

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté Des Sciences Appliquées

Département : Génie Mécanique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE / PROFESSIONNEL

Domaine : Science et Technique

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : **Fabrication mécanique et productive**

Présenté par : **BEN AHMED ZOUAOUID**

ANALYSE VIBRATOIRE D'UN MATRICE COMPOSITE

CAS : PANNEAU SANDWICH

Devant le jury :

Président :

Examineur :

Encadreur : Bou-okba Mostapha

Année universitaire 2023/2024

Remerciements

Tout d'abord , je souhaite exprimer ma gratitude envers notre Créateur pour nous avoir accordé la force nécessaire pour mener à bien cette tâche. Ensuite, je voudrais remercier chaleureusement toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet, en particulier notre encadreur de mémoire . Je souhaite dédier ce modeste travail à mes précieux parents, ainsi qu'à tous mes frères et sœurs, et à toute ma famille. Je tiens également à exprimer ma gratitude envers tous mes amis et les membres de la communauté du département des sciences de la terre et de l'univers.

Résumé

Le but ultime de l'analyse vibratoire d'un panneau sandwich composite est de garantir que la structure est à la fois performante et fiable dans ses applications prévues. Cela inclut la maximisation des propriétés dynamiques, l'optimisation de la conception, l'amélioration du confort et de la sécurité, ainsi que la conformité aux normes et réglementations industrielles. En réalisant une analyse vibratoire approfondie, les ingénieurs peuvent concevoir des structures plus efficaces, plus sûres et plus durables

Abstract

The ultimate goal of vibration analysis of a composite sandwich panel is to ensure that the structure performs both well and reliably in its intended applications. This includes maximizing dynamic properties, optimizing design, improving comfort and safety, and complying with industry standards and regulations. By performing in-depth vibration analysis, engineers can design more efficient, safer and more durable structures

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'analyse vibratoire des structures composites, et plus particulièrement des panneaux sandwichs, est un domaine d'étude essentiel en ingénierie des matériaux et mécanique des structures. Les panneaux sandwichs sont largement utilisés dans divers secteurs industriels, notamment l'aéronautique, l'automobile, la construction navale, et le génie civil, en raison de leur excellente combinaison de légèreté, rigidité, et résistance mécanique.

Contents

CHAPITRE I.....	6
RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE.....	6
Composition des Panneaux Sandwichs.....	7
1. Peaux Externes (Faces) :.....	7
2. Noyau Interne :.....	7
Principe de Fonctionnement.....	8
• Peaux : Sous une charge de flexion, les peaux subissent des tensions (traction et compression) importantes. Leur éloignement par le noyau augmente le moment d'inertie, améliorant ainsi la rigidité globale de la structure... 8	
• Noyau : Il supporte les efforts de cisaillement et maintient les peaux externes en position, tout en ajoutant un minimum de poids supplémentaire. 8	
Les différentes panneaux : Les panneaux sandwichs sont des structures composites utilisées dans de nombreux domaines en raison de leur légèreté et de leur rigidité. Il existe plusieurs types de panneaux sandwichs, chacun conçu pour répondre à des besoins spécifiques en fonction des matériaux utilisés pour les peaux et le noyau..... 8	
1. Panneaux Sandwichs avec Noyau en Mousse.....	8
Chapitre II CALCUL.....	25
VIBRATION	25
CHAPITRE III.....	36
Homogénéisation analytique et numérique des nids d'abeilles	36
2. Création de la Géométrie.....	37
II.4.1.2. Propriétés hors du plan.....	42
$v_{13} = v_{23} = v_S$	43
b) Modules de cisaillement transverses.....	43
II.5. Approche numérique.....	43
II.6.3 Modules de cisaillement G12.....	50
Références Bibliographiques.....	58

CHAPITRE I RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Les panneaux sandwichs sont des structures composites largement utilisées dans divers secteurs en raison de leurs excellentes propriétés mécaniques et de leur légèreté. Voici une présentation générale des panneaux sandwichs, incluant leur composition, leurs avantages, leurs applications, et les défis associés à leur utilisation. [1]

Composition des Panneaux Sandwichs

Un panneau sandwich typique est constitué de trois couches principales :

1. Peaux Externes (Faces) :

- Matériaux : Les peaux sont généralement fabriquées à partir de matériaux rigides et résistants tels que des métaux (aluminium, acier inoxydable), des composites à fibres (fibre de verre, fibre de carbone), ou des polymères renforcés.
- Fonction : Elles assurent la résistance à la traction et à la compression, protègent le noyau interne, et contribuent à la rigidité globale de la structure.

2. Noyau Interne :

- Matériaux Le noyau peut être constitué de mousses polymères (comme le polyuréthane ou le polystyrène), de structures en nid d'abeilles (fabriquées à partir d'aluminium ou de matériaux composites), ou de bois (comme le balsa).
- Fonction : Le noyau fournit une épaisseur au panneau sans ajouter beaucoup de poids, ce qui augmente la rigidité à la flexion et la résistance à la déformation. Il contribue également à l'isolation thermique et acoustique

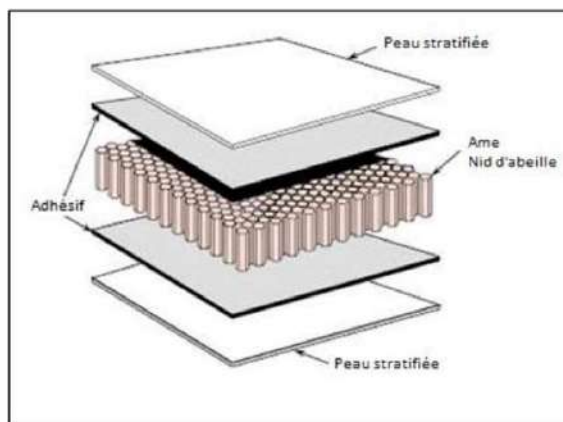


Figure 01 : Structure sandwich du composite[1]

CHAPITRE I RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Principe de Fonctionnement

La conception en sandwich fonctionne sur le principe de l'optimisation de la structure en répartissant les contraintes mécaniques entre les peaux externes et le noyau interne [6]:

- **Peaux** : Sous une charge de flexion, les peaux subissent des tensions (traction et compression) importantes. Leur éloignement par le noyau augmente le moment d'inertie, améliorant ainsi la rigidité globale de la structure.
- **Noyau** : Il supporte les efforts de cisaillement et maintient les peaux externes en position, tout en ajoutant un minimum de poids supplémentaire.

Les différents panneaux : Les panneaux sandwichs sont des structures composites utilisées dans de nombreux domaines en raison de leur légèreté et de leur rigidité. Il existe plusieurs types de panneaux sandwichs, chacun conçu pour répondre à des besoins spécifiques en fonction des matériaux utilisés pour les peaux et le noyau.

Voici une présentation des différents types de panneaux sandwichs [7]:

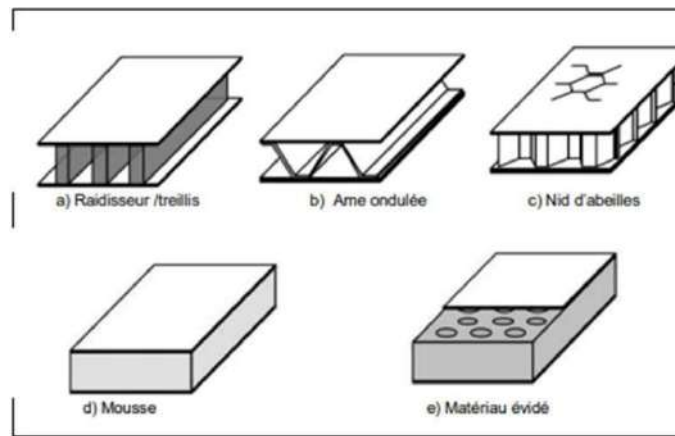


Fig2 - différents types

1. Panneaux Sandwichs avec Noyau en Mousse

a. Mousse Polyuréthane (PU)

- **Caractéristiques** : Bonne isolation thermique, légèreté, résistance à la compression.
- **Applications** : Construction de bâtiments, réfrigération, isolation thermique.

b. Mousse Polystyrène (PS)

- **Caractéristiques** : Très léger, bonne isolation thermique, économique.
- **Applications** : Construction, emballage, isolation des toits et des murs.

c. Mousse Phénolique

- **Caractéristiques** : Excellente résistance au feu, bonne isolation thermique.
- **Applications** : Bâtiments nécessitant une haute résistance au feu, isolation des conduits.

2. Panneaux Sandwichs avec Noyau en Nid d'Abeilles

a. Nid d'Abeilles en Aluminium

- **Caractéristiques** : Haute résistance à la compression, légèreté, bonne absorption d'énergie.

CHAPITRE I RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

- **Applications** : Aéronautique, transport, structures marines, panneaux décoratifs.

b. Nid d'Abeilles en Nomex (Aramide)

- **Caractéristiques** : Haute résistance à la chaleur, légèreté, excellente résistance mécanique.
- **Applications** : Aéronautique, applications militaires, équipement de sport **ref**.

c. Nid d'Abeilles en Papier ou Carton

- **Caractéristiques** : Économique, recyclabilité, légèreté.
- **Applications** : Emballage, panneaux d'exposition, ameublement.

3. Panneaux Sandwichs avec Noyau en Matériaux Naturels

a. Balsa

- **Caractéristiques** : Léger, haute rigidité, renouvelable.
- **Applications** : Construction navale, éoliennes, applications aéronautiques.

b. Fibres Naturelles (chanvre, lin)

- **Caractéristiques** : Écologique, bonne isolation thermique et acoustique.
- **Applications** : Construction écologique, panneaux acoustiques, ameublement.

4. Panneaux Sandwichs avec Noyau en Mousse Thermoplastique

a. Polypropylène (PP)

- **Caractéristiques** : Bonne résistance aux produits chimiques, recyclable, flexible.
- **Applications** : Applications automobiles, emballages, panneaux de signalisation.

5. Panneaux Sandwichs avec Peaux en Matériaux Composites

a. Fibre de Verre

- **Caractéristiques** : Bonne résistance mécanique, économique, résistant à la corrosion.
- **Applications** : Construction, transport, applications marines.

b. Fibre de Carbone

- **Caractéristiques** : Très haute résistance mécanique, légèreté, haute rigidité.
- **Applications** : Aéronautique, sport automobile, produits de haute performance.

6. Panneaux Sandwichs avec Peaux en Métal

a. Aluminium

- **Caractéristiques** : Légèreté, résistance à la corrosion, conductivité thermique.
- **Applications** : Transport, construction, équipements industriels.

b. Acier Inoxydable

- **Caractéristiques** : Haute résistance à la corrosion, robustesse, durabilité.
- **Applications** : Applications industrielles, construction, équipements de cuisine.

7. Panneaux Sandwichs Spécifiques

a. Panneaux Sandwichs pour Isolation

- **Caractéristiques** : Conçus spécifiquement pour une isolation thermique et acoustique maximale.
- **Applications** : Bâtiments résidentiels et commerciaux, réfrigération.

CHAPITRE I RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

b. Panneaux Sandwichs Résistants au Feu

- **Caractéristiques** : Utilisation de matériaux ignifuges pour améliorer la sécurité incendie.
- **Applications** : Bâtiments publics, infrastructures de transport, équipements industriels.

Méthode de fabrication [8]



Fig 3 – Image real explique fabrication de PS

1. Méthode de Stratification Manuelle (Hand Lay-Up)

La méthode de stratification manuelle implique l'application manuelle des couches de matériau de peau sur un moule, suivie de l'ajout du noyau et de la couche supérieure de peau. Une fois les couches mises en place, la résine est appliquée et laissée à durcir, ce qui permet de créer la structure sandwich finale.

Avantages :

Cette méthode présente plusieurs avantages. Tout d'abord, elle a un faible coût initial, ce qui la rend accessible pour les petites productions et les entreprises en démarrage. Ensuite, elle offre une grande flexibilité dans le choix des matériaux, permettant aux fabricants de sélectionner les matériaux les mieux adaptés à leurs besoins spécifiques. Enfin, elle est particulièrement adaptée pour des productions en faible volume, telles que des prototypes et des petites séries.

Inconvénients :

Cependant, la méthode de stratification manuelle présente aussi des inconvénients. Le contrôle sur l'épaisseur et la qualité des couches peut être moins précis, ce qui peut affecter les performances finales du produit. De plus, le processus est lent et exigeant en main-d'œuvre, ce qui peut augmenter les coûts de production à long terme.

CHAPITRE I RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Applications :

Malgré ses inconvénients, cette méthode est couramment utilisée pour des applications spécifiques. Elle est idéale pour la fabrication de prototypes et de petites séries, permettant aux designers et ingénieurs de tester et de valider leurs concepts avant une production à grande échelle. De plus, elle est souvent utilisée pour produire des composants marins et des pièces automobiles, où la flexibilité de conception et la personnalisation sont cruciales

2. Méthode de Stratification Sous Vide (Vacuum

Bagging) Description :

La méthode de stratification sous vide est une variation de la stratification manuelle, où un sac sous vide est utilisé pour compresser les couches de peau et le noyau ensemble. L'application du vide aide à évacuer les bulles d'air présentes entre les couches et assure une meilleure imprégnation de la résine dans le matériau composite, ce qui améliore la qualité de la structure finale.

Avantages :

Cette méthode présente plusieurs avantages notables. Tout d'abord, elle améliore la qualité et la consistance des produits finis, car la pression exercée par le sac sous vide permet une répartition uniforme de la résine. De plus, elle assure une meilleure imprégnation de la résine et réduit les vides au sein du matériau composite, ce qui renforce la structure et augmente sa durabilité.

Inconvénients :

Cependant, la méthode de stratification sous vide comporte aussi des inconvénients. Le coût de l'équipement nécessaire pour créer et maintenir le vide est plus élevé que celui requis pour la stratification manuelle. De plus, cette méthode exige des compétences spécialisées pour garantir une application correcte du vide et une manipulation adéquate des matériaux.

Applications :

Malgré ses inconvénients, la stratification sous vide est largement utilisée dans des domaines nécessitant des performances élevées. Elle est particulièrement adaptée aux applications aéronautiques et marines, où la réduction de poids et l'augmentation de la résistance des structures sont cruciales. En outre, cette méthode est utilisée pour la fabrication de structures composites de haute performance, telles que les coques de bateaux et les composants aéronautiques.

3. Méthode d'Infusion de Résine (Resin Infusion / Vacuum Assisted Resin Transfer Molding - VARTM)

Description :

La méthode d'infusion de résine, également connue sous le nom de moulage par transfert de résine assisté par vide (VARTM), implique la disposition des tissus de peau dans un moule, suivie du noyau. L'ensemble est ensuite recouvert d'un sac sous vide. Une fois le vide appliqué, la résine est injectée, imprégnant les couches

CHAPITRE I RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

de peau et le noyau de manière uniforme, ce qui permet de créer une structure composite de haute qualité.

Avantages :

Cette méthode offre plusieurs avantages importants. Elle permet d'obtenir une haute qualité de lamination, avec des couches de résine bien imprégnées et sans vides. De plus, elle réduit le gaspillage de résine et de matériaux, car la résine est injectée de manière contrôlée et précise. Un autre avantage est le meilleur contrôle de l'épaisseur et des propriétés du matériau composite, ce qui permet d'obtenir des structures aux spécifications exactes.

Inconvénients :

Cependant, la méthode d'infusion de résine présente également des inconvénients. Le processus est plus complexe et coûteux par rapport à d'autres méthodes, nécessitant des compétences spécialisées et des équipements spécifiques pour appliquer correctement le vide et injecter la résine. La mise en œuvre de cette méthode peut donc représenter un investissement important en termes de temps et de ressources.

Applications :

Malgré ses inconvénients, cette méthode est idéale pour la fabrication de grandes structures et de composants de haute performance. Elle est couramment utilisée pour produire des ailes d'éoliennes, où la combinaison de légèreté et de résistance est essentielle. De même, elle est utilisée pour fabriquer des coques de bateaux, assurant une excellente intégrité structurelle et durabilité. En outre, cette méthode est employée dans l'aéronautique pour la fabrication de composants de haute performance, où la précision et la qualité des matériaux composites sont cruciales.

4. Méthode de Pressage à Chaud (Hot

Pressing)Description :

La méthode de pressage à chaud consiste à placer les matériaux de peau et le noyau dans un moule, puis à les soumettre à la chaleur et à la pression dans une presse spécialisée. Sous l'effet de la chaleur, la résine est activée et durcit les matériaux, formant ainsi une structure solide et cohérente.

Avantages :

Cette méthode offre plusieurs avantages notables. Elle permet d'obtenir une excellente qualité et consistance des produits finis, grâce à un contrôle précis de la température et de la pression. De plus, le temps de cycle pour la production est rapide, ce qui la rend idéale pour la production en série et les grandes quantités, augmentant ainsi l'efficacité de la fabrication.

Inconvénients :

Cependant, la méthode de pressage à chaud présente aussi des inconvénients. Le coût des équipements

CHAPITRE I RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

nécessaires est élevé, ce qui peut représenter un investissement initial important. De plus, cette méthode est limitée à la production de panneaux de taille compatible avec la presse utilisée, ce qui peut restreindre les dimensions des produits fabriqués.

Applications :

Malgré ses limitations, la méthode de pressage à chaud est largement utilisée dans certaines industries. Elle est particulièrement adaptée à la production en série de panneaux sandwichs pour l'industrie automobile, où la rapidité et la qualité de production sont cruciales. Elle est également employée dans le secteur de la construction pour la fabrication de panneaux sandwichs, offrant des solutions robustes et durables pour diverses applications structurelles.

5. Méthode d'Autoclave

Description

La méthode d'autoclave consiste à disposer les matériaux de peau et le noyau dans un moule, puis à les sceller dans un sac sous vide. L'ensemble est ensuite placé dans un autoclave, où il est soumis à une haute pression et à une température élevée pour durcir la résine. Ce processus permet de créer des structures composites de haute qualité.

Avantages :

Cette méthode offre plusieurs avantages significatifs. Elle garantit une haute qualité et une uniformité exceptionnelle des pièces produites, grâce à un contrôle précis des conditions de pression et de température. De plus, elle est idéale pour les applications nécessitant des performances structurelles élevées, telles que les composants critiques où la fiabilité et la résistance sont primordiales.

Inconvénients :

Cependant, la méthode d'autoclave présente des inconvénients notables. Elle est très coûteuse en termes d'équipements et de fonctionnement, ce qui peut représenter une barrière pour certaines entreprises. De plus, cette méthode est principalement utilisée pour les productions de haute performance en faibles volumes, limitant ainsi son application à des marchés de niche ou à des projets spécifiques.

Applications :

Malgré ses inconvénients, la méthode d'autoclave est essentielle pour certaines industries. Elle est couramment utilisée pour la fabrication de composants critiques dans l'aéronautique et l'espace, où la performance et la fiabilité sont essentielles. En outre, elle trouve des applications dans les domaines militaires et le sport automobile, où les exigences de performance et de sécurité sont particulièrement élevées.

CHAPITRE I RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

6. Méthode de

PultrusionDescription :

La méthode de pultrusion est un processus continu qui consiste à imprégner des fibres de renfort, telles que

la fibre de verre ou la fibre de carbone, avec de la résine, puis à les tirer à travers une filière chauffée pour former des sections composites de forme constante. Ce procédé est souvent utilisé pour produire des profils longs et continus avec une section transversale constante.

Avantages :

Cette méthode présente plusieurs avantages. Elle permet une production continue et à haut volume, ce qui est idéal pour les grandes séries de fabrication. De plus, la pultrusion assure une uniformité et une constance de la qualité des produits finis, grâce à un contrôle précis du processus. Enfin, elle offre la capacité de produire des formes complexes, ce qui est utile pour diverses applications industrielles.

Inconvénients :

Cependant, la méthode de pultrusion a également des inconvénients. Elle est limitée à la production de sections transversales constantes, ce qui peut restreindre la variété des formes et des tailles des produits fabriqués. De plus, cette méthode est moins flexible pour les conceptions personnalisées, car elle est optimisée pour des productions de masse avec des profils standardisés.

Applications :

Malgré ses limitations, la méthode de pultrusion est largement utilisée dans plusieurs secteurs. Elle est idéale pour la fabrication de poutres structurelles, de cadres et de composants utilisés dans la construction et les infrastructures. Ces produits bénéficient de la solidité et de la légèreté des matériaux composites, tout en offrant une grande durabilité et une résistance à la corrosion.

7. Méthode de RTM (Resin

Transfer Molding) Description :

La méthode de moulage par transfert de résine (RTM) consiste à placer les renforts en fibre dans un moule fermé. La résine est ensuite injectée sous pression dans le moule, imprégnant les fibres avant de durcir. Ce procédé permet de produire des pièces composites de haute qualité avec des surfaces lisses et des tolérances dimensionnelles précises.

Avantages :

Cette méthode présente plusieurs avantages significatifs. Elle permet d'obtenir une excellente qualité de surface et une grande précision dimensionnelle, ce qui est essentiel pour de nombreuses applications techniques. De plus, le RTM est adapté aux productions de taille moyenne à grande, offrant une bonne balance entre qualité et volume de production. Un autre avantage est la possibilité de combiner différents types de renforts et de résines, permettant ainsi de personnaliser les propriétés des pièces finales selon les besoins spécifiques.

Inconvénients :

Cependant, la méthode RTM comporte aussi des inconvénients. Le coût initial pour les moules et l'équipement est élevé, ce qui peut représenter un investissement important. De plus, le processus de moulage est complexe, nécessitant des compétences spécialisées et une gestion précise des paramètres de fabrication.

Applications :

Malgré ses inconvénients, la méthode RTM est largement utilisée dans plusieurs secteurs industriels. Elle est idéale pour la fabrication de pièces automobiles, où la qualité de surface et la précision sont cruciales. Elle est également employée pour produire des coques de bateaux, offrant une excellente résistance et durabilité dans des environnements marins. Enfin, cette méthode est utilisée pour la fabrication de composants d'aéronefs, où les performances structurales élevées et la légèreté sont essentielles.

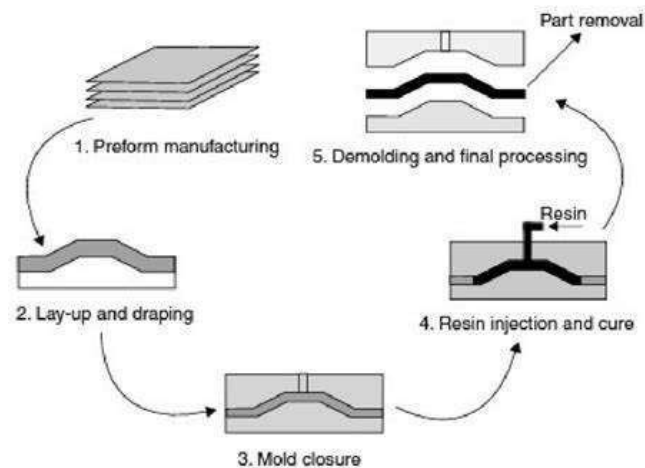


Fig 4 - schéma explicatif Méthode de RTM

8. Méthode de Lamination en Continu

Description

La méthode de lamination en continu est un processus de fabrication qui utilise des rouleaux pour appliquer des couches de matériaux, tels que des fibres et de la résine, de manière continue. Ce procédé permet de créer des panneaux longs et uniformes. Les différentes couches sont combinées et durcies sous l'effet de la pression et de la chaleur dans une ligne de production continue, garantissant une fabrication rapide et efficace.

Avantages

Cette méthode présente plusieurs avantages importants :

- **Efficacité de production** : Elle est extrêmement efficace pour la production de grands volumes, ce qui est idéal pour les applications industrielles à grande échelle.
- **Uniformité des propriétés mécaniques** : Elle assure une uniformité des propriétés mécaniques des panneaux produits, garantissant une qualité constante.
- **Réduction des coûts par unité produite** : Le coût par unité produite est réduit en grande série, permettant de réaliser des économies d'échelle importantes.

Inconvénients

Cependant, la méthode de lamination en continu comporte aussi des inconvénients :

- **Limitations des formes produites** : Elle est limitée à la production de formes plates ou légèrement courbes, ce qui restreint la diversité des produits pouvant être fabriqués.
- **Coût initial élevé** : Le coût initial de l'équipement de lamination en continu est élevé, représentant un investissement important pour les entreprises.

Applications

Malgré ses inconvénients, la méthode de lamination en continu est largement utilisée dans plusieurs secteurs

:

- **Panneaux de construction** : Idéale pour la fabrication de panneaux de construction, offrant des solutions robustes et durables pour diverses applications structurelles.
- **Murs et toits préfabriqués** : Les murs et toits préfabriqués peuvent bénéficier de cette méthode, permettant une construction rapide et efficace.
- **Panneaux d'isolation** : Largement utilisés dans le secteur de la construction pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments.

• .

9. Méthode de Moulage par Compression

Description

Le moulage par compression est une méthode de fabrication qui implique le placement de matériaux de renfort et de résine dans un moule ouvert. Une fois les matériaux en place, le moule est fermé et soumis à chaleur et pression pour durcir la résine. Ce processus permet de produire des pièces complexes avec des tolérances dimensionnelles précises, garantissant des résultats de haute qualité.

Avantages

Cette méthode présente plusieurs avantages significatifs :

- **Haute précision dimensionnelle** : Le moulage par compression offre une haute précision dimensionnelle, ce qui est essentiel pour les pièces nécessitant des tolérances strictes.
- **Adaptabilité aux formes complexes** : Elle convient parfaitement à la production de formes complexes et de détails fins, permettant une grande flexibilité dans la conception des pièces.
- **Contrôle de l'épaisseur et des propriétés mécaniques** : Cette méthode offre un bon contrôle de l'épaisseur et des propriétés mécaniques des pièces fabriquées, assurant une uniformité et une fiabilité accrues.

Inconvénients

Cependant, le moulage par compression comporte également des inconvénients :

- **Coût initial élevé** : Le coût initial pour les moules et l'équipement de compression est élevé, ce qui peut représenter un investissement important pour les entreprises.
- **Temps de cycle plus long** : Le temps de cycle pour la production est plus long comparé à d'autres méthodes continues, ce qui peut affecter l'efficacité de la production en grande série.

Applications

Malgré ses inconvénients, le moulage par compression est largement utilisé dans plusieurs secteurs :

- **Pièces d'automobiles** : Cette méthode est idéale pour la fabrication de pièces automobiles, où la précision et la complexité des formes sont souvent requises.
- **Équipements sportifs** : Elle est également utilisée pour produire des équipements sportifs, offrant des produits légers et résistants avec des détails fins.
- **Composants industriels** : Enfin, le moulage par compression est utilisé pour la fabrication de divers composants industriels, garantissant des pièces robustes et précises pour des applications techniques variées.

10. Méthode de Moulage Par Injection

Description

Le moulage par injection est une méthode de fabrication qui implique l'injection de résine dans un moule fermé contenant des renforts de fibre. Une fois que la résine a durci, la pièce formée est éjectée du moule. Cette méthode est couramment utilisée pour la production en grande série

de pièces composites complexes, grâce à sa capacité à créer des formes détaillées avec une grande précision.

Avantages

Cette méthode offre plusieurs avantages importants :

- **Production rapide et efficace** : Le moulage par injection permet de produire des pièces complexes rapidement et de manière efficace, ce qui est idéal pour les grandes séries de fabrication.
- **Haute répétabilité et précision** : La méthode assure une haute répétabilité et précision, garantissant que chaque pièce produite est conforme aux spécifications exactes.
- **Réduction des déchets de matériaux** : Le processus optimise l'utilisation des matériaux, réduisant ainsi les déchets et augmentant l'efficacité de la production.

Inconvénients

Cependant, le moulage par injection présente également des inconvénients :

- **Coût initial élevé** : Le coût initial pour les moules et l'équipement d'injection est élevé, ce qui peut représenter un investissement important pour les entreprises.
- **Limitée aux pièces de taille modérée** : Cette méthode est limitée à la production de pièces de taille modérée, ce qui peut restreindre son utilisation pour des applications nécessitant des pièces plus grandes.

Applications

Malgré ses inconvénients, le moulage par injection est largement utilisé dans plusieurs secteurs :

- **Pièces techniques pour l'automobile** : Cette méthode est idéale pour la fabrication de pièces techniques pour l'industrie automobile, où la précision et la complexité des formes sont souvent requises.
- **Composants électroniques** : Elle est également utilisée pour produire des composants électroniques, garantissant des produits précis et fiables.
- **Biens de consommation** : Enfin, le moulage par injection est utilisé pour la fabrication de divers biens de consommation, offrant des produits de haute qualité avec des détails fins et une grande uniformité.

I.2. Domaine d'application des sandwichs

1. Aéronautique et Spatial

Les panneaux sandwichs sont couramment utilisés dans l'industrie aéronautique et spatiale en raison

de leur excellent rapport résistance/poids. Ces structures permettent de réduire considérablement le poids des aéronefs tout en maintenant une grande résistance structurelle. Dans les avions, par exemple, les panneaux sandwichs sont utilisés pour les fuselages et les ailes. En réduisant le poids total de l'avion, ces panneaux améliorent l'efficacité énergétique et augmentent la portée de l'appareil.

En outre, les panneaux sandwichs sont utilisés dans les compartiments de stockage des aéronefs. Ils servent à fabriquer les cloisons et les compartiments de stockage, offrant une isolation thermique et acoustique efficace. Cette utilisation permet non seulement de maintenir une température stable à l'intérieur des compartiments, mais aussi de réduire les bruits, ce qui améliore le confort des passagers et de l'équipage.

Dans le domaine spatial, les panneaux sandwichs sont également très prisés pour la fabrication des satellites et des vaisseaux spatiaux. Ils contribuent à minimiser le poids des structures, ce qui est crucial pour les missions spatiales où chaque kilogramme compte. En même temps, ces panneaux doivent être capables de résister aux conditions extrêmes de l'espace, telles que les variations de température et les radiations. Leur utilisation permet donc de combiner légèreté et robustesse, assurant la durabilité et la fiabilité des équipements spatiaux.

2. Construction et Bâtiment

Dans le secteur de la construction, les panneaux sandwichs jouent un rôle essentiel en permettant de créer des structures légères, résistantes et bien isolées. Leur capacité à offrir une isolation thermique et acoustique de haute qualité les rend particulièrement appréciés dans diverses applications. Par exemple, les panneaux sandwichs sont couramment utilisés pour les murs extérieurs et les toitures des bâtiments résidentiels et commerciaux. Leur utilisation dans ces éléments structurels aide non seulement à réduire le poids total des bâtiments, mais aussi à améliorer leur efficacité énergétique en minimisant les pertes de chaleur.

De plus, les panneaux sandwichs sont employés pour les cloisons intérieures, où ils fournissent une isolation acoustique et thermique efficace entre les différentes pièces d'un bâtiment. Cela contribue à créer des environnements intérieurs plus confortables et silencieux, favorisant ainsi le bien-être des occupants.

Enfin, les panneaux sandwichs sont largement utilisés comme panneaux isolants pour l'isolation thermique des bâtiments. En étant installés dans les murs, les toits et parfois les planchers, ils permettent de réduire les coûts énergétiques en maintenant une température stable à l'intérieur des bâtiments, réduisant ainsi la dépendance aux systèmes de chauffage et de climatisation. Cette utilisation contribue non seulement à l'efficacité énergétique, mais aussi à la durabilité et à la performance globale des constructions modernes.

3. Automobile et Transport

Les panneaux sandwichs sont largement utilisés dans l'industrie automobile et les transports pour améliorer les performances des véhicules grâce à leur légèreté et à leur résistance. Dans les carrosseries de voitures, ces panneaux contribuent à réduire le poids global des véhicules. Cette réduction de poids permet d'augmenter l'efficacité énergétique, ce qui se traduit par une meilleure consommation de carburant et des performances accrues.

De plus, les panneaux sandwichs sont utilisés dans les composants de trains et de bus, notamment pour les planchers, les parois et les toits. Leur utilisation dans ces véhicules de transport en commun aide à alléger les structures, ce qui peut augmenter la capacité de transport et améliorer l'efficacité énergétique.

Les panneaux sandwichs jouent également un rôle crucial dans les remorques et les camions. En réduisant le poids total de ces véhicules, ils permettent d'augmenter leur capacité de charge utile. Cela signifie que les remorques et les camions peuvent transporter plus de marchandises sans dépasser les limites de poids, ce qui optimise les opérations de transport et réduit les coûts logistiques. Ainsi, l'intégration de panneaux sandwichs dans les véhicules de transport contribue à des solutions de transport plus efficaces, durables et performantes.

1. Industrie

Maritim

e

Descript

ion

Dans l'industrie maritime, les panneaux sandwichs sont utilisés pour construire des structures légères et résistantes à la corrosion, essentielles pour les environnements marins.

Applications

- Les coques de bateaux fabriquées à partir de matériaux avancés assurent une excellente résistance à la corrosion, prolongeant ainsi la durée de vie du navire et réduisant les besoins en maintenance. De plus, ces matériaux contribuent à une réduction significative du poids global du bateau, améliorant son efficacité énergétique et sa vitesse.
- Les ponts et cloisons bénéficient également de ces matériaux innovants, offrant une isolation thermique et acoustique supérieure. Cette isolation contribue à maintenir des températures confortables et à réduire les bruits à l'intérieur du navire, tout en augmentant la rigidité structurelle, ce qui améliore la sécurité et la durabilité de l'ensemble de la structure.

- Quant aux superstructures, elles sont largement utilisées pour les cabines et autres éléments situés au-dessus du pont principal des navires. Ces matériaux améliorent non seulement la stabilité du navire en abaissant son centre de gravité, mais aussi ses performances globales. Les superstructures légères mais robustes permettent une meilleure répartition des charges et une optimisation des capacités de navigation et de manœuvre du navire.

2. Énergie Éolienne

Dans l'industrie éolienne, les panneaux sandwichs jouent un rôle crucial en étant utilisés pour la fabrication des pales d'éoliennes, qui doivent être à la fois légères et rigides pour maximiser l'efficacité de la

De plus, les panneaux sandwichs sont utilisés dans les composants de trains et de bus, notamment pour les planchers, les parois et les toits. Leur utilisation dans ces véhicules de transport en commun aide à alléger les structures, ce qui peut augmenter la capacité de transport et améliorer l'efficacité énergétique.

Les panneaux sandwichs jouent également un rôle crucial dans les remorques et les camions. En réduisant le poids total de ces véhicules, ils permettent d'augmenter leur capacité de charge utile. Cela signifie que les remorques et les camions peuvent transporter plus de marchandises sans dépasser les limites de poids, ce qui optimise les opérations de transport et réduit les coûts logistiques. Ainsi, l'intégration de panneaux sandwichs dans les véhicules de transport contribue à des solutions de transport plus efficaces, durables et performantes.

1. Industrie

Maritim

e

Descript

ion

Dans l'industrie maritime, les panneaux sandwichs sont utilisés pour construire des structures légères et résistantes à la corrosion, essentielles pour les environnements marins.

Applications

- Les coques de bateaux fabriquées à partir de matériaux avancés assurent une excellente résistance à la corrosion, prolongeant ainsi la durée de vie du navire et réduisant les besoins en maintenance. De plus, ces matériaux contribuent à une réduction significative du poids global du bateau, améliorant son efficacité énergétique et sa vitesse.
- Les ponts et cloisons bénéficient également de ces matériaux innovants, offrant une isolation

thermique et acoustique supérieure. Cette isolation contribue à maintenir des températures confortables et à réduire les bruits à l'intérieur du navire, tout en augmentant la rigidité structurelle, ce qui améliore la sécurité et la durabilité de l'ensemble de la structure.

- Quant aux superstructures, elles sont largement utilisées pour les cabines et autres éléments situés au-dessus du pont principal des navires. Ces matériaux améliorent non seulement la stabilité du navire en abaissant son centre de gravité, mais aussi ses performances globales. Les superstructures légères mais robustes permettent une meilleure répartition des charges et une optimisation des capacités de navigation et de manœuvre du navire.

2. Énergie Éolienne

Dans l'industrie éolienne, les panneaux sandwichs jouent un rôle crucial en étant utilisés pour la fabrication des pales d'éoliennes, qui doivent être à la fois légères et rigides pour maximiser l'efficacité de la production d'énergie renouvelable. Ces panneaux permettent de construire des pales plus longues, augmentant ainsi la surface de captation du vent et améliorant l'efficacité énergétique globale des éoliennes. En outre, leur légèreté et leur rigidité contribuent à la réduction des contraintes structurelles et à l'amélioration de la performance dynamique des éoliennes.

Les panneaux sandwichs sont également utilisés dans la construction des tours et des structures de soutien des éoliennes. Grâce à leur capacité à renforcer les structures tout en maintenant un poids minimal, ils permettent de concevoir des tours plus hautes et plus robustes sans compromettre la stabilité. Cette combinaison de légèreté et de résistance est essentielle pour supporter les forces extrêmes générées par le vent, tout en facilitant le transport et l'installation des composants. En conséquence, l'utilisation de panneaux sandwichs dans les structures de soutien contribue non seulement à l'efficacité opérationnelle, mais aussi à la durabilité et à la viabilité économique des projets éoliens. {5}

4. Industrie Ferroviaire

Dans le secteur ferroviaire, les panneaux sandwichs sont utilisés pour réduire le poids des wagons et des composants, améliorant ainsi l'efficacité énergétique et la vitesse.

Applications

- Planchers et toits des wagons : Fournissent une structure légère et rigide, augmentant la capacité de charge utile.
- Parois et cloisons intérieures : Améliorent l'isolation acoustique et thermique à l'intérieur des wagons.

5. Sports et Loisirs

Les panneaux sandwichs sont également utilisés dans l'industrie des sports et des loisirs pour fabriquer des équipements légers et performants.

Applications :

- Skis et snowboards : Utilisés pour leur légèreté et leur résistance, offrant une meilleure performance sportive.
- Planche de surf et kiteboard : Réduisent le poids et augmentent la durabilité.
- Équipements de camping : Tentes et autres structures légères et résistantes.

Chapitre II
CALCUL
VIBRATOR

Introduction

Théorie de la Plaque Sandwich

Les panneaux sandwich sont constitués de deux couches externes rigides (faces) et d'un noyau léger et épais. La théorie classique de la plaque (CPT) et la théorie de la déformation par cisaillement de la première ordre (FSDT) sont souvent utilisées pour modéliser les vibrations de ces structures. La CPT est utilisée pour des couches minces où les effets de cisaillement sont négligeables, tandis que la FSDT est appliquée pour des couches plus épaisses. [11]

Méthodes de Modélisation

Pour le calcul vibratoire des panneaux sandwich, des méthodes analytiques, numériques et expérimentales peuvent être utilisées. Les méthodes analytiques incluent la solution de Navier pour des conditions aux limites simples, tandis que les méthodes numériques comprennent la méthode des éléments finis (FEM) et la méthode des différences finies (FDM). Ces techniques permettent de résoudre les équations de mouvement différentielles partielles complexes. [12]

Fréquences Propres et Modes de Vibration

L'analyse des fréquences propres et des modes de vibration est cruciale pour évaluer la stabilité dynamique des structures sandwich. Les fréquences propres sont les fréquences naturelles auxquelles une structure vibre librement. La détermination de ces fréquences et des modes associés permet de prévoir les réponses vibratoires et d'identifier les zones de résonance potentiellement dangereuses. [13]

Effets des Conditions aux Limites

Les conditions aux limites influencent fortement les comportements vibratoires des panneaux sandwich. Les structures peuvent être fixées, simplement appuyées, ou libres, chaque condition modifiant les fréquences propres et les modes de vibration. Les calculs doivent intégrer ces variations pour des prévisions précises. [14]

Influence des Propriétés Matérielles

Les propriétés matérielles des couches externes et du noyau jouent un rôle significatif dans les réponses vibratoires des panneaux sandwich. Les matériaux composites, en particulier, présentent des comportements anisotropes et hétérogènes. L'analyse vibratoire doit prendre en compte les modules d'élasticité, les densités et les coefficients de cisaillement spécifiques à chaque matériau. [15]

Chapitre II CALCUL VIBRATOR

Amortissement et Damping

L'amortissement est un facteur crucial dans le comportement vibratoire des panneaux sandwich, influençant la dissipation d'énergie et la réduction des amplitudes de vibration. Les mécanismes d'amortissement incluent l'amortissement viscoélastique, structurel et aérodynamique. La quantification de l'amortissement permet de prédire la durée de vie et la stabilité de la structure sous des charges dynamiques. [16]

Applications Pratiques et Études de Cas

Des études de cas pratiques montrent l'application des méthodes de calcul vibratoire à des structures réelles. Par exemple, l'analyse vibratoire des ailes d'avion ou des coques de bateau met en évidence les défis et solutions spécifiques à chaque domaine. [17].

Modélisation par la Méthode des Éléments Finis

La méthode des éléments finis (FEM) est largement utilisée pour l'analyse vibratoire des panneaux sandwich. Cette technique permet de diviser la structure en un maillage de petits éléments, facilitant ainsi la résolution des équations différentielles de mouvement. Les logiciels tels que ANSYS et ABAQUS sont couramment utilisés pour effectuer ces analyses, offrant des résultats précis pour des configurations complexes et des conditions aux limites variées. [18]

Analyse Transitoire

L'analyse transitoire est essentielle pour comprendre les réponses vibratoires des panneaux sandwich sous des charges dynamiques temporelles. Cette méthode permet de simuler les réponses de la structure à des excitations impulsionnelles ou périodiques, aidant à identifier les effets transitoires et les comportements de résonance. [19]

Effet de la Température

Les propriétés matérielles des panneaux sandwich peuvent varier considérablement avec la température, influençant leurs comportements vibratoires. L'analyse vibratoire doit inclure les effets thermiques pour des applications dans des environnements où les variations de température sont significatives. Cela permet de prévoir les changements dans les fréquences propres et les modes de vibration causés par les variations thermiques.

Interaction Fluide-Structure

Pour les applications maritimes et aéronautiques, l'interaction fluide-structure joue un rôle crucial.

Chapitre II CALCUL VIBRATOR

L'analyse vibratoire doit tenir compte des forces hydrodynamiques ou aérodynamiques agissant sur la structure. Les modèles couplés fluide-structure permettent de simuler ces interactions et de prédire les comportements dynamiques sous l'influence de l'écoulement du fluide. [21]

Modèles d'Amortissement Viscoélastique

L'amortissement viscoélastique est fréquemment utilisé pour réduire les vibrations dans les structures composites. Les modèles viscoélastiques décrivent comment les matériaux dissipent l'énergie vibratoire en chaleur. Ces modèles sont intégrés dans les simulations pour améliorer la prédiction des réponses vibratoires et concevoir des structures avec des caractéristiques d'amortissement optimisées. [22]

Approche Expérimentale

Les tests expérimentaux sont essentiels pour valider les modèles théoriques et numériques. Les techniques telles que l'analyse modal expérimentale (EMA) et les essais de vibration aléatoire permettent de mesurer les fréquences propres, les modes de vibration et les coefficients d'amortissement des panneaux sandwich. Ces données expérimentales sont cruciales pour affiner les modèles et garantir leur précision. [23]

Optimisation Vibratoire

L'optimisation vibratoire vise à améliorer les performances des structures sandwich en modifiant les paramètres de conception pour minimiser les vibrations indésirables. Les algorithmes d'optimisation, tels que les algorithmes génétiques et les méthodes de gradient, sont utilisés pour explorer les configurations optimales des matériaux et des géométries.

Application aux Panneaux Sandwich dans l'Aéronautique

Dans l'industrie aéronautique, les panneaux sandwich sont utilisés pour les structures légères et robustes, comme les ailes et les fuselages. L'analyse vibratoire de ces composants est cruciale pour garantir la sécurité et la performance des avions. Des études de cas sur les vibrations des panneaux sandwich dans les avions démontrent l'application des techniques de calcul vibratoire dans des scénarios réels. [25]

Perspectives Futures

Les avancées en matériaux composites, telles que les nanocomposites et les métamatériaux,

Chapitre II CALCUL VIBRATOR

ouvrent de nouvelles possibilités pour l'amélioration des performances vibratoires des panneaux sandwich. Les recherches futures se concentreront sur l'intégration de ces matériaux avancés et sur le développement de nouvelles méthodes de modélisation et d'optimisation pour répondre aux exigences de performance croissantes dans diverses applications industrielles. [26]

Analyse des Modes de Déformation

L'analyse des modes de déformation permet de comprendre comment les panneaux sandwich se déforment sous des excitations vibratoires. Ces modes de déformation incluent les modes de flexion, de torsion et de cisaillement. Identifier et analyser ces modes aide à prévenir les défaillances structurelles et à optimiser la conception pour des performances vibratoires améliorées. [27]

Effets des Imperfections Géométriques

Les imperfections géométriques, telles que les déformations initiales ou les défauts de fabrication, peuvent affecter les comportements vibratoires des panneaux sandwich. L'analyse de ces imperfections permet de comprendre leur impact sur les fréquences propres et les modes de vibration, et d'améliorer la tolérance aux défauts dans la conception des structures. [28]

Méthodes Asymptotiques et Perturbation

Les méthodes asymptotiques et de perturbation sont utilisées pour résoudre les problèmes vibratoires complexes des panneaux sandwich. Ces méthodes simplifient les équations différentielles en introduisant de petites perturbations, facilitant ainsi l'analyse des systèmes avec des non-linéarités faibles ou des variations paramétriques. [29]

Impact des Charges Dynamiques

L'analyse des charges dynamiques, telles que les impacts ou les vibrations aléatoires, est cruciale pour la durabilité et la performance des panneaux sandwich. Les techniques de simulation de charges dynamiques, combinées à des essais expérimentaux, permettent de prévoir et de mitiger les effets de ces charges sur les structures composites. [30]

Approche Multicouche et Théorie de Lamination

L'approche multicouche et la théorie de lamination sont utilisées pour modéliser les panneaux sandwich en considérant chaque couche individuellement. Cela permet de prendre en compte les interactions entre les couches et d'améliorer la précision des calculs vibratoires. Cette méthode est particulièrement utile pour les panneaux avec des configurations de couches complexes. [31]

Optimisation des Matériaux

L'optimisation des matériaux vise à sélectionner les matériaux les plus adaptés pour chaque couche du panneau sandwich afin de maximiser les performances vibratoires. Les techniques de modélisation avancées permettent de simuler différents scénarios et de choisir les combinaisons de matériaux optimales en fonction des critères de poids, de coût et de performance. [32]

Simulation Multi-physique

Les simulations multi-physiques intègrent les effets mécaniques, thermiques et électriques pour fournir une analyse complète des panneaux sandwich. Ces simulations sont cruciales pour des applications où plusieurs phénomènes physiques interagissent, comme dans les structures aéronautiques et spatiales. [33]

Études de Fiabilité

Les études de fiabilité évaluent la probabilité de défaillance des panneaux sandwich sous diverses conditions de charge et d'environnement. En utilisant des méthodes statistiques et probabilistes, ces études aident à concevoir des structures plus sûres et à prévoir leur durée de vie. [34]

Développement de Normes et de Directives

Le développement de normes et de directives pour l'analyse vibratoire des panneaux sandwich assure des pratiques de conception uniformes et sécuritaires. Ces normes incluent des méthodologies d'essai, des critères de performance et des recommandations de conception, facilitant l'adoption de bonnes pratiques dans l'industrie. [35]

Dynamique Non-linéaire des Panneaux Sandwich

Les comportements vibratoires des panneaux sandwich peuvent souvent présenter des non-linéarités dues à de grandes déformations, des conditions aux limites complexes ou des interactions matériau-structure. Les équations de mouvement non-linéaires sont résolues en utilisant des techniques comme la méthode de perturbation ou des simulations numériques avancées pour capturer ces effets et prévoir les réponses dynamiques de manière plus précise. [36]

Vibrations Paramétriques

Les vibrations paramétriques se produisent lorsque les propriétés d'un panneau sandwich, comme sa rigidité, varient avec le temps ou la position. Cette variation peut induire des instabilités dynamiques et des amplifications de vibration. L'analyse de ces phénomènes est cruciale pour comprendre et contrôler les comportements vibratoires dans des conditions de service variables. [37]

Méthodes d'Identification Modale

L'identification modale expérimentale permet de déterminer les propriétés vibratoires des panneaux sandwich, telles que les fréquences propres, les amortissements modaux et les formes modales. Des techniques comme l'analyse des réponses en fréquence (FRF) et l'analyse modale opérationnelle (OMA) sont utilisées pour extraire ces informations à partir de mesures de vibration. [38]

Réduction de Modèle

Pour simplifier les calculs vibratoires complexes, des techniques de réduction de modèle comme la méthode des sous-structures ou la décomposition des modes dominants sont utilisées. Ces méthodes permettent de réduire le nombre de degrés de liberté sans perdre significativement en précision, facilitant ainsi les simulations pour des structures de grande taille. [39]

Effets des Dégradations et Dommages

Les dégradations et les dommages peuvent altérer les propriétés vibratoires des panneaux sandwich. L'analyse de l'effet des fissures, délaminations, et autres défauts est essentielle pour évaluer la durabilité et la sécurité des structures composites. Des techniques de surveillance de l'état de santé des structures (SHM) sont intégrées pour détecter et évaluer ces dommages en temps réel. [40]

Méthodes Stochastiques

Les méthodes stochastiques intègrent les incertitudes dans les propriétés matérielles, les charges appliquées et les conditions aux limites dans l'analyse vibratoire. L'approche probabiliste permet de quantifier les risques et de prévoir les variations de performances vibratoires, offrant une meilleure fiabilité dans la conception des panneaux sandwich. [41]

Comportements en Post-flambement

L'analyse des comportements en post-flambement des panneaux sandwich permet de comprendre leur stabilité après qu'ils ont subi des déformations critiques. Les vibrations dans l'état post-flambement sont étudiées pour évaluer la résistance résiduelle et la capacité de charge des structures après le flambement initial. [42]

Techniques d'Amortissement Actif

L'amortissement actif utilise des matériaux intelligents comme les alliages à mémoire de forme (SMA) et les polymères électroactifs (EAP) pour contrôler les vibrations en temps réel. Ces matériaux peuvent changer leurs propriétés sous l'application de stimuli externes, offrant des solutions adaptatives pour la gestion des vibrations dans les panneaux sandwich. [43]

Calcul Vibratoire Multi-échelle

Le calcul vibratoire multi-échelle intègre les effets des microstructures matérielles sur les comportements vibratoires macroscopiques. Cette approche est particulièrement pertinente pour les composites avec des renforts nanométriques, où les propriétés des constituants à l'échelle nanométrique influencent les réponses globales de la structure. [44]

Innovations Technologiques et Matériaux Avancés

Les avancées en technologie des matériaux, comme les composites à base de fibres de carbone et les matériaux hybrides, offrent de nouvelles opportunités pour optimiser les comportements vibratoires des panneaux sandwich. L'intégration de ces matériaux dans les analyses vibratoires permet de repousser les limites de performance et de fiabilité des structures composites. [45]

Comportement des Joints et Interfaces

Les joints et interfaces entre les différentes couches des panneaux sandwich jouent un rôle crucial dans les comportements vibratoires globaux. Les analyses doivent inclure l'impact des adhésifs et des liaisons mécaniques sur la transmission des vibrations et la dissipation d'énergie. Les propriétés des interfaces peuvent être modélisées à l'aide de théories de contact et de cohésion pour améliorer la précision des prédictions. [46]

Techniques d'Amortissement Passif

Les techniques d'amortissement passif incluent l'utilisation de matériaux viscoélastiques,

couches de contrôle de vibration intégrées et traitements de surface pour réduire les amplitudes vibratoires. Ces solutions sont cruciales pour les applications où l'ajout de masse est limité mais la réduction des vibrations est nécessaire pour la performance ou la durabilité.

Effet des Charges Cycliques et de Fatigue

Les charges cycliques et la fatigue affectent les performances vibratoires à long terme des panneaux sandwich. L'analyse de fatigue permet de prévoir les cycles de charge qui peuvent provoquer des défaillances structurelles. Les modèles de fatigue sont basés sur des tests expérimentaux et des simulations pour identifier les points faibles et améliorer la durabilité. [48]

Modélisation Multi-physique pour Applications Spécifiques

Les modèles multi-physiques prennent en compte les interactions entre différents phénomènes physiques comme la thermique, l'électromagnétique et l'acoustique. Par exemple, les panneaux sandwich dans les applications spatiales doivent être modélisés pour leurs réponses vibratoires sous des environnements thermiques et mécaniques extrêmes simultanément. [49]

Innovations en Méthodes de Contrôle Actif

Les systèmes de contrôle actif des vibrations utilisent des capteurs et actionneurs intégrés dans les panneaux sandwich pour détecter et contrer les vibrations en temps réel. Les algorithmes de contrôle, tels que le contrôle prédictif et les systèmes adaptatifs, sont développés pour répondre efficacement aux excitations dynamiques variées. [50]

Techniques d'Imagerie et de Détection

Les techniques d'imagerie avancées, comme la thermographie infrarouge et l'interférométrie laser, sont utilisées pour analyser les vibrations des panneaux sandwich. Ces méthodes non destructives permettent de visualiser les modes de vibration et d'identifier les zones de stress élevé et les défauts internes sans endommager la structure. [51]

Influence de l'Environnement sur les Vibrations

L'environnement extérieur, incluant les variations de température, l'humidité et les

charges mécaniques, affecte les propriétés vibratoires des panneaux sandwich. Les analyses doivent intégrer ces facteurs pour des prédictions précises dans des conditions réelles d'exploitation. Cela est particulièrement important pour les structures utilisées dans des environnements hostiles, comme les avions et les navires. [52]

Conception Assistée par Ordinateur (CAO) et Simulation

Les outils de CAO et de simulation jouent un rôle essentiel dans la conception et l'optimisation des panneaux sandwich. Ces outils permettent de créer des modèles détaillés et de simuler les comportements vibratoires sous diverses conditions de charge, facilitant ainsi la prise de décision pour les ingénieurs et les concepteurs. [53]

Applications et Innovations Récentes

Les innovations récentes dans les matériaux composites et les technologies de fabrication ont conduit à des améliorations significatives des performances vibratoires des panneaux sandwich. Par exemple, l'utilisation de fibres de carbone, de nanocomposites et de techniques d'impression 3D permet de créer des structures plus légères, plus résistantes et plus performantes. [54]

CHAPITRE III

**Homogénéisation analytique
et numérique des nids d'abeilles**

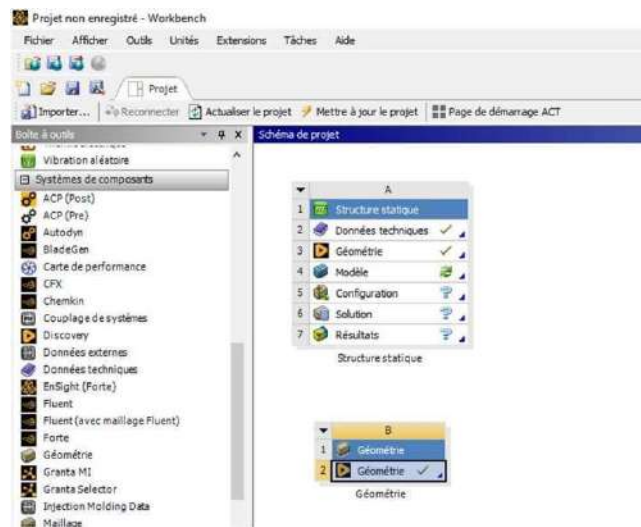
Créer un panneau sandwich à l'aide du programme Ansys :

allant de la définition des matériaux à la modélisation, en passant par la configuration des charges et des conditions aux limites. Voici une explication précise et détaillée des étapes à suivre :

1. Définition des Matériaux

Tout d'abord, vous devez définir les propriétés des matériaux pour les différentes couches de votre panneau sandwich.

1. Ouvrez Ansys et dans **Engineering Data**.
2. Cliquez sur **Add Material** pour chaque matériau .
3. Entrez les propriétés des matériaux.



2. Création de la Géométrie

Ensuite, vous devez créer la géométrie du panneau sandwich.

1. Allez dans **Geometry**.
2. Utilisez les outils de modélisation pour créer les différentes couches de votre panneau.
Typiquement, un panneau sandwich comporte une couche centrale (âme) et deux couches externes (faces).
3. Utilisez des boîtes ou des extrusions pour modéliser les couches.

Nid d'Abeilles :

La connaissance du comportement mécanique des âmes, en particulier en cisaillement, est indispensable lors de la conception des structures sandwich en nid d'abeilles. La méthode d'homogénéisation permet de remplacer un matériau réel non homogène par un matériau fictif homogène ayant des propriétés macroscopiques équivalentes]. Dans cette approche, le nid est homogénéisé indépendamment des peaux. Pour que l'homogénéisation soit possible, il est nécessaire de définir un volume élémentaire représentatif (VER) du matériau. Le résultat de l'homogénéisation sur ce volume sera le comportement du matériau homogène équivalent

Dans cette étude, nous proposons de décrire l'activité mécanique en fonction de la densité relative des matériaux cellulaires normaux tels que les nids d'abeilles de forme hexagonale, carrée et triangulaire. L'objectif de cette section est de déterminer les constantes élastiques des structures cellulaires normales par le processus d'homogénéisation.

II.2. Propriétés mécaniques de l'âme en nid d'abeille

Le comportement élastique d'un matériau orthotrope peut être décrit par les constantes de rigidité C_{ij} ou les constantes de souplesse S_{ij} . La forme généralisée de la loi de Hooke s'exprime ainsi :

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix}$$

CHAPITRE II Homogénéisation analytique et numérique des nids d'abeilles

où E_1 , E_2 et E_3 représentent les trois modules de Young ; G_{12} , G_{13} et G_{23} sont les trois modules de cisaillement ; et ν_{12} , ν_{13} et ν_{23} sont les trois coefficients de Poisson. Ces coefficients de Poisson sont déterminés à l'aide des relations suivantes :

$$\frac{E_i}{\nu_{ij}} = \frac{E_j}{\nu_{ji}}, \quad i, j = 1, 2, 3$$

II.3. Géométrie et notations : Un nid d'abeilles, illustré par la figure, peut être caractérisé par les paramètres présentés dans le tableau.

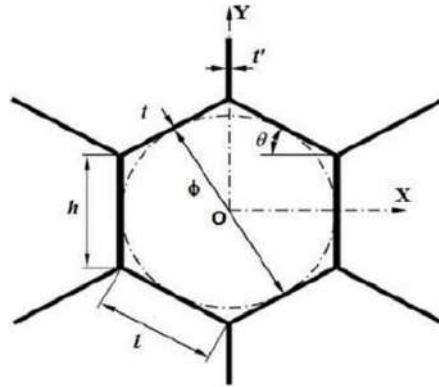


Figure II.1 Géométrie d'une cellule en nid d'abeilles.

Paramètres	Définition
θ	Angle d'inclinaison des parois inclinées
Φ	Diamètre de la cellule (si hexagone régulier)
l	Longueur de la paroi centrale
h	Longueur de la paroi verticale
t	Épaisseur de la paroi inclinée
t'	Épaisseur de la paroi verticale (souvent $t'=2 t$)
b	Hauteur de l'écarteur en nid d'abeilles

Tableau II.1. Paramètres géométriques d'une cellule en nid d'abeilles

Les longueurs des parois verticales et inclinées (h et l), les épaisseurs de ces parois (t' et t), ainsi que l'angle d'inclinaison des parois inclinées (θ) sont résumés dans le tableau.

II.4. Modélisations Analytiques

II.4.1. Modèle de Gibson et Ashby

Le modèle de Gibson et Ashby utilise les équations de l'élasticité pour déterminer les principaux modules et coefficients d'un nid d'abeilles hexagonal en fonction des paramètres géométriques.

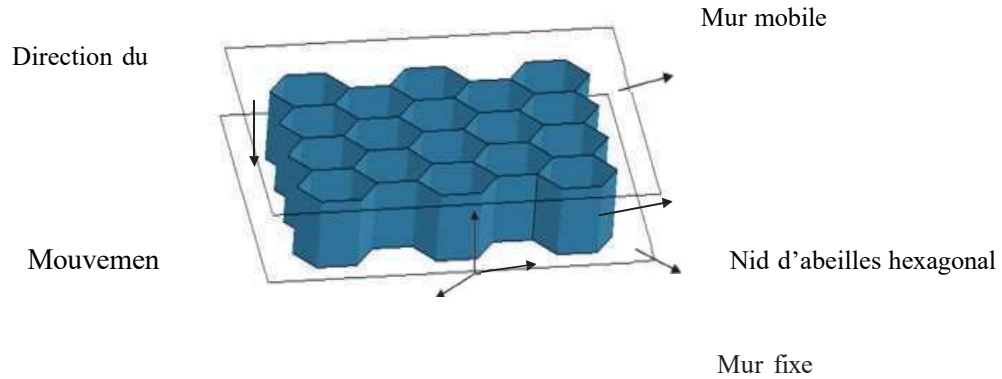


Figure II.2. Vue en perspective d'un nid d'abeilles hexagonal

II.4.1.1. Propriétés dans le plan (x, y)

L'hypothèse proposée par Gibson et Ashby stipule que les déformations sont uniquement dues à l'étirement élastique des parois cellulaires, ce qui entraîne des effets de compression et de flexion négligeables. Les caractéristiques prises en compte dans le plan sont : les modules d'élasticité E_1 et E_2 , le module de cisaillement G_{12} et les coefficients de Poisson ν_{12} et ν_{21} .

a) Modules E_1 et E_2

Les modules d'élasticité E_1 et E_2 sont calculés en appliquant respectivement une pression le long des axes x et y . Cela induit un effort P suivant les axes x et y , générant ainsi des moments de flexion M . On considère le ligament comme une poutre de longueur l , d'épaisseur t et de profondeur b . L'étude de cette poutre permet de dériver l'équation du moment de flexion M comme suit :

$$M = \frac{Pl \sin \theta}{2}$$

L'effort P peut être déterminé de l'équation comme suit :

Le Module d'Young suivant X :

$$E_1 = E_s \left(\frac{t}{l} \right)^3 \frac{\cos \theta}{\left(\frac{h}{l} + \sin \theta \right) \sin^2 \theta}$$

Module d'Young suivant Y

$$E_2 = E_s \left(\frac{t}{l} \right)^3 \frac{h/l + \sin \theta}{\cos^3 \theta}$$

Les coefficients de Poisson sont calculés comme suit:

$$\nu_{12} = \frac{\cos^2 \theta}{\left(\frac{h}{l} + \sin \theta \right) \sin \theta}$$

$$\nu_{21} = \frac{\left(\frac{h}{l} + \sin \theta \right) \sin \theta}{\cos^2 \theta}$$

a) Module de cisaillement G_{12} dans le plan (x, y)

Le module de cisaillement dans le plan est calculé à partir du schéma de la figure.

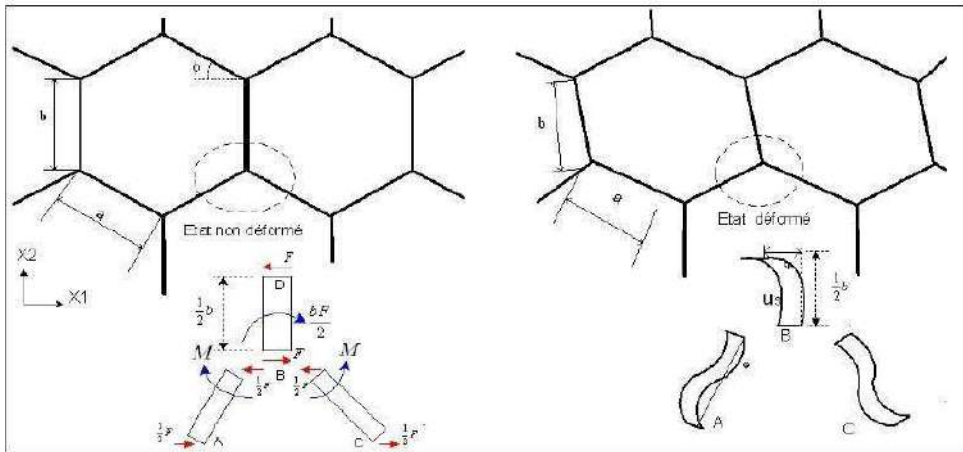


Figure II.4. Déformation en flexion et rotation des parois

Les points A, B et C ne présentent aucun mouvement relatif lorsqu'un état de cisaillement est appliqué sur le nid d'abeilles. En raison de la symétrie, la déviation u_s est uniquement causée par la flexion et la rotation de la paroi (rotation d'angle φ) autour du point B. La déviation globale U prend la forme suivante :

$$U = \frac{1}{2} \varphi h + \frac{F(h/2)^2}{3E_s I}$$

CHAPITRE I I I Homogénéisation analytique et numérique des nids d'abeilles

On introduisant l'expression de l'angle φ dans l'expression de U , on obtient:

$$U = \frac{Fh^2}{48 E_s I} (1 + 2h)$$

La relation du comportement en cisaillement s'écrit:

$$G_{12} = E_s \left(\frac{t}{l}\right)^3 \frac{\left(\frac{h}{l} + \sin \theta\right)}{\left(\frac{h}{l}\right)^2 \left(1 + \frac{2h}{l}\right) \cos \theta}$$

Pour les faibles densités relatives, les modules de Young adimensionnels dans le plan pour les structures cellulaires hexagonales, carrées et triangulaires peuvent être exprimés comme suit :

►hexagonale

$$E = E_s \frac{4}{\sqrt{3}} \left(\frac{t}{l}\right)^3$$

►carrée

$$E = E_s \left(\frac{t}{l}\right)$$

►triangulaire

$$E = E_s \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{t}{l}\right)$$

II.4.1.2. Propriétés hors du plan

Les propriétés concernées sont les suivantes : E_3 , G_{13} , G_{23} et les coefficients de Poisson ν_{13} et ν_{23} , nécessaires pour décrire les déformations hors plan.

a) Module d'élasticité E_3

Le module E_3 est calculé en multipliant le module E_s du matériau de base de la cellule par le rapport de la section de la cellule sur la surface totale de l'hexagone.

$$E_3 = E_s \frac{\text{Section de la cellule}}{2 \text{ Surface de l'hexagone}}$$

$$E_3 = E_s \left(\frac{t}{l}\right) \frac{\left(\frac{h}{l} + 2\right)}{2 \left(\frac{h}{l} + \sin \theta\right) \cos \theta}$$

Les deux coefficients de Poisson ν_{13}, ν_{23} sont supposés égaux à ceux du matériau constituant le

CHAPITRE I I I Homogénéisation analytique et numérique des nids d'abeilles nid d'abeilles.

$$\nu_{13} = \nu_{23} = \nu_s$$

Les deux autres coefficients de Poisson se trouvent dans les relations réciproques suivantes :

$$\nu_{13} = \frac{E_1}{E_3} \nu_{31}$$

$$\nu_{23} = \frac{E_2}{E_3} \nu_{32}$$

b) Modules de cisaillement transverses

Les modules de cisaillement sont plus difficiles à déterminer en raison de la déformation non uniforme des parois cellulaires due à la répartition des contraintes dans la structure du nid d'abeilles. En utilisant les théorèmes de l'énergie, Kelsey et al. ont étudié ce comportement. Le comportement du nid d'abeilles en cisaillement transverse dépend des deux modules G_{13} et G_{23} . La structure répétitive des nids d'abeilles a été exploitée pour estimer ces modules en fonction de la géométrie des alvéoles. Il est important de noter que lorsque les faces inférieure et supérieure du nid d'abeilles sont soumises à un déplacement relatif dans une direction quelconque perpendiculaire, la déformation de cisaillement est généralement hétérogène au sein de la paroi.

II.5. Approche numérique

Neuf simulations sont nécessaires pour déterminer les neuf constantes : trois simulations en traction simple, chacune permettant de calculer un module d'élasticité et deux coefficients de Poisson, et six simulations de cisaillement, une pour chaque module de cisaillement. Il est crucial de bien définir les propriétés mécaniques d'un nid d'abeilles en fonction de ses caractéristiques géométriques.

II.5.1. Volume élémentaire représentatif (V.E.R)

Le V.E.R est nécessaire pour la mesure du temps et la production d'énergie. Cette estimation permet de réduire les modèles en utilisant les symétries du modèle. Dans le cas des architectures de nid d'abeilles

CHAPITRE III Homogénéisation analytique et numérique des nids d'abeilles

conventionnelles, le nombre de modèles pouvant être produits est très élevé. La sélection des modèles est guidée par les expériences et simulations réalisées sur le nid d'abeilles hexagonal par plusieurs équipes de recherche. Les caractéristiques géométriques des structures à cellules hexagonales, carrées et triangulaires sont les suivantes $l = h = 5$ à $7,5$ mm avec un pas de $0,5$ mm , $t = 0,075$ mm , $b = 8,8$ mm . Le matériau considéré est de l'aluminium avec les caractéristiques mécaniques suivantes :

$$E_s = 70\text{GPa}, \quad G_s = 26,627\text{GPa}, \quad \nu_s = 0,34.$$

II.5.2. Conditions aux limites et méthodes de calcul par éléments finis

Les simulations sont réalisées à l'aide du logiciel de calcul ANSYS. Le modèle, composé de 60 cellules, utilise des éléments coques à 4 nœuds avec 6 degrés de liberté par nœud (Shell 63). Ce choix permet de maintenir une bonne précision des résultats sans alourdir les calculs. Le maillage 3D utilisé est illustré dans . Chaque ligament est constitué de 40 éléments, dont 10 suivant la hauteur.

Pour calculer les différents modules, un déplacement est imposé sur une face du V.E.R dans une direction donnée, en prenant en compte les symétries au niveau des conditions aux limites. La simulation d'une sollicitation en traction suivant une direction i ($i = x, y, z$) permet de déterminer les trois modules d'élasticité E_1, E_2 et E_3 , ainsi que les six coefficients de Poisson ($\nu_{12}, \nu_{21}, \nu_{13}, \nu_{31}, \nu_{23}$ et ν_{32})

- La simulation des sollicitations en cisaillement suivant les plans (x, y) , (y, z) et (x, z) (deux simulations par plan) permet de déterminer les six modules de cisaillement $G_{12}, G_{21}, G_{23}, G_{32}, G_{13}, G_{31}$
- Cette méthode, basée sur les efforts aux liaisons à partir d'un déplacement imposé, permet de déduire les constantes élastiques en utilisant les lois de comportement.

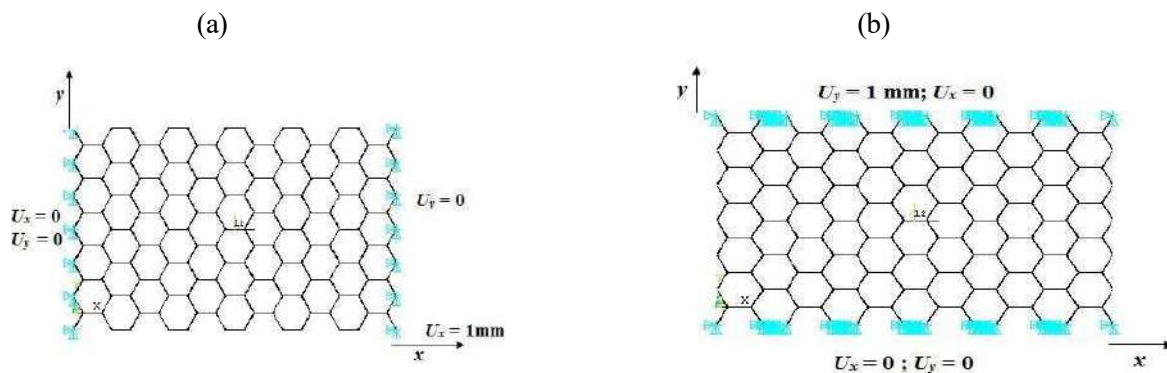


Figure . Conditions aux limites pour une simulation de traction dans le plan (x, y) .
(a) selon l'axe x , (b) selon l'axe y .

CHAPITRE III Homogénéisation analytique et numérique des nids d'abeilles

Trois simulations en traction permettent de déterminer les modules d'élasticité et les coefficients de Poisson. Les relations de comportement en traction sont celles de l'élasticité linéaire uniaxiale, avec des transformations simples :

$$\sigma_i = E_i \varepsilon_i, \quad \sigma_i = \frac{F_i}{S_i}$$

En utilisant la force de liaison du V.E.R suivant la direction i (déduite à partir du déplacement δU imposé) et S_i comme surface perpendiculaire au déplacement imposé. En appliquant un déplacement δU_i de 1 mm, le code de calcul par éléments finis ANSYS permet de déterminer les efforts F_i , donc de calculer E_i . Les déformations sont

$$\varepsilon_i = \frac{\delta U_i}{l_i} \quad \text{et} \quad \varepsilon_j = \frac{\delta U_j}{l_j}$$

Par la suite, les coefficients de Poisson sont déterminés à l'aide de la relation suivante :

$$\nu_{ij} = -\frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_i}, \quad i \neq j, \quad \text{avec} \quad i, j = x, y, z.$$

II.2.1. Calcul des modules de cisaillement G_i

De même, la détermination des modules de cisaillement G_i nécessite l'application des lois de comportement élastique. Les simulations de cisaillement sont indispensables pour déterminer G_i . Cela se fait en bloquant les déplacements d'une face et en appliquant un cisaillement sur la face opposée. La loi de comportement dans le cas d'une sollicitation de cisaillement est la suivante :

$$G_{ij} = \frac{\tau_{ij}}{\gamma_{ij}} \quad i \neq j \text{ et } i, j = x, y, z$$

Pour la contrainte de cisaillement:

$$\tau_{ij} = \frac{F_i}{S_{ik}} \quad i \neq j \neq k \text{ et } i, j, k = x, y, z$$

Et la déformation de cisaillement :

$$\gamma_{ij} = \tan \gamma_{ij} = \frac{\delta u_i}{l_i} \quad i \neq j$$

F_i est la réaction des forces aux noeuds.

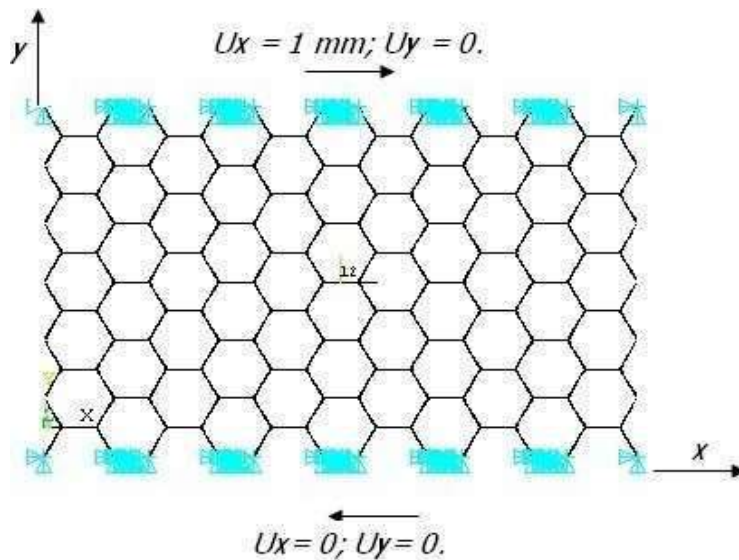


Figure. Principe de test de cisaillement.

II.6. Résultats et discussion

II.6.1. Modules d'élasticité $E1$ et $E2$

La figure illustre l'influence de l'arrangement géométrique sur les propriétés mécaniques pour un rapport fixe entre l'épaisseur et la longueur de la paroi ($t/l=0,2$) pour les trois structures régulières : carrée, triangulaire et hexagonale. Il est observé que la structure à cellules triangulaires est 12,5 fois plus rigide comparée à une structure à cellules hexagonales. Pour un rapport fixe entre l'épaisseur et la longueur de la paroi, la densité d'un nid d'abeilles triangulaire est trois fois supérieure à celle d'un nid d'abeilles

hexagonal. Cela démontre clairement l'influence de l'arrangement géométrique sur le comportement des matériaux cellulaires.

Les résultats pour les modules $E1$ et $E2$ sont obtenus à la fois par la méthode d'homogénéisation numérique et analytique. L'écart type entre les deux méthodes est respectivement de 0,00063, 0,0068 et 0,0049 pour les structures à cellules hexagonales, triangulaires et carrées. Ces faibles écarts types montrent une bonne concordance entre les résultats obtenus par simulation numérique et ceux issus de l'homogénéisation analytique, validant ainsi l'efficacité et la précision des deux approches pour l'estimation des propriétés mécaniques des structures cellulaires

CHAPITRE I I I Homogénéisation analytique et numérique des nids d'abeilles

Figure. Principe de test de cisaillement. longueur de la paroi ($t/l = 0,2$). (a) E1/Es, (b) E2/Es.

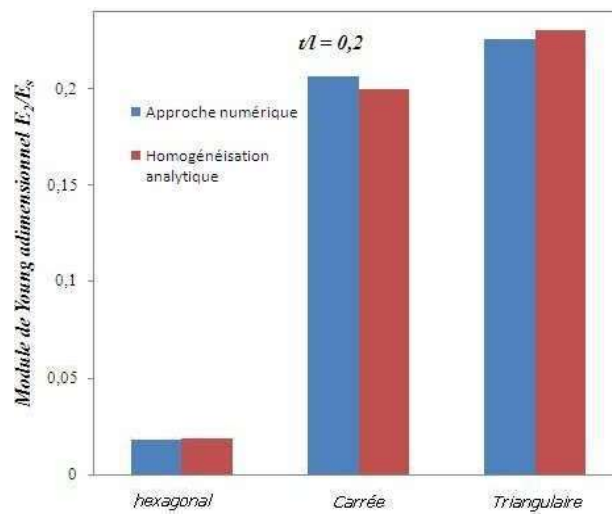
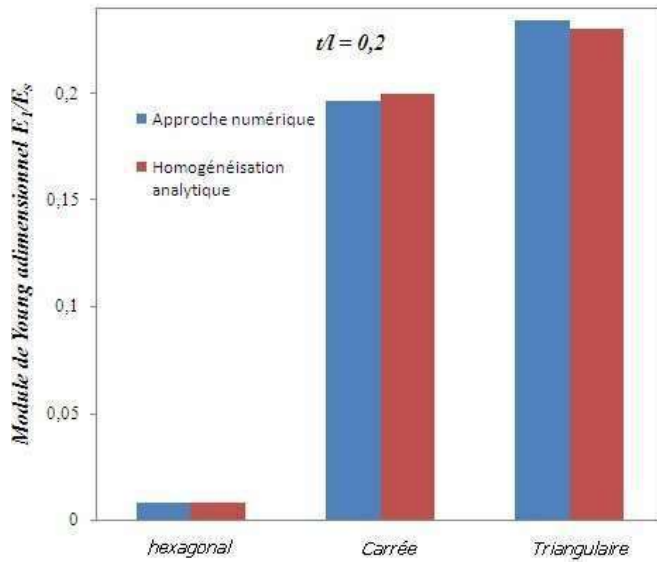


Fig. Module de Young pour les trois structures régulières pour un rapport fixe entre l'épaisseur et la

CHAPITRE I I I Homogénéisation analytique et numérique des nids d'abeilles

Sous l'effet de la traction uniaxial, nous obtenons pour le V.E.R du nid d'abeille ladéformée représentée par la fig

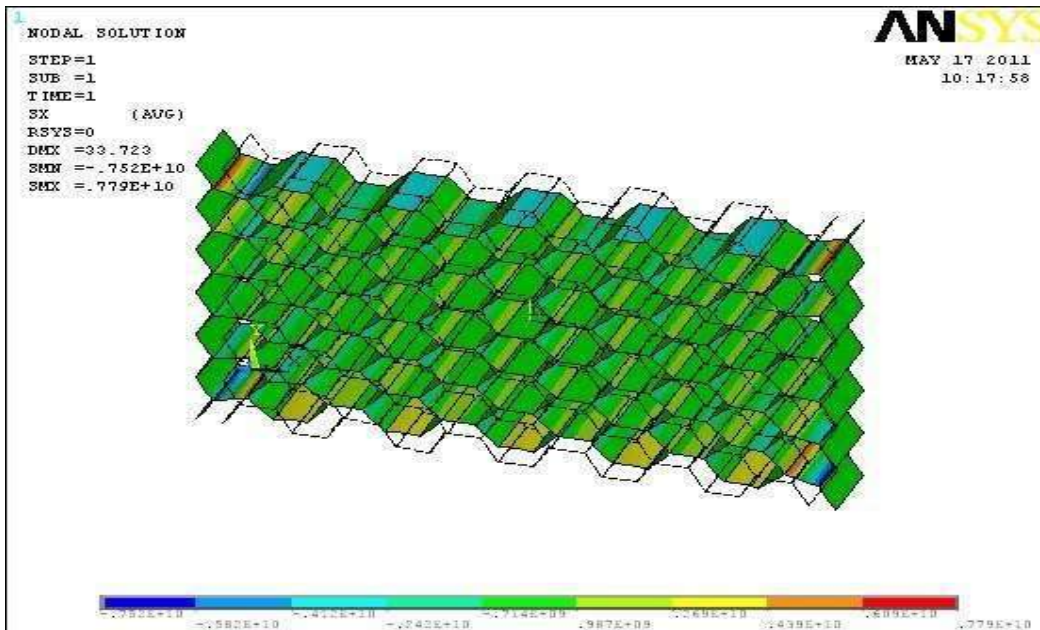


Fig. Distribution du champ de contrainte dans le V.E.R d'une structure à cellules hexagonales (chargement suivant l'axe x)

Le champ de σ_y pour un nid d'abeilles hexagonal soumis à une traction est illustré à la fig, où l'axe de chargement est y

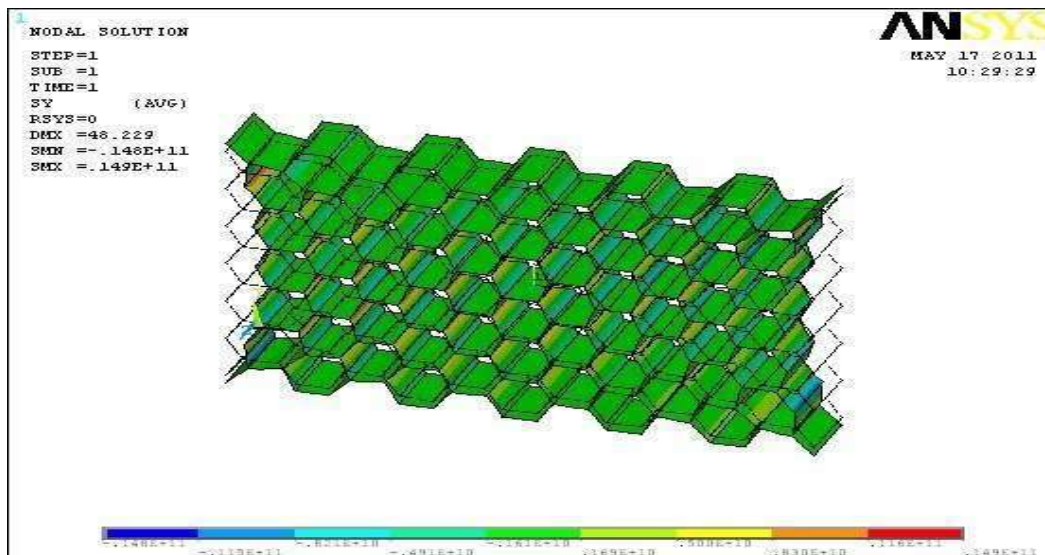


Figure État de la contrainte σ_y dans le V.E.R d'une structure à cellules hexagonale (l'axe de chargement est y

II.2.1. Calcul du module d'élasticité E_3

Pour calculer le module de Young hors plan, on peut utiliser la même méthodologie de calcul (conditions aux limites et formulation). Un déplacement de 1 mm le long de l'axe zzz a été imposé sur la face supérieure, tandis que tous les déplacements sont bloqués au niveau de la face inférieure. Pour $Z = L_z$, un déplacement suivant Z ($U_z = 1$ mm) est imposé pour tous les nœuds allant de $Y = 0$ à $Y = L_y$ et de $X = 0$ à $X = L_x$.

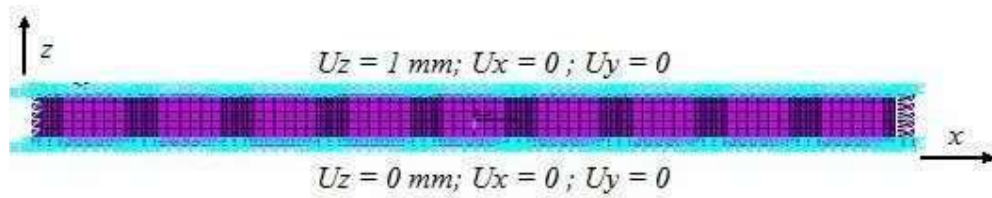


Fig12 . Conditions aux limites pour une traction suivant la direction Z

Le calcul du module de Young hors plan se fait par l'intermédiaire de la relationsuivante :

Sous l'effet de la traction uniaxiale, nous obtenons pour le V.E.R du nid d'abeille la

$$E_3 = \frac{\sigma_z}{\varepsilon_z}$$

déformée

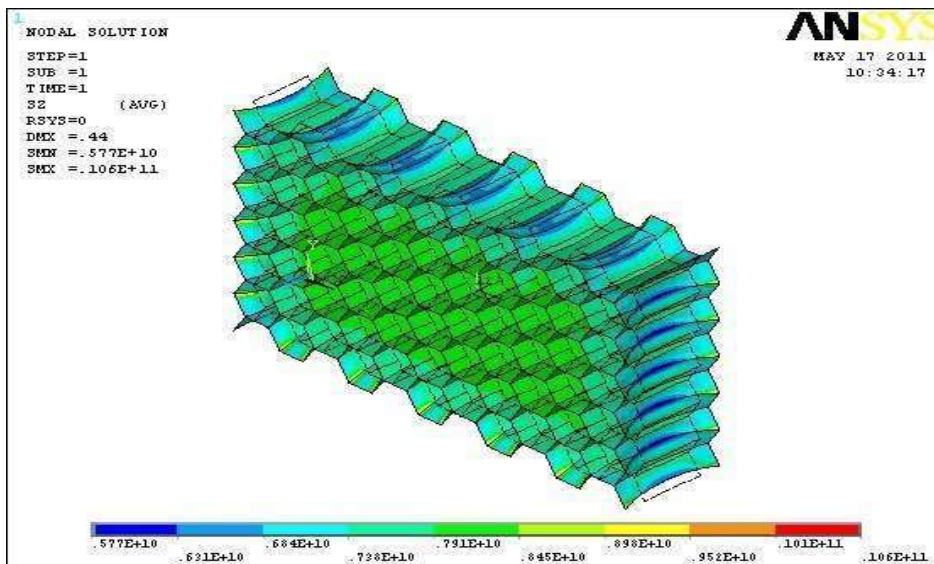


Figure II.12. État de la contrainte dans le V.E.R d'une structure à cellules hexagonales (chargement suivant l'axe z).

II.6.3 Modules de cisaillement G12

La détermination des modules de cisaillement G12 est réalisée en imposant un déplacement dans le plan (x, y). La méthode consiste à bloquer en translation la face inférieure et à appliquer un déplacement à la face supérieure du V.E.R. Sous l'effet de la traction uniaxiale, la déformation du V.E.R du nid d'abeilles est obtenue.

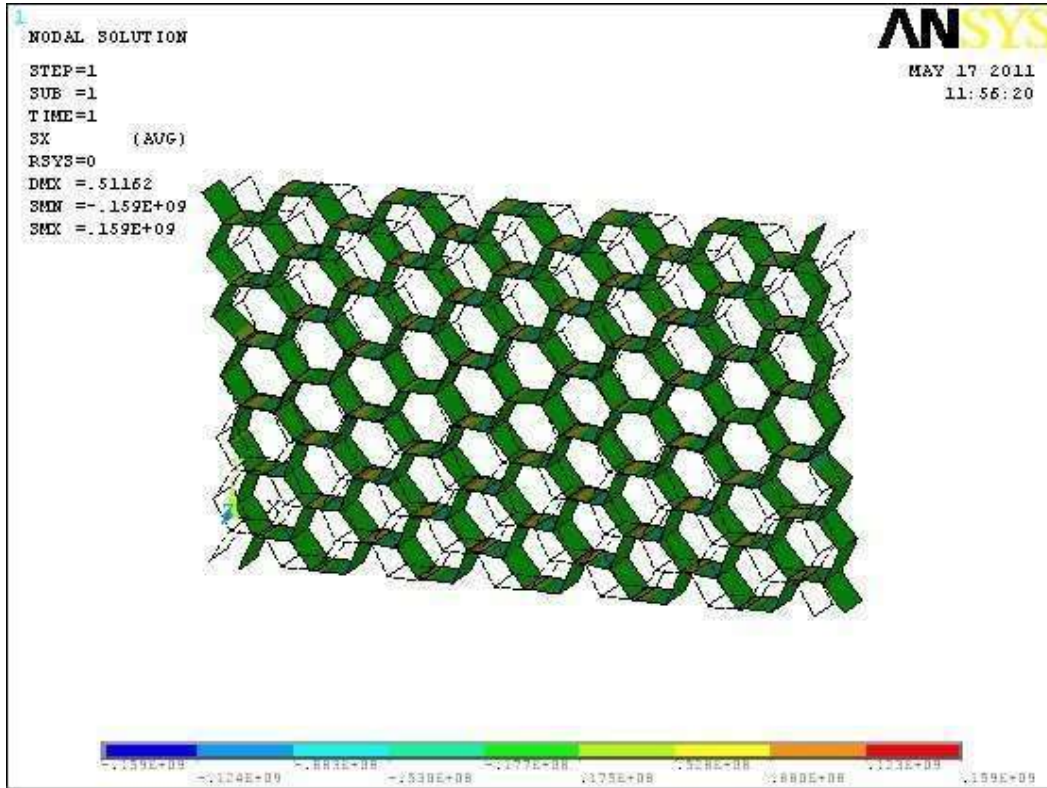


Figure II.13. Effet de cisaillement dans le plan XY

Les figures II.15, II.16 et II.17 montrent respectivement l'évolution des modules de Young adimensionnels E1, E2 et E3 en fonction de la densité relative, selon la méthode analytique de Gibson et Ashby, comparée à celle obtenue par l'approche numérique de cette étude. Les résultats obtenus par ANSYS montrent une bonne concordance avec les résultats analytiques. L'évolution des modules de Young E1 et E2 en fonction de la densité relative suit une loi de type puissance, tandis que celle de E3 est de type linéaire. Les évolutions des modules E1 E2 et E3 pour les structures cellulaires régulières peuvent être déterminé par les formules :

$$E_1 = E_2 = 1.5 E_s \rho^{*3}$$

$$E_3 = E_s \rho^{*1}$$

$$\rho^* = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{r}{l}\right)$$

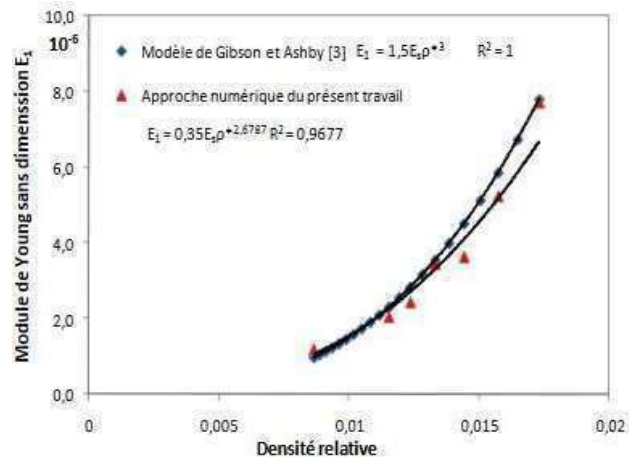


Figure II.14. Évolution du module de Young E_1 en fonction de la densité relative.

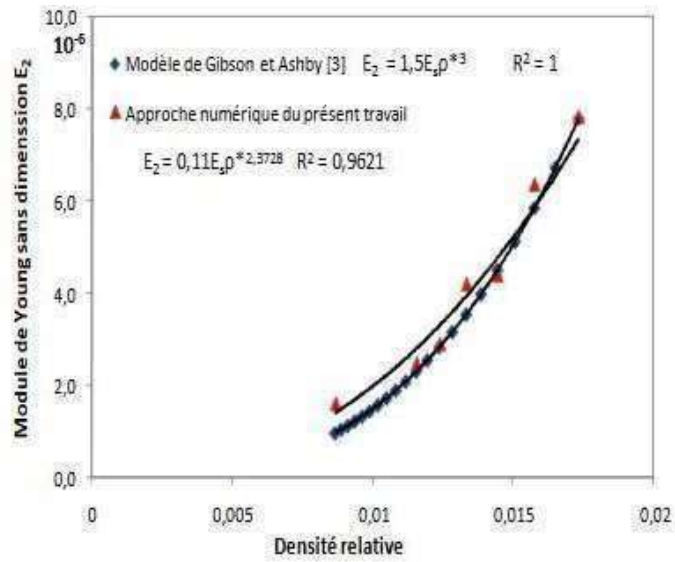


Figure II.15 Évolution du module de Young adimensionnel E_2 en fonction de la densité relative.

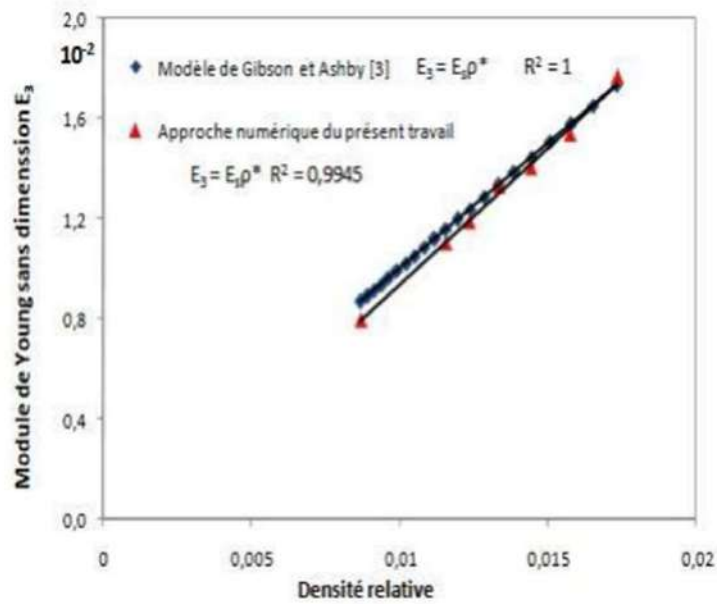


Figure II.16. Évolution du module de Young E_3 en fonction de la densité relative. L'évolution du module de cisaillement G_{12} en fonction de la densité relative Les résultats de l'approche numérique obtenus par le code de calcul des structures ANSYS montrent une bonne concordance avec la modélisation analytique. L'évolution de module de cisaillement G_{12} pour les cellules régulières sans dimension s'effectue selon la formule:

$$G_{12} = 0.375 E_s \rho^{*3}$$

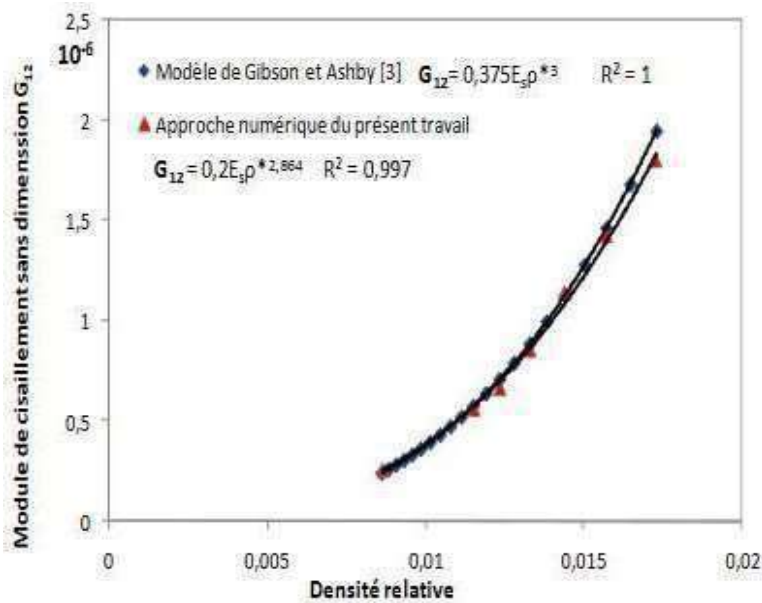


Figure II.17. Évolution du module de cisaillement G_{12} en fonction de la densité relative.

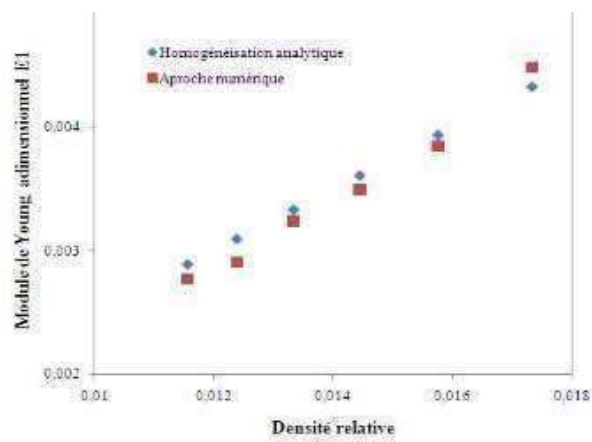
CHAPITRE I I I Homogénéisation analytique et numérique des nids d'abeilles

Les figures II.18 et II.19 illustrent le comportement des modules de Young adimensionnels pour des structures à cellules carrées et triangulaires en fonction de la densité relative dans le plan. Les résultats obtenus par les méthodes d'homogénéisation empirique et numérique, appliquées aux mêmes rapports de densité relative, montrent que le système de cellules triangulaires possède un module plus élevé. Il est important de noter qu'en comparaison avec une structure cellulaire hexagonale, la densité d'une structure cellulaire triangulaire est trois fois plus élevée. En d'autres termes, pour une même densité relative, l'échelle ligamentaire de la cellule triangulaire serait divisée par trois, ce qui aboutit à des poutres plus rigides (ligament). Les formules des densités relatives pour chaque type de structure sont présentées dans le tableau

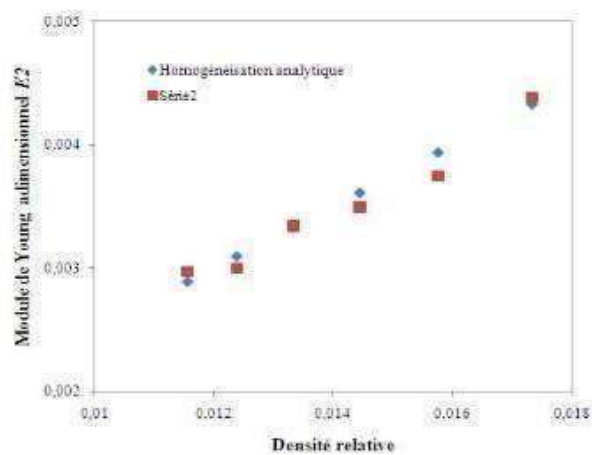
II.2 ci-dessous.

Structure à cellules	Densité relative	Module de Young adimensionnel E/E_s
Hexagonale	$\rho_H = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{t}{l}\right)$	$E_1 = 1.5 E_s \rho_H^3$
Carrée	$\rho_C = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{t}{l}\right)$	$E_1 = E_s \rho_C / 4$
Triangulaire	$\rho_T = \frac{6}{\sqrt{3}} \left(\frac{t}{l}\right)$	$E_1 = E_s \rho_T / 3$

Tableau II.2. Les principales formulations pour les trois structures à cellules régulières



(a)



(b)

Figure II.18. Évolution du module de Young adimensionnel en fonction de la densité relative pour une structure à cellules carrées. (a) E_1/E_s , (b) E_2/E_s .

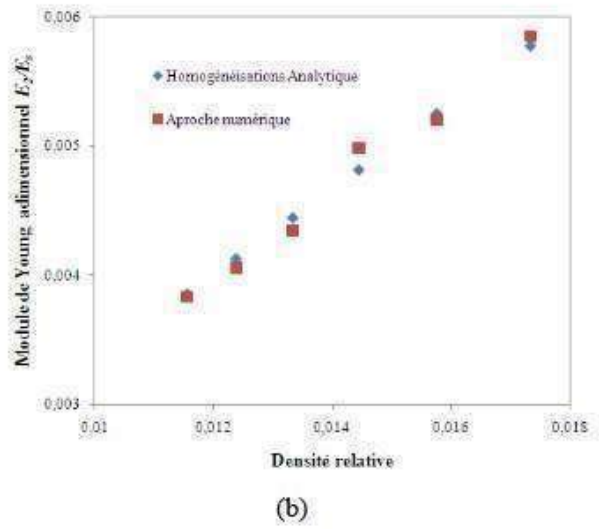
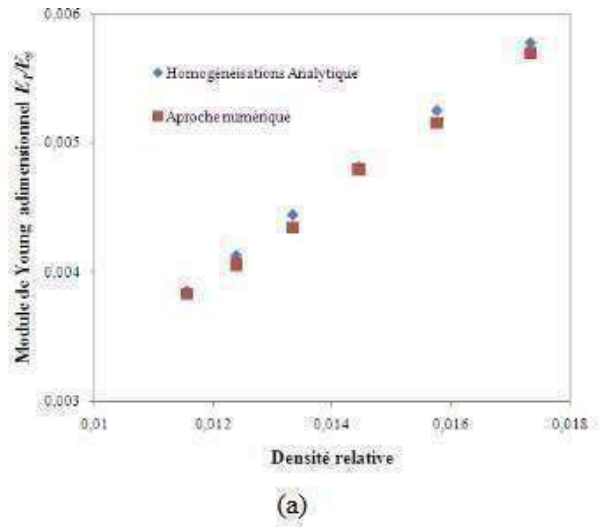


Fig. Évolution du module de Young adimensionnel en fonction de la densité relative pour une structure à cellules triangulaires. (a) E_1/E_0 , (b) E_2/E_0 .

II.7. Conclusion

Ce chapitre présente diverses méthodes de mesure pour l'homogénéisation analytique et numérique des structures en nid d'abeilles de formes hexagonales, carrées et triangulaires. Les résultats obtenus par les méthodes analytique (utilisant ANSYS) et interactive montrent un accord solide pour les différents modules d'élasticité et de cisaillement.

Conclusion Générale

Cette thèse porte sur l'analyse expérimentale du comportement en flexion statique d'un matériau composite et sur l'homogénéisation analytique et numérique de panneaux sandwichs en nid d'abeilles. Les recherches ont démontré que le comportement de ces matériaux peut être déterminé à l'aide de modèles analytiques et numériques, en prenant en compte les défis posés par les structures en nid d'abeilles et les composites. La comparaison des résultats des modèles analytiques (Gibson et Ashby) avec ceux obtenus par simulation numérique a permis de mieux évaluer les valeurs des modules élastiques.

Pour les modules d'élasticité E_1 , E_2 , et E_3 , il a été observé que les résultats obtenus par ANSYS sont en fort accord avec les résultats empiriques. Il est à noter que l'évolution des modules de Young E_1 et E_2 en fonction de la densité relative suit une relation de type puissance, tandis que celle de E_3 est à la fois de type puissance et linéaire.

Les résultats de la méthode de calcul obtenus avec le code de mesure des structures ANSYS montrent un fort alignement avec la modélisation théorique pour le module de cisaillement G_{12} .

Références Bibliographiques

- [1] Zinkert D. (The Handbook of Sandwich Construction). Emas publishing. 1997
- [2] François Horel « Modélisation analytique de l'amortissement des poudres composites sandwich contenant des couches viscoélastiques ». [En ligne]. Disponible sur : <http://docplayer.fr/6049561-Modelisation-analytique-de-l-amortissement-des-poutres-composites-sandwich-contenant-des-couches-viscoelastiques.html>. [Consulté le: 16-Mai-2016].
- [4] Zinkert D. (An introduction to sandwich construction), EMAS ltd. UK.1995
- [5] Petersen, H. N., Beauson, J., McGugan, M., & Sørensen, B. F. (2017). Materials for Wind Turbine Blades: An Overview. *Materials*, 10(11), 1285. doi:10.3390/ma10111285
- [10] Liu, Y., & Shen, H. (2009). **Vibration analysis of composite laminates and sandwich structures. Springer.**
- [11] Reddy, J. N. (2004). **Mechanics of laminated composite plates and shells: theory and analysis. CRC Press.**
- [12] Zenkour, A. M. (2005). **Generalized shear deformation theory for bending analysis of functionally graded sandwich plates. Applied Mathematical Modelling, 29(6), 707-723.**
- [13] Mujumdar, P. M., & Suryanarayana, M. (1988). **Free vibration of laminated composite beams with various boundary conditions. Journal of Sound and Vibration, 123(3), 297-308.**
- [14] Leissa, A. W. (1969). **Vibration of plates. NASA SP-160.**
- [15] Gibson, R. F. (2016). **Principles of composite material mechanics. CRC Press.**

Références Bibliographiques

- [16] Adams, R. D., & Bacon, D. G. C. (1973). Effect of fibre orientation and laminate geometry on the dynamic properties of CFRP. *Journal of Composite Materials*, 7(4), 402-428.
- [17] Craig, R. R., & Kurdila, A. J. (2006). *Fundamentals of structural dynamics*. John Wiley & Sons.
- [18] Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., & Witt, R. J. (2002). *Concepts and applications of finite element analysis*. John Wiley & Sons.
- [19] Bathe, K. J. (1996). *Finite element procedures*. Prentice Hall.
- [20] Sun, C. T., & Zhang, H. (1992). Thermal effects on the vibration frequencies of laminated composite plates. *Journal of Composite Materials*, 26(7), 966-978.
- [21] Fung, Y. C. (2008). *An introduction to the theory of aeroelasticity*. Dover Publications.
- [22] Nashif, A. D., Jones, D. I. G., & Henderson, J. P. (1985). *Vibration damping*. John Wiley & Sons.
- [23] Ewins, D. J. (2000). *Modal testing: theory, practice and application*. Research Studies Press Ltd.
- [24] Arora, J. S. (2011). *Introduction to optimum design*. Academic Press.
- [25] Abrate, S. (2011). *Impact on composite structures*. Cambridge University Press.
- [26] Gibson, R. F. (2010). A review of recent research on nanoindentation of polymer composites and their constituents. *Composite Structures*, 92(12), 2793-2810.
- [27] Mindlin, R. D. (1951). Influence of rotary inertia and shear on flexural motions of isotropic, elastic plates. *Journal of Applied Mechanics*, 18(1), 31-38.
- [28] Leissa, A. W., & Narita, Y. (1980). Vibration modes of rectangular plates with different edge conditions. *Journal of Sound and Vibration*, 69(1), 119-124

Références Bibliographiques

- [29] Nayfeh, A. H., & Mook, D. T. (1995). **Nonlinear oscillations**. John Wiley & Sons.
- [30] Abrate, S. (1998). **Impact on laminated composite materials**. *Applied Mechanics Reviews*, 51(10), 731-744.
- [32] Daniel, I. M., & Ishai, O. (2006). **Engineering mechanics of composite materials**. Oxford University Press.
- [33] Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Zhu, J. Z. (2005). **The finite element method: its basis and fundamentals**. Butterworth-Heinemann.
- [34] Madsen, H. O., Krenk, S., & Lind, N. C. (2006). **Methods of structural safety**. Courier Corporation.
- [35] ASTM International. (2002). **ASTM D3039/D3039M-00: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**
- [36] Nayfeh, A. H., & Balachandran, B. (2008). **Applied nonlinear dynamics: analytical, computational, and experimental methods**. Wiley-VCH.
- [37] Bolotin, V. V. (1964). **The dynamic stability of elastic systems**. Holden-Day
- [38] Ewins, D. J. (2000). **Modal testing: theory, practice and application**. Research Studies Press Ltd.
- [39] Craig, R. R., & Bampton, M. C. C. (1968). **Coupling of substructures for dynamic analyses**. *AIAA Journal*, 6(7), 1313-1319.
- [40] Schmidt, R., & Smith, M. (2005). **Damage detection in composite materials using vibration analysis**. *Journal of Composite Materials*, 39(19), 1631-1649.
- [41] Papoulis, A., & Pillai, S. U. (2002). **Probability, random variables, and stochastic processes**. McGraw-Hill.
- [42] Timoshenko, S. P., & Gere, J. M. (1961). **Theory of elastic stability**. McGraw-Hill.
- [43] Rogers, C. A. (1995). **Intelligent materials**. *Scientific American*, 273(3), 154-157.

Références Bibliographiques

- [44] Fish, J., & Belytschko, T. (2007). **A first course in finite elements. John Wiley & Sons**
- [45] Fiedler, B., Hojo, M., Ochiai, S., Schulte, K., & Ando, M. (2001). **Failure behavior of an epoxy matrix under different kinds of static loading. Composites Science and Technology, 61(1), 61-73.**
- [46] Daoud, M., & Benrahou, K. H. (2009). **Dynamic behavior of adhesively bonded sandwich structures. Journal of Adhesion Science and Technology, 23(10-11), 1449-1470.**
- [47] Rao, S. S. (2003). **Mechanical vibrations. Prentice Hall.**
- [48] Stephens, R. I., Fatemi, A., Stephens, R. R., & Fuchs, H. O. (2000). **Metal fatigue in engineering.**
- [49] John Wiley & Sons Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Zhu, J. Z. (2005). **The finite element method: its basis and fundamentals. Butterworth-Heinemann.**
- [50] Preumont, A. (2002). **Vibration control of active structures: an introduction. Springer.**
- [51] Cawley, P., & Adams, R. D. (1979). **The location of defects in structures from measurements of natural frequencies. Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 14(2), 49-57.**
- [52] Bakis, C. E., Bank, L. C., Brown, V. L., Cosenza, E., Davalos, J. F., Lesko, J. J., ... & Triantafillou, T. C. (2002). **Fiber-reinforced polymer composites for construction—State-of-the-art review. Journal of Composites for Construction, 6(2), 73-87.**
- [53] Lee, K. (1999). **Principles of CAD/CAM/CAE systems. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.**
- [54] Gibson, R. F. (2016). **Principles of composite material mechanics. CRC Press.**