des arêtes qui se trouve à l'extrémité de la surface endommagée.



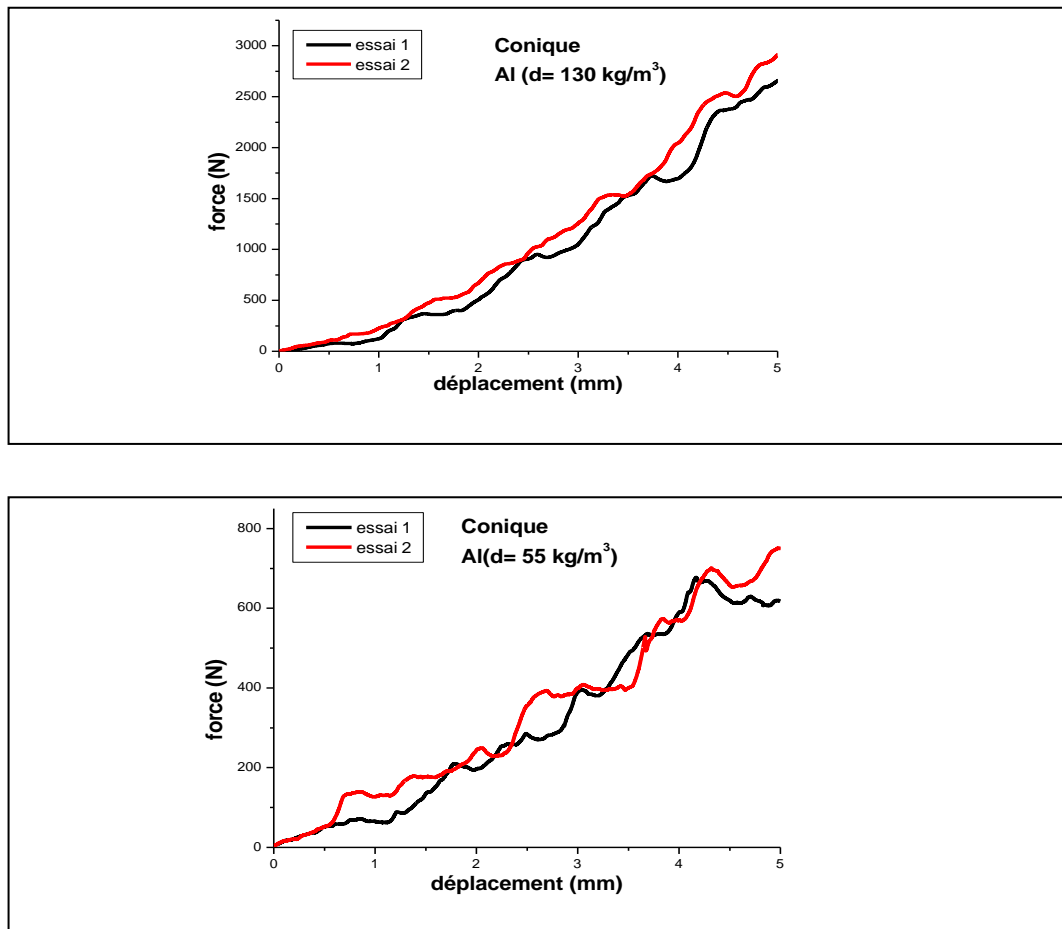
**Figure 3.12 :** Résultats d'essais avec indenteur sphérique 21.75 mm pour différentes densités de l'âme.

Les ondulations observées (figure 3.12) sont moins visibles pour l'essai avec l'impacteur sphérique de grand rayon ( $R = 57.25 \text{ mm}$ ) (voir figure 4.13) car les arêtes qui se situent à l'extrémité sont écrasées presque en même temps que les arêtes qui se trouvent sous la partie centrale de l'impacteur.



**Figure 3.13 :** Résultats d'essais avec indenteur sphérique 57.25 mm pour différentes densités de l'âme.

La figure 3.14 représente l'évolution de la force d'impact en fonction de déplacement de l'impacteur conique pour différentes densités de l'âme. On remarque une bonne répétitivité des essais.

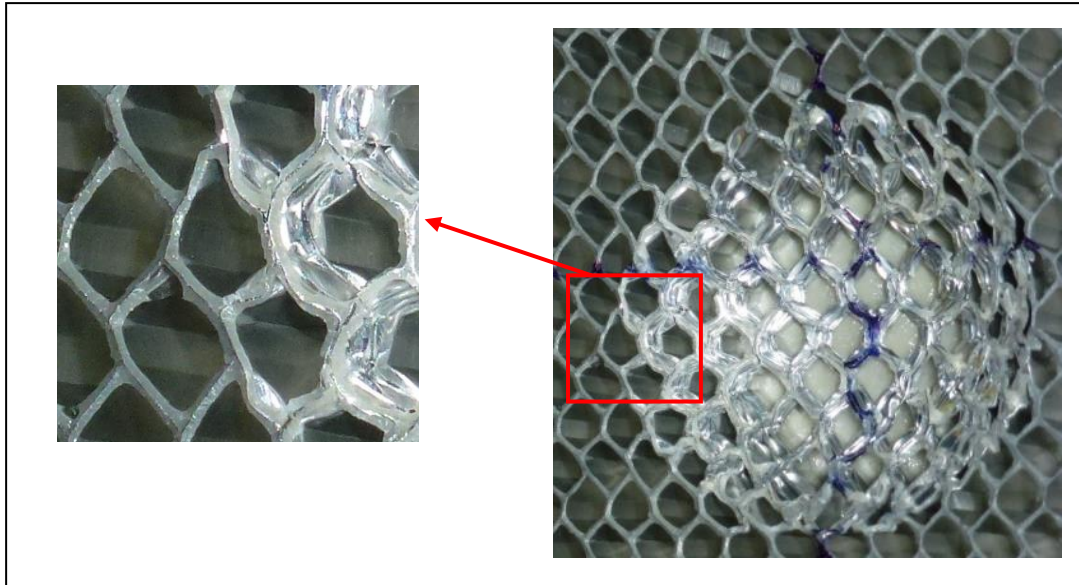


**Figure 3.14** : Résultats d'essais avec indenteur conique pour différentes densités de l'âme.



**Figure.3.15** : Déformation finale du nid d'abeille Alu-Alu seul en indentation ( $55 \text{ kg/m}^3$ ).

On remarque d'après la figure 3.15 que, la surface du nid d'abeille en contact avec l'impacteur, pendant les essais semble bien se déformer suivant la forme de l'impacteur comme le montre les empreintes résiduelles. Les arêtes qui se trouvent juste à l'extérieur de la zone déformée ne semblent subir aucune déformation comme s'il n'existait pas de lien entre deux arêtes côte à côte (figure 3.16).

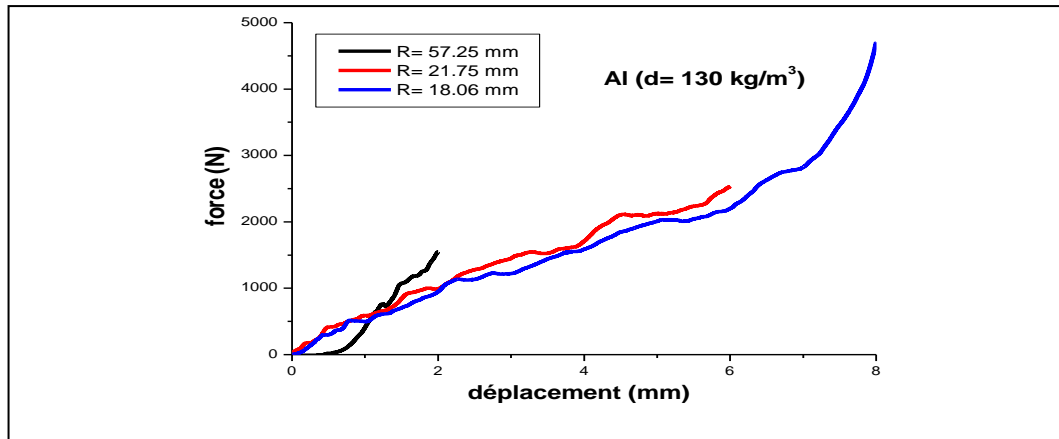


**Figure.3.16** : Empreinte de l'impacteur sphérique de rayon 18.06mm sur âme en aluminium (densité de  $29\text{kg/m}^3$ ).

### 3.8.2 L'effet de la forme de l'impacteur

La figure 3.17 représente une comparaison de l'évolution de la force d'impact en fonction du déplacement des différents impacteurs sphériques pour l'âme en nid d'abeille Aluminium(densité  $130\text{ kg/m}^3$ ).

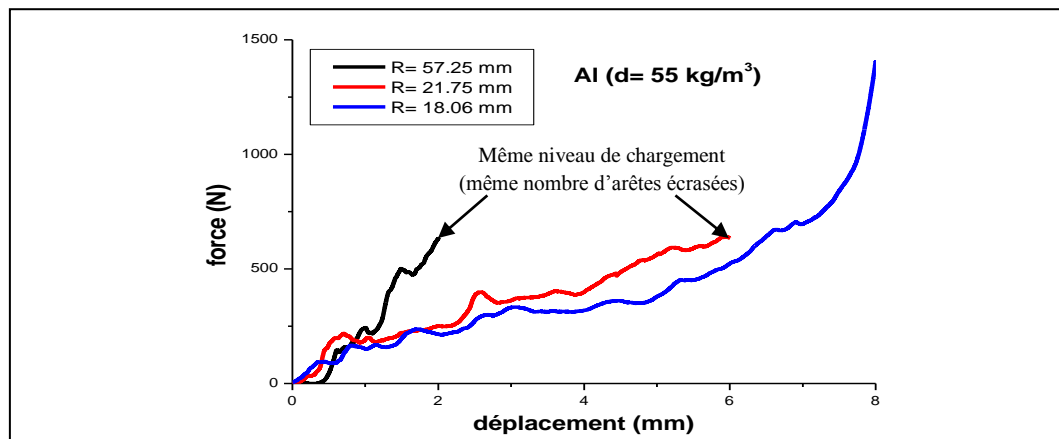
On remarque que le chargement final est différent pour tous les impacteurs sphériques. Il semble que cette différence soit due à un phénomène de rabatement des parois par l'impacteur dans le plan horizontal (au lieu du phénomène d'écrasement vertical attendu) et ce, à partir d'une certaine profondeur d'enfoncement. Ceci renforce encore l'hypothèse qu'une fois que les parois ont flambées, seules les arêtes "travaillent" de manière indépendantes pendant l'impact.



**Figure.3.17 :** Comparaison des essais d'impact de nid d'abeille Aluminium (densité  $130 \text{ kg/m}^3$ ).

Pour l'essai d'impact de nid d'abeille aluminium de densité  $55 \text{ kg/m}^3$  (figure 3.18), le niveau de chargement commun s'explique par le fait qu'à enfoncement maxi, sensiblement le même nombre d'arêtes verticales ont plissé.

L'essai d'impact par l'impacteur de petit rayon provoque un chargement final le plus grand. Les arêtes rabattues ne sont plus verticales qui nécessitent l'augmentation de la force à l'impact.



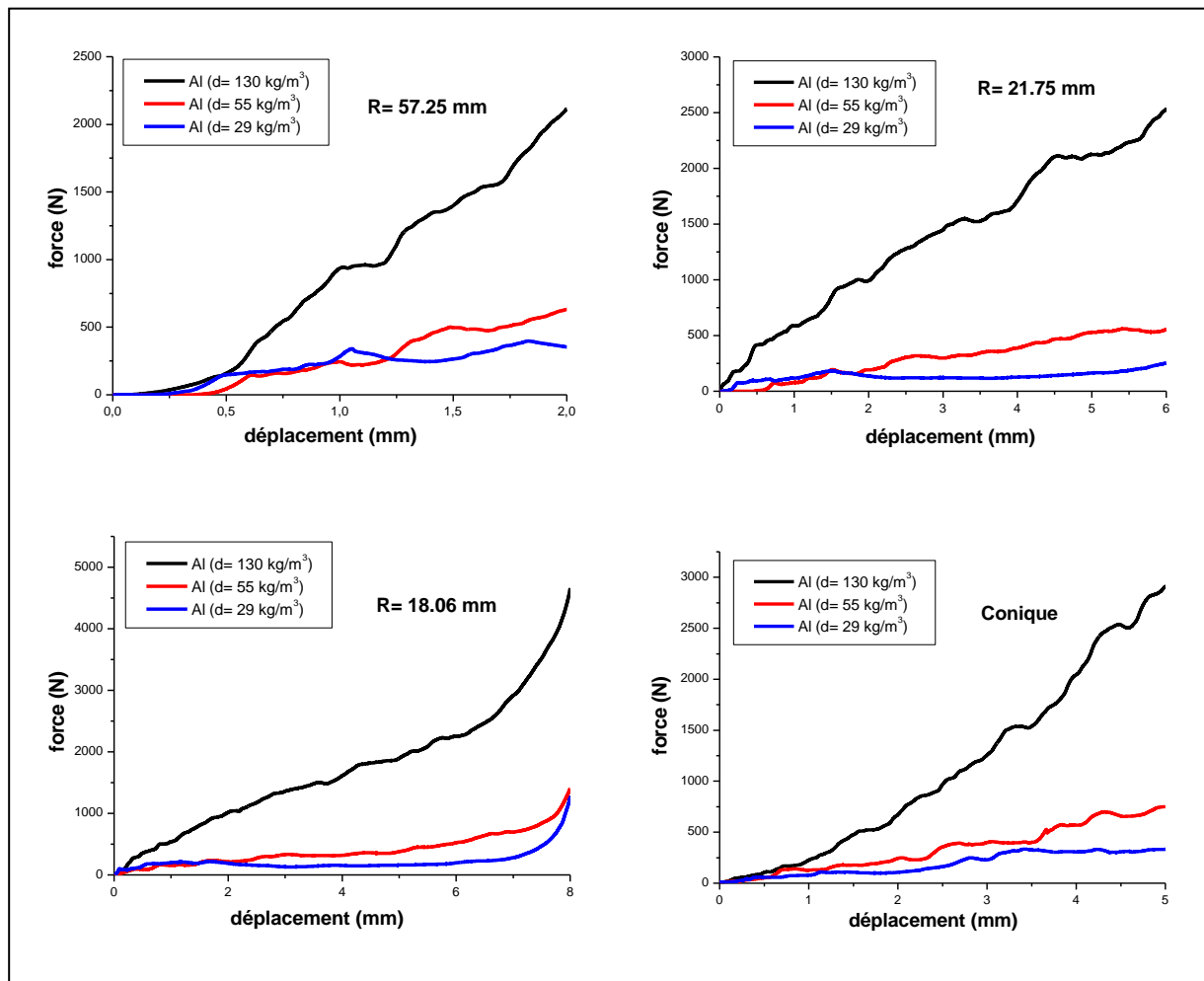
**Figure.3.18 :** Comparaison des essais d'impact de nid d'abeille Aluminium (densité  $55 \text{ kg/m}^3$ ).

### 3.8.3 L'effet de la densité de l'âme

Une première remarque tirée de la lecture des graphes de la figure 3.19 est que l'allure générale des courbes est semblable. La seule différence notable concerne les impacteurs de

petit rayon ( $R=18.06$  mm). La différence de forme semble due au rabattement latéral des arêtes externes en essai, qui commence à partir d'une certaine profondeur d'enfoncement, et qui en conséquence, augmente la force nécessaire à l'impact puisque les arêtes rabattues ne sont plus verticales.

Une autre remarque tirée également est que, plus la densité du Nida utilisés augmente plus le chargement final augmente quel que soit l'impacteur utilisé.

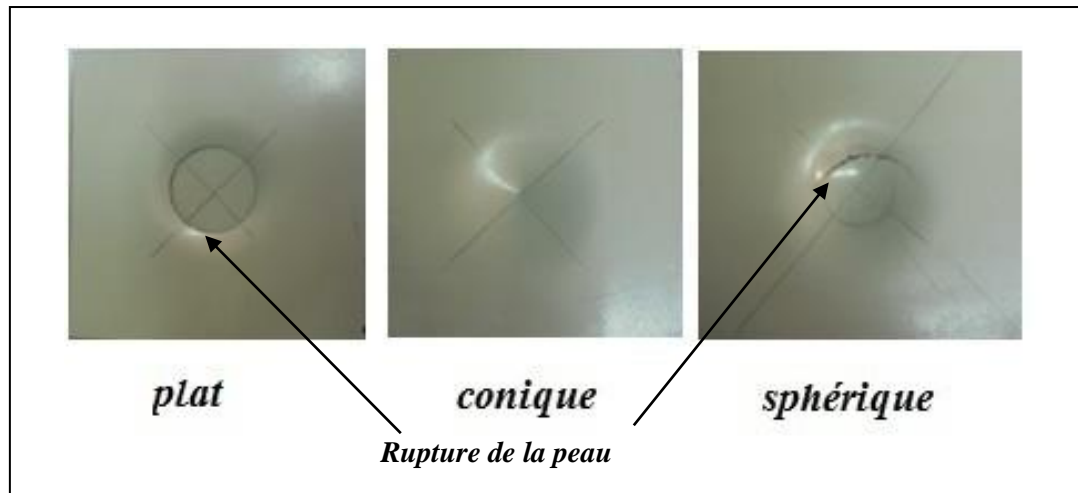


**Figure 3.19 :** Comparaison des essais d'impact de nid d'abeille Aluminium pour différentes densité et différentes impacteur



### 3.9 Résultats des essais d'indentation sur les panneaux sandwichs en NIDA

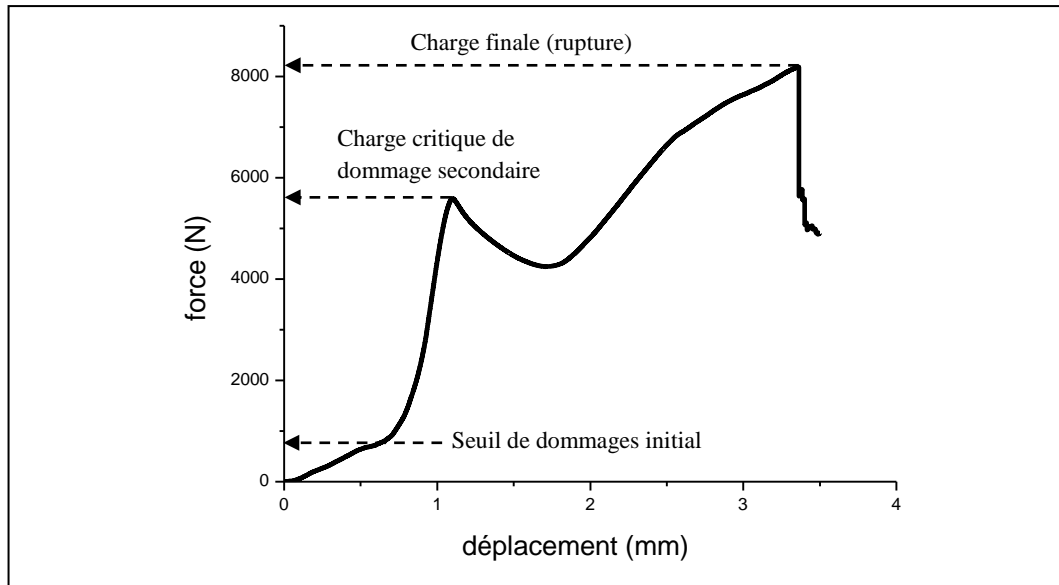
L'indentation résiduelle est parfaitement visible (voir figure 3.20). Lors de l'essai avec l'indenteur plat et l'indenteur sphérique, un bruit que l'on peut attribuer à la rupture du nid d'abeille est entendu.



**figure 3.20:** Aspect final des éprouvettes sandwichs avec peau fine d'épaisseur 1mm.

#### 3.9.1 Essai d'indentation avec indenteur plat

La figure 3.21 illustre la courbe force/déplacement pour un indenteur plat sur un nid d'abeille en aluminium de deux peaux. Trois étapes distinctives de déformation peuvent être clairement identifiées et sont caractérisées par le seuil de dommage initial, la charge critique de dommage secondaire et la charge finale (la rupture de la peau).



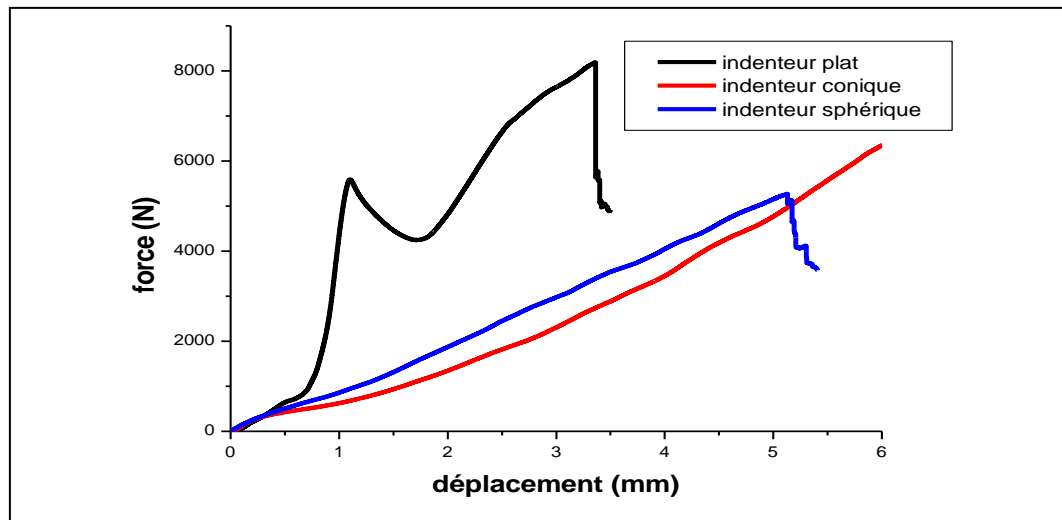
**figure 3.21:** *Courbe force/déplacement pour un indenteur plat.*

La déformation initiale est habituellement élastique et linéaire et termine au seuil de dommage initial. A ce point et après, la courbe devient non linéaire avec une déviation importante dans la pente indiquant le début des dommages initiaux. Parfois, ceci s'est produit avec une baisse de charge. La pente et le seuil de dommage initial dépendent à l'épaisseur de la peau des panneaux sandwichs.

La deuxième étape de déformation a été affectée sensiblement par la forme de l'indenteur.

### 3.9.2 Comparaison entre les essais d'indentation pour différents indenteurs

Les courbes de contact expérimentales sont représentées figure 3.22 . Au début de l'écrasement la structure sandwich indentée présente une raideur importante. A partir d'un certain écrasement (0.5 mm), un très léger changement de pente est observé pour l'indenteur conique et l'indenteur sphérique (rayon de 16.25 mm) contrairement pour l'indenteur plat. La pente et le seuil de dommage initial dépendent à l'épaisseur de la peau, la forme de l'indenteur et la densité de l'âme. Le dommage secondaire est non identifiable pour l'indenteur sphérique ou conique.



**figure 3.22 :** *Courbe force/déplacement pour différents indenteurs.*

Pour l'indenteur sphérique, la courbe de chargement se compose seulement en deux étapes de déformation (des dommages initiaux jusqu'à la rupture). Au contraire, le comportement de l'indentation des panneaux chargés avec l'indenteur plat est caractérisé par la deuxième charge critique avec un dégagement substantiel d'énergie stockée, bien que cette deuxième étape de déformation soit presque linéaire. La pente après cette charge critique semble monter fortement avant de détendre lentement. L'étape finale de déformation, juste pour des panneaux chargés par l'indenteur plat, est caractérisée par une pente sensible probablement augmentée jusqu'à la crête (charge finale), due du nombre plus grand de cellules de nid d'abeilles étant écrasées et de l'étirage de la peau supérieure. La charge de rupture dépend à l'épaisseur de la peau et la forme de l'indenteur. Il semble dépendre moins de la densité de l'âme.

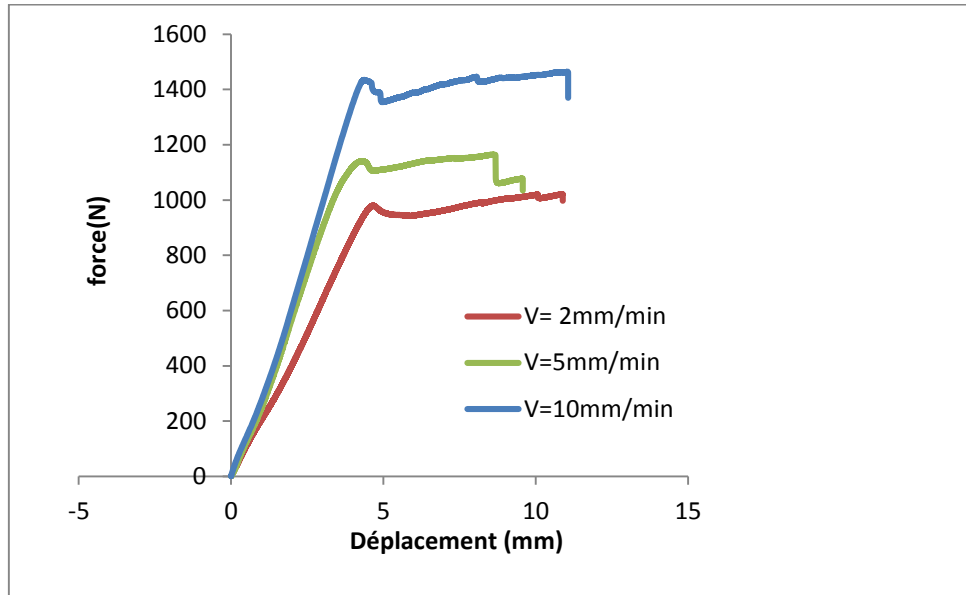
### 3.10 Résultats des essais d'indentation sur les panneaux sandwichs en mousse

Dans cette deuxième étude, nous allons étudier l'effet de la vitesse de l'impacteur sur le comportement des échantillons acier -polyuréthane. Pour ce faire, des essais d'indentation ont été effectués pour différentes vitesses de l'impacteur ( 2, 5 et 10 mm/min ). Tous les tests ont été effectués à température ambiante. Pour chaque vitesse, trois échantillons ont été testés.

La figure 3.23 illustre les courbes force/déplacement de l'essai d'impact avec l'impacteur sphérique de rayon 20 mm pour différentes vitesses ( 2 , 5 et 10 mm/min) , la courbe de chargement se compose de deux étapes de déformation ; une partie linéaire correspondant au

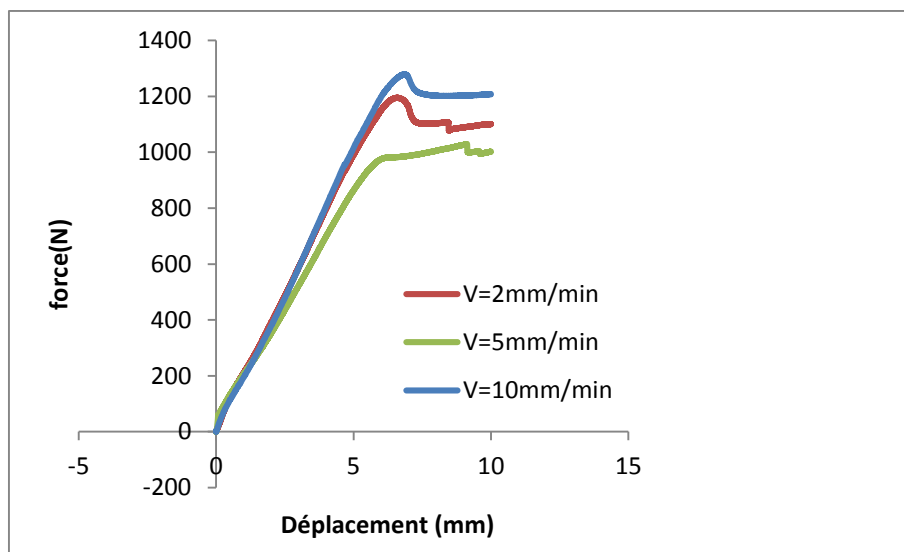
travail de la peau supérieur en traction-compression ; Le comportement non linéaire dépend principalement des propriétés de l'âme sous l'effet des efforts de l'écrasement.

(des dommages initiaux jusqu'à la rupture).



**Figure 3.23 :** Résultats d'essais avec indenteur sphérique 20 mm pour différentes vitesses

La figure 3.24 représente l'évolution de la force d'impact en fonction de déplacement de l'impacteur conique des éprouvettes en mousse (de densité  $40 \text{ kg/m}^3$ ) pour différentes vitesses (2, 5 et 10 mm/min)

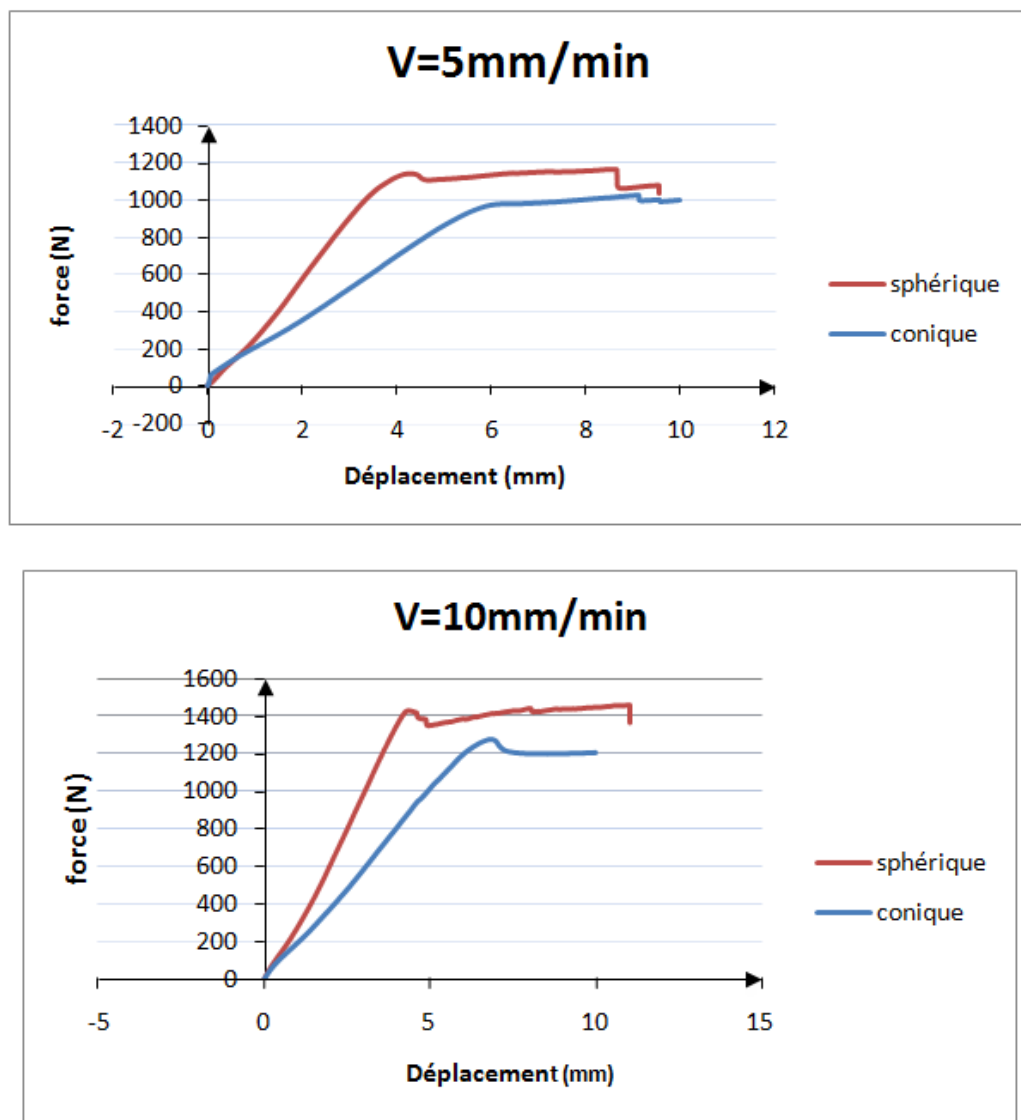


**Figure 3.24 :** Résultats d'essais avec indenteur conique pour différentes vitesses

L'analyse des résultats obtenus montre que la vitesse d'enfoncement joue un rôle majeur sur la réponse à l'impact de nos panneaux. En effet, plus la vitesse de sollicitation augmente, plus la charge maximale à la rupture augmente.

### 3.10.1 Comparaison entre les essais d'indentation pour différents indenteurs

Les courbes expérimentales sont représentées *Figure 3.25*. A partir d'un certain écrasement (1 mm), un très léger changement de pente est observé pour l'indenteur conique et l'indenteur sphérique (rayon de 16.25 mm) contrairement pour l'indenteur plat. La pente et le seuil de dommage initial dépendent à l'épaisseur de la peau, la forme de l'indenteur et la densité de l'âme. Le dommage secondaire est non identifiable pour l'indenteur sphérique ou conique.



**Figure 3.25 :** Comparaison entre les essais d'indentation pour différents indenteurs

Pendant les essais, les panneaux en mousses en contact avec l'impacteur semble bien se déformer suivant la forme de l'impacteur comme le montre les courbes (Figure 3.25) et la forme de l'empreinte (Figure 3.26) empreintes . A partir d'un certain écrasement (1 mm), un décalage de la valeur du pente est observé entre les deux impacteur est expliqué par l'effet de la surface de contact ; quand la surface de l'indenteur augmente provoque une augmentation de la charge de rupture et quand la surface de contact est plus de plus ponctuelle que la rupture et rapide et la charge maximale diminuer.



***Figure 3.26 : la forme des l'empreinte de l'impacteur***