

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

FACULTE DES SCIENCES APPLIQUE

Département de Génie Mécanique

Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADIMIQUE/PROFESSIONNEL

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Génie Productique

Présenter par :

BOUMAAZA Med Ali

BOUMAAZA Mourad

Thème

**Simulation d'essai de traction pour matériau
cellulaire**

Devant le jury composé de

Mr. BOUAKBA Moustafa

Mr. KHALFI Mehdi

Encadreur

Mr. BOUKHATEM Mourad

Année universitaire : 2015/2016



Remerciements

Nous exprimons nos profonds remerciements à Monsieur ***BOUKHATEM Mourad***, encadreur de ce mémoire, pour son aide précieuse, sa confiance, ses encouragements, sa patience et son soutien favorable pour l'aboutissement de ce travail.

Nous remercions, également, ***Mr. BOUAKBA***, enseignant au sein de la faculté des sciences appliquées, pour ses éclairages et ses conseils très utiles .

Je remercie vivement tous ce qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Dédicace

Après cette réussite qui fait la joie de tous ceux qui m'aiment ; je dédie ce modeste travail avec un vif plaisir à mon père et ma mère qui m'ont toujours soutenu et se sont sacrifiés pour que je réussisse dans ma vie ;

Nos frères : Nabil, Sofiane, Djaloul, Tayab.

Nos sœurs : Halima, Fatima Zahra, Nermine.

nos neveux : Abdel Aziz, Mohamed Ali, et notre nièce Nafissa

Toute la famille : BOUMAAZA, DJAKLOU.

Tous mes intimes.

Introduction Générale

L'évolution technologique moderne qui se passe aujourd'hui, est principalement due au développement des matériaux utilisés dans plusieurs domaines. Dans certains domaines, les matériaux présentant des propriétés mécaniques élevées par rapport à leur faible densité sont, de loin, les plus utilisés. ces caractéristiques très spéciales se trouvent dans les Matériaux composites, l'assemblage des matériaux non miscibles nous accorde un nouveau matériau avec des caractéristiques élevées. Les matériaux cellulaires forment une catégorie très importante des matériaux composites. il se subdivisent en plusieurs types et structures et seront détaillées tout le long de ce travail. Et nous axerons notre travail sur les structures en nid d'abeilles.

La structure nid d'abeilles offre un bon compromis entre la résistance et la légèreté. Leur domaine d'applications est très varié grâce à leur simplicité qui fait ressortir des avantages certains tout le long de cette étude. la structure en nid d'abeilles a différents types qui sont liés à la géométrie de la cellule. L'objet de ce travail est de réaliser un modèle analytique de la cellule régulière, pour dans un deuxième temps, effectuer des simulations d'essais de traction par le code ANSYS. Différentes simulations seront effectuées en faisant varier plusieurs paramètres, entre autres : le rapport R entre les petit et grand rayon de la cellule , les angles phi et psi, etc. pour en voir les différentes influences sur les propriétés mécaniques du matériau constitué par cette cellule.

Dans le premier chapitre, nous passons en revue tous les matériaux composites. Avec un accent plus prononcé pour les matériaux cellulaires.

Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude détaillée de la cellule hexagonale régulière . ou, en premier, on effectue sa modélisation. Ensuite, à l'aide du logiciel MATLAB nous créons la structure cellulaire, qui sera implémentée dans ANSYS ou une homogénéisation des propriétés mécaniques sera effectuée. Après quoi, les différentes simulations seront réalisées. Enfin, suit l'opération de collecte des résultats pour analyse et interprétation. Opérations qui clôturent le second chapitre.

Enfin, une conclusion générale résume les principaux enseignements tirés de ce travail et clôture par la même ce mémoire.

Sommaire

Introduction générale.....	01
Chapitre I : Généralités des matériaux cellulaires.....
Introduction.....	02
I-1. les matériaux composites.....	03
I-1-1. généralités.....	03
I-2.Les matériaux composites à structure sandwich.....	03
I-2-1.Les peaux.....	04
I-2-2.L'âme.....	04
I-2-2-a).Ame pleine.....	04
I-2-2-b).Ame creuse.....	04
I-2-2-c).Mousses.....	04
I-2-2-d).Balsa.....	04
I-2-2-e).Nid d'abeille.....	05
I-3.Les matériaux cellulaires.....	05
I-3-1.Les propriétés mécaniques d'un matériau cellulaire.....	06
I-3-2.Applications.....	06
I-3-3.Les avantages et les inconvénients d'un matériau composite.....	06
I-3-3-a).Avantages.....	06
I-3-3-b).Inconvénients.....	06
I-3-4.Le Structure nid d'abeille.....	07
I-4.Matériau orthotrope.....	08
Conclusion.....	10
Chapitre II : L'homogénéisation.....
Introduction.....	11
II-1.La modélisation.....	11
II-1-1.L'obtention des points à partir de MATLAB.....	11
II-1-2.Le code ANSYS.....	12

Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire

II-1-3. Concept d'homogénéisation.....	12
II-1-4. Méthode multifactorielle.....	12
II-1-5. Simulation dans ANSYS.....	12
II-1-6. Approche numérique.....	13
II-2. Résultats et interprétation.....	14
II-2-1 Variation de R.....	14
II-2-1-1. Comparaison des modules d'élasticité E1 et E2 en fonction de R pour différents angles Ψ et ϕ ...	16
II-2-1-2. Comparaison des coefficients de poisson N1-2 et N2-1 en fonction de R pour différents angles Ψ et ϕ	16
II-2-1-3. Comparaison des modules de cisaillement G1-2 en fonction de R pour différents angles Ψ et ϕ ...	17
II-2-2. Effet de la variation de Psi (Ψ).....	17
II-2-2-1. Comparaison des différentes valeurs de E1 et E2 en fonction de psi pour différentes valeurs de R et phi.....	18
II-2-2-2. Comparaison des coefficients de poisson N1-2 et N2-1 en fonction de psi pour R et phi constantes.....	19
II-2-2-3. Comparaison des modules de cisaillement G1-2 en fonction de psi.....	20
II-2-3. Effet de la variation de Phi (ϕ).....	20
II-2-3-1. Comparaison de différents modules d'élasticité E1 et E2 en fonction de phi pour différentes valeurs de R et psi.....	21
II-2-3-2. Comparaison des coefficients de poisson Nu1-2 et Nu2-1.....	22
II-2-3-3. Comparaison entre différentes valeurs des modules de cisaillement G1-2 en fonction de phi.....	22
II-3. Optimisation des propriétés mécaniques de la cellule.....	23
II-3-1. Les Modules d'élasticité E1 et E2.....	23
II-3-2. Les coefficients de poissons N1-2 et N2-1.....	24
II-3-3. Le module de cisaillement G1-2.....	25
Conclusion.....	26
Conclusion générale & Perspectives.....	27

Chapitre I : Recherche bibliographie

Introduction

Les matériaux composites sont les plus utilisés dans l'industrie moderne et parmi eux, nous citons les matériaux cellulaires. Que sont les matériaux cellulaires?

Les matériaux cellulaires sont des matériaux dont la porosité excède typiquement 70% du volume. On peut décrire de tels solides comme un assemblage de cellules vides, chacune étant entourée par des arêtes ou des parois solides. Leur importance est leur densité faible parmi d'autres propriétés physiques intéressantes, ces matériaux sont répandus dans la nature comme l'os, le bois, l'éponge, ou bien dans les produits alimentaires : Pain, Meringue, Mousse au chocolat. Généralement, leurs fonction biologique requiert une résistance mécanique.

La structure hexagonale joue un rôle très important dans les matériaux cellulaires. La structure que nous choisissons pour effectuer cette étude est celle du nid d'abeilles, offrant de renforcer la résistance d'un élément tout en garantissant une légèreté maximale. elle affiche de nombreuses propriétés mécaniques et thermiques. Cette structure unique est proposée sous de nombreux matériaux comme le thermoplastique, la fibre de verre, le carbone, l'aluminium et les papiers aramides.

Ce chapitre présente une revue bibliographique sur les matériaux composites, les matériaux cellulaires, les propriétés et les applications des matériaux cellulaires et, en particulier ceux ayant la structure en nid d'abeilles.

I-1. Les Matériaux composites

I-1-1. Généralités

Dans de nombreux domaines tels que l'aéronautique, l'armement, l'automobile, le génie civil, les transports, le médical, etc ..., l'utilisation des matériaux composites est en constante progression. Cet engouement n'est pas un hasard mais un développement judicieux soutenu par des intérêts techniques et économiques.

Les matériaux composites sont des assemblages de deux ou plusieurs produits élémentaires non miscibles de natures différentes. La complémentarité des différents constituants permet d'aboutir à un matériau dont les performances sont généralement un compromis de celles des constituants (pris séparément).

Il y a des différents types des matériaux composites et les plus connus sont les matériaux multicouches et les matériaux sandwich.

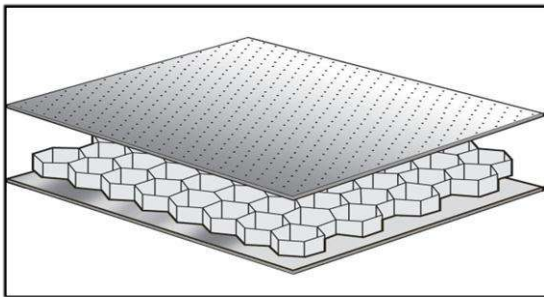


Figure 1-1 : structure sandwich.

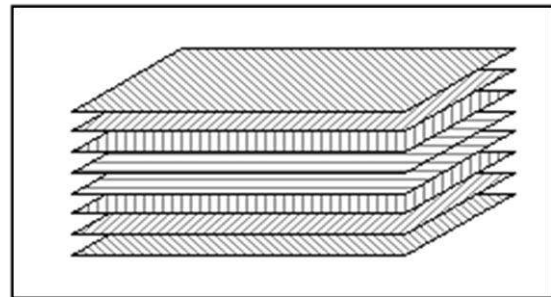


Figure 1-2: structure multicouches.

Ce matériau peut se présenter sous différentes formes généralement dépendant de la géométrie du renfort. Les composants sont choisis par rapport à leurs caractéristiques mécanique, thermique et chimique.

Les propriétés obtenues sont généralement meilleures que celles de la matrice seule.

I-2. Les matériaux composites à structure sandwich :

Le panneau sandwich est un matériau composite composé de deux tôles métalliques minces entre lesquelles est insérée une couche d'un matériau généralement polymère.

Ces structures présentent deux avantages importants: une rigidité nettement plus élevée par rapport à celle d'une tôle monolithique d'un poids équivalent et des propriétés acoustiques remarquables. Comme il est possible d'associer de nombreux types de «peaux» et de «cœurs», une large gamme de produits est disponible.

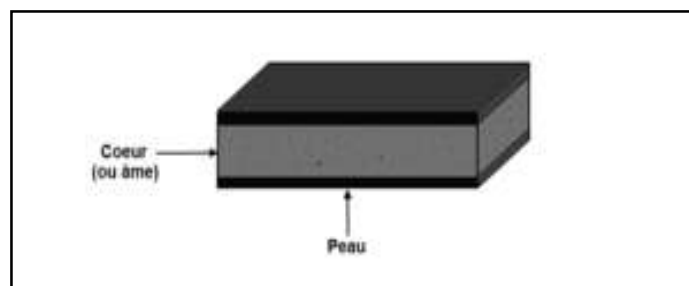


Figure 1-3 : materiau sandwich (peau+âme)

I-2-1. Les peaux

Généralement de faibles épaisseurs, les peaux sont constituées de tout matériau pouvant être obtenu sous forme de couche.

I-2-2. L'âme

Légère, l'âme a en général une très faible résistance à la flexion. Son but est de reprendre les efforts de compression et de cisaillement. Les matériaux d'âme les plus utilisés se présentent principalement sous des formes :

- a) **Âme pleine** : Parmi lesquelles on trouve le balsa (ou bois cellulaire) ; diverses mousses cellulaires et des résines chargées de microsphères creuses de verre.[1]

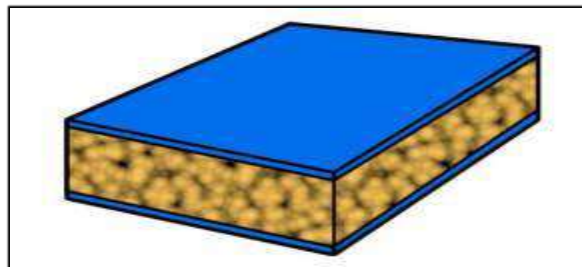


Figure 1-4: d'un âme pleine.

- b) **Âme creuse** : Essentiellement de type nid d'abeilles et profilé (réseaux métalliques légers, réseaux en papier enduit ou non, réseaux en polycarbonate en polypropylène).[1]

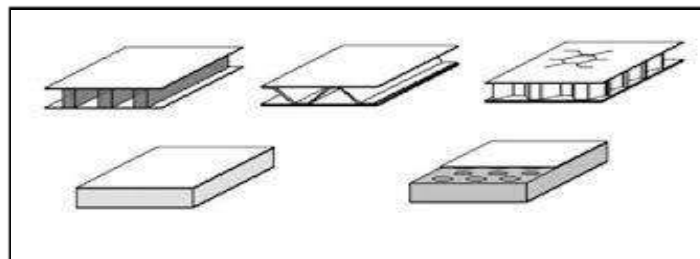


Figure 1-5 : âme creuse

- c) **Mousses** : Ces matériaux légers peu onéreux, facilement usinables et ont cependant de très faibles caractéristiques mécaniques.[1]
- d) **Balsa** : Est un bois bien connu pour ces différentes utilisations et de leurs principales qualités telle que la légèreté, le haut pouvoir d'isolation thermique et acoustique et la non déformation aux variations thermiques. [1]

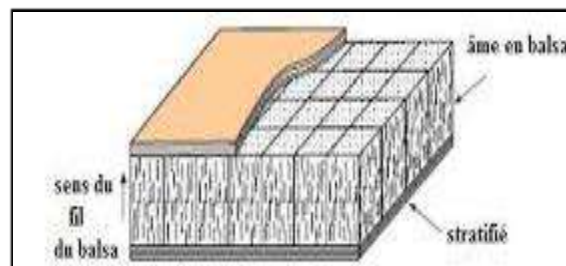


Figure1-6 : âme en balsa.

e) Nid d'abeille

Cette structure est réalisée généralement à partir de matériaux en plaques minces (alliage d'aluminium, papier polyamide).[1]

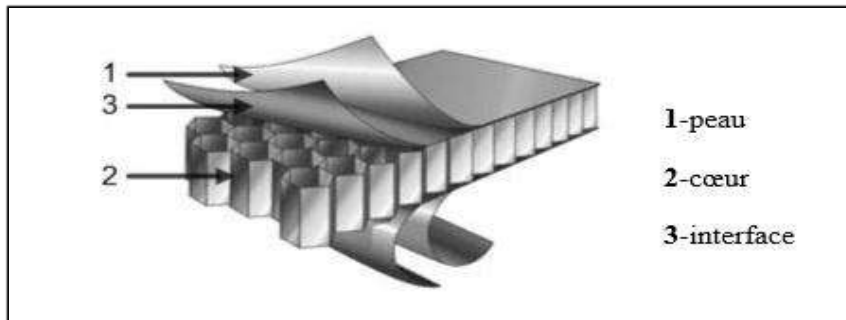


Figure 1-7 : âme structure nid d'abeille.

Les matériaux cellulaires sont parmi les plus utilisés dans l'industrie des matériaux d'âme.

I-3. Les matériaux cellulaires :

Un matériau cellulaire peut être défini en tant que solide composé de plusieurs cellules ouvertes ou fermées relativement régulières. Les matériaux cellulaires sont largement utilisés en raison de leur haute résistance spécifique (rapport entre module Young et masse volumique) et de leur légèreté provenant de leur grande porosité ce qui fait leur attrait principal. On les trouve dans la nature : Os, Bois, Eponge, ou bien dans les produits alimentaires : Pain, Meringue, Mousse au chocolat. La figure 1.8 présente quelques matériaux cellulaires.

Les matériaux cellulaires peuvent être de nature : polymère, céramique ou métallique. Donc la famille d'un matériau cellulaire est définie par la matière qui la constitue. Ces matériaux sont utilisés dans l'industrie automobile, le transport de marchandise et l'emballage comme absorbeurs d'énergie en cas d'impact grâce à leur déformation plastique. Ils sont, aussi, bon isolateur thermique et acoustique.

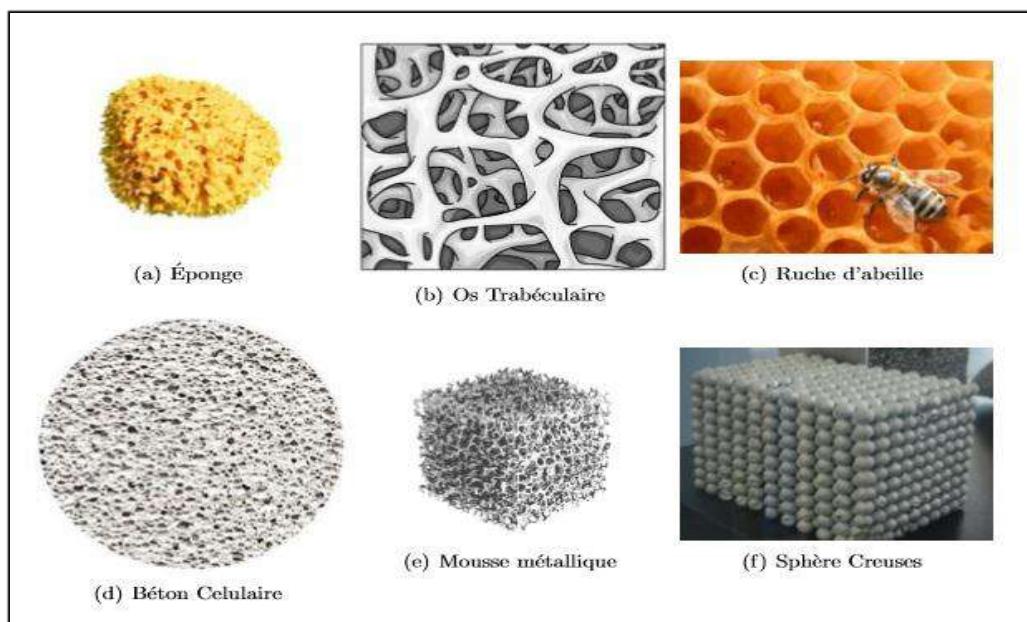


Figure 1-8 : quelques matériaux cellulaires.

I-3-1. Les propriétés mécaniques d'un matériau cellulaire

La structure du matériau cellulaire et la nature de ce matériau sont définis par leurs propriétés mécaniques, aussi la taille de cellule, la forme de cellule et la densité relative.

La grande porosité et la structure font de ce matériau cellulaire un bon absorbeur d'énergie. Les mousses présentent des propriétés structurales et/ou fonctionnelles selon leur caractère ferme et/ou ouvert. Les propriétés intéressantes des matériaux cellulaires sont alors la densité, le module d'Young, la résistance à la compression, le coefficient d'absorption d'énergie mécanique, la conductivité thermique et le coefficient d'absorption acoustique.

I-3-2. Applications

Les matériaux cellulaires ouvrent un grand nombre d'applications émergentes. C'est surtout grâce à leur basse densité qu'ils sont des matériaux structuraux utiles, sachant que le problème principal est le poids. Aussi la basse densité de ces matériaux et l'énorme diminution de la conductivité thermique, cela permet des applications dans le domaine de l'isolation thermique ou même en tant que matières non inflammables.

Ainsi, le matériau cellulaire est une bonne isolation acoustique donc ces matériaux sont utilisés dans le domaine du bâtiment comme le béton, une autre propriété utilisée dans le domaine du bâtiment et l'atténuation des vibrations, les vibrations sont fortement atténuées par la matière molle elle-même, par exemple les mousses polymères.

Une autre application d'un matériau cellulaire et l'emballage de matière fragile, ces matériaux sont de bons absorbeurs d'énergie en cas d'impact, grâce à leur déformation plastique dissipée à un niveau d'effort presque constant sur une large gamme de déformations.

Dans l'industrie de l'automobile, par exemple, le crash box utilisée pour absorber l'énergie cinétique en cas de collision d'un véhicule.

Dans le domaine aéronautique, le matériau cellulaire est utilisé pour leur haute porosité et légèreté, avec ces bonnes propriétés de compression et cisaillement hors plan comparativement à sa masse.

I-3-3. Les avantages et les inconvénients d'un matériau composite

a) Avantages

- Economie d'énergie;
- Durée de vie importante et économique;
- Fabrication dans le respect de l'environnement et sont 100% recyclables;
- Un placement rapide avec le moins de nuisance.

b) Inconvénients

- Mauvais amortissement et isolation acoustique;
- Tenue moyenne au feu pour certaines catégories d'âme;
- Risque de flambement plus élevé que dans les autres structures.

I-3-4. La Structure nid d'abeille :

La structure nid d'abeilles est une de plusieurs structures du matériau cellulaire, il a une forme bidimensionnelle et moins compliquée que les autres structures, il est très important de comprendre le mécanisme de cette structure. Cette structure nous donne un bon équilibre pratique entre la force, la rigidité et le poids. Cette structure est le typique exemple et les plus simples d'un matériau cellulaire, cette structure est anisotrope, les propriétés mécaniques de cette structure dépendant à la direction des forces appliquées.

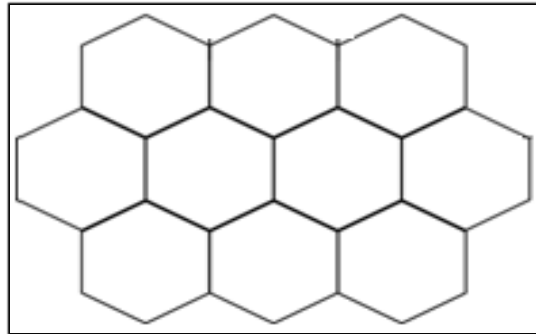


Figure1-9 : structure nid d'abeilles

Le structure nid d'abeilles est très répandus et est constitué de cellules hexagonales régulièrement espacées faisant penser à une ruche d'abeilles. On distingue différents types de nid d'abeille :

- **Métallique**: (alliage léger, acier) sont moins onéreux et plus résistants.
- **Non-métallique**: (carton imprégné de résine phénolique, feuille de polyamide, tissus de verre imprégnés sont insensibles à la corrosion et sont de bons isolants thermiques.

a) Les avantages de structure nid d'abeille

- Economique ;
- Insensible à l'eau ;
- Rigide ;
- Imputrescible ;
- Léger ;
- Isolant acoustique et thermique ;
- Résistant aux chocs ;
- Mise en œuvre aisée ;
- Compatible avec de nombreux matériaux ;
- Recyclable.

b) L'application de la structure de nid d'abeilles dans le domaine industriel

Le nid d'abeille est léger, résistant à la compression et au cisaillement, ainsi qu'au feu et à la corrosion (par exemple aluminium). Les applications du nid d'abeille sont nombreuses et touchent à des domaines très différents : le secteur des moyens de transport (transport ferroviaire, nautique/naval), ou bien dans les secteurs des machines-outils, de la sérigraphie, de l'aérotechnique, du bâtiment, etc...

Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire

Il est aussi employé en tant que noyau pour des panneaux sandwich: planchers, plafonds, portes, cloisons, façades, surfaces pour machines automatiques et pour tous les produits qui nécessitent d'atteindre un rapport rigidité/poids optimal.

Le nid d'abeille employé en tant que noyau des panneaux est la solution idéale pour remplir les besoins suivants :

- Légèreté ;
- Rigidité ;
- Résistance au feu (structure métallique);
- Résistance à la compression, au cisaillement;
- Planéité.

c) Les propriétés mécaniques d'une structure nid d'abeille

Le nid d'abeilles est assimilable à un matériau orthotrope de par ses propriétés directionnelles et ses plans de symétrie. Son homogénéisation passe tout d'abord par la détermination des constantes élastiques de l'ingénieur.

Dans notre cas la structure est en nids d'abeilles, pour la caractériser, il faut donc déterminer les constantes de l'ingénieur:

- Les modules d'élasticité
- Les coefficients de Poisson
- Les modules de cisaillement

I-4. Matériau orthotrope

Un matériau orthotrope possède trois plans de symétrie, perpendiculaires deux à deux. Il est à noter que l'existence de deux plans de symétrie perpendiculaires implique l'existence du troisième.

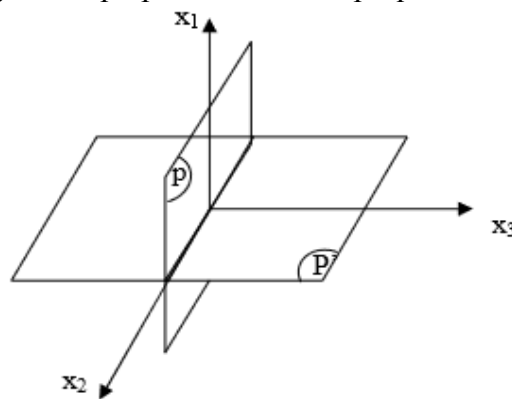


Figure 1-10 : matériau orthotrope.

La forme de la matrice de rigidité est donc obtenue en ajoutant au matériau monoclinique un plan de symétrie perpendiculaire au précédent. L'invariance de la matrice dans un changement de base effectué par symétrie par rapport à ce deuxième plan conduit à une matrice de rigidité de la forme :

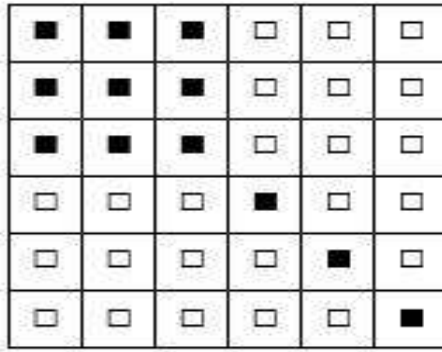


Figure 1-11: matrice de matériau orthotrope.

carrés noirs sont des composants non nuls - **carrés blancs** sont des composants nuls.

La matrice de souplesse a la même forme. Le nombre de constantes d'élasticité indépendantes est ramené à 9.

Dans le cas orthotrope, la loi de comportement de Hooke peut être décrite par:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} \quad \text{I-1}$$

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{31}}{E_3} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{pmatrix} \quad \text{I-2}$$

Dans cette matrice:

- E1, E2, E3 sont les modules d'élasticité longitudinaux ;
- G23, G13, G12 sont les modules de cisaillement ;
- ν_{12} , ν_{21} , ν_{23} , ν_{32} , ν_{13} , ν_{31} sont les coefficients de Poisson.

Conclusion

Les matériaux cellulaires à structure nid d'abeilles sont largement utilisés dans l'industrie à cause de leurs excellentes propriétés et leurs poids relativement faible. Ce matériau est un bon isolant thermique et acoustique. La structure en nid d'abeille a une bonne rigidité et une bonne résistance au cisaillement et à la compression, et cela par rapport à leur masse. Dans ce chapitre, nous avons passé en revue les différents types de matériaux cellulaires et pour cette étude, nous avons choisi les structures en nid d'abeille.

Chapitre II : Homogénéisation

Introduction

La cellule hexagonale régulière présente plusieurs symétries ; par rapport aux axes du plan et par rapport au centre de l'hexagone, ceci nous a poussé à la choisir pour cette étude. Le concept d'homogénéisation consistant à remplacer un matériau réel non homogène par un matériau fictif homogène avec des propriétés macroscopiques équivalentes (obtenus à partir des propriétés des matériaux constituants) simplifie encore plus le travail. Ceci fait, des simulations d'essais de traction seront effectuées dans le Code ANSYS, et ceci sur une toile dessinée avec le concours de MATLAB.

Enfin, nous présentons les résultats des simulations, suivis par une discussion et les interprétations qui s'imposent. Et enfin, une comparaison avec ceux obtenus par la méthode multifactorielle.

II-1.La modélisation

Dans ce travail, nous avons modélisé la cellule hexagonale, dans un premier temps, suivi d'une homogénéisation analytique de la cellule en vue d'avoir des caractéristiques équivalentes. L'obtention de la forme hexagonale a été effectuée avec le concours de la triangulation de Delaunay, qui nous a permis de positionner les centres des hexagones.

II-1-1.L'obtention des points à partir de MATLAB :

L'obtention de ces points permet de tracer trois lignes génératrices de la structure entière. Et ceci à l'aide d'un programme MATLAB dans lequel nous implémentons les trois droites de forme $y=ax+b$. suivront plus bas les équations de ces droites

Le programme MATLAB utilisé est très flexible et nous permet d'intervenir à, pratiquement, tous les stades de son exécution. les variables qui seront continuellement changés sont :

N : Nombre de cellules en l'axe X ;

M : Nombre de cellules en l'axe Y ;

R : le rapport (Y/X) ;

Psi :directeur cosinus en x-axes ;

Phi :directeur cosinus en y-axes.

Le MATLAB sera utilisé pour connecter les points et définir l'épaisseur de chaque paroi de la structure, la figure 1-7 présente la structure obtenue par MATLAB.

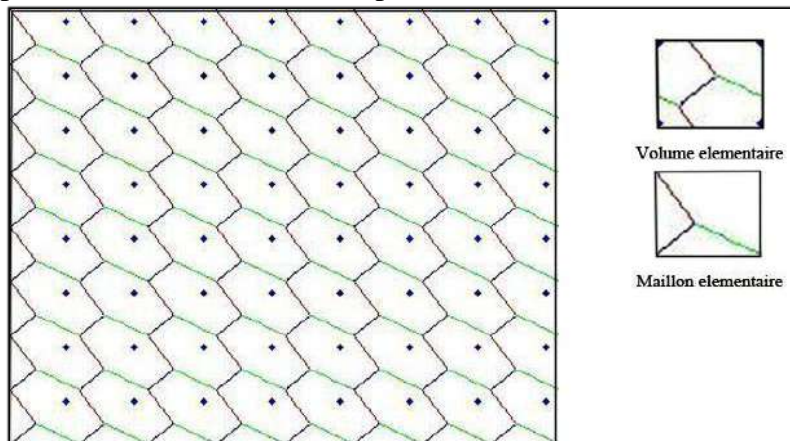


Figure II-1 : La structure obtenue par MATLAB.

La figure obtenue dans MATLAB sera injectée dans le code ANSYS pour réaliser les simulations.

Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire

II-1-2. Le code ANSYS

ANSYS, Inc. est un éditeur de logiciels spécialisé en simulation numérique. L'entreprise a son siège à Canonsburg en Pennsylvanie aux États-Unis. Ses produits majeurs sont des logiciels qui mettent en œuvre la méthode des éléments finis, afin de résoudre des modèles préalablement discrétisés. La société possède de nombreuses filiales¹ à travers le monde, notamment en Europe et en Asie.

II-1-3. Concept d'homogénéisation

Le concept d'homogénéisation consiste à remplacer un matériau réel non homogène par un matériau fictif homogène avec des propriétés macroscopiques équivalentes.

Ces propriétés peuvent être utilisées dans des modèles de calculs où les effets locaux, phénomènes qui interviennent à l'échelle microstructurale, peuvent être négligés. C'est typiquement le cas quand on considère le matériau composite sans les effets locaux dans un but d'exploiter tout le potentiel de la structure.

Les procédures d'homogénéisation peuvent être appliquées pour déterminer une large gamme de propriétés physiques qui peuvent être mécanique, électrique, acoustique, thermique et autres.

II-1-4. Méthode multifactorielle :

Dans le but de trouver les valeurs optimales des caractéristiques mécaniques de la cellule, nous avons opté pour la méthode multifactorielle usant de plusieurs arguments donnant ces valeurs optimales. La méthode multifactorielle est une méthode de la famille de la statistique multi variée, utilisée pour décrire un ensemble de variables observées, au moyen de variables latentes (non observées). Pour réduire le nombre de variables, la méthode calcule ces variables latentes comme combinaisons linéaires des variables observées.

Les résultats obtenus par cette Méthode sont présentés dans l'annexe (B), et les modules calculés sont ci-dessous :

$$\mathbf{E}_1 = (0.0558125) - (0.0462125 * R) - (0.0010625 * \Psi) - (0.0002125 * \Phi) + (0.0024625 * R * \Psi) - (0.0013375 * R * \Phi) - (0.0005875 * \Psi * \Phi) + (0.0005375 * R * \Psi * \Phi) \quad \text{II-1}$$

$$\mathbf{E}_2 = (0.00485625) + (0.00456875 * R) - (0.00064375 * \Psi) + (0.00063875 * \Phi) - (0.00063125 * R * \Psi) + (0.00058625 * R * \Phi) + (0.00003875 * \Psi * \Phi) - (0.00008625 * R * \Psi * \Phi) \quad \text{II-2}$$

$$\mathbf{Nu}_{12} = (0.3772375) + (0.2302375 * R) - (0.0142625 * \Psi) + (0.0403125 * \Phi) - (0.0085625 * R * \Psi) + (0.0373625 * R * \Phi) + (0.0208625 * \Psi * \Phi) - (0.0025875 * R * \Psi * \Phi) \quad \text{II-3}$$

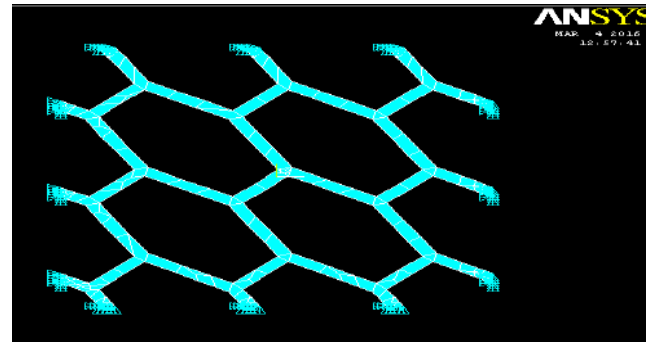
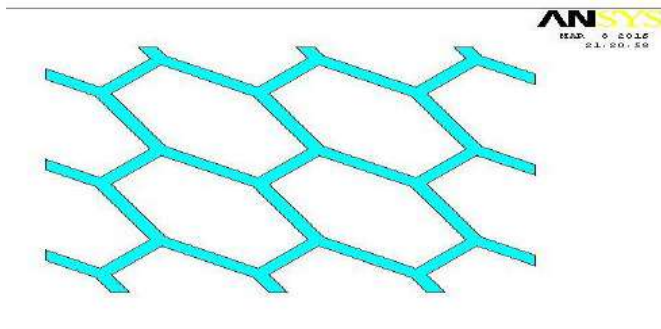
$$\mathbf{Nu}_{21} = (2.1204375) - (1.5217375 * R) + (0.1843875 * \Psi) - (0.0405125 * \Phi) - (0.0981875 * R * \Psi) + (0.0671125 * R * \Phi) + (0.2428375 * \Psi * \Phi) - (0.1601375 * R * \Psi * \Phi) \quad \text{II-4}$$

$$\mathbf{G}_{12} = (0.0089125) + (0.0032625 * R) - (0.0010375 * \Psi) - (0.0012375 * \Phi) - (0.0014875 * R * \Psi) - (0.0015375 * R * \Phi) + (0.0010625 * \Psi * \Phi) + (0.0007625 * R * \Psi * \Phi) \quad \text{II-5}$$

II-1-5. Simulation dans ANSYS

Les coordonnées des points, et puis les lignes et surfaces qui leur sont rattachées sont insérés dans la boîte de commande du code ANSYS. Après génération de la structure dans ANSYS, une opération d'homogénéisation est opérée sur la structure pour déterminer le module d'élasticité équivalent, ensuite, on procède au maillage, l'élément de maillage PLANE 82 est choisi pour ses caractéristiques. PLANE82 et la meilleure version de 2D grâce à leur haute précision de résultats, leur génération automatique de maillage et peuvent tolérer des formes irrégulières sans perte de précision. L'élément PLANE82 possède deux degrés de liberté qui sont dans la direction X, Y. Le chargement est par déplacement imposé.

Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire



a) Structure Hexagonal réalisé par le code MATLAB

a) structure injectée dans ANSYS, b) Conditions aux limites.

II-1-6.Approche numérique

Les résultats obtenus par le Code ANSYS et les résultats obtenus par le méthode multifactorielle sont présentés dans les graphes suivants :

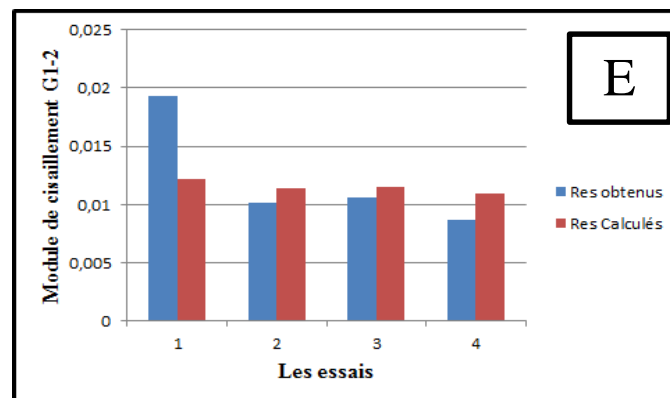
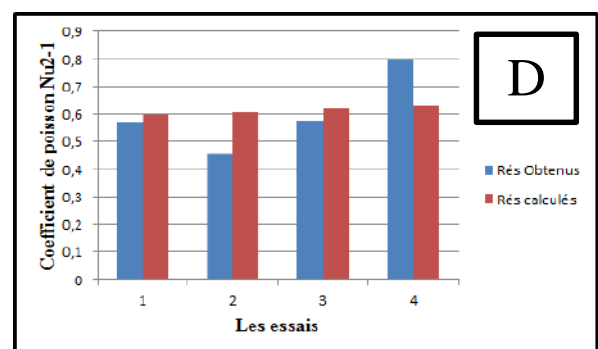
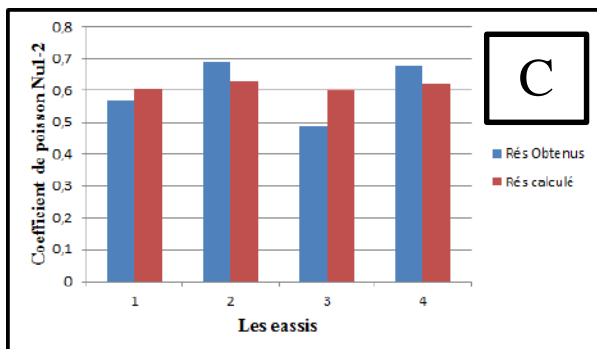
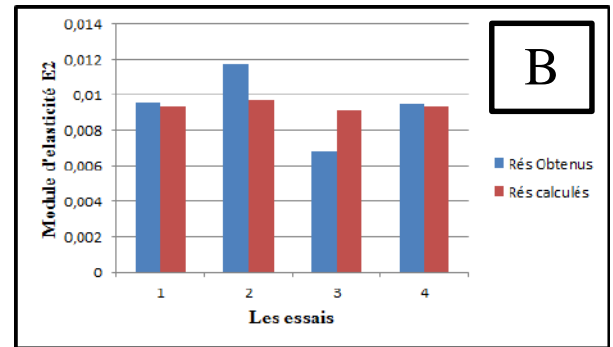
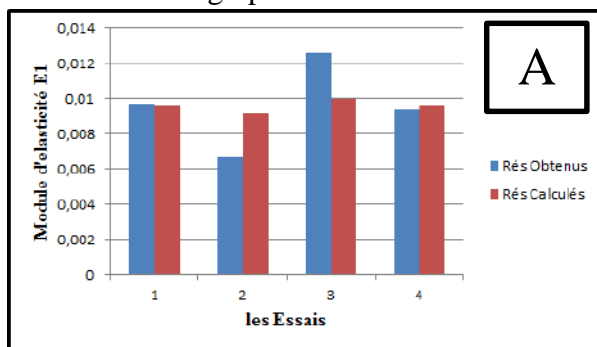


Figure II-3 : Comparaison entre les résultats obtenus par Code ANSYS et les résultats Calculés.

Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire

Les résultats numériques montrent une bonne concordance avec ceux calculés. Et les écarts entre les résultats sont acceptables, les anomalies que nous observons sont causés par l'instabilité du volume élémentaire.

II-2. Résultats et interprétation

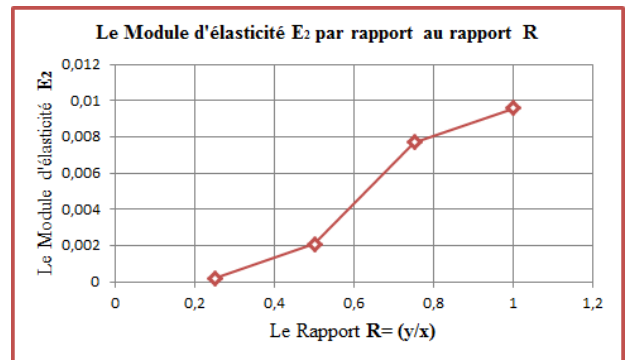
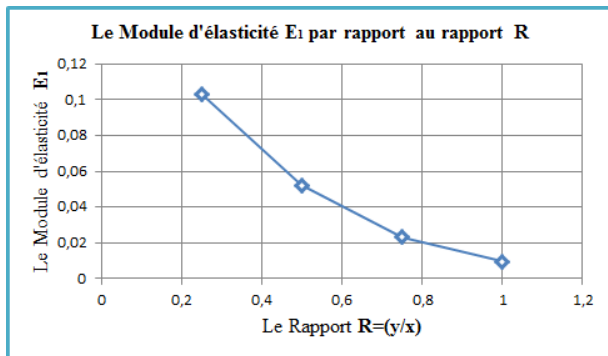
II-2-1 Variation de R

R est le rapport de (y/x) , définissant le rapport entre le grand et petit axe. Ce rapport est variable dans le champ $[0.25, 0.5, 0.75, 1]$.

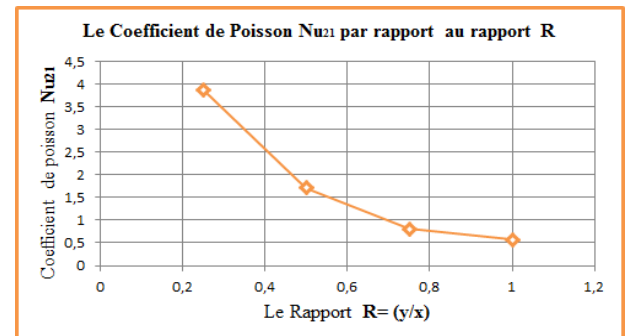
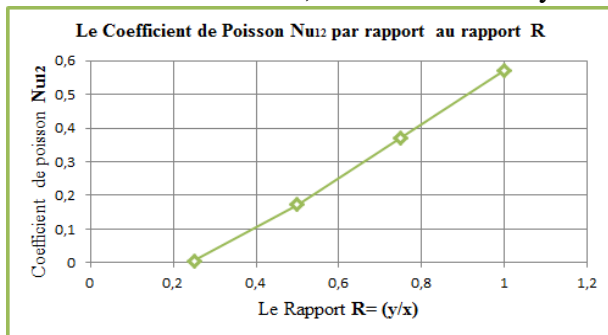
On prend quelques essais pour les présenter, les résultats des essais restants on les trouve dans l'annexe « A ».

Les résultats des essais sont présentés dans les graphes suivants :

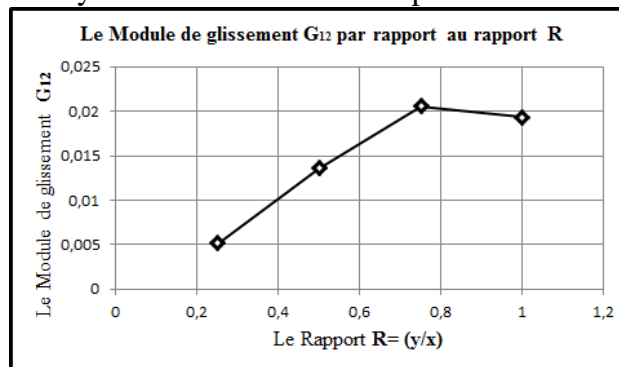
La figure ci-dessous schématise la variation des caractéristiques mécaniques dans le plan en fonction de R pour $\Psi = \phi = 0$.



a) Variation de $R = y/x$ sur le module d'élasticité selon 1 et 2.



b) Variation de $R = y/x$ sur les coefficients de poisson selon la direction 1 et 2.



c) variation du rapport R sur module de cisaillement G_{12} .

Figure II-4 : influence du rapport $R = y/x$

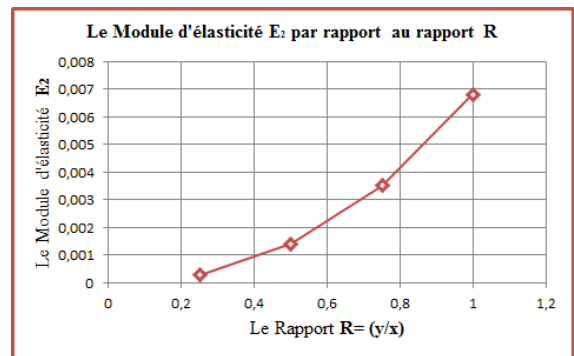
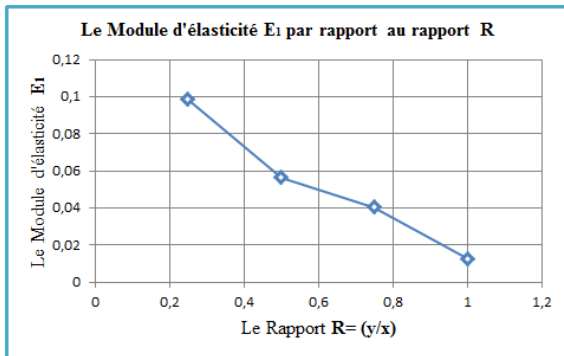
La figure II-4 affiche l'effet de la variation du rapport $R = y/x$ sur les modules d'élasticité longitudinaux E_1 et E_2 (a), les coefficients de Poisson Nu_{12} et Nu_{21} (b) et le module d'élasticité transversal G_{12} (c). Le module E_1 affiche une courbe descendante, en fonction de R. tendance attendue, puisque R représente le rapport entre les deux dimensions de la cellule et au fur et à mesure que y devient important

Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire

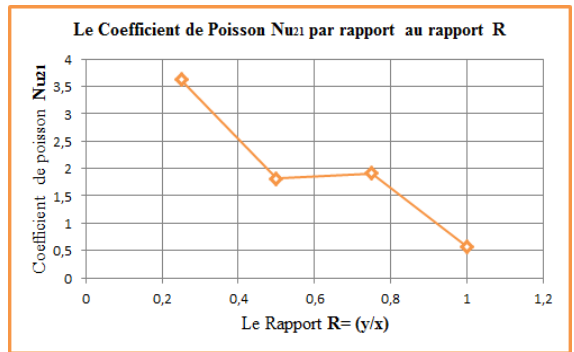
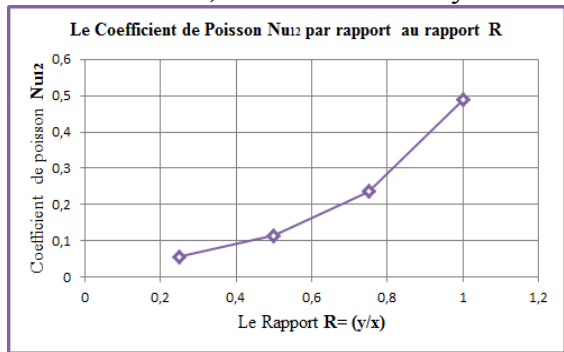
devant x , E_1 (qui est une propriété dans la direction de x) devient petit. La courbe de E_2 montre une légère augmentation de E_2 par rapport à R .

Les courbes de la figure II-4- b) affiche l'inverse de celle II-4 a). pour ce qui est de la figure II-4 c), la courbe affiche un maximum, synonyme d'existence d'une valeur de R optimale ($R = 0.75$).

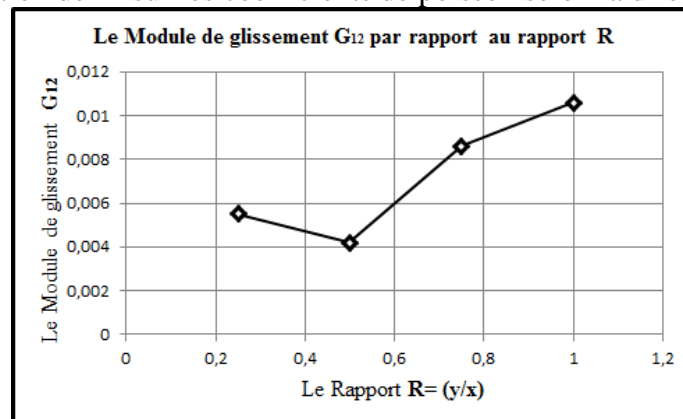
Dans la deuxième simulation, nous avons pris ($\Psi=15$) et ($\phi=0$), les résultats obtenus sont présentés dans les figures ci-dessous :



a) Variation de $R = y/x$ sur le module d'élasticité selon la direction 1 et 2.



b) Variation de R sur les coefficients de poisson selon la direction 1 et 2.



c) Variation du rapport R sur le module de cisaillement G_{12} .

Figure II-5 : influence du rapport R pour $\Psi=15$ et $\phi=0$.

Dans la deuxième simulation les résultats ont presque les mêmes tendances, sauf peut-être pour la courbe c) ou celle-ci présente un minimum, désignant une valeur optimale $R = 0.5$.

Dans le reste des simulations, nous observons des variations légères entre les courbes obtenues. Le reste de ces courbes est répertorié dans l'annexe -E- es graphes schématisent la variation des caractéristiques mécaniques dans le plan en fonction de R pour ($\Psi=0$) et ($\phi=15$).

Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire

II-2-1-1. Comparaison des modules d'élasticité E_1 et E_2 en fonction de R pour différents angles Ψ et ϕ

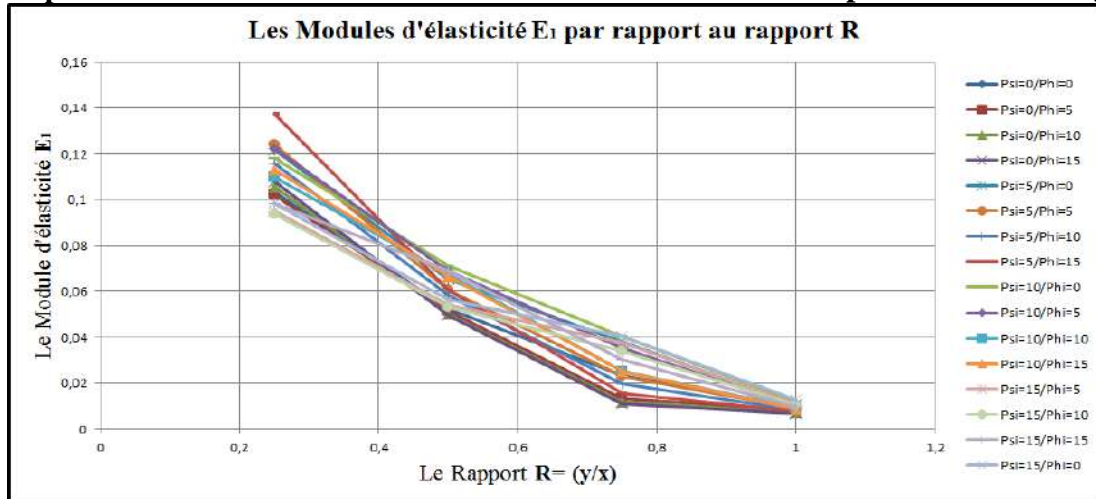


Figure II-6 : Les différents graphes de la module d'Young E_1 par rapport R .

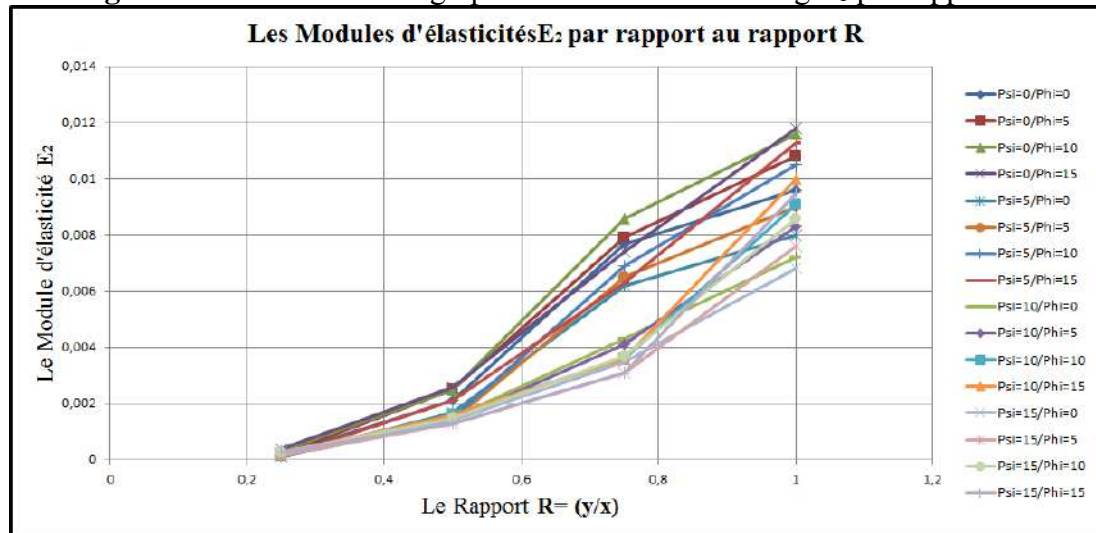


Figure II-7 : Influence de la variation du rapport $R = y/x$ sur le module d'élasticité selon la direction 2.

II-2-1-2. Comparaison des coefficients de poisson N_{1-2} et N_{2-1} en fonction de R pour différents angles Ψ et ϕ

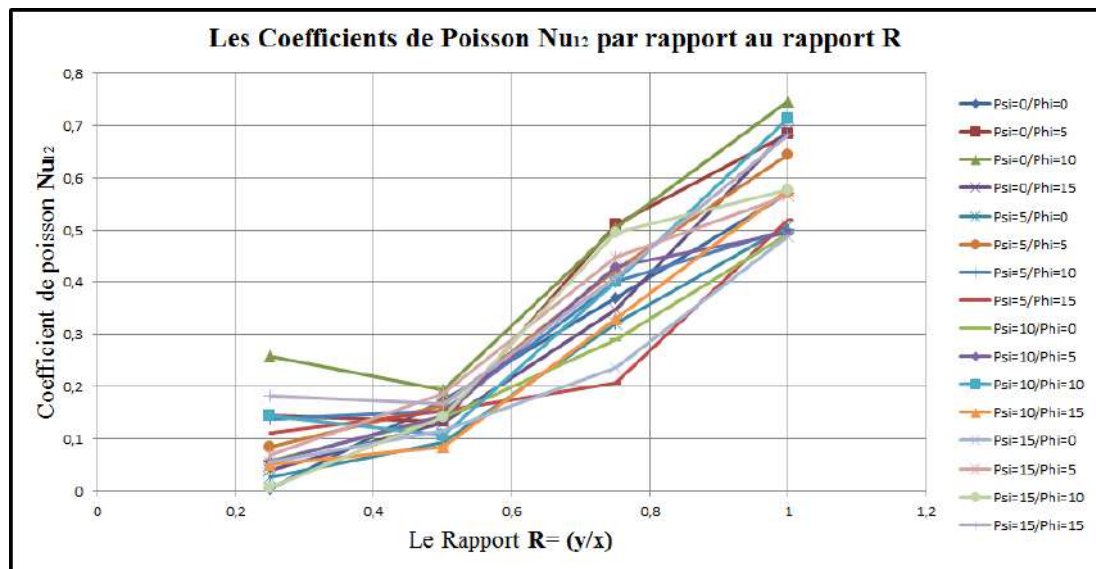
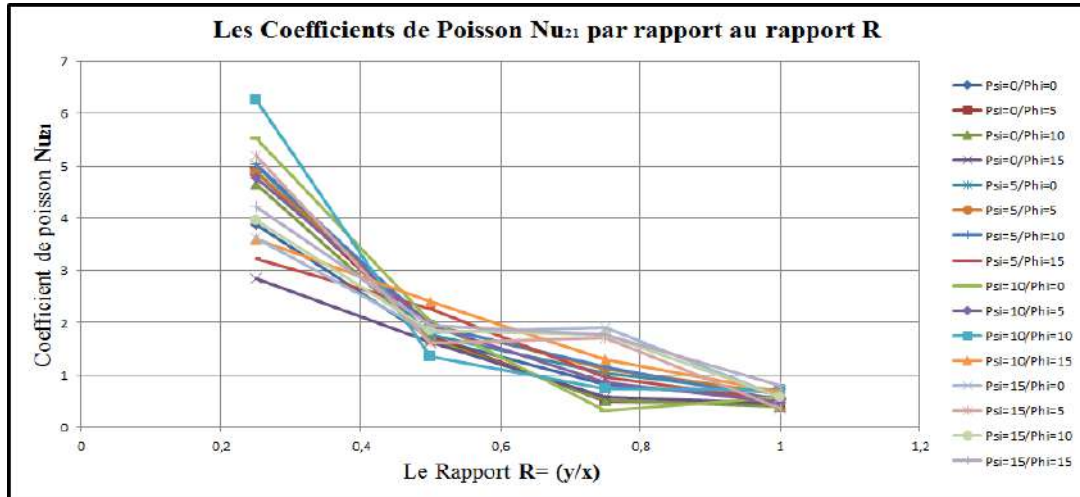
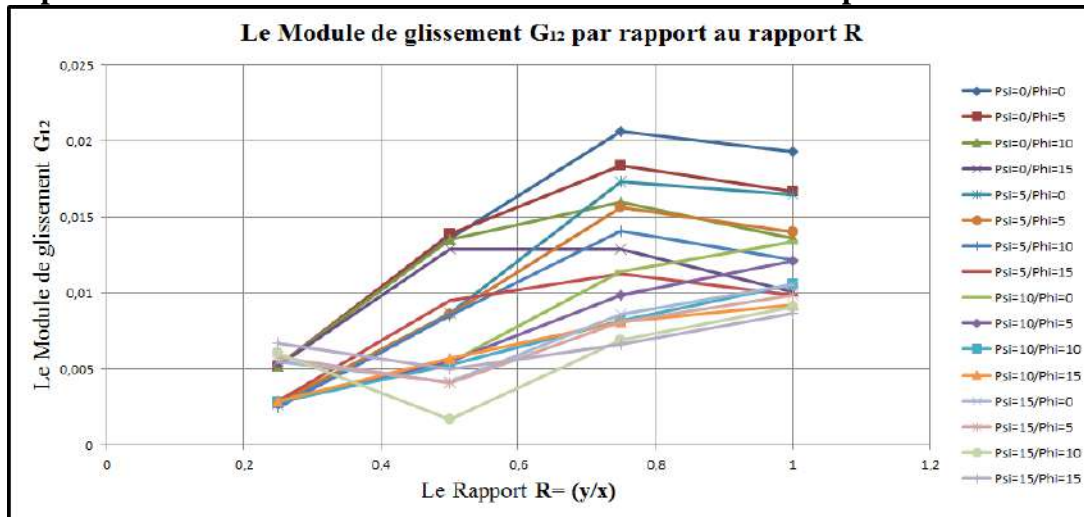


Figure II-8 : les différents graphes de les coefficients des poisson par rapport R .



FigureII-9 : les différents graphs de les coefficients des poisson par rapport R.

II-2-1-3. Comparaison des modules de cisaillement G_{1-2} en fonction de R pour différents angles Ψ et ϕ

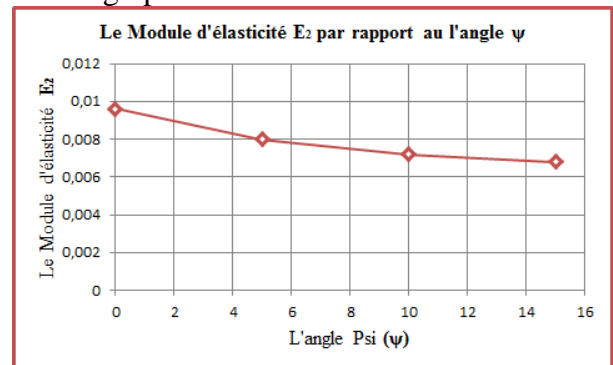
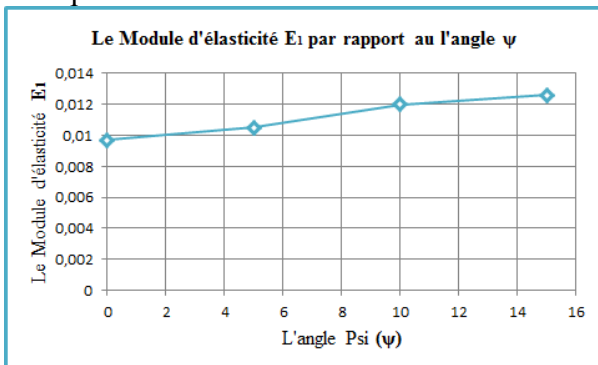


FigureII-10 : les différents graphs de le module des cisaillements.

II-2-2.Effet de la variation de Psi (Ψ)

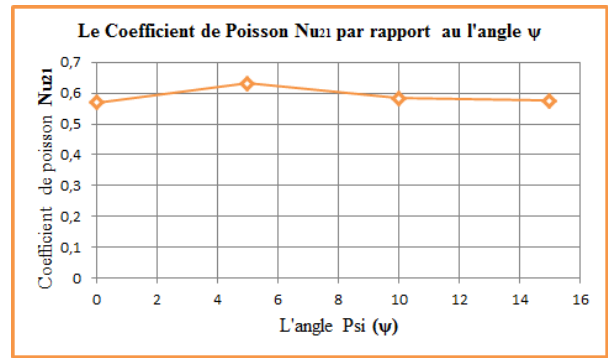
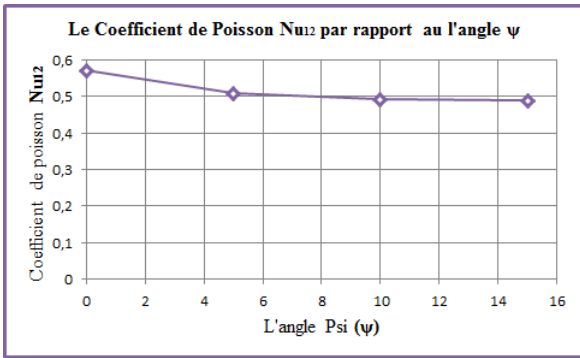
Psi est l'angle entre les deux axes (X, X_1), cet angle définit le type de structure, cet angle est variable dans le champ $[0, 5, 10, 15]$.

Dans cet ensemble de simulations nous maintenons fixes R et ϕ et qui sont maintenus aux valeurs de $R=1$ et $\phi=0$. Les résultats de ces simulations sont tracés dans les graphes suivants :

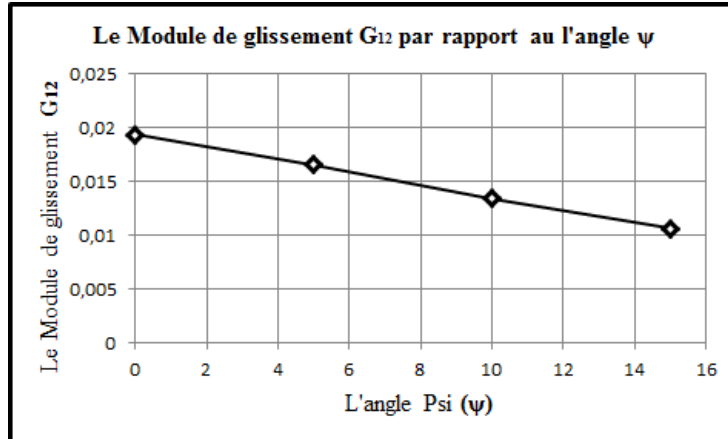


a) Variation des modules d'élasticité E_1 et E_2 en fonction l'angle Ψ sur le selon la direction 1 et 2.

Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire



b) Variation des coefficients de Poisson Nu_{12} et Nu_{21} en fonction de Ψ .



c) Variation du module de cisaillement G_{12} en fonction de Ψ .

Figure II-12 : Effet de l'angle Ψ sur E_1 , E_2 , Nu_{12} , Nu_{21} et G_{12} pour R et ϕ fixes.

Le reste des figures, affichant les résultats des simulations pour des R et ϕ croissant sont affichées dans l'annexe -E-. résultats affichant, cependant, des tendances proches.

II-2-2-1. Comparaison des différentes valeurs de E_1 et E_2 en fonction de ψ pour différentes valeurs de R et ϕ .

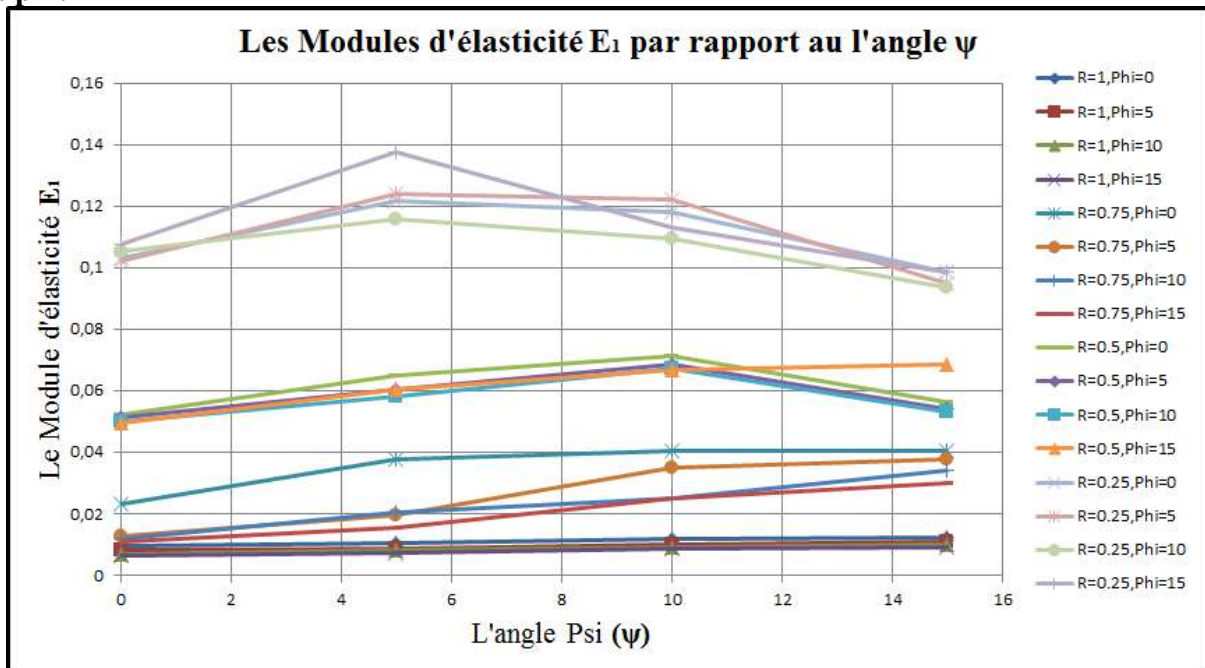


Figure II-13 : Comparaison entre les modules d'Young E_1 par rapport l'angle Psi.

Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire

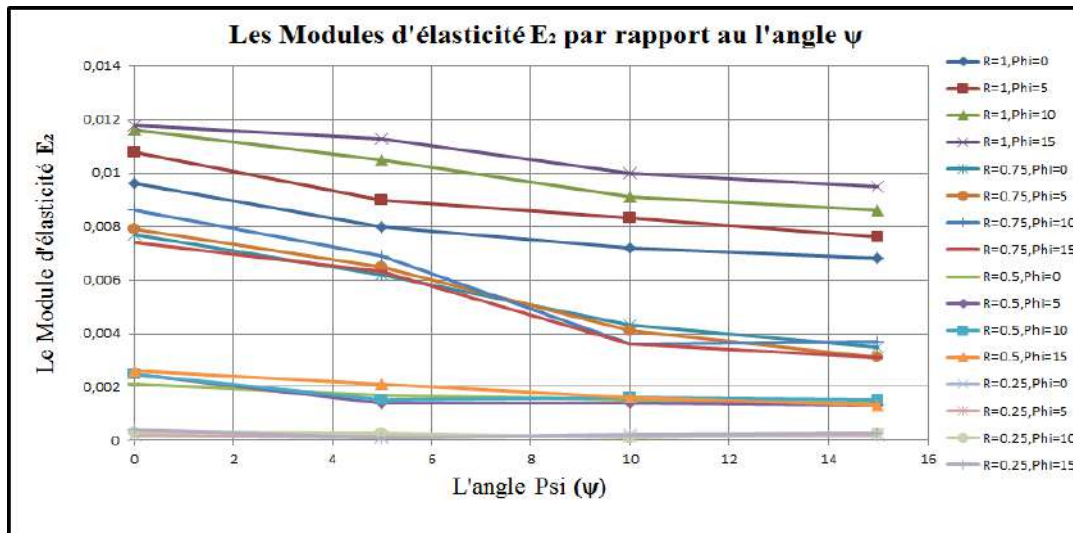


Figure II-14 : Comparaison entre les modules d'Young E_2 par rapport l'angle Psi.

II-2-2-2. Comparaison des coefficients de poisson N_{1-2} et N_{2-1} en fonction de psi pour R et phi constantes

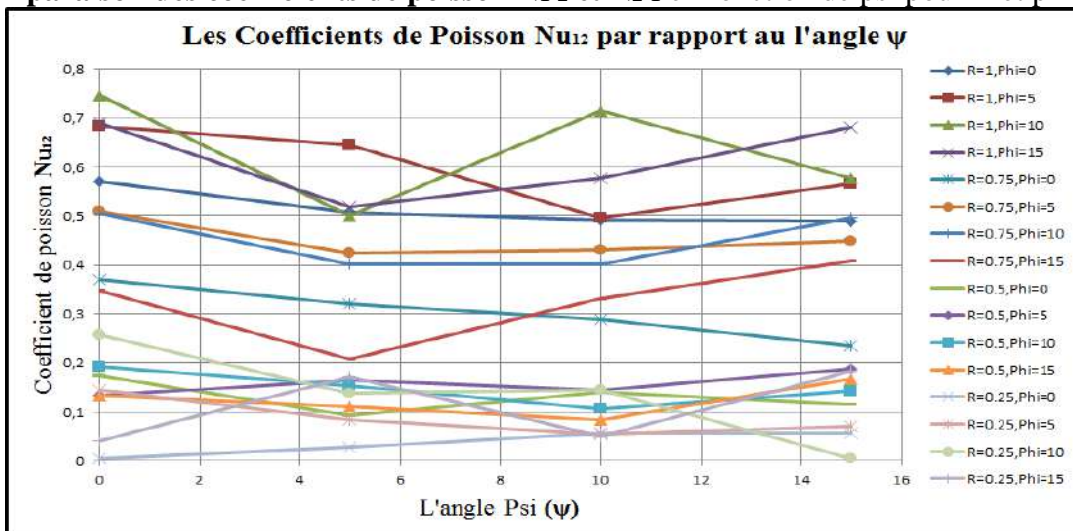


Figure II-15 : Comparaison des coefficients des poisson Nu_{12} par rapport l'angle Psi.

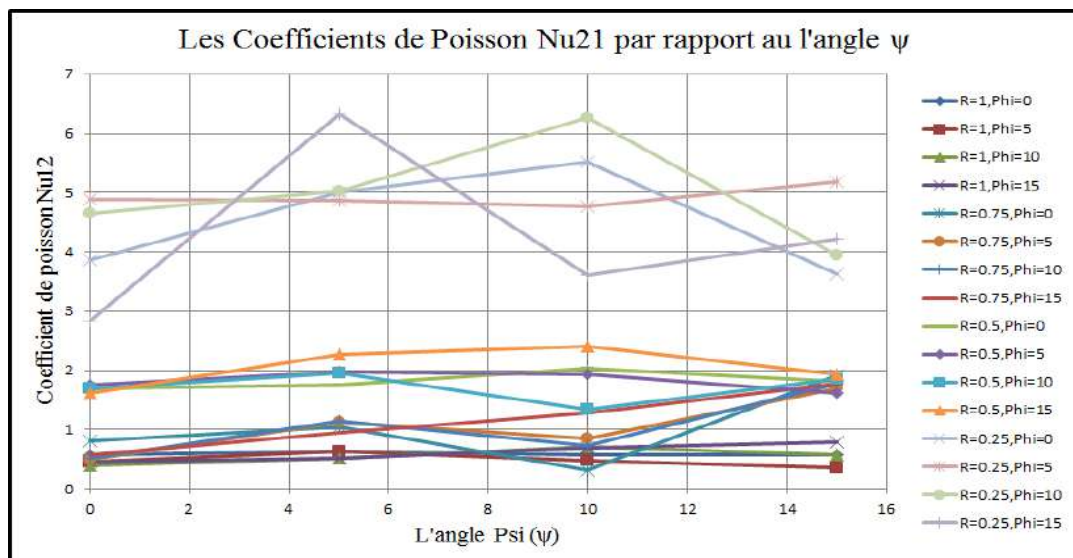


Figure II-16 : Comparaison des coefficients des poisson Nu_{21} par rapport l'angle Psi.

Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire

II-2-2-3. Comparaison des modules de cisailment G_{1-2} en fonction de ψ .

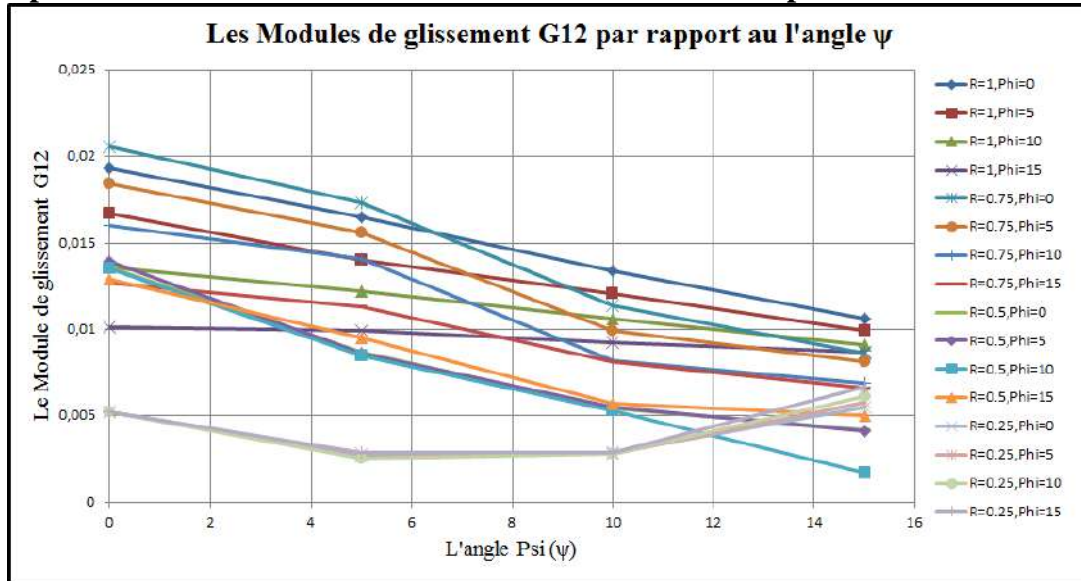
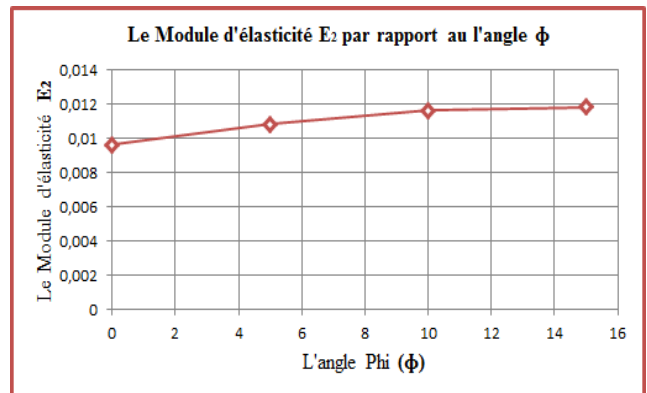
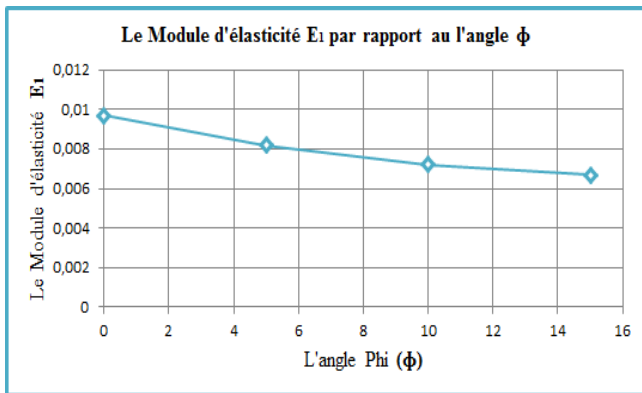


Figure II-17 : Comparaison des modules de cisailment par rapport l'angle Psi.

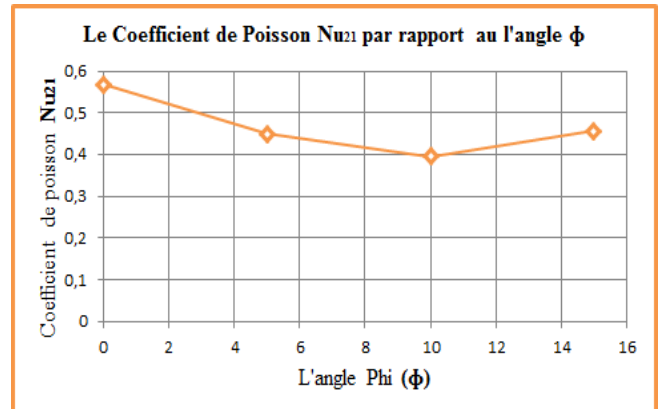
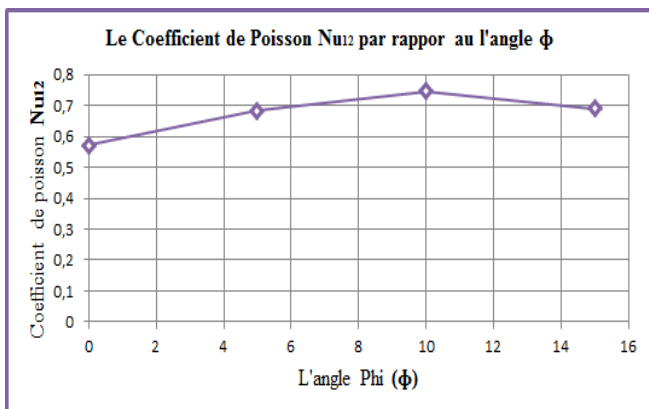
II-2-3. Effet de la variation de Phi (ϕ)

Phi est l'angle entre les deux axes (Y, Y_1), cet angle définit le type de structure, cet angle est variable dans le champ $[0, 5, 10, 15]$. Les résultats sont dans les tableaux suivants :

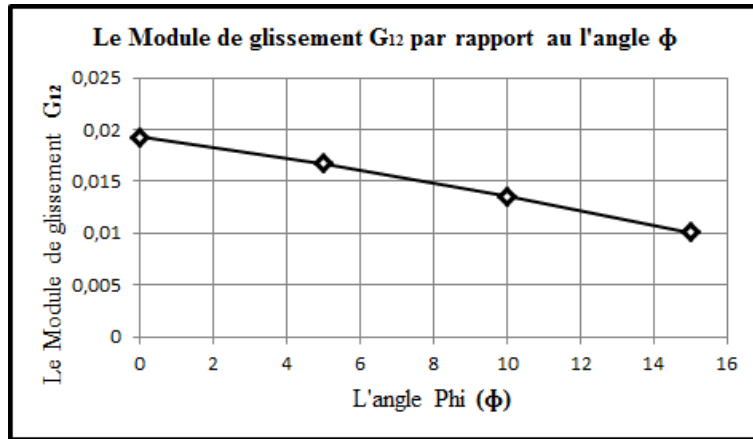
Les figures ci-dessous schématisent la variation des caractéristiques mécaniques dans le plan en fonction ϕ de pour $R=1$ et $\Psi=0$.



a) Variation de l'angle ϕ sur le module d'élasticité selon la direction 1 et 2.



b) Variation de l'angle ϕ sur les coefficients de poissons selon la direction 1 et 2.



c) Variation de l'angle ϕ sur le module de cisaillement selon la direction 1.
Figure II-18 : effet de phi sur E_1 , E_2 , NU_{12} , NU_{21} et G_{12} .

II-2-3-1. Comparaison de différents modules d'élasticité E_1 et E_2 en fonction de phi pour différentes valeurs de R et psi

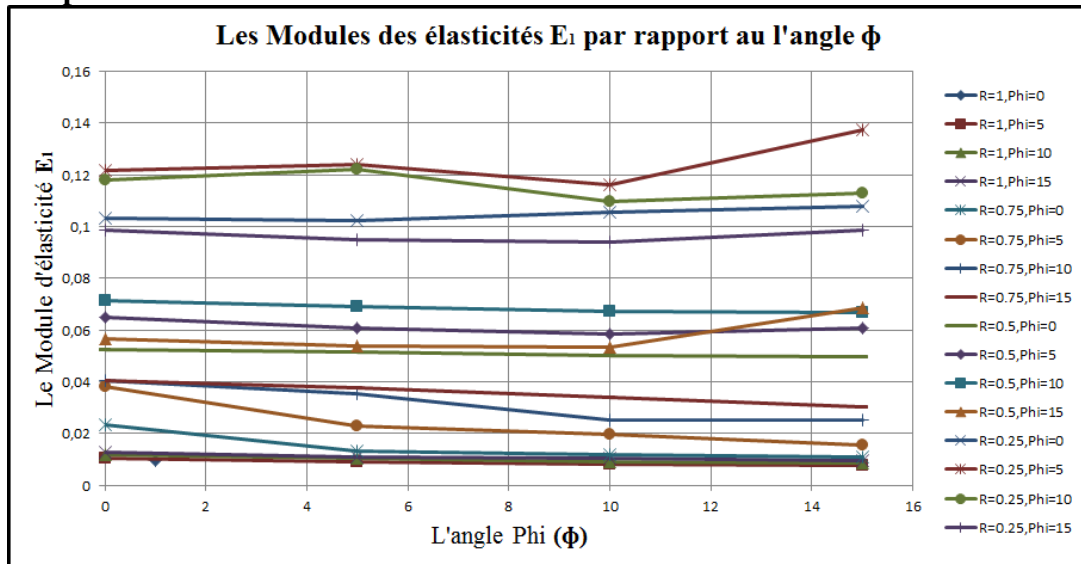


Figure II-19 : Comparaison entre les courbes de différents E_1 par rapport Phi.

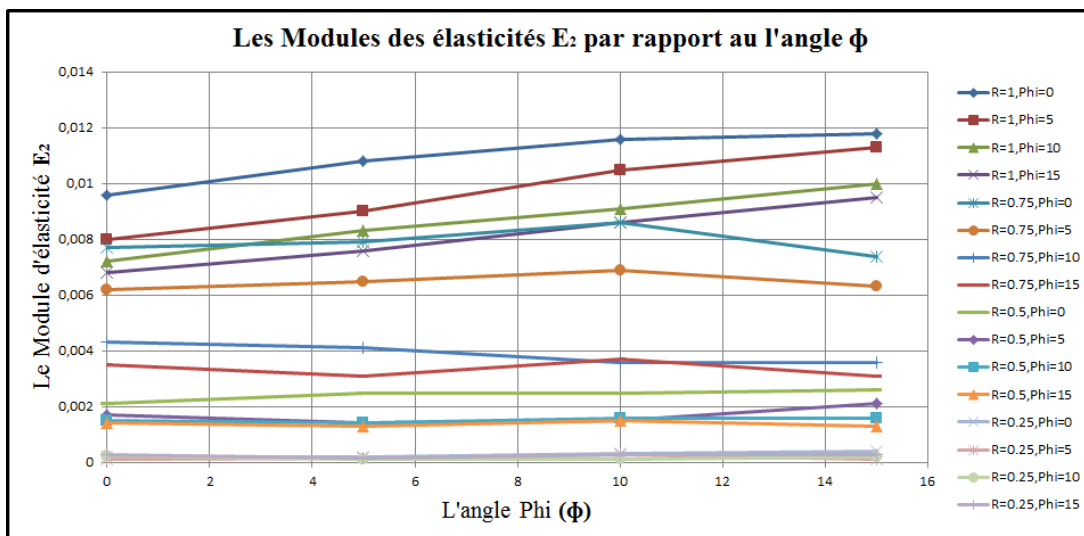


Figure II-20 : Comparaison des différents graphes des modules d'Young E_2 par rapport Phi.

Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire

II-2-3-2. Comparaison des coefficients de poisson ν_{1-2} et ν_{2-1}

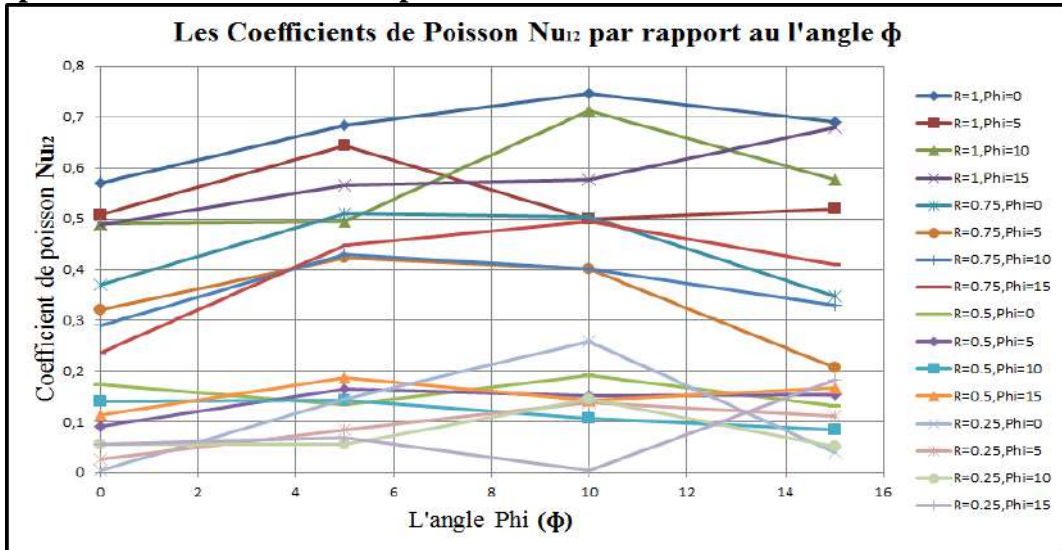


Figure II-21 : Différents graphes des coefficients de poisson par rapport à l'angle Phi.

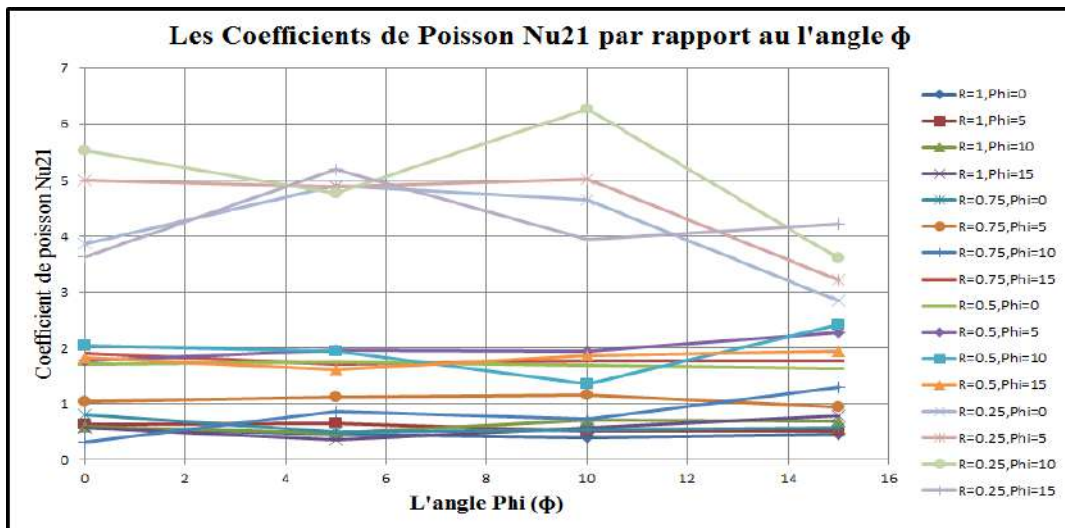


Figure II-22 : Différents graphes des coefficients de poisson par rapport l'angle Phi.

II-2-3-3. Comparaison entre différentes valeurs des modules de cisaillement G_{1-2} en fonction de phi

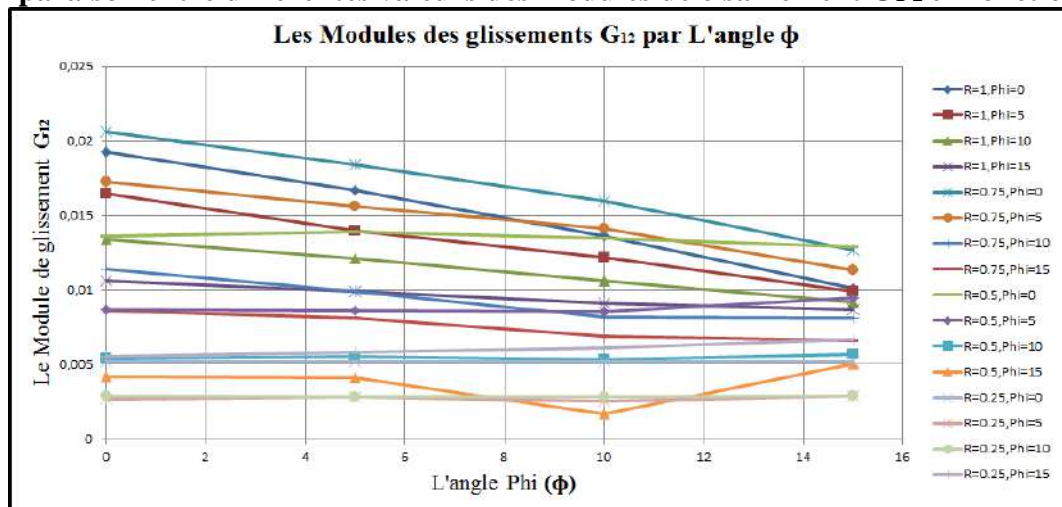


Figure II-23 : les différents graphes de le module des cisaillements.

II-3.Optimisation des propriétés mécaniques de la cellule

L'optimisation est une branche des mathématiques et de l'informatique en tant que disciplines, cherchant à modéliser, à analyser et à résoudre analytiquement ou numériquement les problèmes qui consistent à déterminer quelles sont les solutions satisfaisant un objectif quantitatif tout en respectant d'éventuelles contraintes.

L'optimisation joue un rôle important dans notre étude, on l'utilise pour tracer les graphes et obtenir les minimales valeurs pour trouver les caractéristiques mécaniques optimales de la structure.

Les graphes sont schématisés à partir des matrices, ces matrices on les trouve dans l'annexe (D), les graphes avec la même tendance linéaire sont présentés avec un seul graphe, les graphes sont présentés ci-dessous :

II-3-1.Les Modules d'élasticité E_1 et E_2

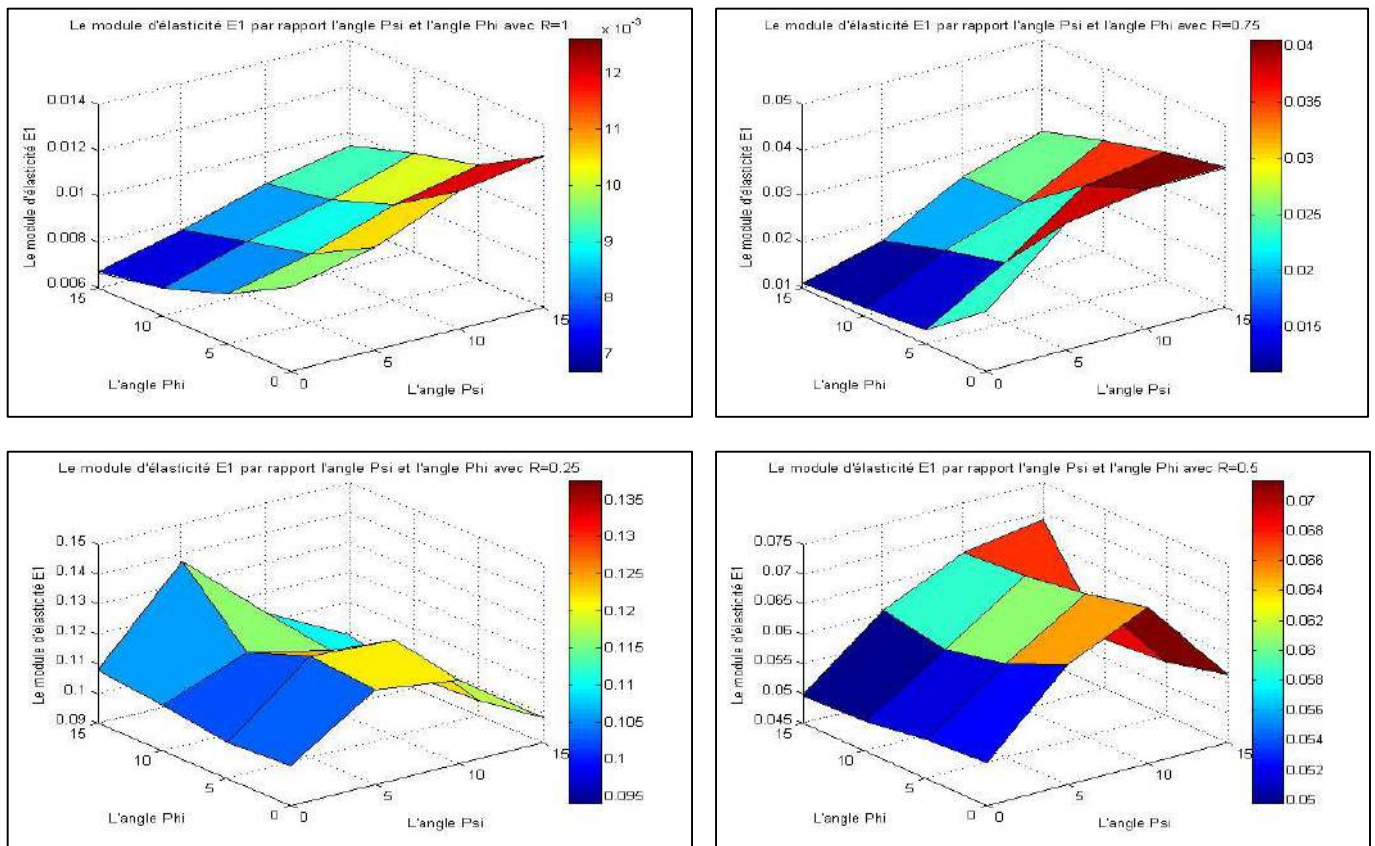
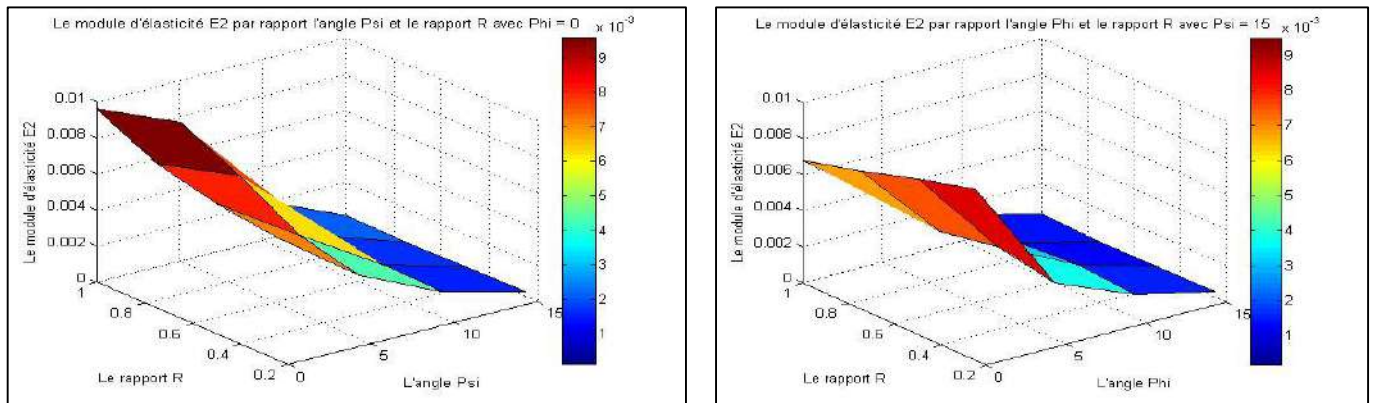


Figure II-24 : Les différents graphes du module d'élasticité E_1 Optimisés



Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire

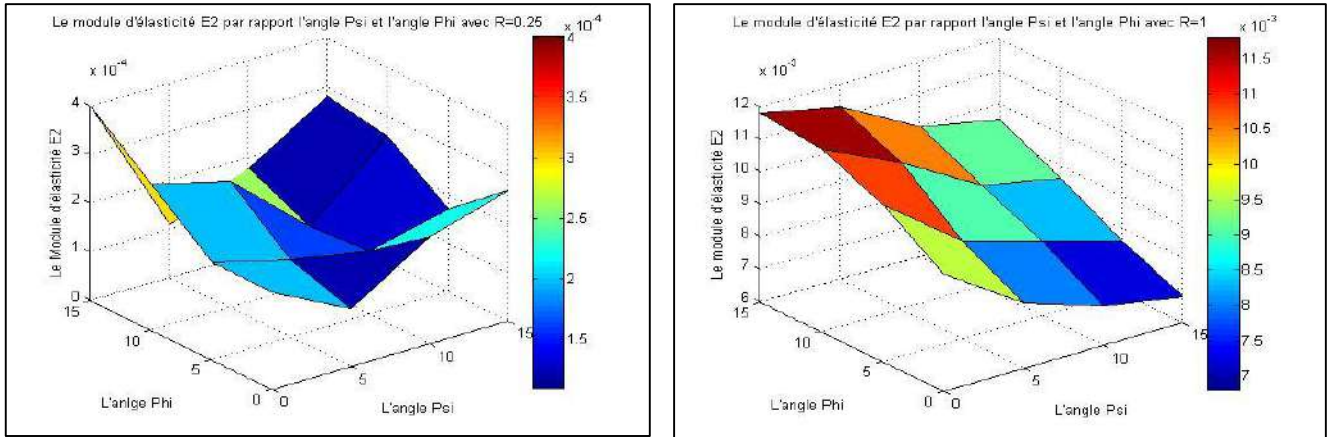


Figure II-25 : Les différents graphes du module d'élasticité E_2 Optimisés

D'après ces graphes on peut faire sortir les résultats suivants:

- 1- Quand nous prenons le Rapport R avec un des deux angles Psi ou Phi et varier l'autre angle, les graphes prends une tendance linéaire mais quand on prend les deux angles avec différentes valeurs du rapport R, les résultats changés par rapport à l'angle et le rapport R, on note grand changement sur les graphes et des piquages à cause d'effets du rapport R.
- 2- La valeur minimum de E_1 est dans le point, $\Phi = 0$, $\Psi = 15$ et $R = 1$.
- 3- La valeur minimum de E_2 est dans le point, $\Phi = 5$, $R = 0.25$, $\Psi = 10$.

II-3-2. Les coefficients de poisons N_{1-2} et N_{2-1}

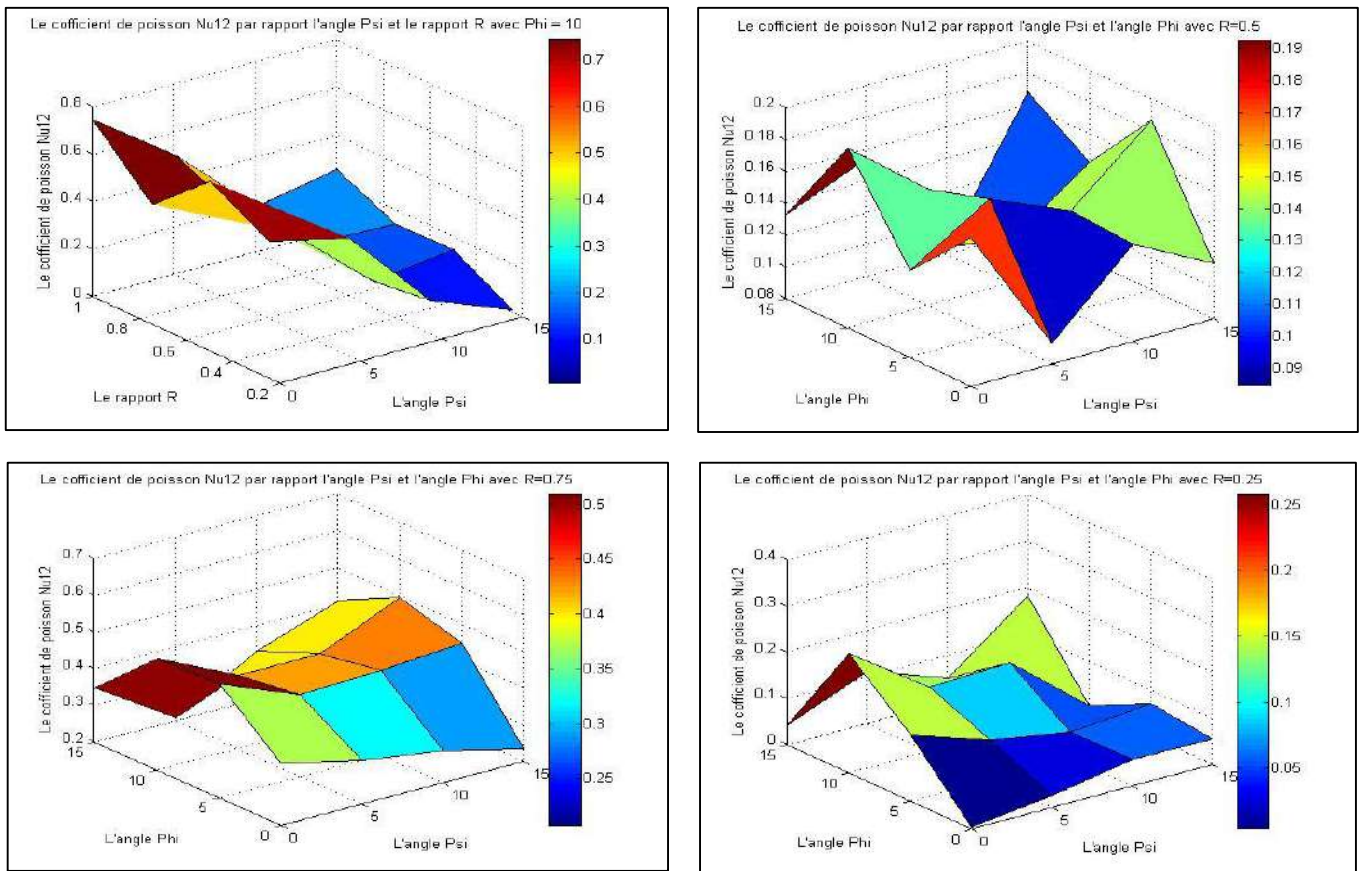


Figure II-26 : Les différents graphes du coefficient de poisson N_{1-2} Optimisés.

Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire

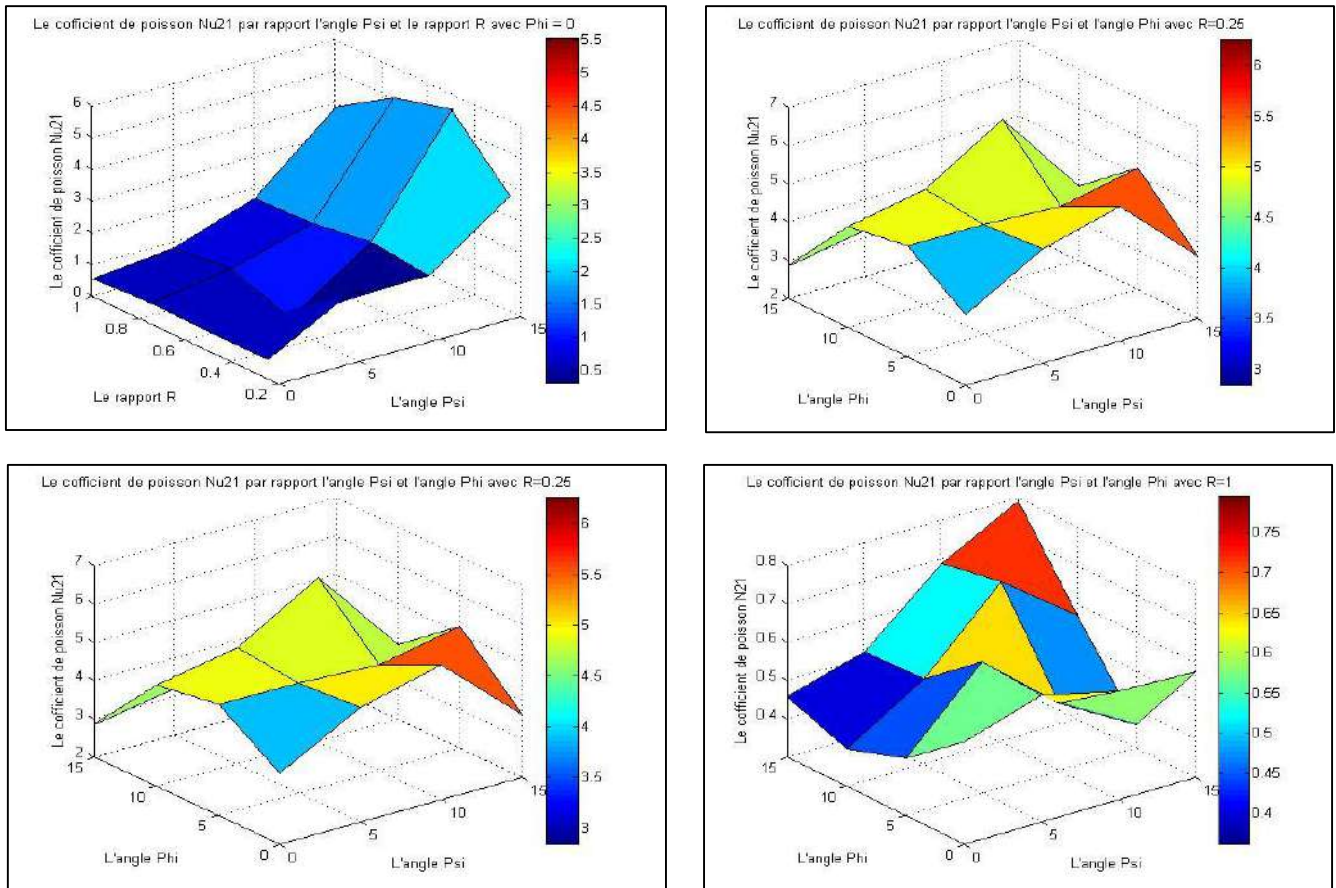
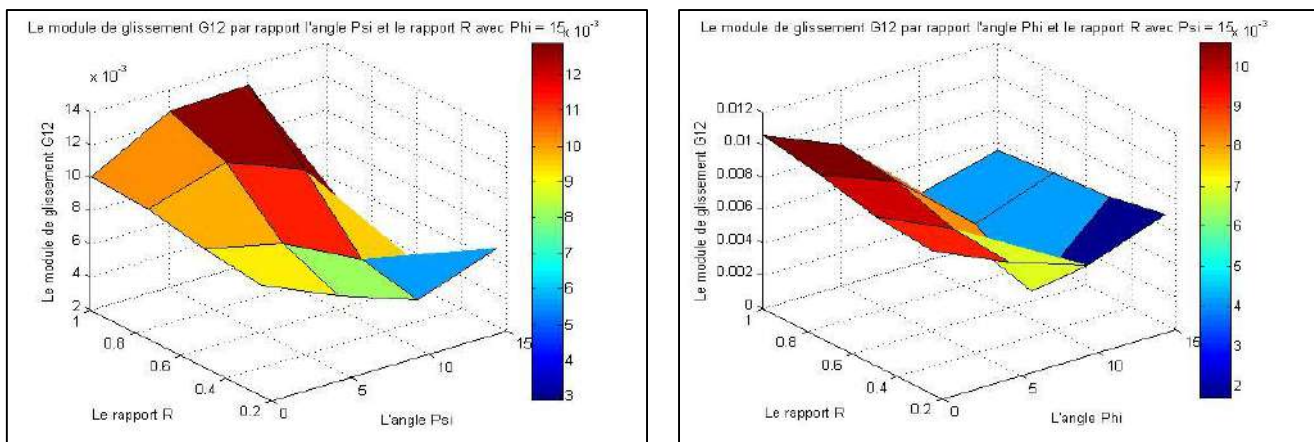


Figure II-27 : Les différents graphes du coefficient de poisson N_{2-1} Optimisés.

D'après ces graphes on peut faire sortir les résultats suivants:

- 1- Les deux angles phi et psi ne sont pas très influents au contraire le rapport R est très influent.
- 2- Les anomalies dans les graphes sont à cause de l'instabilité du volume élémentaire.
- 3- La valeur minimum de Nu_{1-2} est dans le point, $\Phi = 10$, $\Psi = 15$ et $R = 0,25$.
- 4- La valeur minimum de Nu_{2-1} est dans le point, $\Phi = 5$, $\Psi = 15$, $R = 1$.

II-3.3. Le module de cisaillement G_{1-2}



Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire

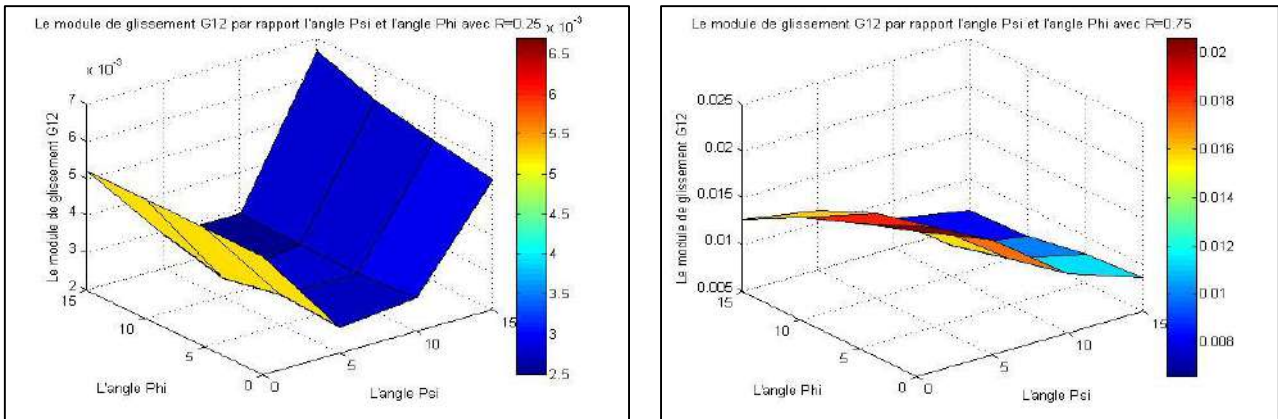


Figure II-28 : Les différents graphes du module de cisaillement G_{1-2} Optimisés.

D'après ces graphes on peut faire sortir les résultats suivants:

- 1- Les paramètres R, Psi et Phi sont très influents sur le module de cisaillement, ces paramètres influencent sur la géométrie de la cellule et cette géométrie influence le module de cisaillement dans une spécifique direction liée aux angles et les dimensions de la structure.
- 2- Le valeur minimum du module de cisaillement est dans le point, $\Phi = 10$, $\Psi = 15$ et $R = 0,5$.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons procédés à des simulations d'essais de traction sur des cellules hexagonales régulières. Ces simulations ont données des résultats très acceptables comparés à ceux obtenus par la méthode multifactorielle. Dans un premier temps, nous avons fait varier le rapport R des dimensions de la cellule, tout en gardant fixes les angles d'ouvertures phi et psi . dans un deuxième temps, nous avons fait varier phi tout en gardant fixes R et l'angle psi . enfin, nous avons fait varier psi, tout en gardant fixes R et phi. Et tout ceci, pour en voir l'influence sur les propriétés mécaniques de la cellule ; E_1 , E_2 , ν_{12} , ν_{21} et autre G_{12} . Les résultats ont révélés de fortes dépendances pour certaines propriétés et faibles pour d'autres.

Le rapport R et les deux angles Psi et Phi en quelque points sont très influents sur les caractéristiques mécaniques de la structure, à partir de ça, nous trouvons que la meilleure structure est quand :

$R = 1$, $\Psi = 15$, $\Phi = 10$.

Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire

Annexe A : les résultats numérique

Essai	R	ψ	ϕ	Zoom	E ₁	E ₂	Nu ₁₂	Nu ₂₁	G ₁₂	V _e	densité
1	1	0	0	1	0,0097	0,0096	0,5709	0,5686	0,0193	1,7051	0,1895
2	1	0	5	1	0,0082	0,0108	0,683	0,4492	0,0167	1,6803	0,1867
3	1	0	10	1	0,0072	0,0116	0,746	0,396	0,0136	1,6607	0,1845
4	1	0	15	1	0,0067	0,0118	0,6897	0,4564	0,0101	1,6437	0,1826
5	1	5	0	1	0,0105	0,008	0,5073	0,6316	0,0165	1,6803	0,1867
6	1	5	5	1	0,009	0,009	0,6439	0,6432	0,014	1,6676	0,1853
7	1	5	10	1	0,0083	0,0105	0,5002	0,5218	0,0122	1,6292	0,181
8	1	5	15	1	0,0076	0,0113	0,5192	0,5174	0,0099	1,6127	0,1792
9	1	10	0	1	0,012	0,0072	0,4913	0,5827	0,0134	1,6607	0,1845
10	1	10	5	1	0,0102	0,0083	0,4953	0,4753	0,0121	1,6292	0,181
11	1	10	10	1	0,0092	0,0091	0,7135	0,7167	0,0106	1,6093	0,1788
12	1	10	15	1	0,0087	0,01	0,5765	0,6876	0,0092	1,5972	0,1775
13	1	15	0	1	0,0126	0,0068	0,4887	0,5756	0,0106	1,6434	0,1826
14	1	15	5	1	0,011	0,0076	0,5651	0,3617	0,0099	1,613	0,1792
15	1	15	10	1	0,0103	0,0086	0,5772	0,5696	0,0091	1,5919	0,1769
16	1	15	15	1	0,0094	0,0095	0,6806	0,7942	0,0087	1,6215	0,1802
17	0,75	0	0	1,1	0,0233	0,0077	0,3704	0,8077	0,0206	1,7745	0,1972
18	0,75	0	5	1,1	0,0131	0,0079	0,5102	0,496	0,0184	1,7321	0,1925
19	0,75	0	10	1,1	0,0119	0,0086	0,5043	0,5266	0,016	1,7235	0,1915
20	0,75	0	15	1,1	0,0111	0,0074	0,3482	0,5748	0,0127	1,6624	0,1847
21	0,75	5	0	1,1	0,0379	0,0062	0,3205	1,0412	0,0173	1,7983	0,1998
22	0,75	5	5	1,1	0,0231	0,0065	0,4236	1,1232	0,0156	1,771	0,1968
23	0,75	5	10	1,1	0,0196	0,0069	0,4012	1,153	0,0141	1,7661	0,1962
24	0,75	5	15	1,1	0,0156	0,0063	0,2071	0,9479	0,0113	1,7357	0,1929
25	0,75	10	0	1,2	0,0405	0,0043	0,2891	0,3208	0,0114	1,7455	0,1939
26	0,75	10	5	1,2	0,0352	0,0041	0,4306	0,8582	0,0099	1,6965	0,1885
27	0,75	10	10	1,2	0,0253	0,0036	0,4007	0,7313	0,0082	1,6562	0,184
28	0,75	10	15	1,2	0,025	0,0036	0,3305	1,2903	0,0081	1,6652	0,185
29	0,75	15	0	1,2	0,0406	0,0035	0,2353	1,9078	0,0086	1,7387	0,1932
30	0,75	15	5	1,2	0,0377	0,0031	0,4478	1,7032	0,0081	1,7275	0,1919
31	0,75	15	10	1,2	0,0341	0,0037	0,495	1,7719	0,0069	1,7116	0,1902
32	0,75	15	15	1,2	0,0302	0,0031	0,409	1,773	0,0066	1,7129	0,1903
33	0,5	0	0	1,4	0,0522	0,0021	0,1732	1,7081	0,0136	1,7838	0,1982
34	0,5	0	5	1,4	0,0515	0,0025	0,1343	1,7543	0,0139	1,7729	0,197
35	0,5	0	10	1,4	0,0499	0,0025	0,1928	1,6956	0,0135	1,7454	0,1939
36	0,5	0	15	1,4	0,0497	0,0026	0,1322	1,6254	0,0129	1,7238	0,1915
37	0,5	5	0	1,5	0,0651	0,0017	0,0927	1,7624	0,0087	1,7976	0,1997
38	0,5	5	5	1,5	0,0606	0,0014	0,1656	1,9682	0,0086	1,7639	0,196
39	0,5	5	10	1,5	0,0585	0,0015	0,1528	1,9499	0,0085	1,7368	0,193
40	0,5	5	15	1,4	0,0605	0,0021	0,1544	2,2754	0,0095	1,7589	0,1954
41	0,5	10	0	1,5	0,0713	0,0015	0,1409	2,032	0,0054	1,7996	0,2
42	0,5	10	5	1,5	0,0689	0,0014	0,1437	1,9415	0,0055	1,7701	0,1967
43	0,5	10	10	1,5	0,0674	0,0016	0,1062	1,3459	0,0053	1,7436	0,1937
44	0,5	10	15	1,5	0,0667	0,0016	0,0847	2,413	0,0057	1,7544	0,1949
45	0,5	15	0	1,6	0,0565	0,0014	0,1149	1,8185	0,0042	1,7035	0,1893

Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire

46	0,5	15	5	1,6	0,054	0,0013	0,1871	1,6148	0,0041	1,6876	0,1875
47	0,5	15	10	1,6	0,0532	0,0015	0,1417	1,8596	0,0017	1,7079	0,1898
48	0,5	15	15	1,6	0,0688	0,0013	0,1677	1,9411	0,005	1,7748	0,1972
49	0,25	0	0	2,7	0,1033	0,0002	0,0046	3,8702	0,0052	1,6667	0,1852
50	0,25	0	5	2,7	0,1021	0,0002	0,1441	4,8925	0,0052	1,6479	0,1831
51	0,25	0	10	2,7	0,1055	0,0003	0,2582	4,6469	0,0052	1,6426	0,1825
52	0,25	0	15	2,7	0,1078	0,0004	0,0408	2,849	0,0052	1,6322	0,1814
53	0,25	5	0	2,9	0,1218	0,00012	0,0269	5,0016	0,0027	1,7227	0,1914
54	0,25	5	5	2,9	0,124	0,00016	0,0848	4,8782	0,0028	1,6988	0,1888
55	0,25	5	10	2,9	0,116	0,00026	0,1385	5,0221	0,0025	1,7525	0,1947
56	0,25	5	15	2,9	0,1375	0,00011	0,1117	3,2164	0,0029	1,8229	0,2025
57	0,25	10	0	2,9	0,118	0,00022	0,0566	5,5218	0,0029	1,7057	0,1895
58	0,25	10	5	2,9	0,1223	0,00013	0,0553	4,7642	0,0028	1,7038	0,1893
59	0,25	10	10	2,9	0,1097	0,00012	0,1442	6,2684	0,0028	1,74	0,1933
60	0,25	10	15	2,9	0,1131	0,00018	0,0504	3,6071	0,0029	1,7672	0,1964
61	0,25	15	0	2,9	0,0985	0,00027	0,0561	3,6294	0,0055	1,6262	0,1807
62	0,25	15	5	2,9	0,0951	0,00017	0,0693	5,1888	0,0058	1,6419	0,1824
63	0,25	15	10	2,9	0,0939	0,00026	0,0056	3,9482	0,0061	1,66	0,1844
64	0,25	15	15	2,9	0,0985	0,00028	0,1821	4,2201	0,0067	1,6809	0,1868

I-1. Tableau des résultats d'Ansys

Annexe B

Ψ	ϕ	R	E_1	E_2	Nu_{12}	Nu_{21}	G_{12}
0	0	1	0,0097	0,0096	0,5709	0,5686	0,0193
0	0	0,75	0,0233	0,0077	0,3704	0,8077	0,0206
0	0	0,5	0,0522	0,0021	0,1732	1,7081	0,0136
0	0	0,25	0,1033	0,0002	0,0046	3,8702	0,0052

I.2. Le tableau des variations $E_1, E_2, Nu_{12}, Nu_{21}, G_{12}$ par rapport R avec ($\Psi=0, \Phi=0$)

Ψ	ϕ	R	E_1	E_2	Nu_{12}	Nu_{21}	G_{12}
0	5	1	0,0082	0,0108	0,683	0,4492	0,0167
0	5	0,75	0,0131	0,0079	0,5102	0,496	0,0184
0	5	0,5	0,0515	0,0025	0,1343	1,7543	0,0139
0	5	0,25	0,1021	0,0002	0,1441	4,8925	0,0052

I.3. Le tableau des variations $E_1, E_2, Nu_{12}, Nu_{21}, G_{12}$ par rapport R avec ($\Psi=0, \Phi=5$)

Ψ	ϕ	R	E_1	E_2	Nu_{12}	Nu_{21}	G_{12}
0	10	1	0,0072	0,0116	0,746	0,396	0,0136
0	10	0,75	0,0119	0,0086	0,5043	0,5266	0,016
0	10	0,5	0,0499	0,0025	0,1928	1,6956	0,0135
0	10	0,25	0,1055	0,0003	0,2582	4,6469	0,0052

I.4. Le tableau des variations $E_1, E_2, Nu_{12}, Nu_{21}, G_{12}$ par rapport R avec ($\Psi=0, \Phi=10$)

Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire

Ψ	ϕ	R	E₁	E₂	Nu₁₂	Nu₂₁	G₁₂
0	15	1	0,0067	0,0118	0,6897	0,4564	0,0101
0	15	0,75	0,0111	0,0074	0,3482	0,5748	0,0129
0	15	0,5	0,0497	0,0026	0,1322	1,6254	0,0129
0	15	0,25	0,1078	0,0004	0,0408	2,849	0,0052

I.5. Le tableau des variations E₁,E₂,Nu₁₂,Nu₂₁,G₁₂ par rapport R avec (Psi=0,Phi=15)

Ψ	ϕ	R	E₁	E₂	Nu₁₂	Nu₂₁	G₁₂
5	0	1	0,0105	0,008	0,5073	0,6316	0,0165
5	0	0,75	0,0379	0,0062	0,3205	1,0412	0,0173
5	0	0,5	0,0651	0,0017	0,0927	1,7624	0,0087
5	0	0,25	0,1218	0,00012	0,0269	5,0016	0,0027

I.6. Le tableau des variations E₁,E₂,Nu₁₂,Nu₂₁,G₁₂ par rapport R avec (Psi=5,Phi=0)

Ψ	ϕ	R	E₁	E₂	Nu₁₂	Nu₂₁	G₁₂
5	5	1	0,009	0,009	0,6439	0,6432	0,014
5	5	0,75	0,0231	0,0065	0,4236	1,1232	0,0156
5	5	0,5	0,0606	0,0014	0,1656	1,9682	0,0086
5	5	0,25	0,124	0,0002	0,0848	4,8782	0,0028

I.7. Le tableau des variations E₁,E₂,Nu₁₂,Nu₂₁,G₁₂ par rapport R avec (Psi=5,Phi=5)

Ψ	ϕ	R	E₁	E₂	Nu₁₂	Nu₂₁	G₁₂
5	10	1	0,0083	0,0105	0,5002	0,5218	0,0122
5	10	0,75	0,0196	0,0069	0,4012	1,153	0,0141
5	10	0,5	0,0585	0,0015	0,1528	1,9499	0,0085
5	10	0,25	0,116	0,00026	0,1385	5,0221	0,0025

I.8. Le tableau des variations E₁,E₂,Nu₁₂,Nu₂₁,G₁₂ par rapport R avec (Psi=5,Phi=10)

Ψ	ϕ	R	E₁	E₂	Nu₁₂	Nu₂₁	G₁₂
5	15	1	0,0076	0,0113	0,5192	0,5174	0,0099
5	15	0,75	0,0156	0,0063	0,2071	0,9479	0,0113
5	15	0,5	0,0605	0,0021	0,1544	2,2754	0,0095
5	15	0,25	0,1375	0,00011	0,1117	3,2164	0,0029

I.9. Le tableau des variations E₁,E₂,Nu₁₂,Nu₂₁,G₁₂ par rapport R avec (Psi=5,Phi=15)

Ψ	ϕ	R	E₁	E₂	Nu₁₂	Nu₂₁	G₁₂
10	0	1	0,012	0,0072	0,4913	0,5827	0,0134
10	0	0,75	0,0405	0,0043	0,2891	0,3208	0,0114
10	0	0,5	0,0713	0,0015	0,1409	2,032	0,0054
10	0	0,25	0,118	0,00022	0,0566	5,5218	0,0029

I.10. Le tableau des variations E₁,E₂,Nu₁₂,Nu₂₁,G₁₂ par rapport R avec (Psi=10,Phi=0)

Ψ	ϕ	R	E₁	E₂	Nu₁₂	Nu₂₁	G₁₂
10	5	1	0,0102	0,0083	0,4953	0,4753	0,0121
10	5	0,75	0,0352	0,0041	0,4306	0,8582	0,0099
10	5	0,5	0,0689	0,0014	0,1437	1,9415	0,0055
10	5	0,25	0,1223	0,0001	0,0553	4,7642	0,0028

I.11. Le tableau des variations E₁,E₂,Nu₁₂,Nu₂₁,G₁₂ par rapport R avec (Psi=10,Phi=5)

Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire

Ψ	ϕ	R	E_1	E_2	Nu_{12}	Nu_{21}	G_{12}
10	10	1	0,0092	0,0091	0,7135	0,7167	0,0106
10	10	0,75	0,0253	0,0036	0,4007	0,7313	0,0082
10	10	0,5	0,0674	0,0016	0,1062	1,3459	0,0053
10	10	0,25	0,1097	0,00012	0,1442	6,2684	0,0028

I.12. Le tableau des variations $E_1, E_2, Nu_{12}, Nu_{21}, G_{12}$ par rapport R avec ($\Psi=10, \Phi=10$)

ψ	ϕ	R	E_1	E_2	Nu_{12}	Nu_{21}	G_{12}
10	15	1	0,0087	0,01	0,5765	0,6876	0,0092
10	15	0,75	0,025	0,0036	0,3305	1,2903	0,0081
10	15	0,5	0,0667	0,0016	0,0847	2,413	0,0057
10	15	0,25	0,1131	0,00018	0,0504	3,6071	0,0029

I.13. Le tableau des variations $E_1, E_2, Nu_{12}, Nu_{21}, G_{12}$ par rapport R avec ($\Psi=10, \Phi=15$)

Ψ	ϕ	R	E_1	E_2	Nu_{12}	Nu_{21}	G_{12}
15	0	1	0,0126	0,0068	0,4887	0,5756	0,0106
15	0	0,75	0,0406	0,0035	0,2353	1,9078	0,0086
15	0	0,5	0,0565	0,0014	0,1149	1,8185	0,0042
15	0	0,25	0,0985	0,00027	0,0561	3,6294	0,0055

I.14. Le tableau des variations $E_1, E_2, Nu_{12}, Nu_{21}, G_{12}$ par rapport R avec ($\Psi=15, \Phi=0$)

Ψ	ϕ	R	E_1	E_2	Nu_{12}	Nu_{21}	G_{12}
15	5	1	0,011	0,0076	0,5651	0,3617	0,0099
15	5	0,75	0,0377	0,0031	0,4478	1,7032	0,0081
15	5	0,5	0,054	0,0013	0,1871	1,6148	0,0041
15	5	0,25	0,0951	0,00017	0,0693	5,1888	0,0058

I.15. Le tableau des variations $E_1, E_2, Nu_{12}, Nu_{21}, G_{12}$ par rapport R avec ($\Psi=15, \Phi=5$)

Ψ	ϕ	R	E_1	E_2	Nu_{12}	Nu_{21}	G_{12}
15	10	1	0,0103	0,0086	0,5772	0,5696	0,0091
15	10	0,75	0,0341	0,0037	0,495	1,7719	0,0069
15	10	0,5	0,0532	0,0015	0,1417	1,8596	0,0017
15	10	0,25	0,0939	0,00026	0,0056	3,9482	0,0061

I.16. Le tableau des variations $E_1, E_2, Nu_{12}, Nu_{21}, G_{12}$ par rapport R avec ($\Psi=15, \Phi=10$)

Ψ	ϕ	R	E_1	E_2	Nu_{12}	Nu_{21}	G_{12}
15	15	1	0,0094	0,0095	0,6806	0,7942	0,0087
15	15	0,75	0,0302	0,0031	0,409	1,773	0,0066
15	15	0,5	0,0688	0,0013	0,1677	1,9411	0,005
15	15	0,25	0,0985	0,00028	0,1821	4,2201	0,0067

I.17. Le tableau des variations $E_1, E_2, Nu_{12}, Nu_{21}, G_{12}$ par rapport R avec ($\Psi=15, \Phi=15$)

Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire

Ψ	0	0	0	0	5	5	5	5
ϕ	0	5	10	15	0	5	10	15
R	E₁	E₁	E₁	E₁	E₁	E₁	E₁	E₁
1	0,0097	0,0082	0,0072	0,0067	0,0105	0,009	0,0083	0,0076
0,75	0,0233	0,0131	0,0119	0,0111	0,0379	0,0231	0,0196	0,0156
0,5	0,0522	0,0515	0,0499	0,0497	0,0651	0,0606	0,0585	0,0605
0,25	0,1033	0,1021	0,1055	0,1078	0,1218	0,124	0,116	0,1375
Ψ	10	10	10	10	15	15	15	15
ϕ	0	5	10	15	0	5	10	0
R	E₁	E₁	E₁	E₁	E₁	E₁	E₁	E₁
1	0,012	0,0102	0,0092	0,0087	0,0126	0,011	0,0103	0,0094
0,75	0,0405	0,0352	0,0253	0,025	0,0406	0,0377	0,0341	0,0302
0,5	0,0713	0,0689	0,0674	0,0667	0,0565	0,054	0,0532	0,0688
0,25	0,118	0,1223	0,1097	0,1131	0,0985	0,0951	0,0939	0,0985

I.18. Le tableau des modules des élasticités E₁ par rapport R

Ψ	0	0	0	0	5	5	5	5
ϕ	0	5	10	15	0	5	10	15
R	E₂	E₂	E₂	E₂	E₂	E₂	E₂	E₂
1	0,0096	0,0108	0,0116	0,0118	0,008	0,009	0,0105	0,0113
0,75	0,0077	0,0079	0,0086	0,0074	0,0062	0,0065	0,0069	0,0063
0,5	0,0021	0,0025	0,0025	0,0026	0,0017	0,0014	0,0015	0,0021
0,25	0,0002	0,0002	0,0003	0,0004	0,00012	0,00016	0,00026	0,00011
Ψ	10	10	10	10	15	15	15	15
ϕ	0	5	10	15	0	5	10	15
R	E₂	E₂	E₂	E₂	E₂	E₂	E₂	E₂
1	0,0072	0,0083	0,0091	0,01	0,0068	0,0076	0,0086	0,0095
0,75	0,0043	0,0041	0,0036	0,0036	0,0035	0,0031	0,0037	0,0031
0,5	0,0015	0,0014	0,0016	0,0016	0,0014	0,0013	0,0015	0,0013
0,25	0,00022	0,00013	0,00012	0,00018	0,00027	0,00017	0,00026	0,00028

I.19. Le tableau des modules des élasticités E₂ par rapport R

Ψ	0	0	0	0	5	5	5	5
ϕ	0	5	10	15	0	5	10	15
R	Nu₁₂	Nu₁₂	Nu₁₂	Nu₁₂	Nu₁₂	Nu₁₂	Nu₁₂	Nu₁₂
1	0,5709	0,683	0,746	0,6897	0,5073	0,6439	0,5002	0,5192
0,75	0,3704	0,5102	0,5043	0,3482	0,3205	0,4236	0,4012	0,2071
0,5	0,1732	0,1343	0,1928	0,1322	0,0927	0,1656	0,1528	0,1544
0,25	0,0046	0,1441	0,2582	0,0408	0,0269	0,0848	0,1385	0,1117
Ψ	10	10	10	10	15	15	15	15
ϕ	0	5	10	15	0	5	10	0
R	Nu₁₂	Nu₁₂	Nu₁₂	Nu₁₂	Nu₁₂	Nu₁₂	Nu₁₂	Nu₁₂
1	0,4913	0,4953	0,7135	0,5765	0,4887	0,5651	0,5772	0,6806
0,75	0,2891	0,4306	0,4007	0,3305	0,2353	0,4478	0,495	0,409
0,5	0,1409	0,1437	0,1062	0,0847	0,1149	0,1871	0,1417	0,1677
0,25	0,0566	0,0553	0,1442	0,0504	0,0561	0,0693	0,0056	0,1821

I.20. Le tableau des coefficients des poissons Nu₁₂ par rapport R

Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire

Ψ	0	0	0	0	5	5	5	5
ϕ	0	5	10	15	0	5	10	15
R	Nu₂₁	Nu₂₁	Nu₂₁	Nu₂₁	Nu₂₁	Nu₂₁	Nu₂₁	Nu₂₁
1	0,5686	0,4492	0,396	0,4564	0,6316	0,6432	0,5218	0,5174
0,75	0,8077	0,496	0,5266	0,5748	1,0412	1,1232	1,153	0,9479
0,5	1,7081	1,7543	1,6956	1,6254	1,7624	1,9682	1,9499	2,2754
0,25	3,8702	4,8925	4,6469	2,849	5,0016	4,8782	5,0221	3,2164
Ψ	10	10	10	10	15	15	15	15
ϕ	0	5	10	15	0	5	10	0
R	Nu₂₁	Nu₂₁	Nu₂₁	Nu₂₁	Nu₂₁	Nu₂₁	Nu₂₁	Nu₂₁
1	0,5827	0,4753	0,7167	0,6876	0,5756	0,3617	0,5696	0,7942
0,75	0,3208	0,8582	0,7313	1,2903	1,9078	1,7032	1,7719	1,773
0,5	2,032	1,9415	1,3459	2,413	1,8185	1,6148	1,8596	1,9411
0,25	5,5218	4,7642	6,2684	3,6071	3,6294	5,1888	3,9482	4,2201

I.21. Le tableau des coefficients des poissons Nu₂₁ par rapport R

Ψ	0	0	0	0	5	5	5	5
ϕ	0	5	10	15	0	5	10	15
R	G₁₂	G₁₂	G₁₂	G₁₂	G₁₂	G₁₂	G₁₂	G₁₂
1	0,0193	0,0167	0,0136	0,0101	0,0165	0,014	0,0122	0,0099
0,75	0,0206	0,0184	0,016	0,0129	0,0173	0,0156	0,0141	0,0113
0,5	0,0136	0,0139	0,0135	0,0129	0,0087	0,0086	0,0085	0,0095
0,25	0,0052	0,0052	0,0052	0,0052	0,0027	0,0028	0,0025	0,0029
Ψ	10	10	10	10	15	15	15	15
ϕ	0	5	10	15	0	5	10	15
R	G₁₂	G₁₂	G₁₂	G₁₂	G₁₂	G₁₂	G₁₂	G₁₂
1	0,0134	0,0121	0,0106	0,0092	0,0106	0,0099	0,0091	0,0087
0,75	0,0114	0,0099	0,0082	0,0081	0,0086	0,0081	0,0069	0,0066
0,5	0,0054	0,0055	0,0053	0,0057	0,0042	0,0041	0,0017	0,005
0,25	0,0029	0,0028	0,0028	0,0029	0,0055	0,0058	0,0061	0,0067

I.22. Le tableau des modules des glissements G₂₁ par rapport R

R	ϕ	ψ	E₁	E₂	Nu₁₂	Nu₂₁	G₁₂
1	0	0	0,0097	0,0096	0,5709	0,5686	0,0193
1	0	5	0,0105	0,008	0,5073	0,6316	0,0165
1	0	10	0,012	0,0072	0,4913	0,5827	0,0134
1	0	15	0,0126	0,0068	0,4887	0,5756	0,0106

I.23. Le tableau des variations E₁, E₂, Nu₁₂, Nu₂₁, G₁₂ par rapport l'angle Psi avec (R=1, Phi=0)

R	ϕ	ψ	E₁	E₂	Nu₁₂	Nu₂₁	G₁₂
1	5	0	0,0082	0,0108	0,683	0,4492	0,0167
1	5	5	0,009	0,009	0,6439	0,6432	0,014
1	5	10	0,0102	0,0083	0,4953	0,4753	0,0121
1	5	15	0,011	0,0076	0,5651	0,3617	0,0099

I.24. Le tableau des variations E₁, E₂, Nu₁₂, Nu₂₁, G₁₂ par rapport l'angle Psi avec (R=1, Phi=5)

Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire

R	ϕ	ψ	E₁	E₂	Nu₁₂	Nu₂₁	G₁₂
1	10	0	0,0072	0,0116	0,746	0,396	0,0136
1	10	5	0,0083	0,0105	0,5002	0,5218	0,0122
1	10	10	0,0092	0,0091	0,7135	0,7167	0,0106
1	10	15	0,0103	0,0086	0,5772	0,5696	0,0091

I.25. Le tableau des variations E₁, E₂, Nu₁₂, Nu₂₁, G₁₂ par rapport l'angle Psi avec (R=1, Phi=10)

R	ϕ	ψ	E₁	E₂	Nu₁₂	Nu₂₁	G₁₂
1	15	0	0,0067	0,0118	0,6897	0,4564	0,0101
1	15	5	0,0076	0,0113	0,5192	0,5174	0,0099
1	15	10	0,0087	0,01	0,5765	0,6876	0,0092
1	15	15	0,0094	0,0095	0,6806	0,7942	0,0087

I.26. Le tableau des variations E₁, E₂, Nu₁₂, Nu₂₁, G₁₂ par rapport l'angle Psi avec (R=1, Phi=15)

R	ϕ	ψ	E₁	E₂	Nu₁₂	Nu₂₁	G₁₂
0,75	0	0	0,0233	0,0077	0,3704	0,8077	0,0206
0,75	0	5	0,0379	0,0062	0,3205	1,0412	0,0173
0,75	0	10	0,0405	0,0043	0,2891	0,3208	0,0114
0,75	0	15	0,0406	0,0035	0,2353	1,9078	0,0086

I.27. Le tableau des variations E₁, E₂, Nu₁₂, Nu₂₁, G₁₂ par rapport l'angle Psi avec (R=0.75, Phi=0)

R	ϕ	ψ	E₁	E₂	Nu₁₂	Nu₂₁	G₁₂
0,75	5	0	0,0131	0,0079	0,5102	0,496	0,0184
0,75	5	5	0,0231	0,0065	0,4236	1,1232	0,0156
0,75	5	10	0,0352	0,0041	0,4306	0,8582	0,0099
0,75	5	15	0,0377	0,0031	0,4478	1,7032	0,0081

I.28. Le tableau des variations E₁, E₂, Nu₁₂, Nu₂₁, G₁₂ par rapport l'angle Psi avec (R=0.75, Phi=5)

R	ϕ	ψ	E₁	E₂	Nu₁₂	Nu₂₁	G₁₂
0,75	10	0	0,0119	0,0086	0,5043	0,5266	0,016
0,75	10	5	0,0196	0,0069	0,4012	1,153	0,0141
0,75	10	10	0,0253	0,0036	0,4007	0,7313	0,0082
0,75	10	15	0,0341	0,0037	0,495	1,7719	0,0069

I.29. Le tableau des variations E₁, E₂, Nu₁₂, Nu₂₁, G₁₂ par rapport l'angle Psi avec (R=0.75, Phi=10)

R	ϕ	ψ	E₁	E₂	Nu₁₂	Nu₂₁	G₁₂
0,75	15	0	0,0111	0,0074	0,3482	0,5748	0,0127
0,75	15	5	0,0156	0,0063	0,2071	0,9479	0,0113
0,75	15	10	0,025	0,0036	0,3305	1,2903	0,0081
0,75	15	15	0,0302	0,0031	0,409	1,773	0,0066

I.30. Le tableau des variations E₁, E₂, Nu₁₂, Nu₂₁, G₁₂ par rapport l'angle Psi avec (R=0.75, Phi=15)

R	ϕ	ψ	E₁	E₂	Nu₁₂	Nu₂₁	G₁₂
0,5	0	0	0,0522	0,0021	0,1732	1,7081	0,0136
0,5	0	5	0,0651	0,0017	0,0927	1,7624	0,0087
0,5	0	10	0,0713	0,0015	0,1409	2,032	0,0054
0,5	0	15	0,0565	0,0014	0,1149	1,8185	0,0042

I.31. Le tableau des variations E₁, E₂, Nu₁₂, Nu₂₁, G₁₂ par rapport l'angle Psi avec (R=0.5, Phi=0)

Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire

R	ϕ	ψ	E₁	E₂	Nu₁₂	Nu₂₁	G₁₂
0,5	5	0	0,0515	0,0025	0,1343	1,7543	0,0139
0,5	5	5	0,0606	0,0014	0,1656	1,9682	0,0086
0,5	5	10	0,0689	0,0014	0,1437	1,9415	0,0055
0,5	5	15	0,054	0,0013	0,1871	1,6148	0,0041

I.32.Le tableau des variations E₁,E₂,Nu₁₂,Nu₂₁,G₁₂ par rapport l'angle Psi avec (R=0.5,Phi=5)

R	ϕ	ψ	E₁	E₂	Nu₁₂	Nu₂₁	G₁₂
0,5	10	0	0,0499	0,0025	0,1928	1,6956	0,0135
0,5	10	5	0,0585	0,0015	0,1528	1,9499	0,0085
0,5	10	10	0,0674	0,0016	0,1062	1,3459	0,0053
0,5	10	15	0,0532	0,0015	0,1417	1,8596	0,0017

I.33.Le tableau des variations E₁,E₂,Nu₁₂,Nu₂₁,G₁₂ par rapport l'angle Psi avec (R=0.5,Phi=10)

R	ϕ	ψ	E₁	E₂	Nu₁₂	Nu₂₁	G₁₂
0,5	15	0	0,0497	0,0026	0,1322	1,6254	0,0129
0,5	15	5	0,0605	0,0021	0,1544	2,2754	0,0095
0,5	15	10	0,0667	0,0016	0,0847	2,413	0,0057
0,5	15	15	0,0688	0,0013	0,1677	1,9411	0,005

I.34.Le tableau des variations E₁,E₂,Nu₁₂,Nu₂₁,G₁₂ par rapport l'angle Psi avec (R=0.5,Phi=15)

R	ϕ	ψ	E₁	E₂	Nu₁₂	Nu₂₁	G₁₂
0,25	0	0	0,1033	0,0002	0,0046	3,8702	0,0052
0,25	0	5	0,1218	0,00012	0,0269	5,0016	0,0027
0,25	0	10	0,118	0,00022	0,0566	5,5218	0,0029
0,25	0	15	0,0985	0,00027	0,0561	3,6294	0,0055

I.35.Le tableau des variations E₁,E₂,Nu₁₂,Nu₂₁,G₁₂ par rapport l'angle Psi avec (R=0.25,Phi=0)

R	ϕ	ψ	E₁	E₂	Nu₁₂	Nu₂₁	G₁₂
0,25	5	0	0,1021	0,0002	0,1441	4,8925	0,0052
0,25	5	5	0,124	0,00016	0,0848	4,8782	0,0028
0,25	5	10	0,1223	0,00013	0,0553	4,7642	0,0028
0,25	5	15	0,0951	0,00017	0,0693	5,1888	0,0058

I.36.Le tableau des variations E₁,E₂,Nu₁₂,Nu₂₁,G₁₂ par rapport l'angle Psi avec (R=0.25,Phi=5)

R	ϕ	ψ	E₁	E₂	Nu₁₂	Nu₂₁	G₁₂
0,25	10	0	0,1055	0,0003	0,2582	4,6469	0,0052
0,25	10	5	0,116	0,00026	0,1385	5,0221	0,0025
0,25	10	10	0,1097	0,00012	0,1442	6,2684	0,0028
0,25	10	15	0,0939	0,00026	0,0056	3,9482	0,0061

I.37.Le tableau des variations E₁,E₂,Nu₁₂,Nu₂₁,G₁₂ par rapport l'angle Psi avec (R=0.25,Phi=10)

R	ϕ	ψ	E₁	E₂	Nu₁₂	Nu₂₁	G₁₂
0,25	15	0	0,1078	0,0004	0,0408	2,849	0,0052
0,25	15	5	0,1375	0,00011	0,1117	3,2164	0,0029
0,25	15	10	0,1131	0,00018	0,0504	3,6071	0,0029
0,25	15	15	0,0985	0,00028	0,1821	4,2201	0,0067

I.38.Le tableau des variations E₁,E₂,Nu₁₂,Nu₂₁,G₁₂ par rapport l'angle Psi avec (R=0.25,Phi=15)

Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire

R	1	1	1	1	0,75	0,75	0,75	0,75
Φ	0	5	10	15	0	5	10	15
ψ	E₁	E₁	E₁	E₁	E₁	E₁	E₁	E₁
0	0,0097	0,0082	0,0072	0,0067	0,0233	0,0131	0,0119	0,0111
5	0,0105	0,009	0,0083	0,0076	0,0379	0,0196	0,0204	0,0156
10	0,012	0,0102	0,0092	0,0087	0,0405	0,0352	0,0253	0,025
15	0,0126	0,011	0,0103	0,0094	0,0406	0,0377	0,0341	0,0302
R	0,5	0,5	0,5	0,5	0,25	0,25	0,25	0,25
Φ	0	5	10	15	0	5	10	15
ψ	E₁	E₁	E₁	E₁	E₁	E₁	E₁	E₁
0	0,0522	0,0515	0,0499	0,0497	0,1033	0,1021	0,1055	0,1078
5	0,0651	0,0606	0,0585	0,0605	0,1218	0,124	0,116	0,1375
10	0,0713	0,0689	0,0674	0,0667	0,118	0,1223	0,1097	0,1131
15	0,0565	0,054	0,0532	0,0688	0,0985	0,0951	0,0939	0,0985

II.39. Le tableau des modules des élasticités E₁ par rapport l'angle Psi

R	1	1	1	1	0,75	0,75	0,75	0,75
Φ	0	5	10	15	0	5	10	15
ψ	E₂	E₂	E₂	E₂	E₂	E₂	E₂	E₂
0	0,0096	0,0108	0,0116	0,0118	0,0077	0,0079	0,0086	0,0074
5	0,008	0,009	0,0105	0,0113	0,0062	0,0065	0,0069	0,0063
10	0,0072	0,0083	0,0091	0,01	0,0043	0,0041	0,0036	0,0036
15	0,0068	0,0076	0,0086	0,0095	0,0035	0,0031	0,0037	0,0031
R	0,5	0,5	0,5	0,5	0,25	0,25	0,25	0,25
Φ	0	5	10	15	0	5	10	15
ψ	E₂	E₂	E₂	E₂	E₂	E₂	E₂	E₂
0	0,0021	0,0025	0,0025	0,0026	0,0002	0,0002	0,0003	0,0004
5	0,0017	0,0014	0,0015	0,0021	0,00012	0,00016	0,00026	0,00011
10	0,0015	0,0014	0,0016	0,0016	0,00022	0,00013	0,00012	0,00018
15	0,0014	0,0013	0,0015	0,0013	0,00027	0,00017	0,00026	0,00028

II.40. Le tableau des modules des élasticités E₂ par rapport l'angle Psi

R	1	1	1	1	0,75	0,75	0,75	0,75
Φ	0	5	10	15	0	5	10	15
ψ	Nu₁₂	Nu₁₂	Nu₁₂	Nu₁₂	Nu₁₂	Nu₁₂	Nu₁₂	Nu₁₂
0	0,5709	0,683	0,746	0,6897	0,3704	0,5102	0,5043	0,3482
5	0,5073	0,6439	0,5002	0,5192	0,3205	0,4236	0,4012	0,2071
10	0,4913	0,4953	0,7135	0,5765	0,2891	0,4306	0,4007	0,3305
15	0,4887	0,5651	0,5772	0,6806	0,2353	0,4478	0,495	0,409
R	0,5	0,5	0,5	0,5	0,25	0,25	0,25	0,25
Φ	0	5	10	15	0	5	10	0
ψ	Nu₁₂	Nu₁₂	Nu₁₂	Nu₁₂	Nu₁₂	Nu₁₂	Nu₁₂	Nu₁₂
0	0,1732	0,1343	0,1928	0,1322	0,0046	0,1441	0,2582	0,0408
5	0,0927	0,1656	0,1528	0,1117	0,0269	0,0848	0,1385	0,1713
10	0,1409	0,1437	0,1062	0,0847	0,0566	0,0553	0,1442	0,0504
15	0,1149	0,1871	0,1417	0,1677	0,0561	0,0693	0,0056	0,1821

II.41. Le tableau des coefficients des poissons Nu₁₂ par rapport l'angle Psi

Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire

R	1	1	1	1	0,75	0,75	0,75	0,75
Φ	0	5	10	15	0	5	10	15
Ψ	Nu₂₁	Nu₂₁	Nu₂₁	Nu₂₁	Nu₂₁	Nu₂₁	Nu₂₁	Nu₂₁
0	0,5686	0,4492	0,396	0,4564	0,8077	0,496	0,5266	0,5748
5	0,6316	0,6432	0,5218	0,5174	1,0412	1,1232	1,153	0,9479
10	0,5827	0,4753	0,7167	0,6876	0,3208	0,8582	0,7313	1,2903
15	0,5756	0,3617	0,5696	0,7942	1,9078	1,7032	1,7719	1,773
R	0,5	0,5	0,5	0,5	0,25	0,25	0,25	0,25
Φ	0	5	10	15	0	5	10	15
Ψ	Nu₂₁	Nu₂₁	Nu₂₁	Nu₂₁	Nu₂₁	Nu₂₁	Nu₂₁	Nu₂₁
0	1,7081	1,7543	1,6956	1,6254	3,8702	4,8925	4,6469	2,849
5	1,7624	1,9682	1,9499	2,2754	5,0016	4,8782	5,0221	6,3269
10	2,032	1,9415	1,3459	2,413	5,5218	4,7642	6,2684	3,6071
15	1,8185	1,6148	1,8596	1,9411	3,6294	5,1888	3,9482	4,2201

II.42. Le tableau des coefficients des poissons Nu₂₁ par rapport l'angle Psi

R	1	1	1	1	0,75	0,75	0,75	0,75
Φ	0	5	10	15	0	5	10	15
Ψ	G₁₂	G₁₂	G₁₂	G₁₂	G₁₂	G₁₂	G₁₂	G₁₂
0	0,0193	0,0167	0,0136	0,0101	0,0206	0,0184	0,016	0,0127
5	0,0165	0,014	0,0122	0,0099	0,0173	0,0156	0,0141	0,0113
10	0,0134	0,0121	0,0106	0,0092	0,0114	0,0099	0,0082	0,0081
15	0,0106	0,0099	0,0091	0,0087	0,0086	0,0081	0,0069	0,0066
R	0,5	0,5	0,5	0,5	0,25	0,25	0,25	0,25
Φ	0	5	10	15	0	5	10	0
Ψ	G₁₂	G₁₂	G₁₂	G₁₂	G₁₂	G₁₂	G₁₂	G₁₂
0	0,0136	0,0139	0,0135	0,0129	0,0052	0,0052	0,0052	0,0052
5	0,0087	0,0086	0,0085	0,0095	0,0027	0,0028	0,0025	0,0029
10	0,0054	0,0055	0,0053	0,0057	0,0029	0,0028	0,0028	0,0029
15	0,0042	0,0041	0,0017	0,005	0,0055	0,0058	0,0061	0,0067

II.43. Le tableau des modules des glissements G₁₂ par rapport l'angle Psi

Les graphs du l'angle Psi :

R	Ψ	Φ	E₁	E₂	Nu₁₂	Nu₂₁	G₁₂
1	0	0	0,0097	0,0096	0,5709	0,5686	0,0193
1	0	5	0,0082	0,0108	0,683	0,4492	0,0167
1	0	10	0,0072	0,0116	0,746	0,396	0,0136
1	0	15	0,0067	0,0118	0,6897	0,4564	0,0101

I.44. Le tableau des variations E₁, E₂, Nu₁₂, Nu₂₁, G₁₂ par rapport l'angle Phi avec (R=1, Psi=0)

R	Ψ	Φ	E₁	E₂	Nu₁₂	Nu₂₁	G₁₂
1	5	0	0,0105	0,008	0,5073	0,6316	0,0165
1	5	5	0,009	0,009	0,6439	0,6432	0,014
1	5	10	0,0083	0,0105	0,5002	0,5218	0,0122
1	5	15	0,0076	0,0113	0,5192	0,5174	0,0099

I.45. Le tableau des variations E₁, E₂, Nu₁₂, Nu₂₁, G₁₂ par rapport l'angle Phi avec (R=1, Psi=5)

Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire

R	ψ	ϕ	E₁	E₂	Nu₁₂	Nu₂₁	G₁₋₂
1	10	0	0,012	0,0072	0,4913	0,5827	0,0134
1	10	5	0,0102	0,0083	0,4953	0,4753	0,0121
1	10	10	0,0092	0,0091	0,7135	0,7167	0,0106
1	10	15	0,0087	0,01	0,5765	0,6876	0,0092

I.46.Le tableau des variations E₁,E₂,Nu₁₂,Nu₂₁,G₁₂ par rapport l'angle Phi avec (R=1,Psi=10)

R	ψ	ϕ	E₁	E₂	Nu₁₂	Nu₂₁	G₁₂
1	15	0	0,0126	0,0068	0,4887	0,5756	0,0106
1	15	5	0,011	0,0076	0,5651	0,3617	0,0099
1	15	10	0,0103	0,0086	0,5772	0,5696	0,0091
1	15	15	0,0094	0,0095	0,6806	0,7942	0,0087

I.47.Le tableau des variations E₁,E₂,Nu₁₂,Nu₂₁,G₁₂ par rapport l'angle Phi avec (R=1,Psi=15)

R	Ψ	ϕ	E₁	E₂	Nu₁₂	Nu₂₁	G₁₂
0,75	0	0	0,0233	0,0077	0,3704	0,8077	0,0206
0,75	0	5	0,0131	0,0079	0,5102	0,496	0,0184
0,75	0	10	0,0119	0,0086	0,5043	0,5266	0,016
0,75	0	15	0,0111	0,0074	0,3482	0,5748	0,0127

I.48.Le tableau des variations E₁,E₂,Nu₁₂,Nu₂₁,G₁₂ par rapport l'angle Phi avec (R=0.75,Psi=0)

R	ψ	ϕ	E₁	E₂	Nu₁₂	Nu₂₁	G₁₂
0,75	5	0	0,0379	0,0062	0,3205	1,0412	0,0173
0,75	5	5	0,0231	0,0065	0,4236	1,1232	0,0156
0,75	5	10	0,0196	0,0069	0,4012	1,153	0,0141
0,75	5	15	0,0156	0,0063	0,2071	0,9479	0,0113

I.49.Le tableau des variations E₁,E₂,Nu₁₂,Nu₂₁,G₁₂ par rapport l'angle Phi avec (R=0.75,Psi=5)

R	ψ	ϕ	E₁	E₂	Nu₁₂	Nu₂₁	G₁₂
0,75	10	0	0,0405	0,0043	0,2891	0,3208	0,0114
0,75	10	5	0,0352	0,0041	0,4306	0,8582	0,0099
0,75	10	10	0,0253	0,0036	0,4007	0,7313	0,0082
0,75	10	15	0,025	0,0036	0,3305	1,2903	0,0081

I.50.Le tableau des variations E₁,E₂,Nu₁₂,Nu₂₁,G₁₂ par rapport l'angle Phi avec (R=0.75,Psi=10)

R	ψ	ϕ	E₁	E₂	Nu₁₂	Nu₂₋₁	G₁₂
0,75	15	0	0,0406	0,0035	0,2353	1,9078	0,0086
0,75	15	5	0,0377	0,0031	0,4478	1,7032	0,0081
0,75	15	10	0,0341	0,0037	0,495	1,7719	0,0069
0,75	15	15	0,0302	0,0031	0,409	1,773	0,0066

I.51.Le tableau des variations E₁,E₂,Nu₁₂,Nu₂₁,G₁₂ par rapport l'angle Phi avec (R=0.75,Psi=15)

R	ψ	ϕ	E₁	E₂	Nu₁₂	Nu₂₁	G₁₂
0,5	0	0	0,0522	0,0021	0,1732	1,7081	0,0136
0,5	0	5	0,0515	0,0024	0,1343	1,7543	0,0139
0,5	0	10	0,0499	0,0025	0,1928	1,6956	0,0135
0,5	0	15	0,0497	0,0026	0,1322	1,6254	0,0129

I.52.Le tableau des variations E₁,E₂,Nu₁₂,Nu₂₁,G₁₂ par rapport l'angle Phi avec (R=0.5,Psi=0)

Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire

R	ψ	ϕ	E₁	E₂	Nu₁₂	Nu₂₁	G₁₂
0,5	5	0	0,0651	0,0017	0,0927	1,7624	0,0087
0,5	5	5	0,0606	0,0014	0,1656	1,9682	0,0086
0,5	5	10	0,0585	0,0015	0,1528	1,9499	0,0085
0,5	5	15	0,0605	0,0021	0,1544	2,2754	0,0095

I.53.Le tableau des variations E₁,E₂,Nu₁₂,Nu₂₁,G₁₂ par rapport l'angle Phi avec (R=0.5,Psi=5)

R	ψ	ϕ	E₁	E₂	Nu₁₂	Nu₂₁	G₁₂
0,5	10	0	0,0713	0,0015	0,1409	2,032	0,0054
0,5	10	5	0,0689	0,0014	0,1437	1,9415	0,0055
0,5	10	10	0,0674	0,0016	0,1062	1,3459	0,0053
0,5	10	15	0,0667	0,0016	0,0847	2,413	0,0057

I.54.Le tableau des variations E₁,E₂,Nu₁₂,Nu₂₁,G₁₂ par rapport l'angle Phi avec (R=0.5,Psi=10)

R	ψ	ϕ	E₁	E₂	Nu₁₂	Nu₂₁	G₁₂
0,5	15	0	0,0565	0,0014	0,1149	1,8185	0,0042
0,5	15	5	0,054	0,0013	0,1871	1,6148	0,0041
0,5	15	10	0,0532	0,0015	0,1417	1,8596	0,0017
0,5	15	15	0,0688	0,0013	0,1677	1,9411	0,005

I.55.Le tableau des variations E₁,E₂,Nu₁₂,Nu₂₁,G₁₂ par rapport l'angle Phi avec (R=0.5,Psi=15)

R	ψ	ϕ	E₁	E₂	Nu₁₂	Nu₂₁	G₁₂
0,25	0	0	0,1033	0,0002	0,0046	3,8702	0,0052
0,25	0	5	0,1021	0,0002	0,1441	4,8925	0,0052
0,25	0	10	0,1055	0,0003	0,2582	4,6469	0,0052
0,25	0	15	0,1078	0,0004	0,0408	2,849	0,0052

I.56.Le tableau des variations E₁,E₂,Nu₁₂,Nu₂₁,G₁₂ par rapport l'angle Phi avec (R=0.25,Psi=0)

R	ψ	ϕ	E₁	E₂	Nu₁₂	Nu₂₁	G₁₂
0,25	5	0	0,1218	0,00012	0,0269	5,0016	0,0027
0,25	5	5	0,124	0,00016	0,0848	4,8782	0,0028
0,25	5	10	0,116	0,00026	0,1385	5,0221	0,0025
0,25	5	15	0,1375	0,00011	0,1117	3,2164	0,0029

I.57.Le tableau des variations E₁,E₂,Nu₁₂,Nu₂₁,G₁₂ par rapport l'angle Phi avec (R=0.25,Psi=5)

R	ψ	ϕ	E₁	E₂	Nu₁₂	Nu₂₁	G₁₂
0,25	10	0	0,118	0,00022	0,0566	5,5218	0,0029
0,25	10	5	0,1223	0,00013	0,0553	4,7642	0,0028
0,25	10	10	0,1097	0,00012	0,1442	6,2684	0,0028
0,25	10	15	0,1131	0,00018	0,0504	3,6071	0,0029

I.58.Le tableau des variations E₁,E₂,Nu₁₂,Nu₂₁,G₁₂ par rapport l'angle Phi avec (R=0.25,Psi=10)

R	ψ	ϕ	E₁	E₂	Nu₁₂	Nu₂₁	G₁₂
0,25	15	0	0,0985	0,00027	0,0561	3,6294	0,0055
0,25	15	5	0,0951	0,00017	0,0693	5,1888	0,0058
0,25	15	10	0,0939	0,00026	0,0056	3,9482	0,0061
0,25	15	15	0,0985	0,00028	0,1821	4,2201	0,0067

I.59.Le tableau des variations E₁,E₂,Nu₁₂,Nu₂₁,G₁₂ par rapport l'angle Phi avec (R=0.25,Psi=15)

Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire

R	1	1	1	1	0,75	0,75	0,75	0,75
Ψ	0	5	10	15	0	5	10	15
φ	E₁	E₁	E₁	E₁	E₁	E₁	E₁	E₁
0	0,0097	0,0105	0,012	0,0126	0,0233	0,0379	0,0405	0,0406
5	0,0082	0,009	0,0102	0,011	0,0131	0,0231	0,0352	0,0377
10	0,0072	0,0083	0,0092	0,0103	0,0119	0,0196	0,0253	0,0341
15	0,0067	0,0076	0,0087	0,0094	0,0111	0,0156	0,025	0,0302
R	0,5	0,5	0,5	0,5	0,25	0,25	0,25	0,25
Ψ	0	5	10	15	0	5	10	15
φ	E₁	E₁	E₁	E₁	E₁	E₁	E₁	E₁
0	0,0522	0,0651	0,0713	0,0565	0,1033	0,1218	0,118	0,0985
5	0,0515	0,0606	0,0689	0,054	0,1021	0,124	0,1223	0,0951
10	0,0499	0,0585	0,0674	0,0532	0,1055	0,116	0,1097	0,0939
15	0,0497	0,0605	0,0667	0,0688	0,1078	0,1375	0,1131	0,0985

II.60. Le tableau des modules des élasticités E₁ par rapport l'angle Phi

R	1	1	1	1	0,75	0,75	0,75	0,75
Ψ	0	5	10	15	0	5	10	15
φ	E₂	E₂	E₂	E₂	E₂	E₂	E₂	E₂
0	0,0096	0,008	0,0072	0,0068	0,0077	0,0062	0,0043	0,0035
5	0,0108	0,009	0,0083	0,0076	0,0079	0,0065	0,0041	0,0031
10	0,0116	0,0105	0,0091	0,0086	0,0086	0,0069	0,0036	0,0037
15	0,0118	0,0113	0,01	0,0095	0,0074	0,0063	0,0036	0,0031
R	0,5	0,5	0,5	0,5	0,25	0,25	0,25	0,25
Ψ	0	5	10	15	0	5	10	0
φ	E₂	E₂	E₂	E₂	E₂	E₂	E₂	E₂
0	0,0021	0,0017	0,0015	0,0014	0,0002	0,00012	0,00022	0,00027
5	0,0025	0,0014	0,0014	0,0013	0,0002	0,00016	0,00013	0,00017
10	0,0025	0,0015	0,0016	0,0015	0,0003	0,00026	0,00012	0,00026
15	0,0026	0,0021	0,0016	0,0013	0,0004	0,00011	0,00018	0,00028

II.61. Le tableau des modules des élasticités E₂ par rapport l'angle Phi

R	1	1	1	1	0,75	0,75	0,75	0,75
Ψ	0	5	10	15	0	5	10	15
φ	Nu₂₁	Nu₂₁	Nu₂₁	Nu₂₁	Nu₂₁	Nu₂₁	Nu₂₁	Nu₂₁
0	0,5686	0,6316	0,5827	0,5756	0,8077	1,0412	0,3208	1,9078
5	0,4492	0,6432	0,4753	0,3617	0,496	1,1232	0,8582	1,7032
10	0,396	0,5218	0,7167	0,5696	0,5266	1,153	0,7313	1,7719
15	0,4564	0,5174	0,6876	0,7942	0,5748	0,9479	1,2903	1,773
R	0,5	0,5	0,5	0,5	0,25	0,25	0,25	0,25
Ψ	0	5	10	15	0	5	10	0
φ	Nu₂₁	Nu₂₁	Nu₂₁	Nu₂₁	Nu₂₁	Nu₂₁	Nu₂₁	Nu₂₁
0	1,7081	1,7624	2,032	1,8185	3,8702	5,0016	5,5218	3,6294
5	1,7543	1,9682	1,9415	1,6148	4,8925	4,8782	4,7642	5,1888
10	1,6956	1,9499	1,3459	1,8596	4,6469	5,0221	6,2684	3,9482
15	1,6254	2,2754	2,413	1,9411	2,849	3,2164	3,6071	4,2201

II.62. Le tableau des modules des élasticités Nu₂₁ par rapport l'angle Phi

Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire

R	1	1	1	1	0,75	0,75	0,75	0,75
Ψ	0	5	10	15	0	5	10	15
φ	G₁₂	G₁₂	G₁₂	G₁₂	G₁₂	G₁₂	G₁₂	G₁₂
0	0,0193	0,0165	0,0134	0,0106	0,0206	0,0173	0,0114	0,0086
5	0,0167	0,014	0,0121	0,0099	0,0184	0,0156	0,0099	0,0081
10	0,0136	0,0122	0,0106	0,0091	0,016	0,0141	0,0082	0,0069
15	0,0101	0,0099	0,0092	0,0087	0,0127	0,0113	0,0081	0,0066
R	0,5	0,5	0,5	0,5	0,25	0,25	0,25	0,25
Ψ	0	5	10	15	0	5	10	0
φ	G₁₂	G₁₂	G₁₂	G₁₂	G₁₂	G₁₂	G₁₂	G₁₂
0	0,0136	0,0087	0,0054	0,0042	0,0052	0,0027	0,0029	0,0055
5	0,0139	0,0086	0,0055	0,0041	0,0052	0,0028	0,0028	0,0058
10	0,0135	0,0085	0,0053	0,0017	0,0052	0,0025	0,0028	0,0061
15	0,0129	0,0095	0,0057	0,005	0,0052	0,0029	0,0029	0,0067

II.63. Le tableau des modules des élasticités G_{12} par rapport l'angle Φ

Annexe C

Essai	Ansys	Module	Rapport
1	0,0097	0,0096	0,989690722
4	0,0067	0,0092	1,373134328
13	0,0126	0,01	0,793650794
16	0,0094	0,0096	1,021276596

II.64. Le tableau de comparaison entre les résultats obtenus et résultats calculé du module d'élasticités E_1

Essai	Ansys	Module	Rapport
1	0,0096	0,0094	0,979166667
4	0,0118	0,0097	0,822033898
13	0,0068	0,0091	1,338235294
16	0,0095	0,0094	0,989473684

II.65. Le tableau de comparaison entre les résultats obtenus et résultats calculé du module d'élasticités E_2

Essai	Ansys	Module	Rapport
1	0,5709	0,6075	1,0641093
4	0,6897	0,6278	0,9102508
13	0,4887	0,6015	1,2308165
16	0,6806	0,6231	0,9155157

II.66. Le tableau de comparaison entre les résultats obtenus et résultats calculé du coefficient de poisson ν_{12}

Essai	Ansys	Calculé	Rapport
1	0,5686	0,5987	1,052937038
4	0,4564	0,6057	1,327125329
13	0,5756	0,6213	1,079395413
16	0,7942	0,6339	0,798161672

II.67. Le tableau de comparaison entre les résultats obtenus et résultats calculé du coefficient de poisson ν_{21}

Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire

Essai	Ansys	Module	Rapport
1	0,0193	0,0122	0,632124352
4	0,0101	0,0114	1,128712871
13	0,0106	0,0115	1,08490566
16	0,0087	0,0109	1,252873563

II.68. Le tableau de comparaison entre les résultats obtenus et résultats calculé du module de glissement G_{12}

Annexe D : Les Matrices

Les Matrices du Module d'élasticité E_1 :

	0	5	10	15
0	0,1033	0,1218	0,118	0,0985
5	0,1021	0,124	0,1223	0,0951
10	0,1055	0,116	0,1097	0,0939
15	0,1078	0,1375	0,1131	0,0985

II.1. La matrice du module d'élasticité E_1 ($R=0.25$)

	0	5	10	15
0	0,0522	0,0651	0,0713	0,0565
5	0,0515	0,0606	0,0689	0,054
10	0,0499	0,0585	0,0674	0,0532
15	0,0497	0,0605	0,0667	0,0688

II.2. La matrice du module d'élasticité E_1 ($R=0.5$)

	0	5	10	15
0	0,0233	0,0379	0,0405	0,0406
5	0,0131	0,0231	0,0352	0,0377
10	0,0119	0,0196	0,0253	0,0341
15	0,0111	0,0156	0,025	0,0302

II.3. La matrice du module d'élasticité E_1 ($R=0.75$)

	0	5	10	15
0	0,0097	0,0105	0,012	0,0126
5	0,0082	0,009	0,0102	0,011
10	0,0072	0,0083	0,0092	0,0103
15	0,0067	0,0076	0,0087	0,0094

II.4. La matrice du module d'élasticité E_1 ($R=1$)

	1	0,75	0,5	0,25
0	0,0097	0,0233	0,0522	0,1033
5	0,0082	0,0131	0,0515	0,1021
10	0,0072	0,0119	0,0499	0,1055
15	0,0067	0,0111	0,0497	0,1078

II.5. La matrice du module d'élasticité E_1 ($\Psi=0$)

	1	0,75	0,5	0,25
0	0,0105	0,0379	0,0651	0,1218
5	0,009	0,0231	0,0606	0,124
10	0,0083	0,0196	0,0585	0,116
15	0,0076	0,0156	0,0605	0,1375

II.6. La matrice du module d'élasticité E_1 ($\Psi=5$)

	1	0,75	0,5	0,25
0	0,012	0,0405	0,0713	0,118
5	0,0102	0,0352	0,0689	0,1223
10	0,0092	0,0253	0,0674	0,1097
15	0,0087	0,025	0,0667	0,1131

II.7. La matrice du module d'élasticité E_1 ($\Psi=10$)

	1	0,75	0,5	0,25
0	0,0126	0,0406	0,0565	0,0985
5	0,011	0,0377	0,054	0,0951
10	0,0103	0,0341	0,0532	0,0939
15	0,0094	0,0302	0,0688	0,0985

II.8. La matrice du module d'élasticité E_1 ($\Psi=15$)

Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire

	1	0,75	0,5	0,25
0	0,0097	0,0233	0,0522	0,1033
5	0,0105	0,0379	0,0651	0,1218
10	0,012	0,0405	0,0713	0,118
15	0,0126	0,0406	0,0565	0,0985

II.9. La matrice du module d'élasticité E_1 ($\Phi=0$)

	1	0,75	0,5	0,25
0	0,0082	0,0131	0,0515	0,1021
5	0,009	0,0231	0,0606	0,124
10	0,0102	0,0352	0,0689	0,1223
15	0,011	0,0377	0,054	0,0951

II.10. La matrice du module d'élasticité E_1 ($\Phi=5$)

	1	0,75	0,5	0,25
0	0,0072	0,0119	0,0499	0,1055
5	0,0083	0,0196	0,0585	0,116
10	0,0092	0,0253	0,0674	0,1097
15	0,0103	0,0341	0,0532	0,0939

II.11. La matrice du module d'élasticité E_1 ($\Phi=10$)

	1	0,75	0,5	0,25
0	0,0067	0,0111	0,0497	0,1078
5	0,0076	0,0156	0,0605	0,1375
10	0,0087	0,025	0,0667	0,1131
15	0,0094	0,0302	0,0688	0,0985

II.12. La matrice du module d'élasticité E_1 ($\Phi=15$)

Les Matrices du Module d'élasticité E_2 :

	0	5	10	15
0	0,0002	0,00012	0,00022	0,00027
5	0,0002	0,00016	0,00013	0,00017
10	0,0003	0,00026	0,00012	0,00026
15	0,0004	0,00011	0,00018	0,00028

II.13. La matrice du module d'élasticité E_2 ($R=0.25$)

	0	5	10	15
0	0,0021	0,0017	0,0015	0,0014
5	0,0025	0,0014	0,0014	0,0013
10	0,0025	0,0015	0,0016	0,0015
15	0,0026	0,0021	0,0016	0,0013

II.14. La matrice du module d'élasticité E_2 ($R=0.5$)

	0	5	10	15
0	0,0077	0,0062	0,0043	0,0035
5	0,0079	0,0065	0,0041	0,0031
10	0,0086	0,0069	0,0036	0,0037
15	0,0074	0,0063	0,0036	0,0031

II.15. La matrice du module d'élasticité E_2 ($R=0.75$)

	0	5	10	15
0	0,0097	0,0105	0,012	0,0126
5	0,0082	0,009	0,0102	0,011
10	0,0072	0,0083	0,0092	0,0103
15	0,0067	0,0076	0,0087	0,0094

II.16. La matrice du module d'élasticité E_2 ($R=1$)

	1	0,75	0,5	0,25
0	0,0096	0,0077	0,0021	0,0002
5	0,0108	0,0079	0,0025	0,0002
10	0,0116	0,0086	0,0025	0,0003
15	0,0118	0,0074	0,0026	0,0004

II.17. La matrice du module d'élasticité E_2 ($\Psi=0$)

	1	0,75	0,5	0,25
0	0,008	0,0062	0,0017	0,00012
5	0,009	0,0065	0,0014	0,00016
10	0,0105	0,0069	0,0015	0,00026
15	0,0113	0,0063	0,0021	0,00011

II.18. La matrice du module d'élasticité E_2 ($\Psi=5$)

Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire

	1	0,75	0,5	0,25
0	0,0072	0,0043	0,0015	0,00022
5	0,0083	0,0041	0,0014	0,00013
10	0,0091	0,0036	0,0016	0,00012
15	0,01	0,0036	0,0016	0,00018

II.19. La matrice du module d'élasticité E_2 ($\Psi=10$)

	1	0,75	0,5	0,25
0	0,0068	0,0035	0,0014	0,00027
5	0,0076	0,0031	0,0013	0,00017
10	0,0086	0,0037	0,0015	0,00026
15	0,0095	0,0031	0,0013	0,00028

II.20. La matrice du module d'élasticité E_2 ($\Psi=15$)

	1	0,75	0,5	0,25
0	0,0096	0,0077	0,0021	0,0002
5	0,008	0,0062	0,0017	0,00012
10	0,0072	0,0043	0,0015	0,00022
15	0,0068	0,0035	0,0014	0,00027

II.21. La matrice du module d'élasticité E_2 ($\Phi=0$)

	1	0,75	0,5	0,25
0	0,0108	0,0079	0,0025	0,0002
5	0,009	0,0065	0,0014	0,00016
10	0,0083	0,0041	0,0014	0,00013
15	0,0076	0,0031	0,0013	0,00017

II.22. La matrice du module d'élasticité E_2 ($\Phi=5$)

	1	0,75	0,5	0,25
0	0,0116	0,0086	0,0025	0,0003
5	0,0105	0,0069	0,0015	0,00026
10	0,0091	0,0036	0,0016	0,00012
15	0,0086	0,0037	0,0015	0,00026

II.23. La matrice du module d'élasticité E_2 ($\Phi=10$)

	1	0,75	0,5	0,25
0	0,0118	0,0074	0,0026	0,0004
5	0,0113	0,0063	0,0021	0,00011
10	0,01	0,0036	0,0016	0,00018
15	0,0095	0,0031	0,0013	0,00028

II.24. La matrice du module d'élasticité E_2 ($\Phi=15$)

Les Matrices du coefficient de poisson ν_{12} :

	0	5	10	15
0	0,0046	0,0269	0,0566	0,0561
5	0,1441	0,0848	0,0553	0,0693
10	0,2582	0,1385	0,1442	0,0056
15	0,0408	0,1117	0,0504	0,1821

II.25. La matrice du coefficient de poisson ν_{12} ($R=0.25$)

	0	5	10	15
0	0,1732	0,0927	0,1409	0,1149
5	0,1343	0,1656	0,1437	0,1871
10	0,1928	0,1528	0,1062	0,1417
15	0,1322	0,1544	0,0847	0,1677

II.26. La matrice du coefficient de poisson ν_{12} ($R=0.5$)

	0	5	10	15
0	0,3704	0,3205	0,2891	0,2353
5	0,5102	0,4236	0,4306	0,4478
10	0,5043	0,4012	0,4007	0,495
15	0,3482	0,2071	0,3305	0,409

II.27. La matrice du coefficient de poisson ν_{12} ($R=0.5$)

	0	5	10	15
0	0,5709	0,5073	0,4913	0,4887
5	0,683	0,6439	0,4953	0,5651
10	0,746	0,5002	0,7135	0,5772
15	0,6897	0,5192	0,5765	0,6806

II.28. La matrice du coefficient de poisson ν_{12} ($R=1$)

Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire

	1	0,75	0,5	0,25
0	0,5709	0,3704	0,1732	0,0046
5	0,683	0,5102	0,1343	0,1441
10	0,746	0,5043	0,1928	0,2582
15	0,6897	0,3482	0,1322	0,0408

II.29. La matrice du coefficient de poisson Nu_{12} ($\Psi=0$)

	1	0,75	0,5	0,25
0	0,5073	0,3205	0,0927	0,0269
5	0,6439	0,4236	0,1656	0,0848
10	0,5002	0,4012	0,1528	0,1385
15	0,5192	0,2071	0,1544	0,1117

II.30. La matrice du coefficient de poisson Nu_{12} ($\Psi=5$)

	1	0,75	0,5	0,25
0	0,4913	0,2891	0,1409	0,0566
5	0,4953	0,4306	0,1437	0,0553
10	0,7135	0,4007	0,1062	0,1442
15	0,5765	0,3305	0,0847	0,0504

II.31. La matrice du coefficient de poisson Nu_{12} ($\Psi=10$)

	1	0,75	0,5	0,25
0	0,4887	0,2353	0,1149	0,0561
5	0,5651	0,4478	0,1871	0,0693
10	0,5772	0,495	0,1417	0,0056
15	0,6806	0,409	0,1677	0,1821

II.32. La matrice du coefficient de poisson Nu_{12} ($\Psi=15$)

	1	0,75	0,5	0,25
0	0,5709	0,3704	0,1732	0,0046
5	0,5073	0,3205	0,0927	0,0269
10	0,4913	0,2891	0,1409	0,0566
15	0,4887	0,2353	0,1149	0,0561

II.33. La matrice du coefficient de poisson Nu_{12} ($\Phi=0$)

	1	0,75	0,5	0,25
0	0,683	0,5102	0,1343	0,1441
5	0,6439	0,4236	0,1656	0,0848
10	0,4953	0,4306	0,1437	0,0553
15	0,5651	0,4478	0,1871	0,0693

II.34. La matrice du coefficient de poisson Nu_{12} ($\Phi=5$)

	1	0,75	0,5	0,25
0	0,746	0,5043	0,1928	0,2582
5	0,5002	0,4012	0,1528	0,1385
10	0,7135	0,4007	0,1062	0,1442
15	0,5772	0,495	0,1417	0,0056

II.35. La matrice du coefficient de poisson Nu_{12} ($\Phi=10$)

	1	0,75	0,5	0,25
0	0,6897	0,3482	0,1322	0,0408
5	0,5192	0,2071	0,1544	0,1117
10	0,5765	0,3305	0,0847	0,0504
15	0,6806	0,409	0,1677	0,1821

II.36. La matrice du coefficient de poisson Nu_{12} ($\Phi=15$)

Les Matrices du coefficient de poisson Nu_{21} :

	0	5	10	15
0	3,8702	5,0016	5,5218	3,6294
5	4,8925	4,8782	4,7642	5,1888
10	4,6469	5,0221	6,2684	3,9482
15	2,849	3,2164	3,6071	4,2201

II.37. La matrice du coefficient de poisson Nu_{21} ($R=0.25$)

	0	5	10	15
0	1,7081	1,7624	2,032	1,8185
5	1,7543	1,9682	1,9415	1,6148
10	1,6956	1,9499	1,3459	1,8596
15	1,6254	2,2754	2,413	1,9411

II.38. La matrice du coefficient de poisson Nu_{21} ($R=0.5$)

Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire

	0	5	10	15
0	0,8077	1,0412	0,3208	1,9078
5	0,496	1,1232	0,8582	1,7032
10	0,5266	1,153	0,7313	1,7719
15	0,5748	0,9479	1,2903	1,773

II.39. La matrice du coefficient de poisson Nu_{21} ($R=0.75$)

	0	5	10	15
0	0,5686	0,6316	0,5827	0,5756
5	0,4492	0,6432	0,4753	0,3617
10	0,396	0,5218	0,7167	0,5696
15	0,4564	0,5174	0,6876	0,7942

II.40. La matrice du coefficient de poisson Nu_{21} ($R=1$)

	1	0,75	0,5	0,25
0	0,5686	0,8077	1,7081	3,8702
5	0,4492	0,496	1,7543	4,8925
10	0,396	0,5266	1,6956	4,6469
15	0,4564	0,5748	1,6254	2,849

II.41. La matrice du coefficient de poisson Nu_{21} ($\text{Psi}=0$)

	1	0,75	0,5	0,25
0	0,6316	1,0412	1,7624	5,0016
5	0,6432	1,1232	1,9682	4,8782
10	0,5218	1,153	1,9499	5,0221
15	0,5174	0,9479	2,2754	3,2164

II.42. La matrice du coefficient de poisson Nu_{21} ($\text{Psi}=5$)

	1	0,75	0,5	0,25
0	0,5827	0,3208	2,032	5,5218
5	0,4753	0,8582	1,9415	4,7642
10	0,7167	0,7313	1,3459	6,2684
15	0,6876	1,2903	2,413	3,6071

II.43. La matrice du coefficient de poisson Nu_{21} ($\text{Psi}=10$)

	1	0,75	0,5	0,25
0	0,5756	1,9078	1,8185	3,6294
5	0,3617	1,7032	1,6148	5,1888
10	0,5696	1,7719	1,8596	3,9482
15	0,7942	1,773	1,9411	4,2201

II.44. La matrice du coefficient de poisson Nu_{21} ($\text{Psi}=15$)

	1	0,75	0,5	0,25
0	0,5686	0,8077	1,7081	3,8702
5	0,6316	1,0412	1,7624	5,0016
10	0,5827	0,3208	2,032	5,5218
15	0,5756	1,9078	1,8185	3,6294

II.45. La matrice du coefficient de poisson Nu_{21} ($\text{Phi}=0$)

	1	0,75	0,5	0,25
0	0,4492	0,496	1,7543	4,8925
5	0,6432	1,1232	1,9682	4,8782
10	0,4753	0,8582	1,9415	4,7642
15	0,3617	1,7032	1,6148	5,1888

II.46. La matrice du coefficient de poisson Nu_{21} ($\text{Phi}=5$)

	1	0,75	0,5	0,25
0	0,396	0,5266	1,6956	4,6469
5	0,5218	1,153	1,9499	5,0221
10	0,7167	0,7313	1,3459	6,2684
15	0,5696	1,7719	1,8596	3,9482

II.47. La matrice du coefficient de poisson Nu_{21} ($\text{Phi}=10$)

	1	0,75	0,5	0,25
0	0,4564	0,5748	1,6254	2,849
5	0,5174	0,9479	2,2754	3,2164
10	0,6876	1,2903	2,413	3,6071
15	0,7942	1,773	1,9411	4,2201

II.48. La matrice du coefficient de poisson Nu_{21} ($\text{Psi}=15$)

Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire

Les Matrices du module de glissement G_{21} :

	0	5	10	15
0	0,0052	0,0027	0,0029	0,0055
5	0,0052	0,0028	0,0028	0,0058
10	0,0052	0,0025	0,0028	0,0061
15	0,0052	0,0029	0,0029	0,0067

II.49. La matrice du module de glissement G_{21} ($R=0.25$)

	0	5	10	15
0	0,0136	0,0087	0,0054	0,0042
5	0,0139	0,0086	0,0055	0,0041
10	0,0135	0,0085	0,0053	0,0017
15	0,0129	0,0095	0,0057	0,005

II.50. La matrice du module de glissement G_{21} ($R=0.5$)

	0	5	10	15
0	0,0206	0,0173	0,0114	0,0086
5	0,0184	0,0156	0,0099	0,0081
10	0,016	0,0141	0,0082	0,0069
15	0,0127	0,0113	0,0081	0,0066

II.51. La matrice du module de glissement G_{21} ($R=0.75$)

	0	5	10	15
0	0,0193	0,0165	0,0134	0,0106
5	0,0167	0,014	0,0121	0,0099
10	0,0136	0,0122	0,0106	0,0091
15	0,0101	0,0099	0,0092	0,0087

II.52. La matrice du module de glissement G_{21} ($R=1$)

	1	0,75	0,5	0,25
0	0,0193	0,0206	0,0136	0,0052
5	0,0167	0,0184	0,0139	0,0052
10	0,0136	0,016	0,0135	0,0052
15	0,0101	0,0127	0,0129	0,0052

II.53. La matrice du module de glissement G_{21} ($\Psi=0$)

	1	0,75	0,5	0,25
0	0,0165	0,0173	0,0087	0,0027
5	0,014	0,0156	0,0086	0,0028
10	0,0122	0,0141	0,0085	0,0025
15	0,0099	0,0113	0,0095	0,0029

II.54. La matrice du module de glissement G_{21} ($\Psi=5$)

	1	0,75	0,5	0,25
0	0,0134	0,0114	0,0054	0,0029
5	0,0121	0,0099	0,0055	0,0028
10	0,0106	0,0082	0,0053	0,0028
15	0,0092	0,0081	0,0057	0,0029

II.55. La matrice du module de glissement G_{21} ($\Psi=10$)

	1	0,75	0,5	0,25
0	0,0106	0,0086	0,0042	0,0055
5	0,0099	0,0081	0,0041	0,0058
10	0,0091	0,0069	0,0017	0,0061
15	0,0087	0,0066	0,005	0,0067

II.56. La matrice du module de glissement G_{21} ($\Psi=15$)

	1	0,75	0,5	0,25
0	0,0193	0,0206	0,0136	0,0052
5	0,0165	0,0173	0,0087	0,0027
10	0,0134	0,0114	0,0054	0,0029
15	0,0106	0,0086	0,0042	0,0055

II.57. La matrice du module de glissement G_{21} ($\Phi=0$)

	1	0,75	0,5	0,25
0	0,0167	0,0184	0,0139	0,0052
5	0,014	0,0156	0,0086	0,0028
10	0,0121	0,0099	0,0055	0,0028
15	0,0099	0,0081	0,0041	0,0058

II.58. La matrice du module de glissement G_{21} ($\Phi=5$)

Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire

	1	0,75	0,5	0,25
0	0,0136	0,016	0,0135	0,0052
5	0,0122	0,0141	0,0085	0,0025
10	0,0106	0,0082	0,0053	0,0028
15	0,0091	0,0069	0,0017	0,0061

II.59. La matrice du module de glissement G_{21} ($\Phi=10$)

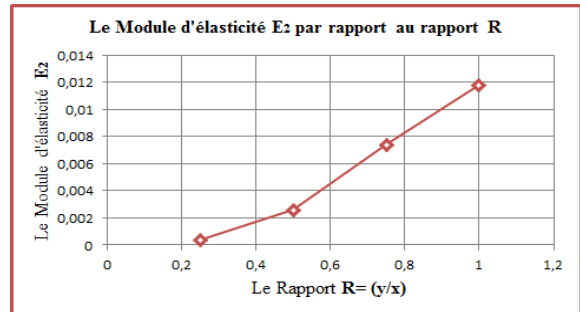
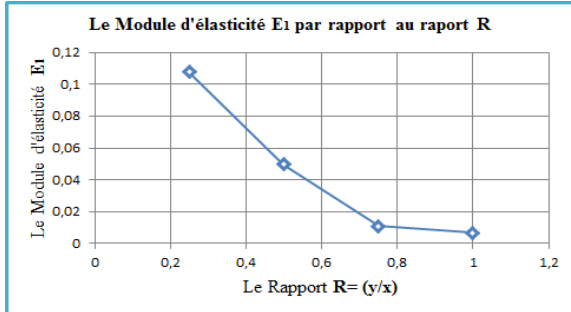
	1	0,75	0,5	0,25
0	0,0101	0,0127	0,0129	0,0052
5	0,0099	0,0113	0,0095	0,0029
10	0,0092	0,0081	0,0057	0,0029
15	0,0087	0,0066	0,005	0,0067

II.60. La matrice du module de glissement G_{21} ($\Phi=15$)

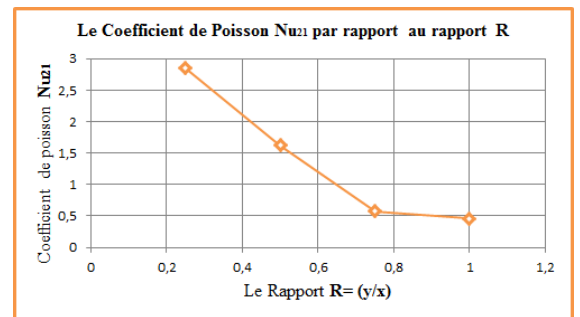
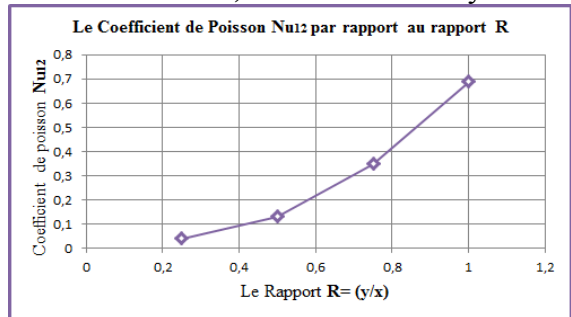
ANNEXE E

L'effet de R :

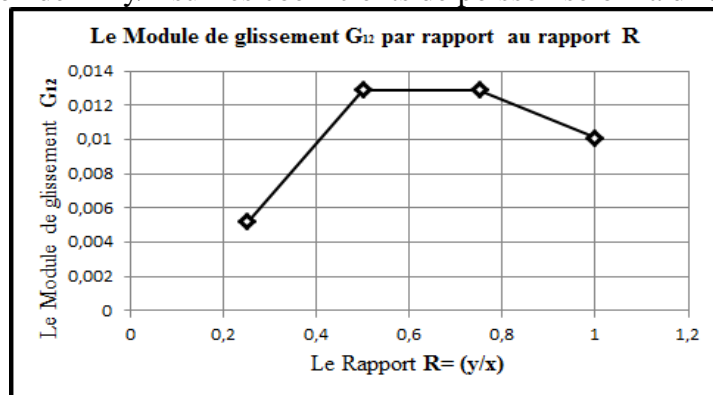
Pour : $\Psi=0, \phi=15$



a) Variation de $R=y/x$ sur le module d'élasticité selon 1 et 2.



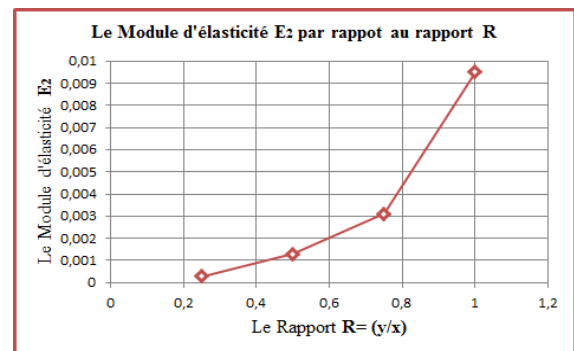
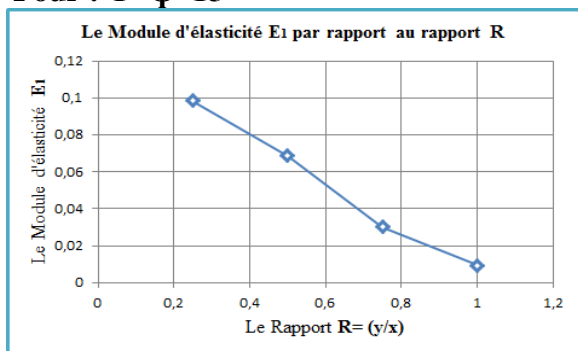
b) Variation de $R=y/x$ sur les coefficients de poisson selon la direction 1 et 2.



c) variation du rapport R sur module de cisaillement G12.

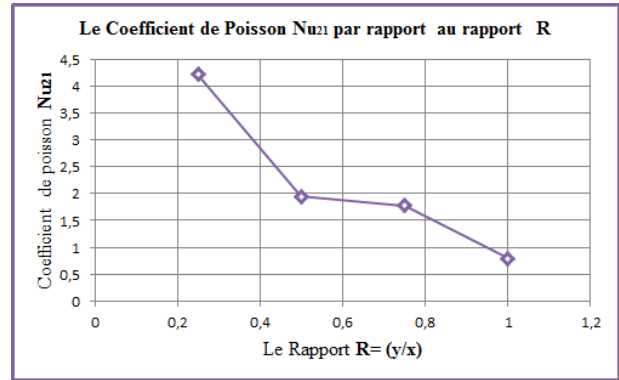
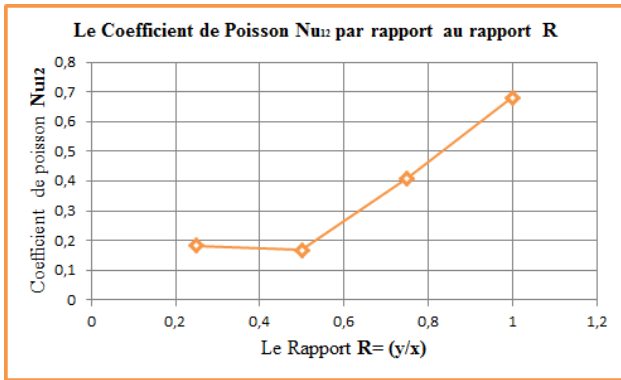
Figure II-1 : influence du rapport $R=y/x$

Pour : $\Psi=\phi=15$

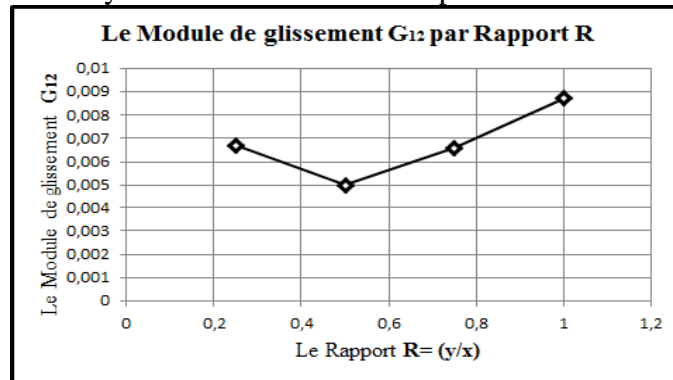


a) Variation de $R=y/x$ sur le module d'élasticité selon 1 et 2.

Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire



b) Variation de $R = y/x$ sur les coefficients de poisson selon la direction 1 et 2.

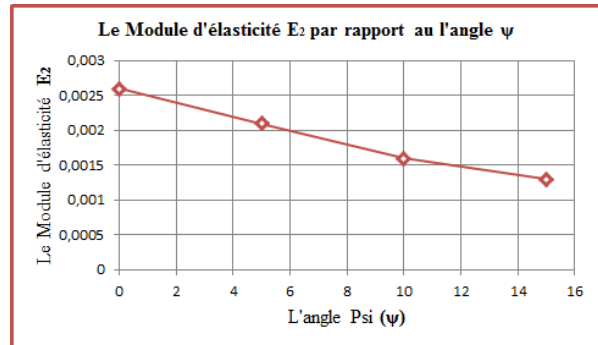
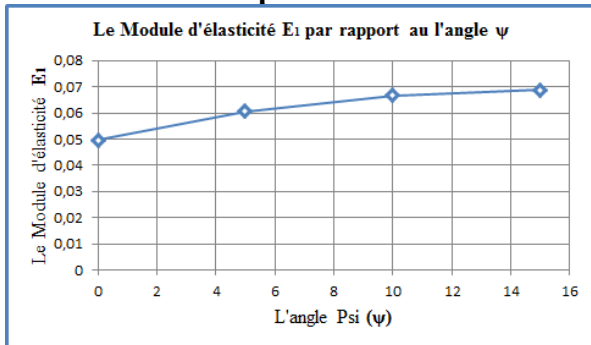


c) variation du rapport R sur module de cisaillement G_{12} .

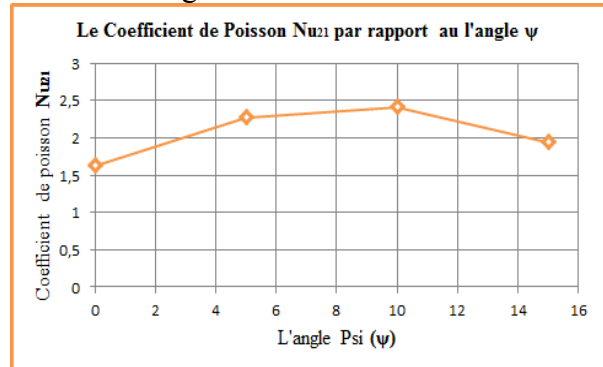
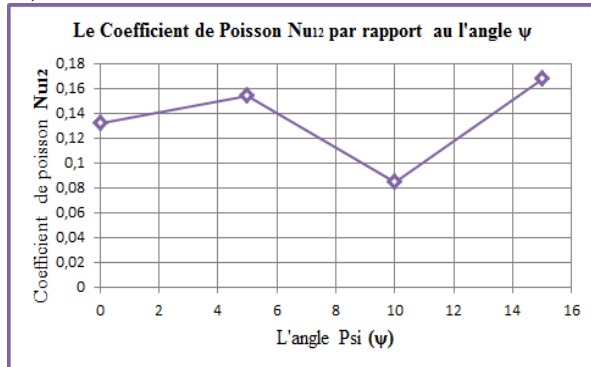
Figure II-2 : influence du rapport $R = y/x$

L'effet de Psi

Pour : $R=0.5$ et $\phi=15$

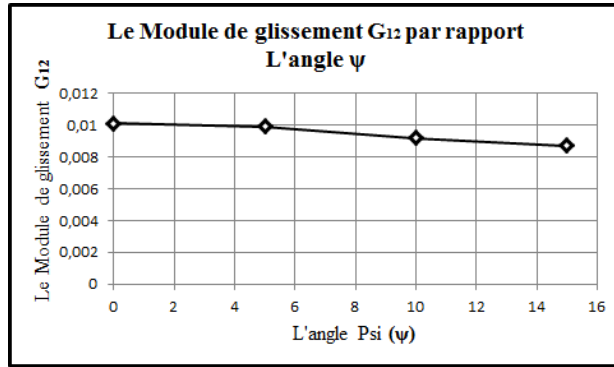


a) Variation des modules d'élasticité E_1 et E_2 en fonction l'angle Ψ sur le selon la direction 1 et 2.



b) Variation des coefficients de Poisson Nu_{12} et Nu_{21} en fonction de Ψ .

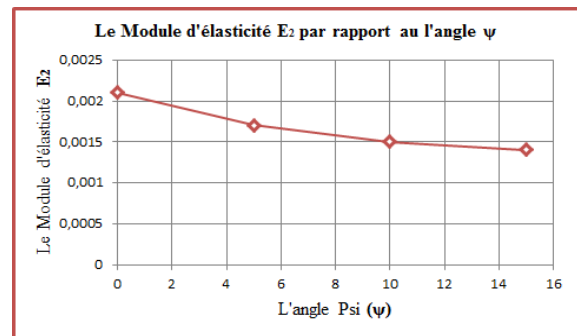
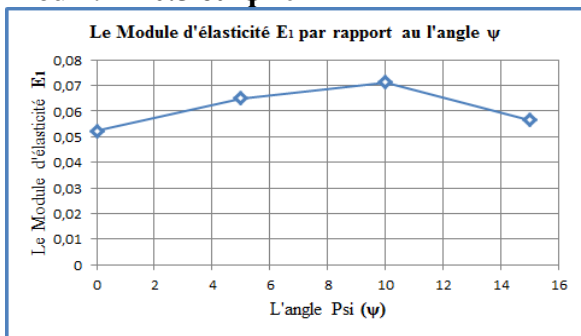
Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire



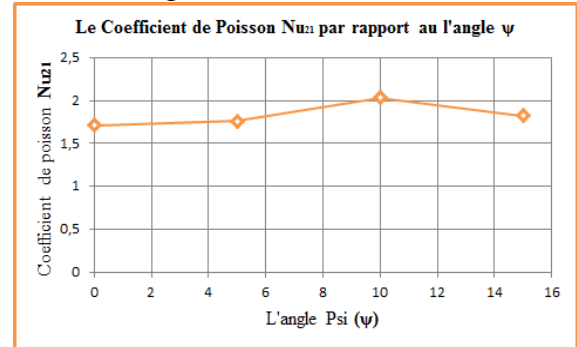
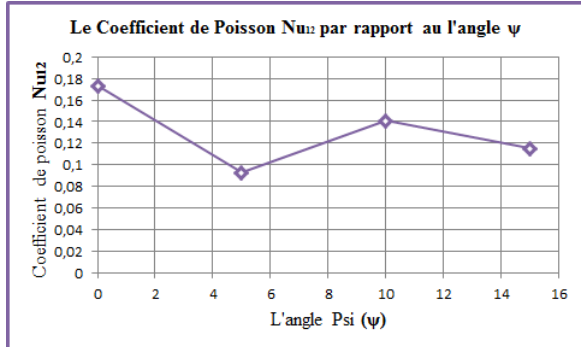
c) Variation du module de cisaillement G_{12} en fonction de Ψ .

Figure II-3 : Effet de l'angle Ψ sur E_1 , E_2 , Nu_{12} , Nu_{21} et G_{12} pour R et ϕ fixes.

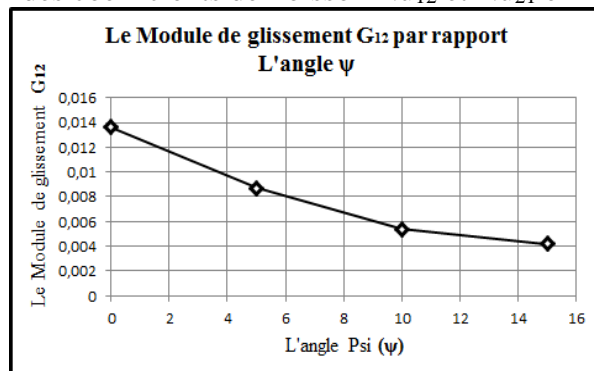
Pour : $R=0.5$ et $\phi=0$



a) Variation des modules d'élasticité E_1 et E_2 en fonction l'angle Ψ sur le selon la direction 1 et 2.



b) Variation des coefficients de Poisson Nu_{12} et Nu_{21} en fonction de Ψ .

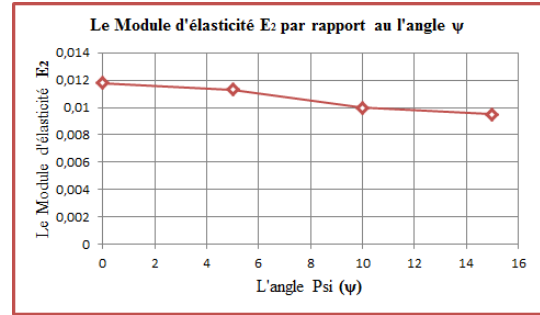
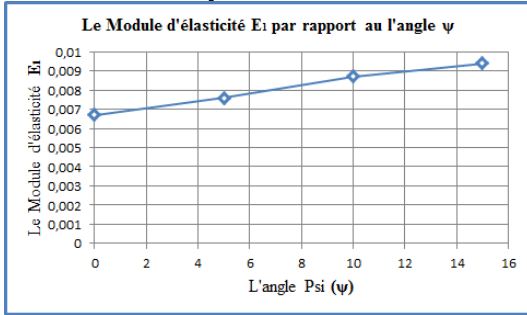


c) Variation du module de cisaillement G_{12} en fonction de Ψ .

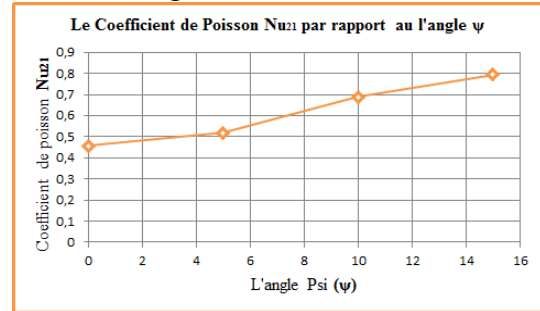
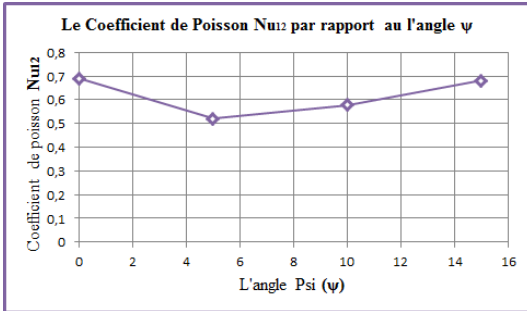
Figure II-4 : Effet de l'angle Ψ sur E_1 , E_2 , Nu_{12} , Nu_{21} et G_{12} pour R et ϕ fixes.

Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire

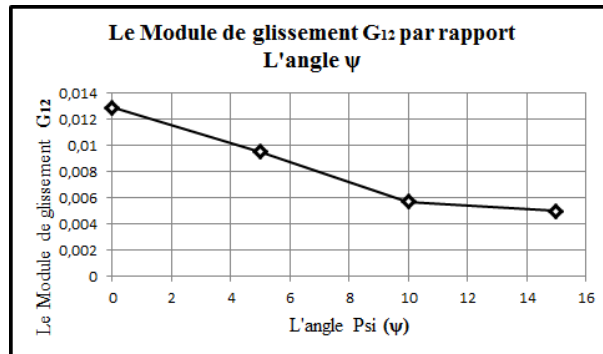
Pour : $R=0.5$ et $\phi=15$



a) Variation des modules d'élasticité E1 et E2 en fonction l'angle Ψ sur le selon la direction 1 et 2.



b) Variation des coefficients de Poisson Nu_{12} et Nu_{21} en fonction de Ψ .

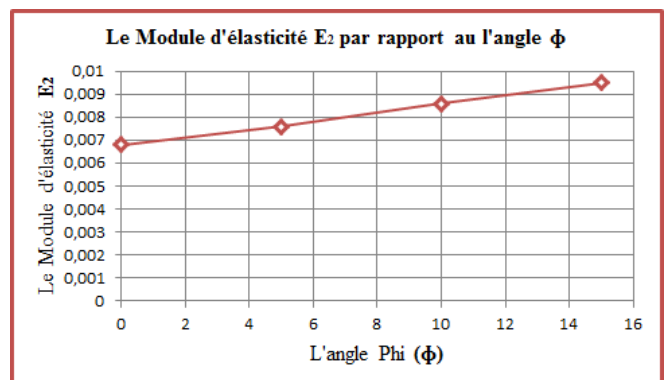
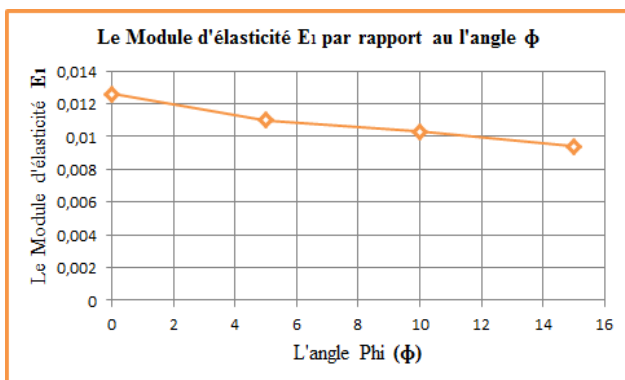


c) Variation du module de cisaillement G_{12} en fonction de Ψ .

Figure II-5 : Effet de l'angle Ψ sur E_1 , E_2 , Nu_{12} , Nu_{21} et G_{12} pour R et ϕ fixes.

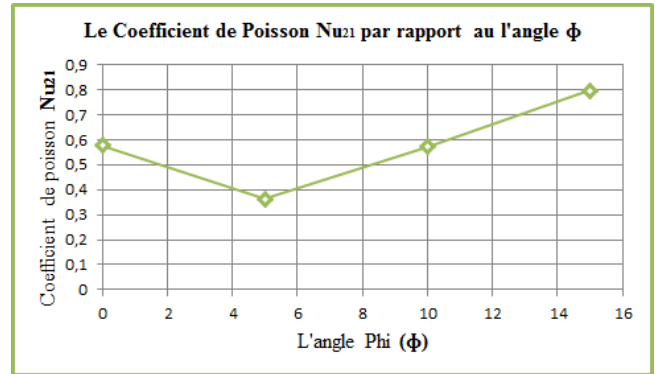
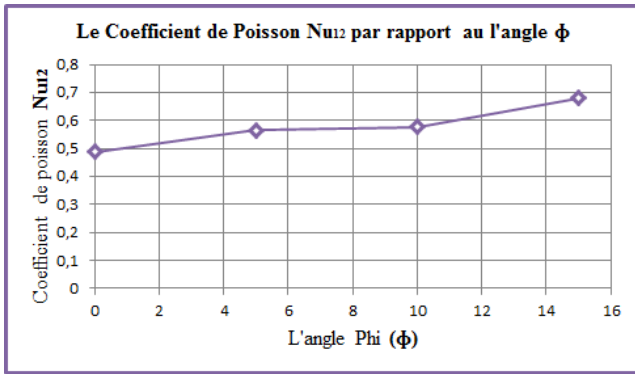
L'effet de Phi

Pour : $R=1$ et $\Psi=15$

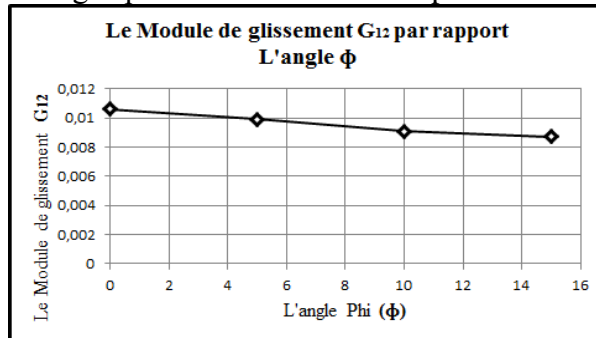


a) Variation de l'angle ϕ sur le module d'élasticité selon la direction 1 et 2.

Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire



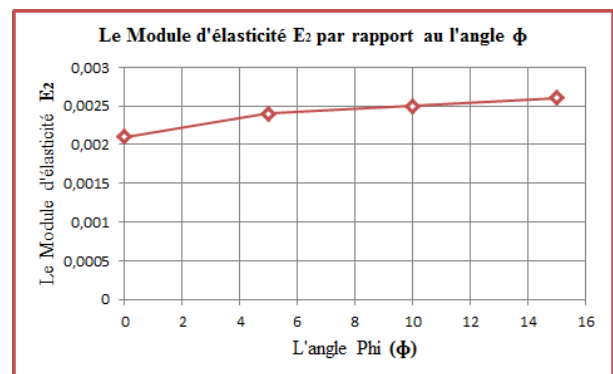
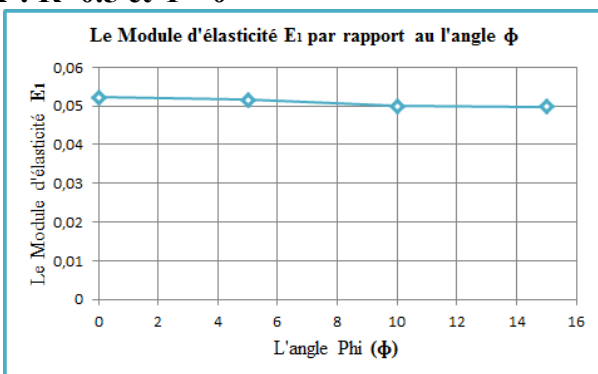
b) Variation de l'angle ϕ sur les coefficients de poissons selon la direction 1 et 2.



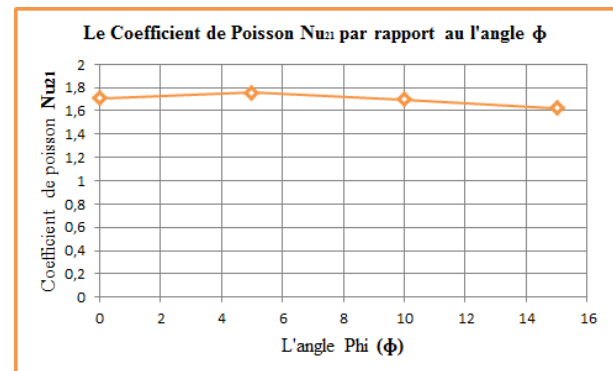
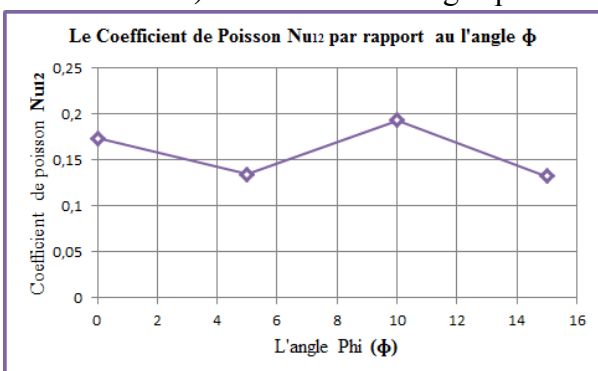
c) Variation de l'angle ϕ sur le module de cisaillement selon la direction 1.

Figure II-6 : effet de phi

Pour : $R=0.5$ et $\Psi=0$

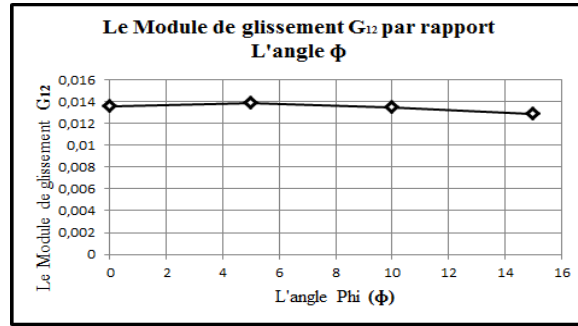


a) Variation de l'angle ϕ sur le module d'élasticité selon la direction 1 et 2.



b) Variation de l'angle ϕ sur les coefficients de poissons selon la direction 1 et 2.

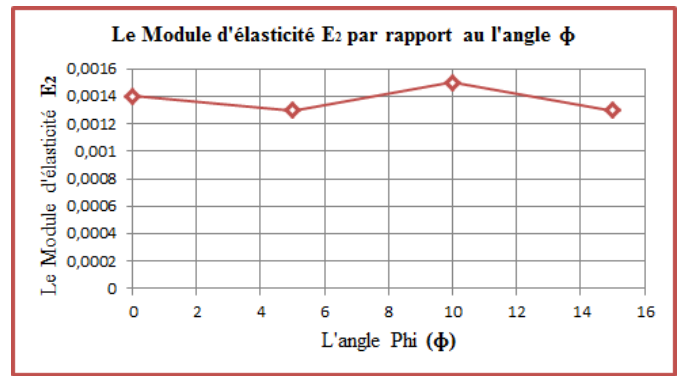
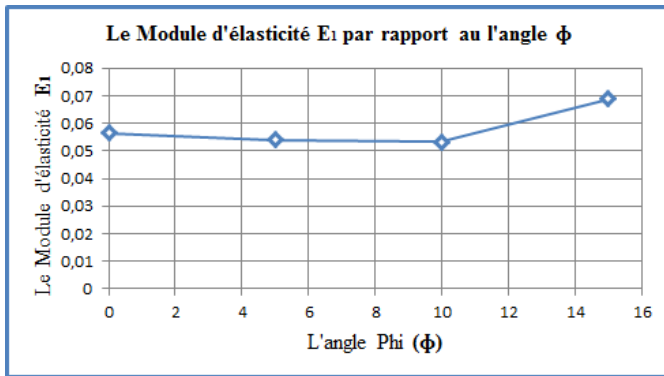
Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire



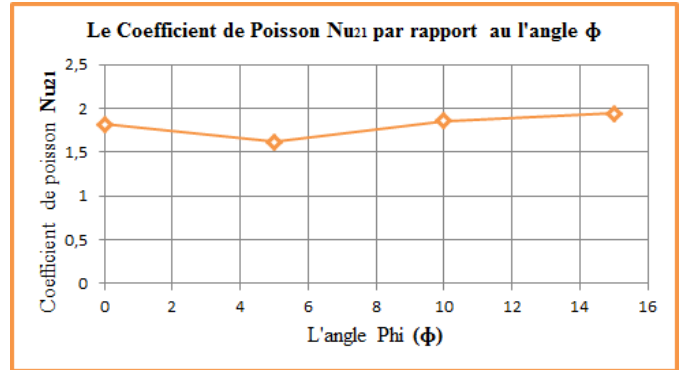
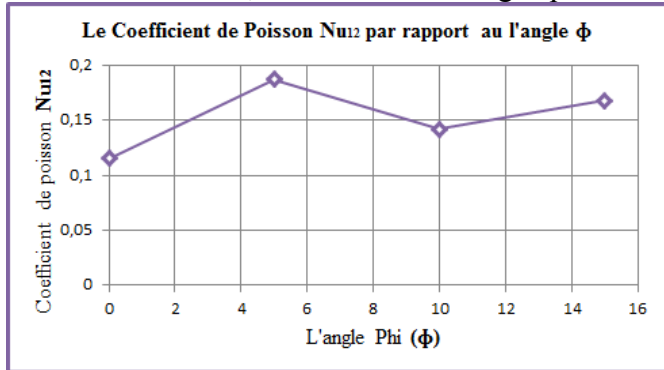
c) Variation de l'angle ϕ sur le module de cisaillement selon la direction 1.

Figure II-7 : effet de phi

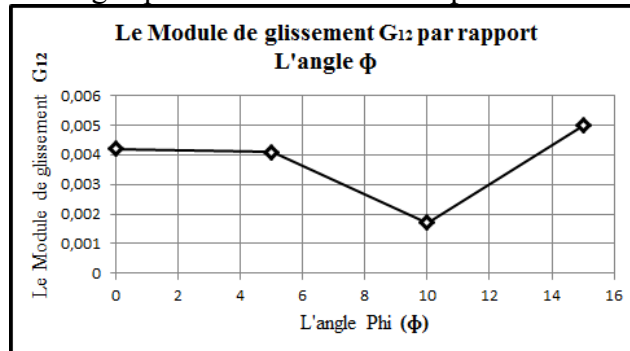
Pour : $R=0.5$ et $\Psi =15$



a) Variation de l'angle ϕ sur le module d'élasticité selon la direction 1 et 2.



b) Variation de l'angle ϕ sur les coefficients de poissons selon la direction 1 et 2.



c) Variation de l'angle ϕ sur le module de cisaillement selon la direction 1.

Figure II-8 : effet de phi

Conclusion générale

&

Perspectives

Dans ce travail nous avons procédé à une étude des cellules en nid d'abeilles de forme hexagonale régulière, constituant la partie principale des matériaux cellulaires, qui à leur tour constituent les matériaux les plus récents des matériaux composites. L'étude s'est concentrée principalement sur des simulations d'essais de traction sur des cellules du type suscitée. Ces simulations ont données des résultats très acceptables comparés à ceux obtenus par la méthode multifactorielle. Dans un premier temps, nous avons fait varier le rapport R des dimensions de la cellule, tout en gardant fixes les angles d'ouvertures phi et psi . dans un deuxième temps, nous avons fait varier phi tout en gardant fixes R et l'angle psi . enfin, nous avons fait varier psi, tout en gardant fixes R et phi. Et tout ceci, pour en voir l'influence sur les propriétés mécaniques de la cellule ; E_1 , E_2 , Nu_{12} , Nu_{21} et autre G_{12} .

Les résultats ont révélés de fortes dépendances pour certaines propriétés et faibles pour d'autres. En exemple ; le module d'élasticité longitudinale E_1 qui a montré une forte dépendance de R. par contre, le module de Young E_2 a affiché, quant à lui, une légère augmentation pour R croissant. Les résultats ont donnés, aussi, des courbes, traçant la dépendance du module transversal G_{12} présentant soit un maximum ou un minimum, synonyme d'existence d'une valeur optimale. L'existence de ces valeurs optimales a été confirmé par la méthode d'optimisation multifactorielle.

A la fin de cette étude, nous concluons les points suivants :

- Les Matériaux cellulaires sont largement utilisés dans les industries modernes. Grace à leur propriétés mécaniques importantes, ces matériaux ont une bonne résistance par rapport à leur volume, ces matériaux sont aussi de bons isolants thermiques et acoustiques.
- Les écarts entre les résultats que nous avons obtenus à partir de la simulation et les résultats calculés avec la méthode multifactorielle sont acceptables, et les résultats sont presque égaux.
- Les simulations d'essais que nous avons appliqué ont permis d'identifier les différents paramètres influents sur le comportement mécanique. Les résultats présentent des impacts tout au long de la taille du ligament de la cellule et les deux angles Phi et Psi sur les propriétés mécaniques. Ces trois paramètres ouvrent plusieurs nouvelles options des structures nid d'abeilles.
- A partir de notre étude la meilleure structure que nous trouvons est la structure d'essai 15 avec les paramètres suivants :

Le rapport $R = 1$, $\Psi = 15$, $\Phi = 10$.

Notre étude arrivant à son terme, les probabilités de mise au point de nouvelles structures sont grandes, variées et larges, nous visons, en perspective, à poursuivre les travaux dans le même axe dans le but de trouver de meilleurs résultats pour des propriétés dans et hors plan de la cellule hexagonale régulière et irrégulière.

Listes des figures

Chapitre I : Généralités des matériaux cellulaires	
Figure 1-1 : Matériau composite à structure sandwich.....	03
Figure 1-2 : Matériau composite à structure multicouches.....	03
Figure 1-3 : matériau sandwich (peau, âme).....	03
Figure 1-4 : d'une âme pleine.....	04
Figure 1-5 : âme creuse.....	04
Figure 1-6 : âme en balsa.....	04
Figure 1-7 : âme structure nid d'abeille.....	05
Figure 1-8 : quelques matériaux cellulaires.....	05
Figure 1-9 : structure nid d'abeilles.....	07
Figure 1-10 : matériau orthotrope.....	08
Figure 1-11: matrice de matériau orthotrope.....	09
Chapitre II : L'homogénéisation	
Figure II-1 : La structure obtenue par MATLAB.....	11
Figure II-2 : Structure Hexagonal réalisé par le code MATLAB.....	13
Figure II-3 : Comparaison entre les résultats obtenus par Code ANSYS et les résultats Calculés.....	13
Figure II-4 : influence du rapport $R = y/x$	14
Figure II-5 : influence du rapport R pour $\Psi=15$ et $\phi=0$	15
Figure II-6 :Les différents graphs de la module d'Young $E1$ par rapport R	16
Figure II-7 :Influence de la variation du rapport $R = y/x$ sur le module d'élasticité selon la direction 2.....	16
Figure II-8 : les différents graphs de les coefficients des poisson par rapport R	16
FigureII-9 : les différents graphs de les coefficients des poisson par rapport R	17
FigureII-10 : les différents graphs de le module des cisaillements.....	17
Figure II-12 : Effet de l'angle Ψ sur $E1$, $E2$, $Nu12$, $Nu21$ et $G12$ pour R et ϕ fixes.....	18
Figure II-13 : Comparaison entre les modules d'Young $E1$ par rapport l'angle Ψ	18
Figure II-14 : Comparaison entre les modules d'Young $E2$ par rapport l'angle Ψ	19

Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire

Figure II-15 : Comparaison des coefficients des poisson ν_{12} par rapport l'angle Ψ	19
Figure II-16 : Comparaison des coefficients des poisson ν_{21} par rapport l'angle Ψ	19
Figure II-17 : Comparaison des modules de cisaillement par rapport l'angle Ψ	20
Figure II-18 : effet de ϕ sur E_1 , E_2 , ν_{12} , ν_{21} et G_{12}	21
Figure II-19 : Comparaison entre les courbes de différents E_1 par rapport Φ	21
Figure II-20 : Comparaison des différents graphes des modules d'Young E_2 par rapport Φ	21
Figure II-21 : Différents graphes des coefficients de poisson par rapport à l'angle Φ	22
Figure II-22 : Différents graphes des coefficients de poisson par rapport l'angle Φ	22
Figure II-23 : les différents graphes de le module des cisaillements.....	22
Figure II-24 : Les différents graphes du module d'élasticité E_1 Optimisés.....	23
Figure II-25 : Les différents graphes du module d'élasticité E_2 Optimisés.....	24
Figure II-26 : Les différents graphes du coefficient de poisson ν_{1-2} Optimisés.....	24
Figure II-27 : Les différents graphes du coefficient de poisson ν_{2-1} Optimisés.....	25
Figure II-28 : Les différents graphes du module de cisaillement G_{1-2} Optimisés.....	26

Annexe

Annexe A	
I-1. Tableau des résultats d'ANSYS.....	28
Annexe B	
I.2. Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport R avec ($\Psi=0, \Phi=0$).....	28
I.3. Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport R avec ($\Psi=0, \Phi=5$).....	28
I.4. Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport R avec ($\Psi=0, \Phi=10$).....	28
I.5. Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport R avec ($\Psi=0, \Phi=15$).....	29
I.6. Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport R avec ($\Psi=5, \Phi=0$).....	29
I.7. Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport R avec ($\Psi=5, \Phi=5$).....	29
I.8. Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport R avec ($\Psi=5, \Phi=10$).....	29
I.9. Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport R avec ($\Psi=5, \Phi=15$).....	29
I.10. Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport R avec ($\Psi=10, \Phi=0$).....	29
I.11. Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport R avec ($\Psi=10, \Phi=5$).....	29
I.12. Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport R avec ($\Psi=10, \Phi=10$).....	30
I.13. Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport R avec ($\Psi=10, \Phi=15$).....	30
I.14. Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport R avec ($\Psi=15, \Phi=0$).....	30
I.15. Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport R avec ($\Psi=15, \Phi=5$).....	30
I.16. Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport R avec ($\Psi=15, \Phi=10$).....	30
I.17. Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport R avec ($\Psi=15, \Phi=15$).....	30
I.18. Le tableau des modules des élasticités E_1 par rapport R.....	31
I.19. Le tableau des modules des élasticités E_2 par rapport R.....	31
I.20. Le tableau des coefficients des poissons ν_{12} par rapport R.....	31
I.21. Le tableau des coefficients des poissons ν_{21} par rapport R.....	32
I.22. Le tableau des modules des glissements G_{21} par rapport R.....	32
I.23. Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport l'angle Ψ avec ($R=1, \Phi=0$).....	32

Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire

I.24.Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport l'angle Psi avec $(R=1, \Phi=5)$	32
I.25.Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport l'angle Psi avec $(R=1, \Phi=10)$	33
I.26.Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport l'angle Psi avec $(R=1, \Phi=15)$	33
I.27.Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport l'angle Psi avec $(R=0.75, \Phi=0)$	33
I.28.Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport l'angle Psi avec $(R=0.75, \Phi=5)$	33
I.29.Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport l'angle Psi avec $(R=0.75, \Phi=10)$	33
I.30.Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport l'angle Psi avec $(R=0.75, \Phi=15)$	33
I.31.Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport l'angle Psi avec $(R=0.5, \Phi=0)$	33
I.32.Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport l'angle Psi avec $(R=0.5, \Phi=5)$	34
I.33.Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport l'angle Psi avec $(R=0.5, \Phi=10)$	34
I.34.Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport l'angle Psi avec $(R=0.5, \Phi=15)$	34
I.35.Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport l'angle Psi avec $(R=0.25, \Phi=0)$	34
I.36.Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport l'angle Psi avec $(R=0.25, \Phi=5)$	34
I.37.Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport l'angle Psi avec $(R=0.25, \Phi=10)$	34
I.38.Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport l'angle Psi avec $(R=0.25, \Phi=15)$	34
II.39.Le tableau des modules des élasticités E_2 par rapport l'angle Psi.....	35
II.40.Le tableau des coefficients des poissons ν_{12} par rapport l'angle Psi.....	35
II.41.Le tableau des coefficients des poissons ν_{21} par rapport l'angle Psi.....	35
II.42.Le tableau des modules des glissements G_{12} par rapport l'angle Psi.....	35
I.43.Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport l'angle Phi avec $(R=1, \Psi=0)$	36
I.44.Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport l'angle Phi avec $(R=1, \Psi=5)$	36
I.45.Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport l'angle Phi avec $(R=1, \Psi=10)$	36
I.46.Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport l'angle Phi avec $(R=1, \Psi=15)$	37
I.47.Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport l'angle Phi avec $(R=0.75, \Psi=0)$	37
I.48.Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport l'angle Phi avec $(R=0.75, \Psi=5)$	37
I.49.Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport l'angle Phi avec $(R=0.75, \Psi=10)$	37
I.50.Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport l'angle Phi avec $(R=0.75, \Psi=15)$	37

Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire

I.51. Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport l'angle Φ avec ($R=0.5, \Psi=0$).....	37
I.52. Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport l'angle Φ avec ($R=0.5, \Psi=5$).....	37
I.53. Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport l'angle Φ avec ($R=0.5, \Psi=10$).....	38
I.54. Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport l'angle Φ avec ($R=0.5, \Psi=15$).....	38
I.55. Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport l'angle Φ avec ($R=0.25, \Psi=0$).....	38
I.56. Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport l'angle Φ avec ($R=0.25, \Psi=5$).....	38
I.57. Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport l'angle Φ avec ($R=0.25, \Psi=10$).....	38
I.58. Le tableau des variations $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ par rapport l'angle Φ avec ($R=0.25, \Psi=15$).....	38
II.59. Le tableau des modules des élasticités E_1 par rapport l'angle Φ	38
II.60. Le tableau des modules des élasticités E_2 par rapport l'angle Φ	39
II.62. Le tableau des modules des élasticités ν_{21} par rapport l'angle Φ	39
II.63. Le tableau des modules des élasticités G_{12} par rapport l'angle Φ	40
Annexe C	
II.64. Le tableau de comparaison entre les résultats obtenus et résultats calculé du module d'élasticités E_1	40
II.65. Le tableau de comparaison entre les résultats obtenus et résultats calculé du module d'élasticités E_2	40
II.66. Le tableau de comparaison entre les résultats obtenus et résultats calculé du coefficient de poisson ν_{12}	40
II.67. Le tableau de comparaison entre les résultats obtenus et résultats calculé du coefficient de poisson ν_{21}	40
II.68. Le tableau de comparaison entre les résultats obtenus et résultats calculé du module de glissement G_{12}	41
Annexe D	
II.1. La matrice du module d'élasticité E_1 ($R=0.25$).....	41
II.2. La matrice du module d'élasticité E_1 ($R=0.5$).....	41
II.3. La matrice du module d'élasticité E_1 ($R=0.75$).....	41
II.4. La matrice du module d'élasticité E_1 ($R=1$).....	41
II.5. La matrice du module d'élasticité E_1 ($\Psi=0$).....	41
II.6. La matrice du module d'élasticité E_1 ($\Psi=5$).....	41

Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire

II.7. La matrice du module d'élasticité E_1 ($\Psi=10$).....	41
II.8. La matrice du module d'élasticité E_1 ($\Psi=15$).....	41
II.9. La matrice du module d'élasticité E_1 ($\Phi=0$).....	42
II.10. La matrice du module d'élasticité E_1 ($\Phi=5$).....	42
II.11. La matrice du module d'élasticité E_1 ($\Phi=10$).....	42
II.12. La matrice du module d'élasticité E_1 ($\Phi=15$).....	42
II.13. La matrice du module d'élasticité E_2 ($R=0.25$).....	42
II.14. La matrice du module d'élasticité E_2 ($R=0.5$).....	42
II.15. La matrice du module d'élasticité E_2 ($R=0.75$).....	42
II.16. La matrice du module d'élasticité E_2 ($R=1$).....	42
II.17. La matrice du module d'élasticité E_2 ($\Psi=0$).....	42
II.18. La matrice du module d'élasticité E_2 ($\Psi=5$).....	42
II.19. La matrice du module d'élasticité E_2 ($\Psi=10$).....	43
II.20. La matrice du module d'élasticité E_2 ($\Psi=15$).....	43
II.21. La matrice du module d'élasticité E_2 ($\Phi=0$).....	43
II.22. La matrice du module d'élasticité E_2 ($\Phi=5$).....	43
II.23. La matrice du module d'élasticité E_2 ($\Phi=10$).....	43
II.24. La matrice du module d'élasticité E_2 ($\Phi=15$).....	43
II.25. La matrice du coefficient de poisson ν_{12} ($R=0.25$).....	43
II.26. La matrice du coefficient de poisson ν_{12} ($R=0.5$).....	43
II.27. La matrice du coefficient de poisson ν_{12} ($R=0.5$).....	43
II.28. La matrice du coefficient de poisson ν_{12} ($R=1$).....	43
II.29. La matrice du coefficient de poisson ν_{12} ($\Psi=0$).....	44
II.30. La matrice du coefficient de poisson ν_{12} ($\Psi=5$).....	44
II.31. La matrice du coefficient de poisson ν_{12} ($\Psi=10$).....	44
II.32. La matrice du coefficient de poisson ν_{12} ($\Psi=15$).....	44
II.33. La matrice du coefficient de poisson ν_{12} ($\Phi=0$).....	44
II.34. La matrice du coefficient de poisson ν_{12} ($\Phi=5$).....	44

Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire

II.35. La matrice du coefficient de poisson ν_{12} ($\Phi=10$).....	44
II.36. La matrice du coefficient de poisson ν_{12} ($\Phi=15$).....	44
II.37. La matrice du coefficient de poisson ν_{21} ($R=0.25$).....	44
II.38. La matrice du coefficient de poisson ν_{21} ($R=0.5$).....	44
II.39. La matrice du coefficient de poisson ν_{21} ($R=0.75$).....	45
II.40. La matrice du coefficient de poisson ν_{21} ($R=1$).....	45
II.41. La matrice du coefficient de poisson ν_{21} ($\Psi=0$).....	45
II.42. La matrice du coefficient de poisson ν_{21} ($\Psi=5$).....	45
II.43. La matrice du coefficient de poisson ν_{21} ($\Psi=10$).....	45
II.44. La matrice du coefficient de poisson ν_{21} ($\Psi=15$).....	45
II.45. La matrice du coefficient de poisson ν_{21} ($\Phi=0$).....	45
II.46. La matrice du coefficient de poisson ν_{21} ($\Phi=5$).....	45
II.47. La matrice du coefficient de poisson ν_{21} ($\Phi=10$).....	45
II.48. La matrice du coefficient de poisson ν_{21} ($\Psi=15$).....	45
II.49. La matrice du module de glissement G_{21} ($R=0.25$).....	46
II.50. La matrice du module de glissement G_{21} ($R=0.5$).....	46
II.51. La matrice du module de glissement G_{21} ($R=0.75$).....	46
II.52. La matrice du module de glissement G_{21} ($R=1$).....	46
II.53. La matrice du module de glissement G_{21} ($\Psi=0$).....	46
II.54. La matrice du module de glissement G_{21} ($\Psi=5$).....	46
II.55. La matrice du module de glissement G_{21} ($\Psi=10$).....	46
II.56. La matrice du module de glissement G_{21} ($\Psi=15$).....	46
II.57. La matrice du module de glissement G_{21} ($\Phi=0$).....	46
II.58. La matrice du module de glissement G_{21} ($\Phi=5$).....	46
II.59. La matrice du module de glissement G_{21} ($\Phi=10$).....	47
II.60. La matrice du module de glissement G_{21} ($\Phi=15$).....	47
Annexe E	
Figure II-1 : influence du rapport $R = y/x$	48

Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire

Figure II-2 : influence du rapport $R = y/x$	49
Figure II-3 : Effet de l'angle Ψ sur $E1$, $E2$, $Nu12$, $Nu21$ et $G12$ pour R et ϕ fixes.....	50
Figure II-4 : Effet de l'angle Ψ sur $E1$, $E2$, $Nu12$, $Nu21$ et $G12$ pour R et ϕ fixes.....	50
Figure II-5 : Effet de l'angle Ψ sur $E1$, $E2$, $Nu12$, $Nu21$ et $G12$ pour R et ϕ fixes.....	51
Figure II-6 : effet de ϕ	52
Figure II-7 : effet de ϕ	53
Figure II-8 : effet de ϕ	53

Bibliographie

[1]- Homogénéisation numérique des matériaux cellulaires, ALILI Med Alhadi, KHABBAR Nesreddine. Thème de master. Ouargla 2013.

[2]- étude comparative et caractérisation mécanique de structure sandwich multicouche, Jameleddine ARBAOUI, 2009.

Simulation d'essai de traction pour matériau cellulaire

Résumé

Le matériau cellulaire a une grande importance en termes de la résistance, ainsi que la densité relative élevée, il est utilisé dans divers domaines de la technologie moderne.

On a étudié dans ce travail quelques généralités sur les matériaux cellulaires. Et nous avons passé en revue les différents types de matériaux cellulaires. Et pour cette étude, nous avons choisi les structures en nid d'abeille pour faire une simulation pour déterminer l'effet de les paramètres : le rapport R, Phi et Psi, sur les propriétés mécaniques (module de Young, module de cisaillement, et les coefficient de poisson).

Le résultat par la méthode multifactorielle confirmé de la présence de l'impact de les trois paramètres sur les propriétés mécaniques des matériaux cellulaires.

Mots clés: Matériaux composites, nid d'abeille, les matériaux cellulaires, Homogénéisation, Méthode multifactorielle.

المخلص

تعتبر المواد الخلوية ذات أهمية كبيرة من حيث المقاومة والكثافة النسبية العالية. كما أنها مستعملة في العديد من المجالات الصناعية الحديثة.

في هذا العمل تطرقنا لعموميات على المواد المركبة وخصوصا الخلوية منها. في دراستنا اخترنا بنية خلية النحل للقيام بمحاكاة لتجارب سحب لتحديد مدى تأثير كل من المعامل (أر) والزوايتين (في) و(بسي) على الخصائص الميكانيكية للبنية (معامل يونغ، معامل القطع، ومعامل بواسون).

النتائج المتحصل عليها عن طريق الطريقة متعددة العوامل أثبتت وجود تأثير للمعامل (أر) والزوايتين (في) و(بسي).

الكلمات الدالة : مواد مركبة، خلية النحل، التجانس، الطريقة متعددة العوامل.

Due to their high resistance comparing to their light weight, the cellular materials are widely used in various fields of the modern industry.

In this memoir, we've passed on some generalities about the cellular materials, we've seen their types and we've chose the honeycomb as our model in the simulation of the tensile test to determine the influence of the three settings (R report, and the two angles Psi and Phi) on the mechanical proprieties.

The results we got from the multi-factor method confirms that there is an influence of those three settings on the mechanical proprieties.

Key words : composites materials, honeycomb, cellular materials, homogenization, multi-factor method.