CONCLUSION GÉNÉRALE

Les panneaux de sandwich en nid-d'abeilles répondent bien à des exigences telles que la bonne rigidité, la haute résistance mécanique, et une grande légèreté ; en particulier, beaucoup de critères sont recommandés pour bien bénéficier de ces panneaux en introduisant de nouvelles géométries et des matériaux pour l'affermissement de comportement mécanique, l'homogénéisation analytique, la simulation et l'optimisation de ce type de panneaux permet d'obtenir une idée captivante pour les applications mécaniques spécifiques dans les divers domaines.

Le but de cette étude est de faire la lumière sur l'importance d'une classe de matériaux composites qui sont les sandwichs à âme en nid-d'abeilles. L'intérêt scientifique pour ce type de structures est conforté par un intérêt industriel très croissant. Ce dernier est justifié par la multifonctionnalité et l'avantage de faible poids couplé à une forte rigidité.

Des modèles d'homogénéisation analytiques et numériques ont été développés pour prédire le comportement élastique d'une nouvelle structure cellulaire à parois courbées. La caractérisation des constants élastiques dans le plan et hors plan est optimisée et comparée à l'intermédiaire de simulations numériques qui permet de fournir de nouvelles connaissances sur la conception de nouveaux types des géométries cellulaires. Ces modèles sont très efficaces et performants, permettant de traiter toutes les géométries avec courbure.

Les résultats obtenus donnent un aperçu sur la compréhension de la mécanique des nids-d'abeilles disposés de parois courbées et de faible densité, permettant au concepteur d'en tenir compte à l'avenir.

Nous avons également présenté un aperçu sur les matériaux viscoélastiques, de leurs caractéristiques, et la manière dont leur comportement peut être lié à des modèles rhéologiques. Les résultats ont montré qu'à partir d'un nombre réduit de paramètres, il est possible de prédire le comportement des matériaux viscoélastiques et déterminé les caractéristiques du module dynamique de stockage et de perte dans le domaine fréquentiel. Une description basée sur des caractéristiques du matériau complexes est donc plus apte à décrire la viscoélasticité dans ce domaine. Dans cette approche non paramétrique, la partie réelle de ces caractéristiques est liée à l'élasticité tandis que la partie imaginaire correspond à la dissipation.

Le développement d'un programme par le code Matlab a permis de déterminer des coefficients de la série de Prony d'un module de relaxation viscoélastique en utilisant des données de charge en fonction du temps pour différentes séquences de rapport de charge ajustées aux intégrales de convolution des matériaux testés. La variation des modules de stockage et de perte a permis la modélisation, du comportement réel des matériaux viscoélastiques.

Le noyau en matériau viscoélastique fonctionne bien, car il a le potentiel d'amplifier la déformation de flexion et de cisaillement dans la couche viscoélastique plus efficacement que les autres matériaux fréquemment utilisés comme de noyau dans les poutres et les plaques sandwich. Les résultats montrent une tendance intéressante des premières fréquences de résonance par rapport aux propriétés structurelles effectives. Les nids-d'abeilles avec un noyau en matériau viscoélastique, avec la même masse, ont décalé les fréquences naturelles plus bas et détenaient plus de résonances dans la plage de 1 à 1000 Hz.

Le comportement dynamique des structures sandwich avec des topologies en nid-d'abeilles courbées doit être pris en compte lors de la conception de ces structures. Les fréquences propres et les modes de résonance, ainsi que les amortissements, et les facteurs de perte associés sont générés par plusieurs méthodes, en utilisant des matériaux polymères permettent de localiser les problèmes liés aux vibrations pour de différents types de chargement dynamique et de vérifier que la présence de la courbure favorise l'amortissement des panneaux sandwich avec un noyau viscoélastique.

Pour les analyses dynamiques et quasi statiques réalisées, une plaque sandwich en nid d'abeille auxétique courbé présente l'amortissement le plus élevé pour des conditions aux limites données et les facteurs de perte sont plus élevés pour le chargement hors du plan que pour le chargement dans le plan. De plus, la rigidité hors plan était significativement plus élevée avec une énergie de déformation interne stockée plus faible, par rapport au chargement dans le plan, car les modules d'élasticité efficaces hors plan sont généralement plus grands que dans le plan.

L'interaction entre les couches rigides d'aluminium et le polycarbonate pris en sandwich dans les parois des cellules peut jouer un rôle important dans le contrôle de la quantité d'amortissement dans la structure en nid-d'abeilles. Les Topologies en nid-d'abeilles auxétiques ont un degré de dissipation d'énergie et une capacité d'amortissement élevée par rapport aux nids-d'abeilles conventionnels, quelle que soit la sollicitation appliquée, ces topologies sont plus flexibles et génèrent des fréquences naturelles, plus basses que le noyau conventionnel.

Le comportement mécanique de structures à parois minces en aluminium, aciers et stratifiés composites en fibres de carbone et de verre avec des sections circulaires, carrées, hexagonales et hexagonales courbées a été étudié sous l'impact à grande vitesse (compression quasi statique) pour le but d'améliorer le comportement à l'écrasement des structures tubulaires. Les cellules à paroi courbée conventionnelle représentent la meilleure efficacité de la force d'écrasement et une capacité d'absorption d'énergies supérieure à celle des sections classiques généralement utilisées dans ce domaine.

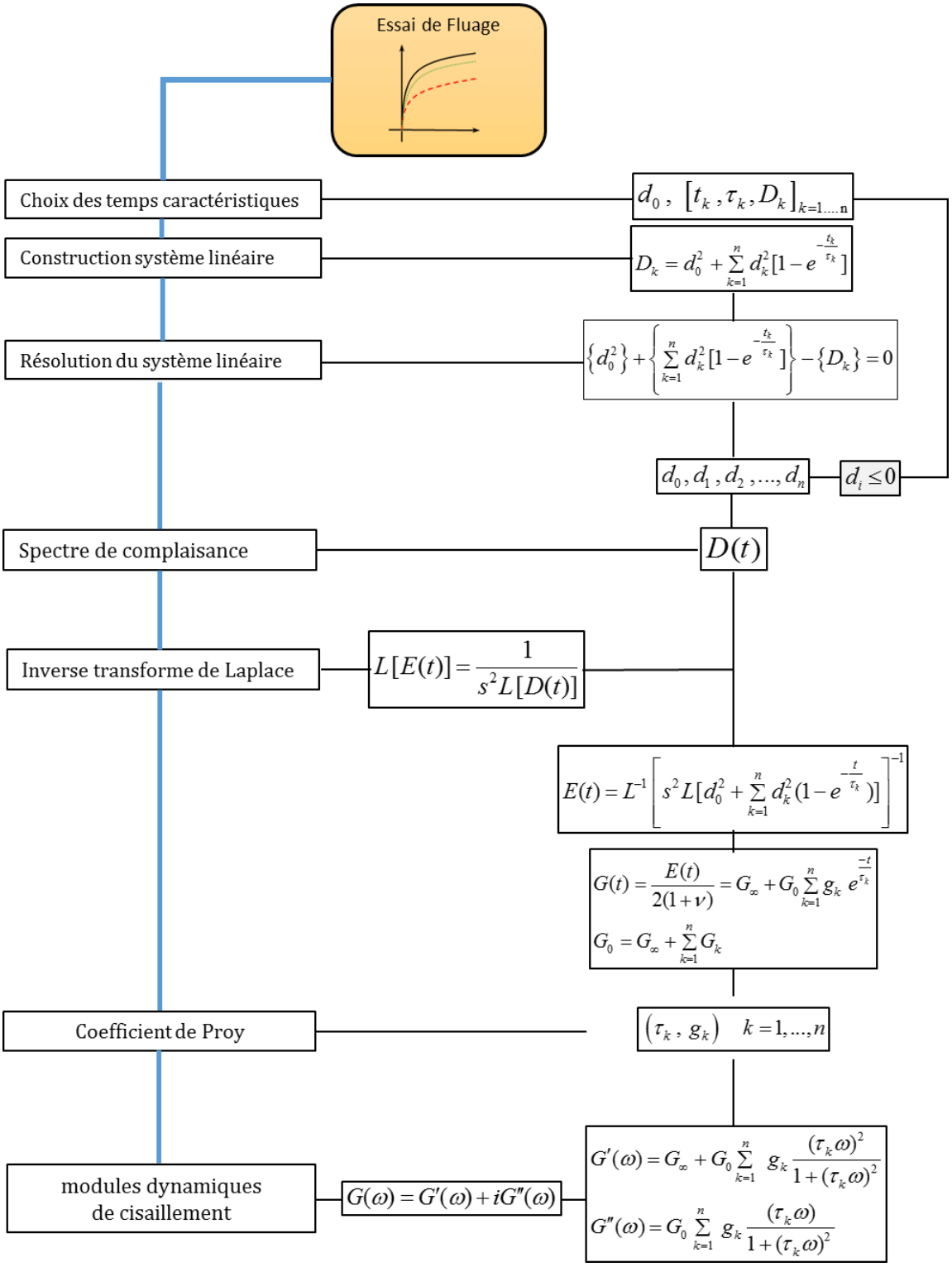
Perspectives

Les trois axes du travail effectué dans cette étude méritent d'être approfondis par :

1- L'étude numérique présentée dans cette thèse sur les plaques en sandwichs avec noyau viscoélastique n'est qu'une première étape. En effet par la suite, nous souhaitons effectuer des analyses expérimentales sur d'autres types de cellules.
2- Ce travail peut être prolongé en dérivant d'autres topologies de nids-d'abeilles en changeant les paramètres géométriques des cellules unitaires qui peuvent offrir de meilleures capacités d'amortissement et d'écrasement.

ANNEXE 01

L'organigramme de calcul permet d'évaluer les paramètres de la série de Prony et les modules dynamiques de cisaillement à partir d'un essai de fluage et des transformations mathématiques pour définir le matériau viscoélastique dans l'ABAQUS.

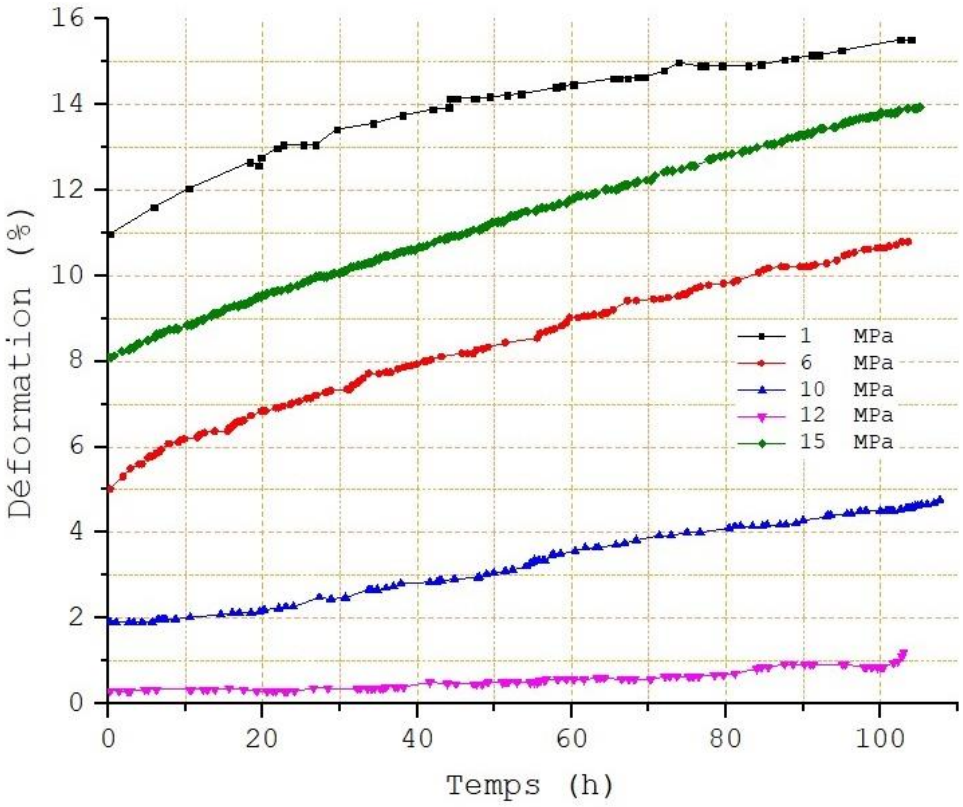


A1.1 Programme Matlab pour la détermination des coefficients de série Prony

```
%============ coefficient de PRONY (alfa i) pour le PTFE ==================
%======================== La valeur de d0 ================================
d0=0.006;
%==================== les temps caractéristiques =========================
t1=0.704;
t2=56.807;
t3=80.5164;
t4=119.718;
%============== La complaisance D(t) pour chaque temps ti ===============
%============================= Di=D(ti)-d0 ================================
D1=0.0091944-0.006
D2=0.0111389-0.006
D3=0.0112888-0.006
D4=0.0114444-0.006
%=========================1-exp(-t/teau) ================================
K11=1-(exp((-t1/0.1)));
K12=1-(exp((-t1/1)));
K13=1-(exp((-t1/10)));
K14=1-(exp((-t1/100)));
K21=1-(exp((-t2/0.1)));
K22=1-(exp((-t2/1)));
K23=1-(exp((-t2/10)));
K24=1-(exp((-t2/100)));
K31=1-(exp((-t3/0.1)));
K32=1-(exp((-t3/1)));
K33=1-(exp((-t3/10)));
K34=1-(exp((-t3/100)));
K41=1-(exp((-t4/0.1)));
K42=1-(exp((-t4/1)));
K43=1-(exp((-t4/10)));
K44=1-(exp((-t4/100)));

K= [K14 K11 K12 K13;
    K24 K21 K22 K23;
    K34 K31 K32 K33;
    K44 K41 K42 K43]
%======================== La valeur de Dii ===============================
B=[0.00319444;
    0.0051389;
    0.0052778;
    0.005444];
%======================== les constantes di ==============================
 XX= K\B;
fprintf('%6s  \n','XX=',XX');
%=================== D(t)= somme[1-exp(-t/teau)]XXi=======================
%D(t)= Cst-XX(22)*e(-t/0.01)-XX(33)*e(-t)-XX(44)*e(-t/10)-XX(11)*e(-t/100))
%D(t)=0.01178986-0.0022537*exp(-t/0.1)-0.0017652*exp(-t)-0.00062586*exp(-
t/10)-0.0011451*exp(-t/100)
syms   t s
AA= laplace(0.01178986-0.0022537*exp(-t/0.1)-0.0017652*exp(-t)-
0.00062586*exp(-t/10)-0.0011451*exp(-t/100))
%==================== E(t)=1/((s^2)*L[D(t)])==============================
syms   s t
%============================== ROOTS ====================================
r1=(1/s)
r2=(s+10)
r3=(s+1)*(s+0.01)*(s+0.1)
r4=(s+1.2078)*(s+0.011066)*(s+0.10617)*(s+13.848)
```

```
%================================================
E(t)=ilaplace((r1*r2*r3)/(r4))
t=0:0.1:50;
plot(t,E(t))          % Figure
%E=0.12045*exp(-1.2078*t)+ 5.3738e-2*exp(-1.1066e-2*t)+ 3.4329e-2*exp(-
0.10617t)+ 0.28259*exp(-13.848t)+ 0.50889;
%========= Module de cisaillement G(t) et de compressibilité K(t)==========
Nu= 0.33    % Coefficient de poisson du matériau
syms t
Gt=E(t)\(2*(1+Nu))        % Module de cisaillement G(t)
syms t
Kt=E(t)\(3*(1-(2*Nu)))    %  Module de compressibilité K(t)
%Gt=0.17428+9.6777e-2*exp(-(t/(0.0722)))+0.04125*exp(-t/(0.8285)))
     +1.1757e-2*exp(-(t/(9.4188)))+1.8403e-2*exp(-(t/(90.3667)))
%=========== Détermination des coefficients de PRONY ======================
Ginf=0.17428;
G1=9.677e-2;
G2=0.04125;
G3=1.1757e-2;
G4=1.8403e-2;
somGi=G1+G2+G3+G4
G0=Ginf+somGi
alfa1=G1/G0     % pour t1=0.704          alfa1= 0,282573147228873
alfa2=G2/G0     % pour t2=56.807         alfa2= 0,120452023593996
alfa3=G3/G0     % pour t3=80.5164        alfa3= 0,034331016761081
alfa4=G4/G0     % pour t4=119.718        alfa4= 0,053737662792734
%============================== FIN ======================================
```



Fig[1]. A1.1 Variation de la déformation en fonction du temps pour des divers contraintes (Pour le PTFE)

[1]Guillaume Vivien. Modélisation d'une vanne à tournant sphérique munie d'un joint de polymère viscoélastique. Thèse de maîtrise ès sciences appliquées -2010.

ANNEXE 02

Dans cette étude, le modèle constitutif du matériau pour caractériser la réponse de l'impact est le modèle constitutif de *Johnson-Cook*. Dans ce modèle, il existe trois réponses matérielles clés, l'écrouissage, les effets de la vitesse de déformation et le ramollissement thermique. Ces trois effets sont combinés, comme le montre la formule (A2.1).

Ce modèle est une loi purement empirique. Il a rencontré beaucoup de succès vu sa simplicité et la grande disponibilité de paramètres pour différents matériaux. De plus, ces paramètres peuvent être obtenus par un nombre peu élevé d'expériences. Des modèles plus complexes peuvent fournir une description plus précise du comportement du matériau, mais ces modèles plus complexes ne sont pas toujours aisément intégrables dans les codes de calcul commerciaux par les routines utilisateurs. L'inconvénient de ce modelé est la forme imposée de l'écrouissage du matériau (de type puissance).

Pour décrire correctement les phénomènes de la dynamique rapide, il est important d'utiliser des lois constitutives tenant compte non seulement de la vitesse de déformation plastique équivalente ε_{pl} mais aussi de la température, afin d'être capable de représenter l'adoucissement résultant de l'échauffement du matériau (adoucissement thermique).

$$. \sigma_{crit} = \left(A + B\left(\bar{\varepsilon}^{pl} \right)^n \right) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}}{\dot{\bar{\varepsilon}}_0} \right) \left(1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \right)^m \right) \qquad \text{(A2.2)}$$

Chaque facteur représente :

$\left(A + B\left(\bar{\varepsilon}^{pl} \right)^n \right)$ …..… C'est la dépendance de la limite élastique à la déformation plastique.

$\left(1 + C \ln \frac{\dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}}{\dot{\bar{\varepsilon}}_0} \right)$ …….. Représente la sensibilité à la vitesse de déformation.

$1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \right)^m$ …. Modélise l'adoucissement thermique dû à l'élévation de température résultant de la déformation.

Cette approche ne prend pas en compte les effets dus à l'histoire de la vitesse de déformation et de la température.

Le choix de la vitesse de déformation de référence $\dot{\bar{\varepsilon}}_0$ influence la valeur du paramètre C lors du processus d'identification des contraintes, on obtient une valeur de C différent si la valeur de $\dot{\bar{\varepsilon}}_0$ est modifiée. Il n'y a pas d'unanimité dans la littérature concernant le choix de, $\dot{\bar{\varepsilon}}_0$ mais une valeur de $\dot{\bar{\varepsilon}}_0 = 1\ s^{-1}$ est couramment utilisée.

Ajoutons que lorsque la vitesse de déformation plastique équivalente $\dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}$ est inférieure à $\dot{\bar{\varepsilon}}_0$, le terme de viscosité est annulé. Ceci est logique dans la mesure où cela induirait une diminution de la limite élastique du matériau. Or, la viscosité plastique ne peut qu'augmenter cette limite élastique.

De plus, le test de plasticité se fait sur la limite de plasticité non visqueuse (on considère que la vitesse de déformation plastique est nulle si on n'a pas de plastification). Ajoutons encore que, sans cette précaution numérique, nous risquons d'obtenir, pour de très faibles valeurs de $\dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}$, une limite élastique négative ! Dans le même ordre d'idées, si la température est inférieure à T_{room}, le facteur d'adoucissement thermique est pris égal à 1, ce qui supprime les problèmes numériques rencontrés dans le cas où l'exposant *m* est inférieur à 1. En pratique, nous choisirons logiquement, comme température initiale, la température ambiante T_{room} ou éventuellement une température supérieure au cas où le matériau serait chauffe auparavant. Cependant, des températures inférieures à T_{room} peuvent quand même éventuellement résulter d'effets numériques dus à un maillage trop grossier et à une variation brutale de la température (effet de peau). Dans un souci de simplification des écritures, nous définissons la vitesse de déformation plastique équivalente relative $\dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}$ et la température relative *T*.

Notation :

σ_{crit} : Contrainte équivalente selon le critère de Von Mises.

$\bar{\varepsilon}^{pl}$ & $\dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}$: Déformation plastique équivalente et la vitesse de déformation équivalente.

$\dot{\bar{\varepsilon}}_0$: Vitesse de déformation de référence.

A : Limite d'élasticité.

B & *n* : Traduisent l'écrouissage.

C & *m* : la sensibilité à la vitesse de déformation et la sensibilité à la température.

T & T_{room} & T_{melt} : Respectivement, la température, la température initiale et la température de fusion.