



MEMOIRE MASTER

Domaine : Science et Technologie

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Fabrication Mécanique et productique

Présenté par :

BENRAS Ahmed Fayçal

BARA Ibrahim

Thème

Modélisation d'une structure multicouche sous sollicitation mécanique par la méthode des éléments finis

12/06/2022

Devant le jury composé de :

Mme. REZGUI Imane	M.C.A	Président	UKM Ouargla
Mr. HECINI Adel	M .A.A	Encadreur	UKM Ouargla
Mr. BOUKHATEM Mourad	M.C.B	Examineur	UKM Ouargla

Année Universitaire : 2021/2022

Remerciements

Nous remercions, en premier lieu dieu qui nous a donné la force et le pouvoir pour effectuer ce travail.

Nous tenons à remercier très chaleureusement notre encadreur Mr : ADEL HECINI pour son aide, sa disponibilité et ses conseils tout au long de ce travail.

Nous remercions également Mr : BOUKHATEM.M et Mme : REZGUI.I Pour son aide précieuse et ses conseils judicieux.

Nous remercions très chaleureusement nos parents et toute la famille.

Un grand remerciement à tous les enseignants du département de Génie Mécanique et nos collègues et tous nos amis.

Dédicace

اللهم لك الحمد قبل أن ترضى ولك الحمد إذا رضيت ولك الحمد بعد الرضا، نحمد الله عز وجل أنه وفقنا في انجاز هذا العمل المتواضع الى قرة عيني الى من جعلت الجنة تحت قدميها ... الى التي حرمت نفسها واعطتني، ومن نبع حنانها سقتني الى من وهبتني الحياة
أمي العزيزة حفصها الله

الى من يزيدني اتسالي له وذكره فخرا واعتزاز وإلى من تعب من اجل تربيتي وتعليمي، وجعلني أكبر وازكى وأظهر فضيلة ابي العزيز

إلى إخوتي الأحباء ميساء رتاج، دعاء السجود، هيبه الرحمان، شريفة، منال، الياس، زوبر،

واعز أصدقائي زكريا، حمادة، عبد العزيز، عبد الرؤوف، مراد

إلى كل من شاءت الأقدار أن تجمعني بهم الحياة الدراسية ونجعل منهم أشقاء

وأشكر الأستاذ الكريم عادل حسيني الذي لم يبخل علينا بتوجيهاته ونصائحه القيمة التي كانت عوناً في اتمام هذه المذكرة

أهدي هادا العمل لوجه الله تعالى راجيا منه أن يتقبل منا ويجعل ثوبه في ميزان أعمالنا

BARA Ibrahim

نحمد الله عز وجل الذي وفقنا في اتمام هذا البحث العلمي والذي الهمنه الصحة والعافية والعزيمة،
فالحمد لله حمدا كثيرا،

إلى من أفضلها على نفسي ولما لا فلقد ضحيت من أجلي، ولم تدخر جهداً في سبيل إسعادي على الدوام (أبي الحبيبة)

.نسير في دروب الحياة، ويقتي من يسيطر على أذهاننا في كل مسلك نسلكه

صاحب الوجه الطيب والأفعال الحسنة، فلم يبخل علي طيلة حياته (والذي العزيز)

الى روح جدي وجدتي رحمهما الله، والى جدي وجدتي بارك الله في أعمالهم

إلى إخوتي واعمالي و اخوالي

واتقدم لجزيل الشكر والتقدير والاحترام الى الاستاذ الدكتور حسيني عادل

إلى أصدقائي وجميع من وقفوا بجواري وساعدوني بكل ما يملكون وفي أصعدة كثيرة.

أهدي هادا العمل لوجه الله تعالى راجيا منه أن يتقبل منا ويجعل ثوبه في ميزان أعمالنا

BENRAS Ahmed Fayçal

Sommaire

Remerciements	II
Dédicace	III
Sommaire	IV
liste des Figure.....	VII
Introduction générale	1
Chapitre I	2
généralités Les matériaux composites	2
I.1. Introduction	3
I.2. Définition d'un composite	3
I.2.1. La matrice	3
I.2.2. Les renforts	4
I.3. Structure des matériaux composites	5
I.3.1. Monocouches :	5
I.3.2. Les stratifiées	5
I.4. Structure sandwich	7
I.5 Type de matériaux composites	8
I.5.1 Les composites à grande diffusion	8
I.5.2 Les composites hautes performances	8
I.6 Caractéristiques des matériaux composites	8
I.7. La mise en œuvre des matériaux composites:	9
I.8. Domaines d'application des matériaux composites	10
I.8.1. Construction aéronautique	10
I.8.2. Construction automobile	11
I.8.3. Secteur du bâtiment	12
I.9. Avantages et inconvénients des composites	13
Conclusion	13
Chapitre II	14
.....	14
2) Méthode des éléments finis :	15
2-1) Généralités :	15
2-2) Avantage de la méthode des éléments finis :	15
2-3-1) Choix du type d'élément et discrétisation :	15
2-3-1-1) Type d'élément	15
2-3-1-2) Taille de l'élément ou maillage :	16
2-4) Formulation des éléments finis :	16

2-5) Les étapes d'analyse par éléments finis	17
2-5-1) Les différentes formulations de la méthode des éléments finis :	18
2-5-1-1) Formulation en déplacement :	18
2-5-1-2) Formulation équilibre :	19
2-5-1-3) Formulation hybride :	19
2-5-1-4) Formulation mixte :	19
2-5-1-5) Formulation en déformation :	19
2-6) Modélisation des plaques par la méthode des éléments finis:	19
2-6-1) Modélisation et discrétisation :	19
2-6-2) Importance de la modélisation du comportement de la structure :	20
2-6-3) Discrétisation d'une structure :	20
2-6-4) Discrétisation géométrique :	22
2-6-5) Critères de convergence :	22
Convergence « h » :	22
Chapitre III	25
Présentation de l'outil informatique.....	24
PRESENTATION DE L'OUTIL INFORMATIQUE	25
1 Introduction :	25
2.2 Définition de l'ABAQUS :	25
2.2.2. ABAQUS/Explicit	25
2.2.3. ABAQUS/CAE	26
2.3 Système d'unités dans le code de calcul ABAQUS:	26
2.3.1 Caractéristiques de logiciel ABAQUS:	27
2.3.2 Type d'analyse:	27
2.4 Les éléments utilisés par ABAQUS :	27
2.5 Organisation de l'interface Abaqus CAE.....	29
2.6 Les modules [16]	30
2.7 Les différents fichiers pour la simulation sous ABAQUS [15]	32
2.7.1 Fichier d'entrée (Input file) :	32
2.7.2 Fichier de résultats (output file) :	32
2.7.3 Autres fichiers créés par ABAQUS lors de la simulation :	32
Chapitre IV	33
Résultats	33
4.1. INTRODUCTION :	34
4.2. Structure trois couches :	34
4.3 Cas(1) : Peaux (isotrope) et Âme (isotrope) :	35
4.3.1. Influence du module de Young des peaux :	35
4.4. Cas(2) : Peaux (isotrope) Âme (lamina)	37

4.4.1. Influence du module de Young E_x (Âme) :	37
4.4.2. Influence du module de Young E_y de l'âme :	38
4.4.3. Influence du module de cisaillement G_{yz} de l'âme:	39
4.4.4. Influence du module de cisaillement G_{xy} de l'âme :	39
4.3.5. Influence du module de cisaillement G_{xz} de l'âme:	40
Conclusion générale	44
.....	45
Références	46

Figure I- 1: Schéma illustratif d'un matériau composite	3
Figure I- 2: Différentes familles de matrices	4
Figure I- 3 : Différentes types de renfort de base	4
Figure I- 4 : Constitution d'une monocouche	5
Figure I- 5 : Désignation d'un stratifié	6
Figure I- 6 : Constitution d'un Sandwich	8
Figure I- 7 : Les types de moulage	9
Figure I- 8 : Formage par moulage	10
Figure I- 9 : Matériaux composites dans l'industrie	13
Figure II- 1 : Modélisations par éléments finis de structures	18
Figure II- 2 : Etapes de l'analyse d'un problème de limites	20
Figure II- 3 : structure type en génie civil es sa discrétisation	21
Figure II- 4 : condition aux limites	22
Figure II- 5 - Erreur de discrétisation géométrique	22
Figure II- 6 : Subdivision plus poussée pour étudier la convergence h	23
Figure III- 1: Structure d'une analyse sous Abaqus	26
Figure III- 2: Quelque élément dans Abaqus	28
Figure III- 3: Les types d'intégrations et le nombre de nœuds	29
Figure III- 4: Organisation d'ABAQUS [□]	30
Figure III- 5: Réalisation de la mise en données d'un problème [□]	30
Figure IV- 1 : structure poutre encastree	34
Figure IV- 2 simulation par logiciel ABAQUSE	35
Figure IV- 3 : Evolution de déplacement en fonction du module d'Young	35
Figure IV- 4 : simulation par logiciel ABAQUSE	37
Figure IV- 5 : Evolution de déplacement en fonction du module d'Young (E1)	36
Figure IV- 6 : Evolution de déplacement en fonction du module d'Young (E2, E3)	39
Figure IV- 7 Evolution de déplacement en fonction du module de cisaillement (G23)	39
Figure IV- 8 : Evolution de déplacement en fonction du module de cisaillement	40

Introduction Générale

Introduction Générale

Introduction générale

Parmi les différents matériaux (les métaux, les plastiques, céramique...) on trouve les composites qui sont formés en combinant deux ou plusieurs matériaux à l'échelle macroscopique dans le but d'améliorer les propriétés technologiques des matériaux conventionnels telles que la rigidité, le poids volumique, les propriétés thermiques, la durée de vie, la résistance à la corrosion et à l'usure.

Vu leurs propriétés attractives, les matériaux composites trouvent des applications dans des domaines très variés à savoir l'aviation, les structures sous-marines, les structures spatiales, l'automobile, les équipements de sport, les dispositifs médicaux ...

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence de propriétés mécaniques sur le comportement mécanique des plaques composites à structure sandwich en flexion. Le mémoire de cette étude est constitué de quatre chapitres.

Ce mémoire débute par une introduction générale sur les matériaux composites, leur importance et leurs applications, en présentant l'objectif essentiel du présent travail.

Dans le premier chapitre on a définie d'une manière générale les matériaux composites, En ce qui concerne la structure des matériaux composites multicouche en particulier.

Le deuxième chapitre est consacré à rappeler les généralités de la méthode des éléments finis, Donne un aperçu sur les fondements et l'historique de cette méthode. Par ailleurs nous citons d'une part les avantages, les inconvénients et les caractéristiques de la méthode des éléments finis comme nous avons donné un exemple pour chaque type.

Dans le troisième chapitre on présente le logiciel ABAQUS les généralités à travers l'interface générale et les principaux modules disponibles.

Enfin, le quatrième chapitre regroupe les résultats obtenus sur le Comportement géométrique d'une structure multicouches sous une charge uniformément répartie sur la surface supérieure en utilisant l'environnement ABAQUS.

On conclut notre étude par une conclusion générale sur le travail effectué.

Chapitre I

Généralités sur les matériaux composites

I.1. Introduction

Le développement de nouveaux matériaux est soumis aux besoins des utilisateurs (constructeurs). Ceux-ci veulent toujours des matériaux plus performants, plus économiques et qui durent plus longtemps. Les chercheurs sont le plus souvent amenés à optimiser les solutions déjà utilisées, mais dans certains cas, ils doivent complètement repenser le problème et envisager de " nouveaux matériaux ". En effet, on ne découvre plus de nouveaux matériaux, mais on crée plutôt des nouvelles associations de matériaux. L'un des résultats de cette association est l'aboutissement à un matériau composite, qui fait le sujet de notre étude [1].

I.2. Définition d'un composite

Un composite est un matériau artificiel moderne dont la structure est composée de deux constituants ou plus, combinés à une échelle microscopique, et qui ne sont pas solubles entre eux. L'un des constituants est appelé « Renfort » noyé dans l'autre constituant appelé « Matrice ». La phase de renforcement du matériau doit être sous la forme de fibres, particules, ou paillettes. La phase matrice du matériau est généralement continue [2].

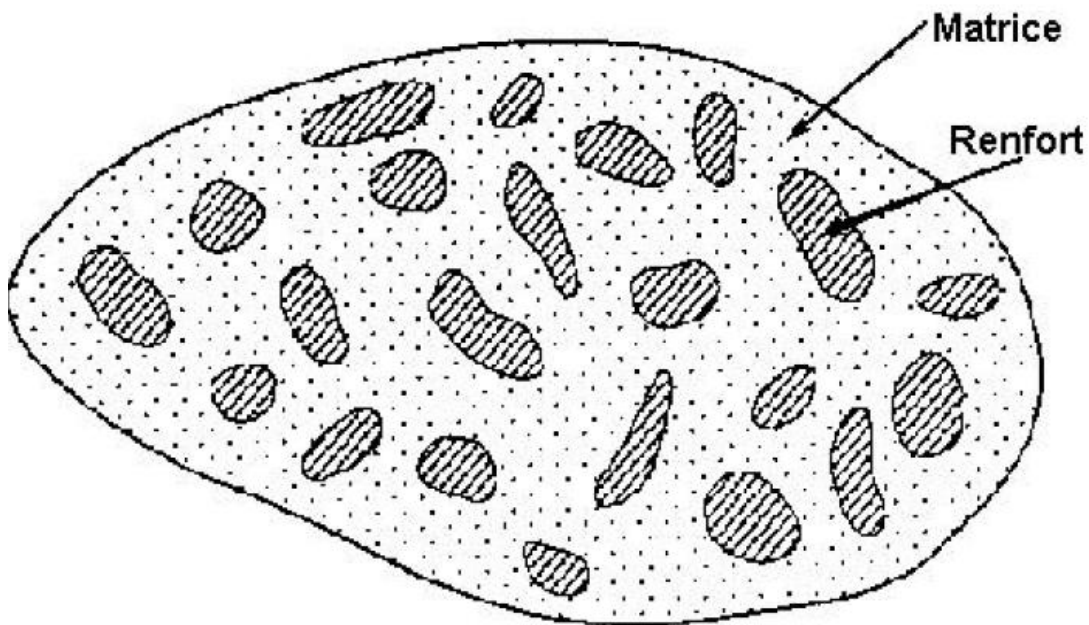


Figure I- 1: Schéma illustratif d'un matériau composite [3].

I.2.1. La matrice

La matrice permet de lier les fibres du renfort fibreux entre elles, ainsi que de répartir les efforts (résistance à la compression ou à la flexion). La matrice est facilement déformable et assure la protection chimique des fibres. Généralement, c'est un polymère ou une résine organique. [2]

Dans l'organigramme suivant On peut retrouver les différentes familles de **matrices**

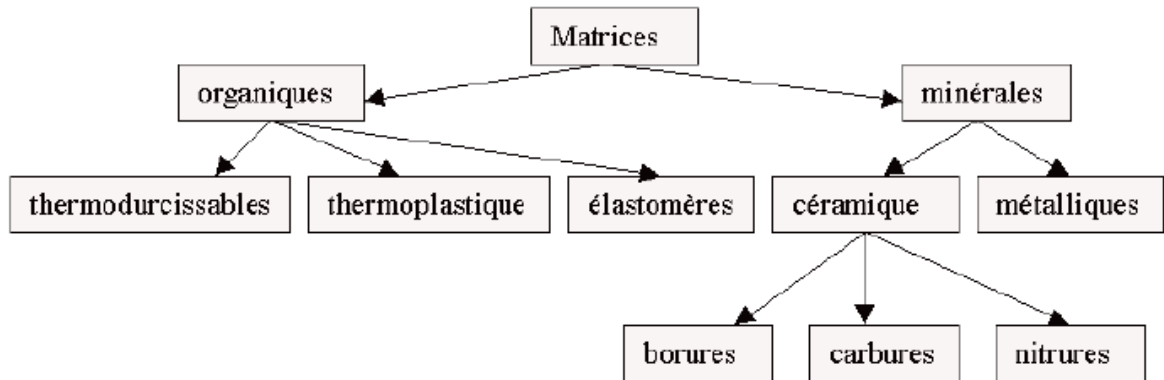


Figure I- 2: Différentes familles de matrices. [4]

I.2.2. Les renforts

Les renforts contribuent à améliorer la résistance mécanique et la rigidité des matériaux composites et se présentent sous forme filamentaire, allant de la particule de forme allongée à la fibre continue qui donne au matériau un effet de résistance orientée. [4]

Les différents types de renforts sont cités dans l’organigramme ci-dessous.

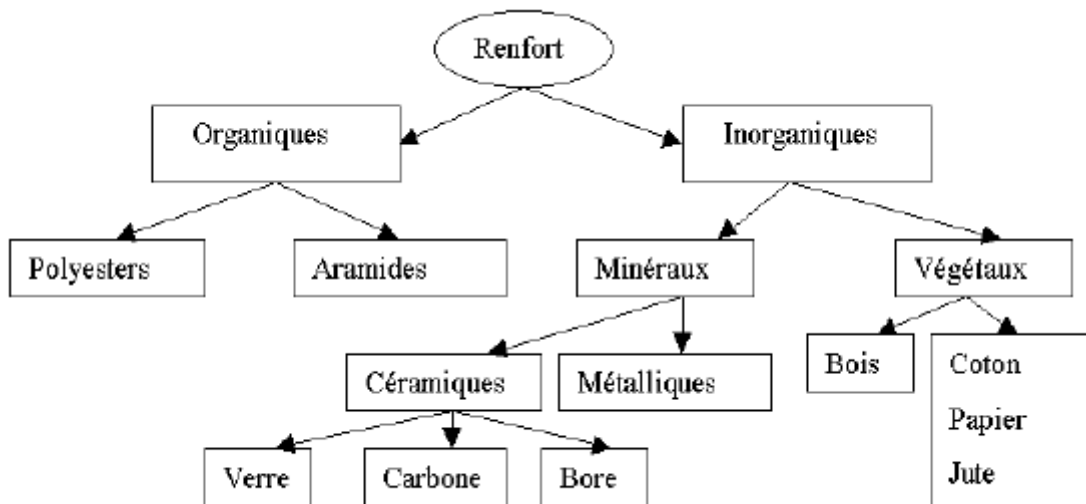


Figure I- 3 : Différentes types de renfort de base [4]

I.3. Structure des matériaux composites

I.3.1. Monocouches :

Les monocouches représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres longues (unidirectionnelles UD, réparties aléatoirement), à fibres tissées ou à fibres courtes [5].

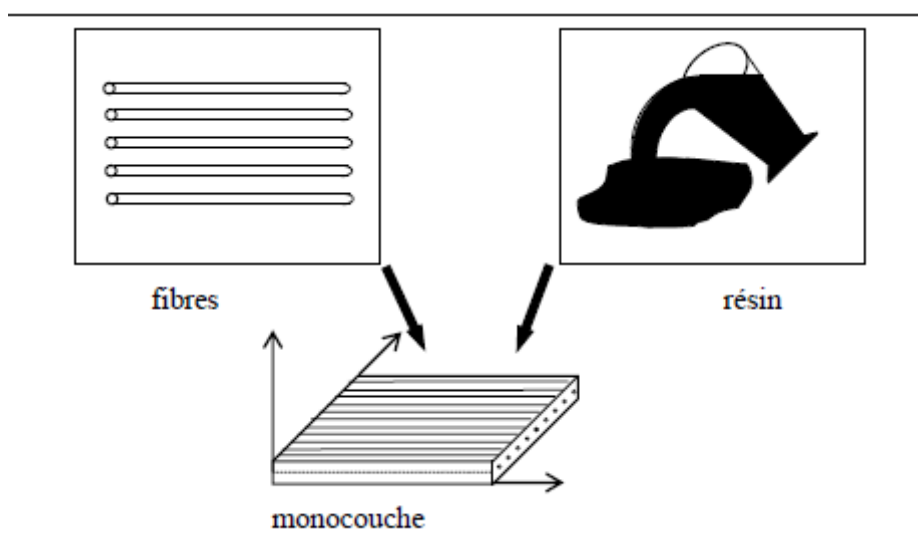


Figure I- 4 : Constitution d'une monocouche [4]

I.3.2. Les stratifiées

Un stratifié est constitué d'un empilement de monocouches ayant chacun une orientation propre par rapport à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié (Figure I.5) [4]

Le choix de l'empilement et plus particulièrement des orientations permet de d'avoir des propriétés mécaniques spécifiques. On pourra avoir des stratifiés du type :

- 1- Equilibré : stratifié comportant autant de couches orientées suivant la direction $+ \theta$ que de couches orientées suivant la direction $- \theta$.
- 2- Symétrique : stratifié comportant des couches disposées symétriquement par rapport à un plan moyen.
- 3- Antisymétriques : stratifié comportant des couches disposées non symétriquement par rapport un plan moyen.

4- Croisé : stratifié comportant autant de couches à 0° que de couches à 90° .

5- Hybride : les couches successives comportent des fibres de natures différentes, il s'agit d'un stratifié hybride.[20]

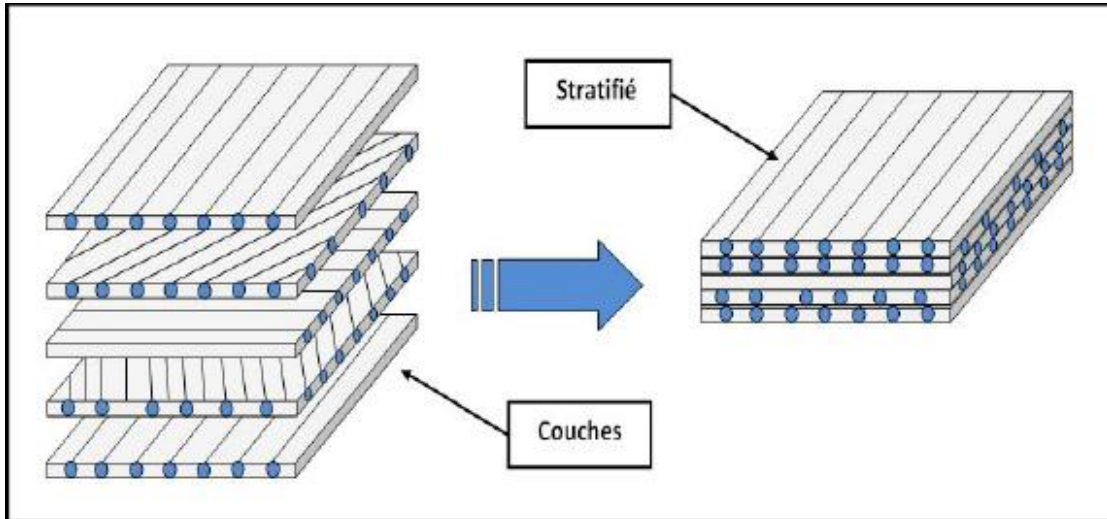


Fig. (I.5) : Constitution d'un Stratifié.

Désignation d'un stratifié :

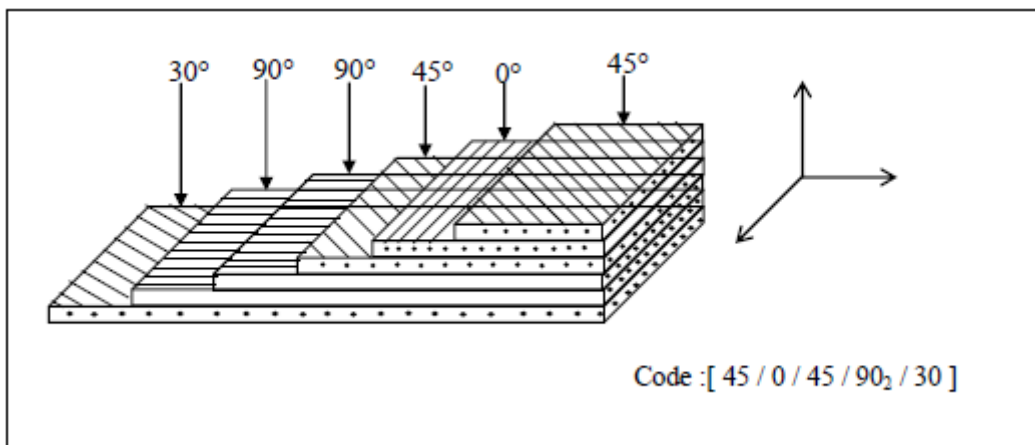
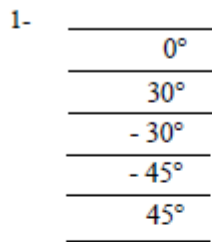


Figure I- 5 : Désignation d'un stratifié [8]

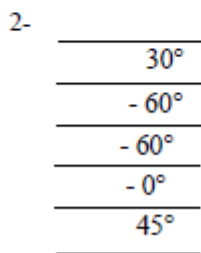
Stratifié



Désignation

[± 45/ ∓ 30/ 0]

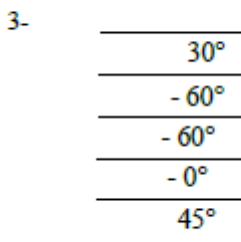
Stratifié



Désignation

[45/ 0/ - 60₂/ 30]

Stratifié



Désignation

[45/0/60₂/30]

I.4. Structure sandwich

Les structures sandwichs résultant généralement de l'association de deux semelles ou peaux de faible épaisseur, constituées de matériaux à haute résistance et haut module et d'une âme beaucoup plus épaisse et de faible densité (Figure I.6). Ils sont pour avantages : une grande rigidité, une résistance à la rupture élevée associées à un faible poids par unité de surface.

Malgré une activité de recherche et de développement sur ces matériaux, le comportement au cours de l'endommagement reste peu connu. Le matériau sandwich possède une grande légèreté en flexion et c'est un excellent isolant thermique [6]

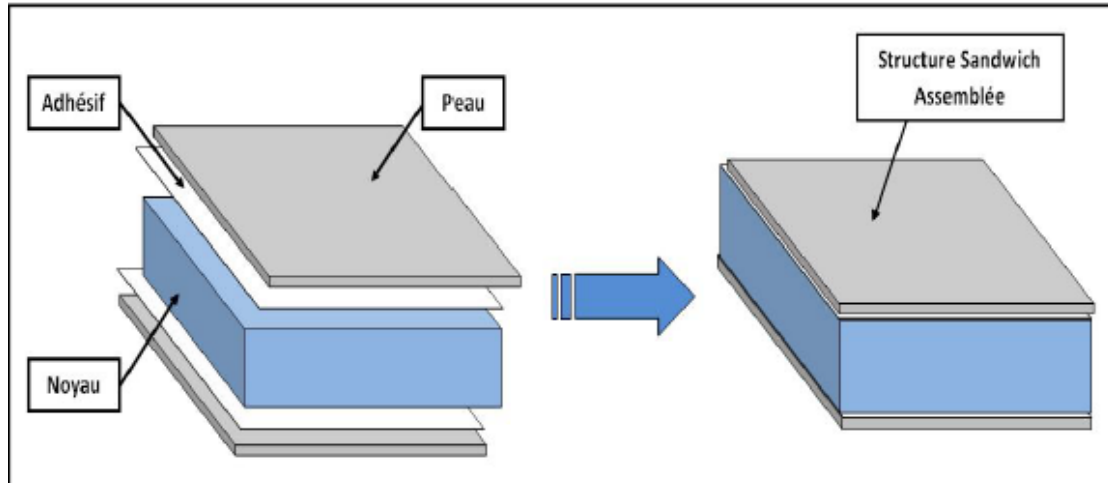


Figure I- 6 : Constitution d'un Sandwich.

I.5 Type de matériaux composites

Selon leur taux d'utilisation, les composites sont classés en deux grandes classes : les composites à grande diffusion et les composites hautes performances [7]

I.5.1 Les composites à grande diffusion

Ils occupent une portion de 95% des composites utilisés. Ce sont en général des plastiques armés ou des plastiques renforcés, le taux de renfort est de 30%. Dans 90% des cas, l'anisotropie n'est pas maîtrisée car les renforts sont des fibres courtes.

Les principaux constituants de bases sont les résines polyesters avec des fibres de verre, dans ce cas le renfort et la matrice sont à des coûts voisins [7].

I.5.2 Les composites hautes performances

Ils sont principalement utilisés dans l'aéronautique et sont d'un coût élevé. Les renforts sont plutôt des fibres longues. Le taux de renfort est supérieur à 50%, et ce sont les renforts qui influent sur le coût. Les propriétés mécaniques (résistance mécanique et rigidité) sont largement supérieures à celles des métaux, contrairement aux composites à grande diffusion. Des méthodes de calculs de structures et d'homogénéisations ont été développées pour les composites hautes performances [7].

I.6 Caractéristiques des matériaux composites

Les propriétés des matériaux composites dépendent de beaucoup de facteurs et sont différentes selon les divers types de matériaux composites. Ces propriétés résultent :

- des propriétés, de la nature et de la quantité des matériaux constitutifs.
- des constituants, de la géométrie et de la distribution du renfort
- de leurs interactions, de la nature de l'interface matrice-renfort, etc.

Les principales caractéristiques des pièces fabriquées en matériaux composites sont :

- le gain de masse,
- la bonne tenue en fatigue (durée de vie augmentée),
- l'absence de corrosion,
- l'absence de plasticité (leur limite élastique correspond à la limite de rupture)
- le vieillissement sous l'action de l'humidité et de la chaleur,
- L'insensibilité à certains produits chimiques courants (solvants, peinture, huiles, Pétroles,...),
- tenue aux impacts et aux chocs très moyenne,
- très forte anisotropie [8]

I.7. La mise en œuvre des matériaux composites:

La mise en œuvre des matériaux composites nécessite trois opérations indispensables :

1. Imprégnation du renfort par le système résineux.
2. Mise en forme à la géométrie de la pièce.
3. Durcissement du système
 - soit par polycondensation et réticulation pour les matrices thermodurcissables,
 - soit par simple refroidissement pour les matières thermoplastiques [5]

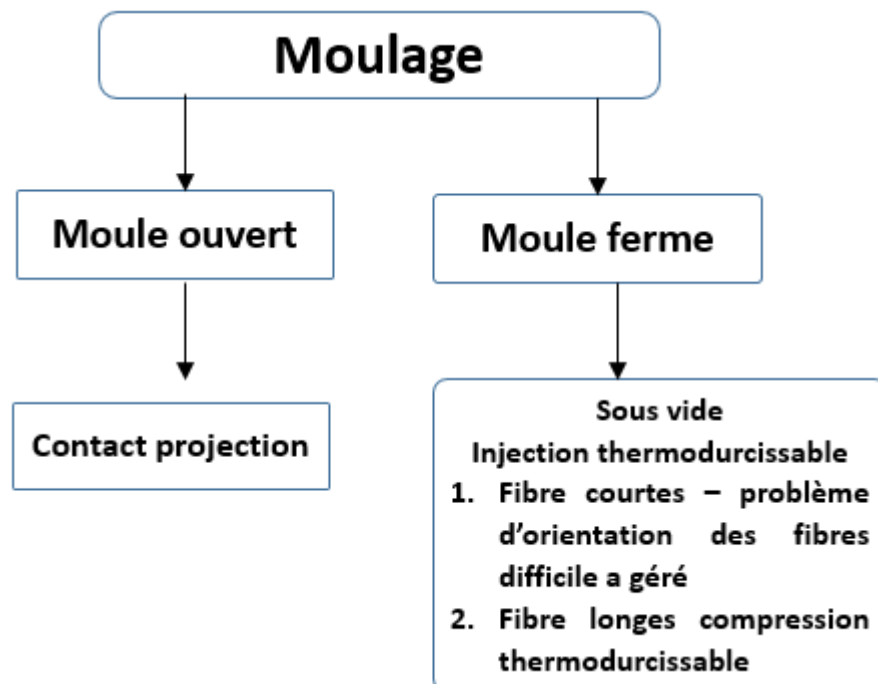


Figure I- 7 : Les types de moulage.

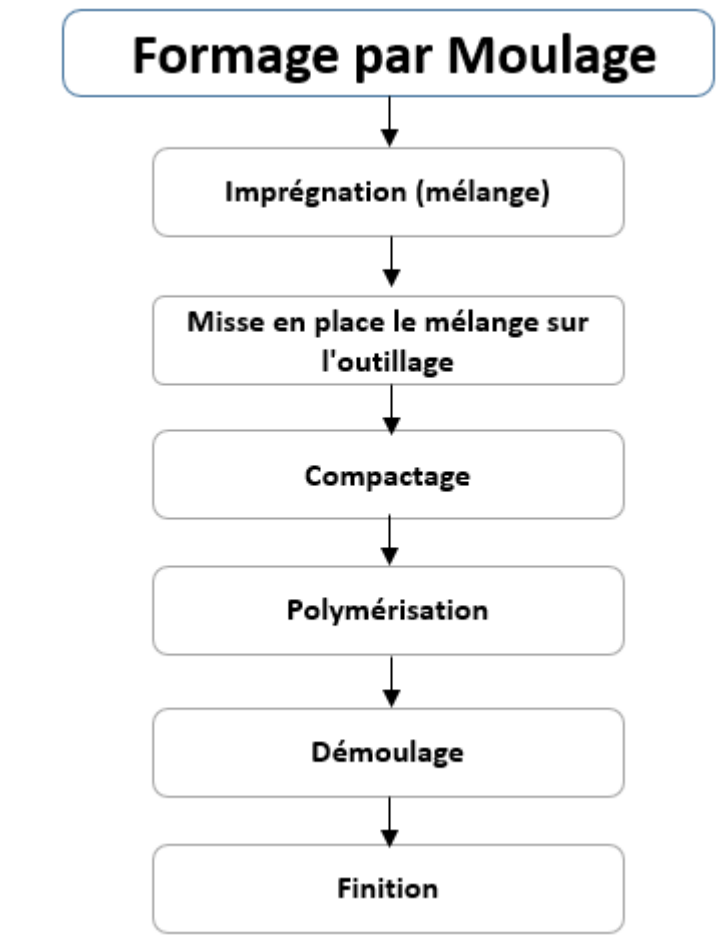


Figure I- 8 : Formage par moulage

I.8. Domaines d'application des matériaux composites

I.8.1. Construction aéronautique

Les composites de haute performance ont été longtemps confinés dans l'aéronautique civile à des pièces de structure secondaire (habillage intérieur, volets), plus rarement primaire et jamais à la voilure, car il se posait deux difficultés :^[9]

- des coûts élevés par rapport à l'aluminium,
- des risques de délaminage les interdisant de vol sur les structures aérodynamiques chargées.

Certains obstacles à l'utilisation massive des composites sont progressivement levés, en particulier par des acteurs étrangers, par exemple :

- dans le cadre du programme Advanced Composite Technologie mené par la NASA et Boeing, mise au point d'un nouveau procédé permettant de développer des ailes en Composites 20% moins chers qu'avec des matériaux conventionnels,

- développement de composites à mémoire de forme mené par British Aerospace et Daimler Benz,
- décision d'Airbus d'équiper les fuseaux de ses futurs A380 en technologie composite dite «glare »...

La place future de l'aéronautique militaire française (Dassault, consortium Eurocopter) au sein de l'industrie militaire de défense européenne (EADS) dépend fortement de notre capacité à proposer un leadership durable dans des technologies critiques, en particulier les matériaux.

Il est donc important d'amener les transformateurs de composites dynamiques français (Composites Aquitaine, Vetrotex...) à profiter de l'intérêt du secteur pour ces nouvelles solutions [9]

I.8.2. Construction automobile

L'utilisation des composites dans le secteur automobile remonte à des origines

Relativement anciennes (fin des années 1980), mais ne s'est généralisé que très récemment, comme le montrent les décisions récentes de grands constructeurs étrangers (Volvo, Mercedes) de développer des coffres et hayons. Les composites à matrice thermoplastique sont, par contre, de plus en plus fréquents [9]

Les entreprises françaises de transformations de composites, notamment les deux leaders du marché de l'équipement automobile - Inoplast et Matra Automobile - devront profiter du rattrapage probable de l'Europe sur les Etats-Unis dans l'utilisation des composites dans l'automobile (estimée globalement à 113 kg par voiture aux Etats Unis contre 30 kg en Europe).

Pour industrialiser les procédés afin de satisfaire la forte demande prévue dans l'automobile, le développement prévu des thermoplastiques renforcés de fibres longues notamment, les divers transformateurs français, PME pour la plupart, se sont alliés à des partenaires plus gros (Inoplast-Plastic Omnium). Ils ont été imités par leurs concurrents étrangers (Menzolit Fibron).[9]

Le groupe français Hutchinson est un co-leader européen des systèmes de transfert de fluides à paroi composites (élastomères et polymères) [9]

L'existence de deux constructeurs français est un atout pour le secteur domestique des composites dont certains des éléments peuvent bénéficier de l'implantation internationale des constructeurs [9].

Il est important d'anticiper sur les procédés et les technologies susceptibles de correspondre aux exigences des constructeurs, et orienter les structures de recherche ou de transfert publiques (Cetim, Critt) ou privés (Cary Valley, Sora, Inoplast) [9].

I.8.3. Secteur du bâtiment

Mis à part la fourniture de renforcement des structures en béton, les composites ont relativement peu pénétré le secteur du BTP, notamment du fait : [9]

- d'un prix élevé comparé aux matériaux traditionnels (35 F/kg contre 18 F/kg pour l'acier et 6 F/kg pour le bois),
- d'une relative méconnaissance des architectes et bureaux d'études vis-à-vis des composites,
- d'un manque d'information sur le cycle de vie (recyclabilité, durabilité).

Les qualités des composites (légèreté, résistance au feu, résistance mécanique et chimique, possibilité de créativité) sont cependant extrêmement prometteuses. Les fournisseurs de solutions composites (Acome, Uniject, Gimm Menuiseries, Owens Corning, etc.) ont développé de nombreux produits présentés au salon JEC d'avril 2000 : fenêtres, portes, substituts d'ardoise, renforts de poutres, etc

Dans ce secteur également, l'origine française de leaders mondiaux du BTP (Bouygues, Vinci, etc.) est un atout fort pour le développement commercial des technologies composites.

Dans ce chapitre, nous nous sommes attachés à présenter et à définir, brièvement la notion de matériau composite. Dans un premier temps, on a présenté les différents constituants des matériaux composites, les différents types de ces matériaux, ainsi que la notion de monocouche [11].

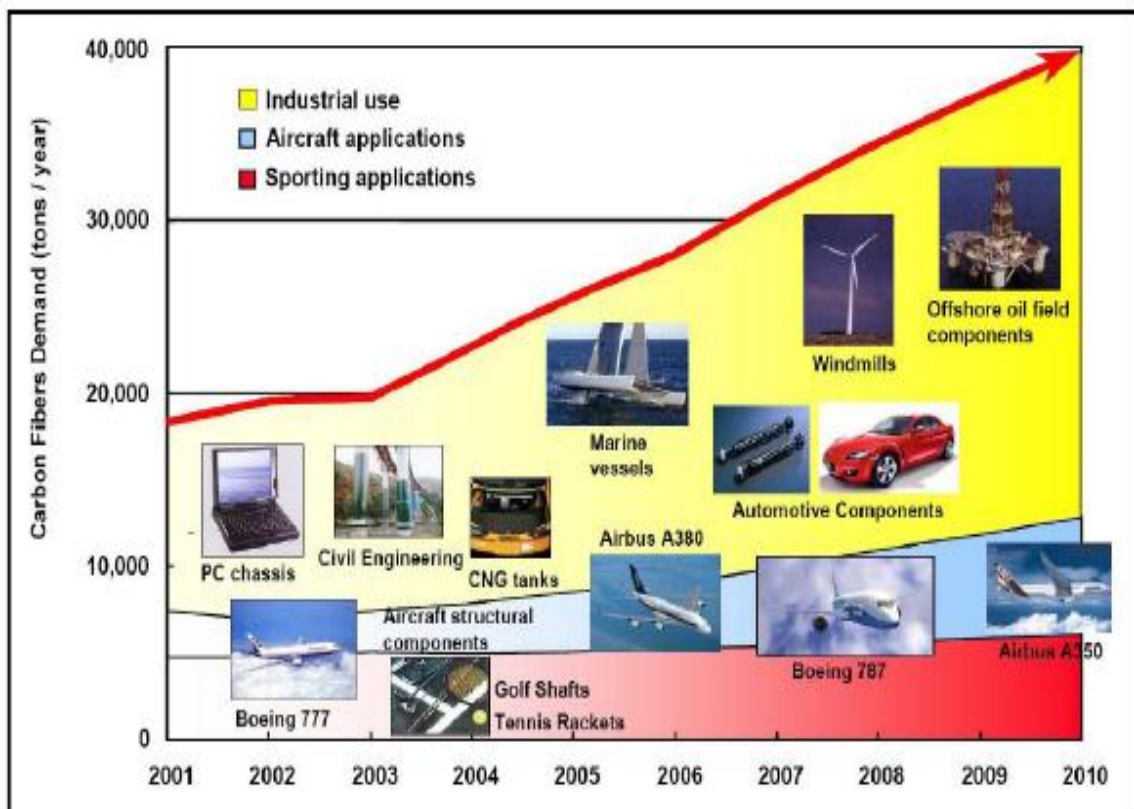


Figure I- 9 : Matériaux composites dans l'industrie. [11]**I.9. Avantages et inconvénients des composites**

Les composites sont préférés à d'autres matériaux parce qu'ils offrent des atouts liés à [10] :

- Leur légèreté ;
- Leur résistance à la corrosion et aussi à la fatigue ;
- Leur insensibilité aux produits comme les graisses, les liquides hydrauliques, les peintures et les solvants ;
- Leur possibilité de prendre plusieurs formes, d'intégrer des accessoires et permettre la réduction de bruit.

Cependant certains inconvénients freinent leur diffusion [10] :

- Les coûts des matières premières et des procédés de fabrication ;
- La gestion des déchets engendrés et la réglementation de plus en plus stricte.

L'industrie des matériaux composites doit donc aujourd'hui relever certains défis tels que :

- La maîtrise des émanations de produits organiques volatiles, par exemple le styrène ;
- La maîtrise des procédés de transformations et des performances des matériaux qui sous-entend une très bonne connaissance des constituants mis en place ;
- La mise en place de technologies et des filières pour la gestion des déchets en fin de vie qui est la partie la plus difficile à satisfaire en raison du caractère thermostable de la plupart des composites.

Conclusion

L'objectif des producteurs des matériaux composites est de concurrencer et de surpasser les métaux qui, de leur côté, ne cessent d'optimiser leurs propres caractéristiques. La diversité des matériaux composites et leur souplesse, qui permet de fabriquer ou de composer des caractéristiques à la carte, rendent cet objectif légitime. Pour atteindre ces objectifs, ce secteur développer par l'innovation.

Chapitre II

Le concept des éléments finis

2) Méthode des éléments finis :

2-1) Généralités :

La méthode des éléments finis est une méthode numérique de résolution approchée des équations différentielles décrivant les phénomènes physiques de l'ingénierie. Elle connaît, depuis 1970 environ une extension fantastique, qui va de pair avec le développement et l'accroissement de puissance des ordinateurs. Elle est devenue un outil de travail, calcul et conception quotidien, voir familier, de l'ingénieur, dans des domaines aussi variés que l'analyse des structures, le transfert de chaleur, la mécanique des fluides, l'électromagnétisme, les écoulements souterrains, la combustion ou encore la diffusion des polluants

2-2) Avantage de la méthode des éléments finis :

- La puissance de la méthode des éléments finis réside essentiellement dans sa souplesse. Elle peut être applicable à une variété de problèmes mécaniques ou bien physiques. La géométrie du domaine peut être quelconque, les forces et les conditions aux limites peuvent être aussi de natures quelconques.

Le maillage peut combiner autant de types d'éléments que l'on souhaite. Et toute cette généralité est contenue dans un programme unique qu'on peut faire tourner sur un ordinateur (sélection du de problème, de la géométrie, du type d'élément, des chargements et des conditions aux limites). La méthode des éléments finis réside dans le fait que le modèle qu'elle utilise est très proche de la structure réelle [12].

2 -3) Les différentes étapes de la méthode des éléments finis :

D'une manière générale les différentes étapes pour l'application de la méthode des éléments finis sont :

2-3-1) Choix du type d'élément et discrétisation :

La première étape consiste à choisir le type d'élément le plus adapté au problème donné, ensuite on discrétise le milieu continu en un certain nombre d'éléments. En général, les points suivants sont à prendre en considération dans la sélection du type d'élément.

2-3-1-1) Type d'élément

* La sélection de l'élément sera fonction du type de problème à résoudre, généralement : ils sont groupés en quatre classes :

- 1- les contraintes planes ; les déformations planes ; axisymétriques (problème à deux dimensions)
- 2- la flexion des plaques.
- 3- les coques.
- 4- l'analyse des solides tridimensionnels.

* On distingue plusieurs classes d'éléments finis suivant leur géométrie [12].

- • Les éléments 1D : barres, poutres rectilignes ou courbes.
- • Les éléments 2D : élasticité plane (déformation ou contrainte plane), plaque en flexion, coques courbes.
- • Les éléments 3D : éléments de volume ou coques épaisses.

* Dans chaque groupe des différents niveaux de précision peuvent être atteints. Ceci dépend du nombre de degrés de liberté associé avec le type d'élément. Les points nodaux se trouvent généralement sur les frontières des éléments bien que des nœuds internes peuvent aussi être inclus dans certains éléments pour augmenter leur efficacité. Généralement, avec l'augmentation de l'ordre de l'élément, celui-ci devient plus précis et plus coûteux. Cependant certaines conditions doivent être satisfaites dans la sélection du type d'élément pour assurer une bonne convergence (Convergence vers la solution exacte). Ces conditions sont :

*le champ des déplacements à l'intérieur de l'élément doit être continu.

* Le modèle du déplacement doit inclure un état de déformation constante (L'élément doit être capable de reproduire un champ de déformation constant, si les déplacements nodaux le requièrent).

* L'élément doit être capable de reproduire un mouvement de corps rigide : par exemple quand les degrés de liberté nodaux correspondent à un mouvement de corps rigide, l'élément doit avoir une déformation égale à zéro et des forces nodales nulles. Ceci est un cas particulier du critère de la déformation constante.

* L'élément doit être compatible, il ne doit pas y avoir de vide entre deux éléments. l'élément qui ne remplit pas cette condition est dit incompatible ou non conforme.

Cependant un élément incompatible peut être valide et sa convergence maintenue si

Les incompatibilités disparaissent en augmentant le maillage et si l'élément se rapproche d'un état de déformation constante.

* L'élément n'a pas une direction privilégiée, c'est-à-dire que l'élément doit être géométriquement invariant et donne les mêmes résultats pour n'importe quelle orientation de l'élément.

2-3-1-2) Taille de l'élément ou maillage :

En général plus le maillage est fin plus les résultats obtenus sont meilleurs, mais en même temps un grand effort de programmation est requis. Le nombre d'éléments utilisés sera la fonction du type de la structure à analyser, mais généralement plus d'éléments sont requis dans les régions où les contraintes varient rapidement que dans les régions où elles varient graduellement. Cependant pour les éléments complexes les maillages grossiers donneront des résultats aussi bons que ceux des maillages fins ayant des éléments simples. [13]

2-4) Formulation des éléments finis :

La méthode des éléments finis représente l'extension de la méthode de rigidité pour les portiques à l'étude bidimensionnelle et tridimensionnelle des structures continues (exemple : plaque, coque ... etc.).

Dans la méthode des éléments finis, la structure continue est remplacée par une structure idéalisée équivalente composée d'un ensemble d'élément appelé «élément finis », qui est censé relier les uns aux autres en un nombre fini de points appelés nœuds.

On définit de manière unique le champ des déplacements à l'intérieur de chaque «élément fini », qui est censé relier les uns aux autres en un nombre fini de points appelés nœuds.

On définit de manière unique le champ des déplacements à l'intérieur de chaque «élément fini » qui est une approximation du problème. Cette approximation de la fonction choisie par un élément appelé une «interpolation » qui est exprimée en fonction des déplacements aux nœuds.

Il est possible, par l'utilisation des théorèmes de l'énergie, de déterminer la matrice de rigidité qui relie les forces nodales avec les déplacements nodaux d'un «élément fini». La matrice de rigidité de l'assemblage des éléments est obtenue de la même manière que le cas des portiques (Méthode des rigidités).

Si les conditions d'équilibre sont appliquées, chaque nœud de la structure modélisée, on obtient un système d'équations simultanées résoudre.

2-5) Les étapes d'analyse par éléments finis

Les étapes sont les suivantes :

L'idéalisation et la discrétisation de la structure en éléments finis par un maillage constitue de lignes ou de surfaces imaginaires. Les éléments sont supposés reliés en un nombre fini de points nodaux situés sur leurs frontières.

Les déplacements de ces points nodaux seront les inconnues de base du problème. Il est apparent que la méthode des éléments finis est applicable pour les structures des matériaux de propriétés hétérogènes ou de formes géométriques compliqués et irrégulières (bords courbes, trous,...).

On choisit une fonction de déplacement permettant de définir de manière unique le champ des déplacements à l'intérieure de chaque « élément fini » en fonction des déplacements de ces nœuds. On se basant sur cette fonction de déplacement, nous déduisons-la matrice de rigidité de l'élément qui lie les forces nodales avec les déplacements nodaux et la matrice masse en utilisant le principe des travaux virtuels ou le principe de l'énergie potentielle totale minimale.

L'analyse de la structure idéalisée de l'assemblage des éléments. Cette analyse procède de la manière classique qui a été décrite par la méthode des rigidités.

La solution de ces équations nous permet d'évaluer les déplacements et les efforts internes dans la structure (contrainte, déformation).

La méthode des éléments finis est extrêmement puissante puisqu'elle permet d'étudier correctement des structures continues ayant des propriétés géométriques et des conditions de charge compliquées ; elle nécessite un grand nombre de calculs qui, à cause de leur nature répétitive, s'adaptent parfaitement à la programmation numérique et à la résolution par ordinateur [13]

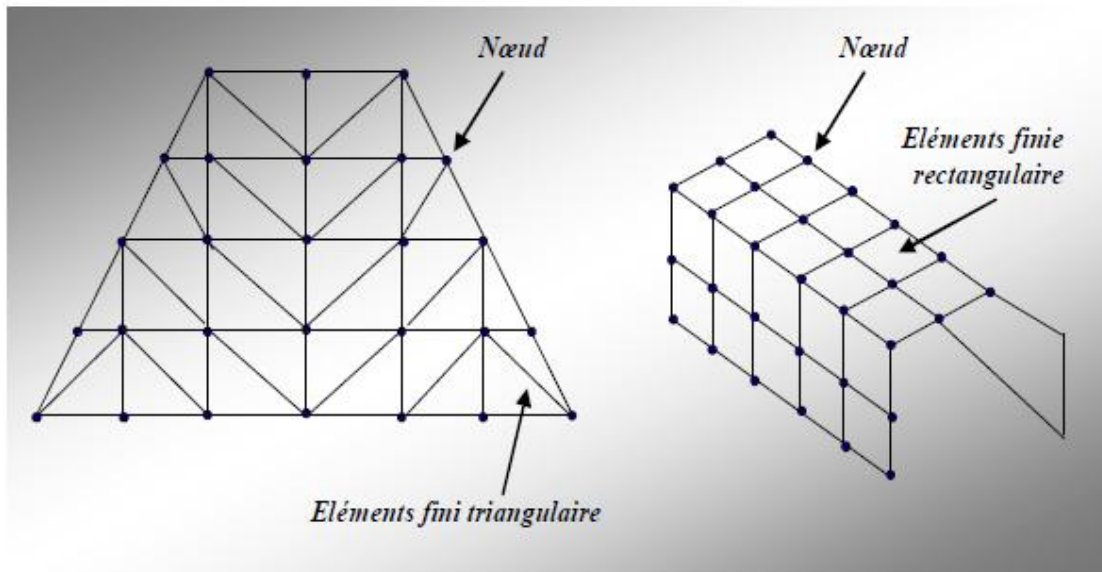


Figure II- 1 : Modélisations par éléments finis de structures

2-5-1) Les différentes formulations de la méthode des éléments finis :

En général, le principe de toute méthode de discrétisation consiste à remplacer un milieu continu (structure) comportant une infinité de modes de déformations ou de tensions par un milieu idéalisé ne possédant qu'un nombre fini de tels modes.

On va alors définir une approximation de la solution (déplacement et/ou contraintes) non pas pour l'ensemble de la structure, mais pour chacun de ses éléments en les réduisant à un petit nombre de mode décrits par des fonctions simple. Ils sont choisis parmi les plus fondamentaux pour la description du comportement de l'élément dans la structure.

La structure entière est donc idéalisée par un nombre fini de modes qui se transmet entre chaque élément de manière bien précise. Les inconnues du problème sont alors les paramètres qui représentent l'intensité de chaque mode.

Il existe plusieurs manières d'approcher un système réel, cette approche consiste à formuler un champ qui porte sur tout le système ou une partie de celui-ci, les différentes formulations existantes sont les suivantes.

2-5-1-1) Formulation en déplacement :

C'est une formulation selon laquelle l'approximation est faite sur le champ de déplacements de façon que l'intégrabilité du champ de déformations soit assurée à l'intérieur de l'élément. L'élément est dit "cinématiquement admissible".

* Cette condition est automatiquement réalisée lorsque le champ de la déformation est déduit à un champ de déplacement continu et éventuellement différentiable.

Si la continuité du champ de déplacement est vérifiée aux surfaces de séparation des éléments, le modèle est dit **Co-déformable ou compatible**.

Il existe un autre groupe d'éléments où l'on satisfait plus que les conditions de compatibilité, ce modèle est alors dit **sur-conforme ou sur-compatible**.

En général, dans ce modèle, on assure au moins la continuité au nœud du tenseur complet des déformations, y compris le changement des courbures.

2-5-1-2) Formulation équilibre :

C'est une formulation dans laquelle l'approximation se fait sur le champ de tension de façon que les équations d'équilibre soient satisfaites à l'intérieur de chaque élément.

2-5-1-3) Formulation hybride :

Dans cette formulation, le plus souvent on définit la solution en termes d'approximation, d'une part du champ de contraintes interne en équilibre, d'autre part de déplacements sur la frontière de l'élément.

2-5-1-4) Formulation mixte :

Dans celle-ci, on définit la solution en terme d'approximation de deux ou plusieurs Champs indépendants ; généralement, le champ des déplacements et celui des contraintes, étendues à tout l'élément ; en général cette formulation conserve les paramètres inconnus de tout les champs comme **DDL** ; sa mise au point peut être longue et coûteuse ; elle peut toutefois être d'excellente qualité.

2-5-1-5) Formulation en déformation :

C'est une formulation dans laquelle l'approximation se fait sur le champ de déformation de façon telle que les équations de compatibilité et d'équilibre soient satisfaites à l'intérieur de l'élément. Le champ de déplacement est déduit du champ de déformations qui est continu et différentiable. **Ce modèle est sur compatible.**

2-6) Modélisation des plaques par la méthode des éléments finis:

« **Modélisé** » consiste à simplifier les unités caractéristiques d'un ouvrage (unité géométrique mécanique et/ou cinématique) et à les soumettre à des conditions théoriques de liaisons et de chargements. ^[2]

2-6-1) Modélisation et discrétisation :

Pour s'assurer qu'une analyse numérique simulera au mieux un problème réel donné, il faut effectuer deux opérations essentielles, la modélisation dans un premier temps et la discrétisation dans un deuxième temps voir (figure2-2) ces opérations portant sur deux aspects principaux du problème pratique ^[3]

- * Représentation de la géométrie, des charges, des conditions aux limites et du milieu,
- * choix des éléments finis et du maillage.

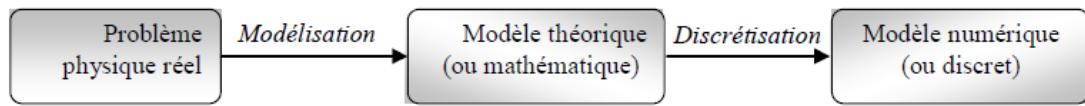


Figure II- 2 : **Étapes de l'analyse d'un problème de limites**

2-6-2) Importance de la modélisation du comportement de la structure :

La modélisation est l'étape clé de toute analyse, elle consiste à rattacher la structure réelle à un modèle connu de la mécanique des solides, structures et matériaux qui sont capable d'en décrire le fonctionnement avec une précision convenable. Donc pratiquement la modélisation consiste :

En ce qui concerne la structure, à ramener cette dernière à une géométrie en choisissant des axes (barre, poutre câble), des plans (parois, plaques coques), des volumes (solides) après avoir éliminé certains détails (gousset, petites excentricités ...), à choisir la théorie la plus appropriée à cette géométrie pour définir les conditions d'appuis et les charges. Choisir de façon réaliste les lois constitutives des matériaux décrivant aussi bien les réponses mécaniques classiques, (linéaires anisotropes discontinuité) que les phénomènes physiques (teneur en eau, discontinuité, perméabilité), à déterminer les propriétés qui définissent ces lois et à connaître l'état initial des matériaux (contraintes initiales)

2-6-3) Discrétisation d'une structure :

La solution obtenue en utilisant n'importe quelle méthode en éléments finis dépende d'une série d'approximations, telles que le type et la forme de l'élément qui doit être utilisé dans la discrétisation. Dans de nombreux cas, un seul type d'élément est nécessaire pour modéliser un problème, donné, mais parfois deux ou plusieurs éléments sont nécessaires pour discrétiser un tel problème, dans le cas d'une plaque avec raidisseurs, les éléments poutres et plaques sont utilisés dans la discrétisation. De plus le maillage peut être grossier ou fin. Le choix dépend de la géométrie de la structure et de certaines caractéristiques locales telles que la concentration des contraintes ^[13].

Le choix d'un maillage adapté à une structure particulière doit être dans la mesure du possible basé sur le résultant des expériences antérieures. Si cela n'est pas possible, alors il faudra étudier la structure pour différents maillages pour tester le taux de convergence. De plus, le type d'élément utilisé dans la modélisation à une influence considérable sur la précision de la solution, il doit être choisi avec soin Les éléments les plus utilisés en pratique sont illustrés sur la figure (2-3).

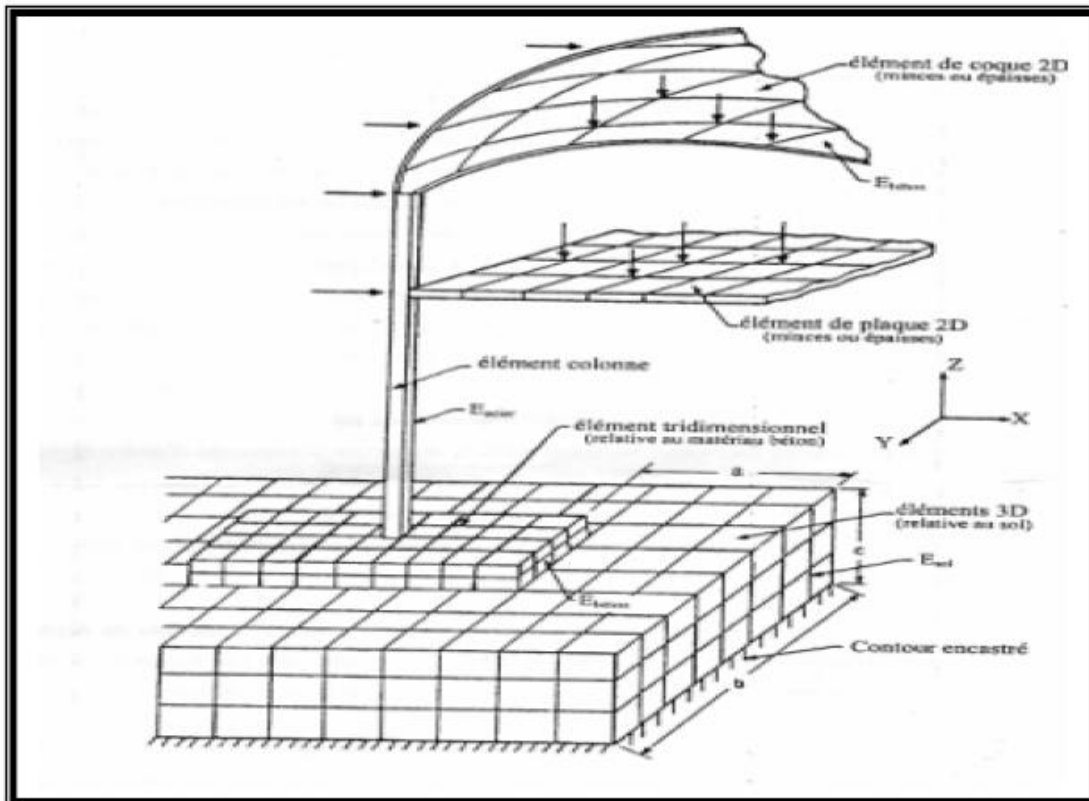


Figure II- 3 : structure type en génie civil es sa discrétisation [9]

L'opération de discrétisation est aussi importante que celle de la modélisation. Elle implique essentiellement deux choix :

- * L'un porte sur le type d'éléments finis à utiliser, les éléments doivent s'adapter à la nature du problème à traiter, c'est-à-dire respecter les hypothèses et se conformer aux caractéristiques de la modélisation.
- * L'autre de la finesse de cette discrétisation, en liaison avec le maillage qui est guidé essentiellement par la géométrie, à savoir par les discontinuités (trous, variations d'épaisseurs, d'inertie ou de matériau...), les conditions d'appui et chargement, les étapes de construction, les zones à forte variation des contraintes ou déplacements

(Découpage plus fin), certains aspects de la rhéologie (orthotrope, lignes de failles...), etc.

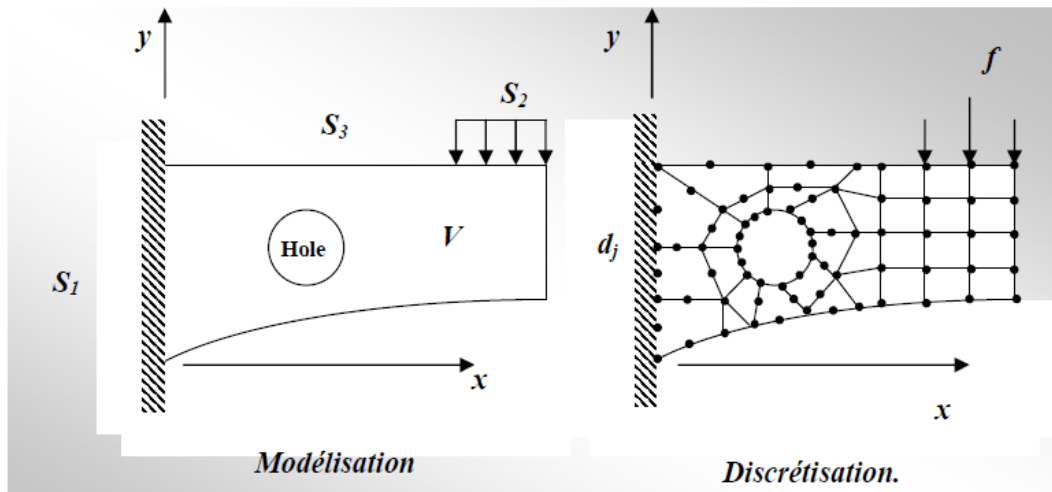


Figure II- 4 : condition aux limites

2-6-4) Discrétisation géométrique :

Il faut donc pouvoir représenter au mieux la géométrie souvent complexe du domaine étudié par des éléments de forme géométrique simple. Il ne doit y avoir ni recouvrement ni trou entre deux éléments ayant une frontière commune.

Lorsque la frontière du domaine est complexe, une erreur de discrétisation géométrique est inévitable. Cette erreur doit être estimée, et éventuellement réduite en modifiant la forme ou en diminuant la taille des éléments concernés comme proposé sur la figure (2.5). Sur chaque élément nous allons chercher à définir une approximation de la fonction solution.

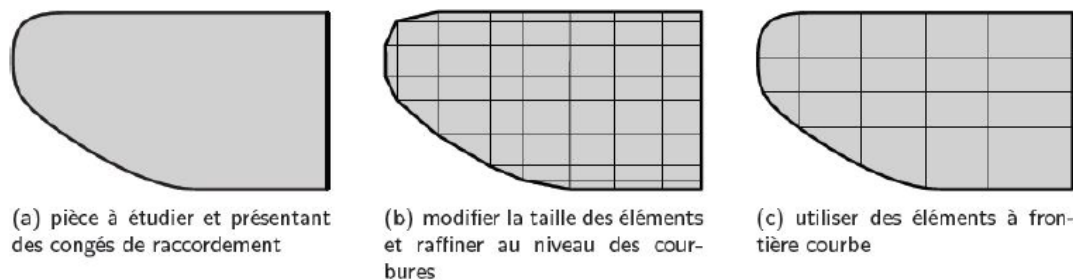


Figure II- 5 - Erreur de discrétisation géométrique

2-6-5) Critères de convergence :

Dans la méthode des éléments finis, il existe deux types de convergence :

La convergence « **h** », par raffinement du maillage sans modification de l'interpolation.

La convergence « **p** » par enrichissement de l'interpolation sans modification du maillage.

Convergence « h » :

Considérons un maillage d'éléments finis (**Fig.2-6**) et appelons **h** la dimension caractéristique d'un élément (longueur du plus grand coté, diamètre du cercle circonscrit). On subdivise

toujours davantage le domaine en éléments toujours plus petits, chaque nouvelle division contenant la précédente, conservons pour les éléments de même type, constamment la même approximation du champ. On appelle critères de convergence les conditions que l'interpolation doit respecter pour que la solution approchée tende vers la solution exacte quand la taille des éléments finis tend vers zéro.

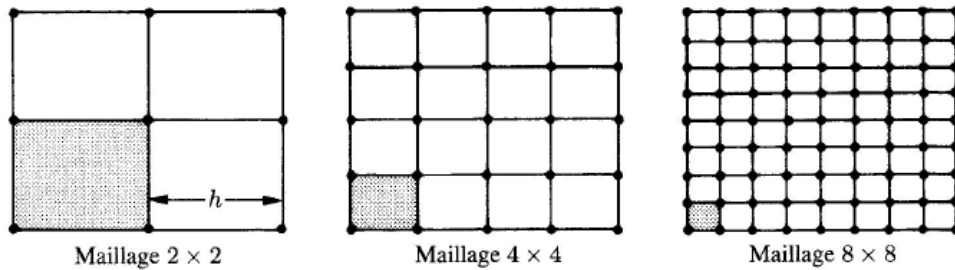


Figure II- 6 : Subdivision plus poussée pour étudier la convergence h [9]

Conclusion :

Dans notre travail La méthode des éléments finis est une technique à caractère pluridisciplinaire, car elle met en œuvre les connaissances de trois disciplines de base : la mécanique des multi continus, l'analyse numérique et l'informatique appliquée.

Notre objet dans ce chapitre est de donner un aperçu sur la méthode des éléments finis.

Chapitre III

Présentation de l'outil informatique

PRESENTATION DE L'OUTIL INFORMATIQUE

1 Introduction :

ABAQUS/CAE™ est un code de calcul qui résout les problèmes de divers champs par la technique des éléments finis (M.E.F). Dans ce cadre il présente un système complet intégrant non seulement les fonctions de calculs proprement dites mais également les fonctions de construction du modèle et les fonctions de traitement des résultats ABAQUS/CAE™ [15].

ABAQUS est un code de calcul par la méthode des éléments finis créé en 1978. Il est avant tout un logiciel de modélisation de problèmes très variés en mécanique. Simuler la réponse physique des structures soumises à des chargements, des températures, des impacts ou autres conditions extérieures, Il est connu et répandu, en particulier pour ses traitements performants des problèmes linéaires et problèmes non linéaires. Dans ce chapitre, on va présenter en bref, le logiciel numérique l'ABAQUS qui est considéré parmi des logiciels de calcul par éléments finis les très puissants pour résolutions des problèmes linéaire et non linéaires [13].

2.2 Définition de l'ABAQUS :

ABAQUS compose de trois produits : ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit et ABAQUS/CAE, figure 3.1 [14].

2.2.1. ABAQUS/Standard

ABAQUS Est un solveur généraliste qui recourt à un schéma traditionnel d'intégration Implicite :

- Problèmes linéaires et non linéaires Géométrie 1D, 2D, 3D et Axisymétrique.
- Nombreuses procédures d'analyse dans le domaine temporel et fréquentiel.
- Résolution basée sur l'algorithme de Newton-Raphson et la méthode de Riks.

2.2.2. ABAQUS/Explicit

ABAQUS/ Explicit Un schéma d'intégration explicite pour résoudre des problèmes dynamique ou quasi-statiques non-linéaires.

- Problème transitoire et dynamique des structures.
- Résolution basée sur la méthode explicite d'intégration en temps.
- Analyse non linéaire (discrétisation spatiale et temporelle).

2.2.3. ABAQUS/CAE

ABAQUS /CAE Constitue une interface intégrée de visualisation et de modélisation pour lesdits solveurs. Chacun de ces produits est complété par des modules additionnels et optionnels, spécifiques à certaines applications.

ABAQUS fut d'abord conçu pour analyser les comportements non-linéaires. Il possède en conséquence une vaste gamme de modèles de matériau. Ses modélisations d'élastomères, en particulier, méritent d'être reconnues.

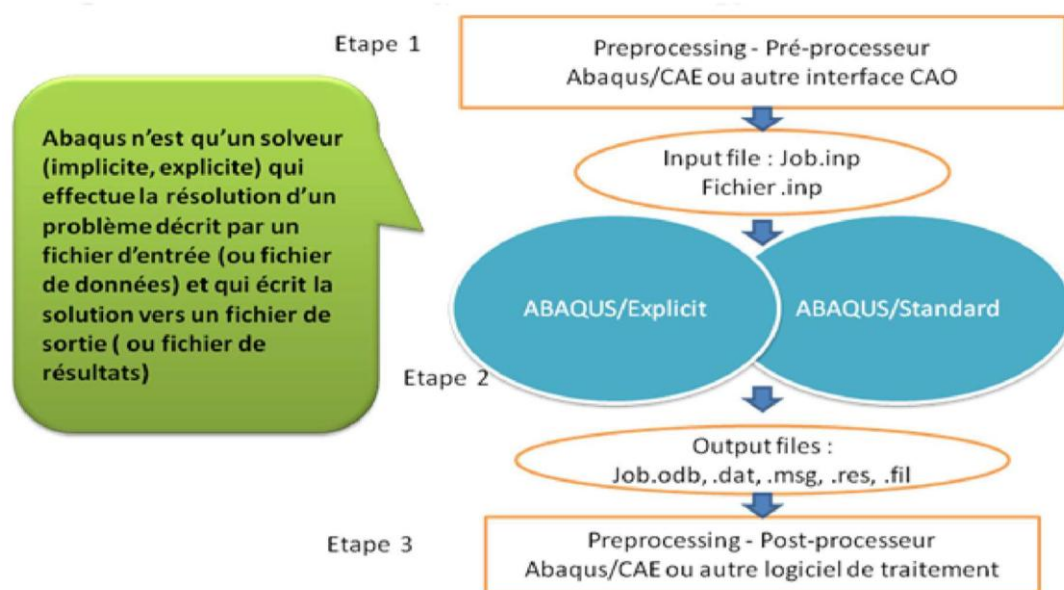


Figure III- 1: Structure d'une analyse sous Abaqus

2.3 Système d'unités dans le code de calcul ABAQUS:

Comme dans beaucoup de logiciels, il n'y a pas de système d'unités fixé. C'est à l'utilisateur de définir son propre système (Tableau 2.1). [15]

Grandeur	SI	SI (mm)	US Unite (ft)	US Unite (inch)
Longueur	m	Mm	ft	in
Force	N	N	lbf	lbf
Masse	Kg	Ton (10^3 Kg)	Slug	lbf S ² /in
Temps	S	S	S	S
Stress	Pa (N/m ²)	MPa (N/m ²)	lbf/ft ²	Psi (lbf/in ²)
Energie	J	mJ (10^{-3} J)	Ft lbf	In lbf
Densité	Kg/m ³	Ton/mm ³	Slug/ft ³	lbf S ² /in ⁴

Tableau III- 1 : Système d'unités pour la programmation

Le tableau présente les différentes unités pour la résolution d'un problème mécanique avec le code ABAQUS.

2.3.1 Caractéristiques de logiciel ABAQUS:

Description succincte des possibilités d'ABAQUS. [13]

- Analyses.
- Éléments.
- Linéarités.

2.3.2 Type d'analyse:

Domaines physiques :

- Mécanique.
- Problèmes couplés.
- Electrique (Pièze et thermique).
- Thermique.
- Une bibliothèque de matériaux de pointe, y compris l'habituel élastique et solide plastique, élastique; Modèles pour les mousses, le béton, les sols, les géo synthétiques.

Problèmes :

- Dynamique des corps rigides.
- Linéaires et non linéaires.
- Statique et dynamique.

2.4 Les éléments utilisés par ABAQUS :

- Un très large choix d'éléments (plus de 100). [15]
- Chaque élément est caractérisé par : famille, ddl, nombre de nœuds, intégration.

- Possibilités de programmer de nouveaux éléments (sur ABAQUS/Standard)

On distingue différentes grandes classes d'éléments [13]

- **Les éléments unidimensionnels (1D)** : barre; Poutre, rectiligne ou courbe
- **Les éléments bidimensionnels (2D)** : élasticité plane (contrainte ou déformation plane), Plaques en flexion, coques courbes de forme triangulaire ou rectangulaire.
- **les éléments tridimensionnels (3D)** : de forme tétraédrique, hexaédrique...etc.
- **les éléments axisymétriques** : (pour les pièces présentant une symétrie de révolution au niveau de la géométrie et du chargement).
- **les autres éléments** : ressorts, amortisseurs, rigides.

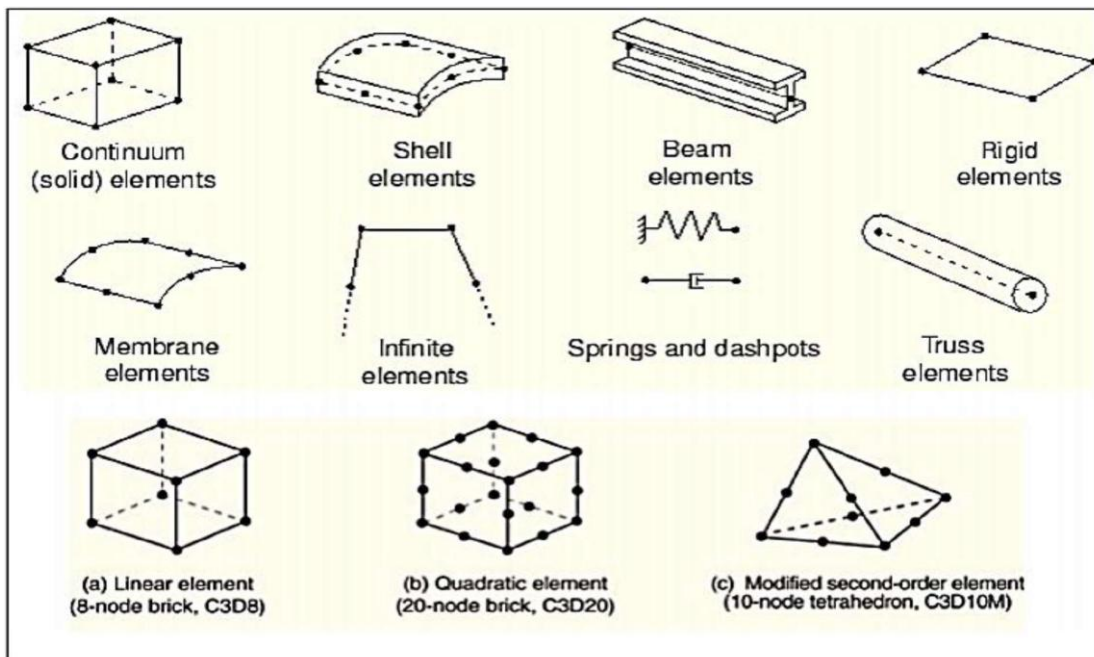
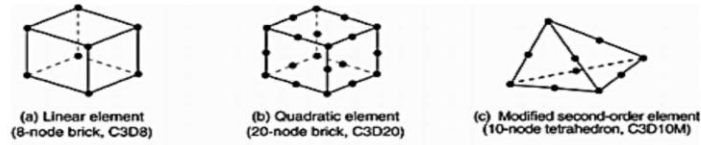


Figure III- 2: Quelque élément dans Abaqus.

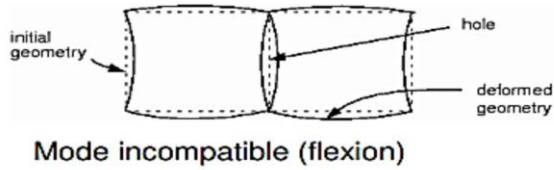
Nombre de nœuds – ordre d'interpolation:



Types d'intégration:



Intégration complète



Intégration réduite

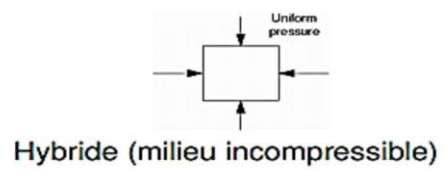


Figure III- 3: Les types d'intégrations et le nombre de nœuds.

2.5 Organisation de l'interface Abaqus CAE.

Il est important de savoir que le module CAE figure 2.4 que vous allez utiliser pour créer votre jeu de données est relativement récent (quelques années) et qu'il est plutôt destiné à la mise en données de problèmes relativement classiques.

Donc pas toutes les commandes utilisables dans Abaqus et fait souvent le choix de

Paramètres par défaut [14]

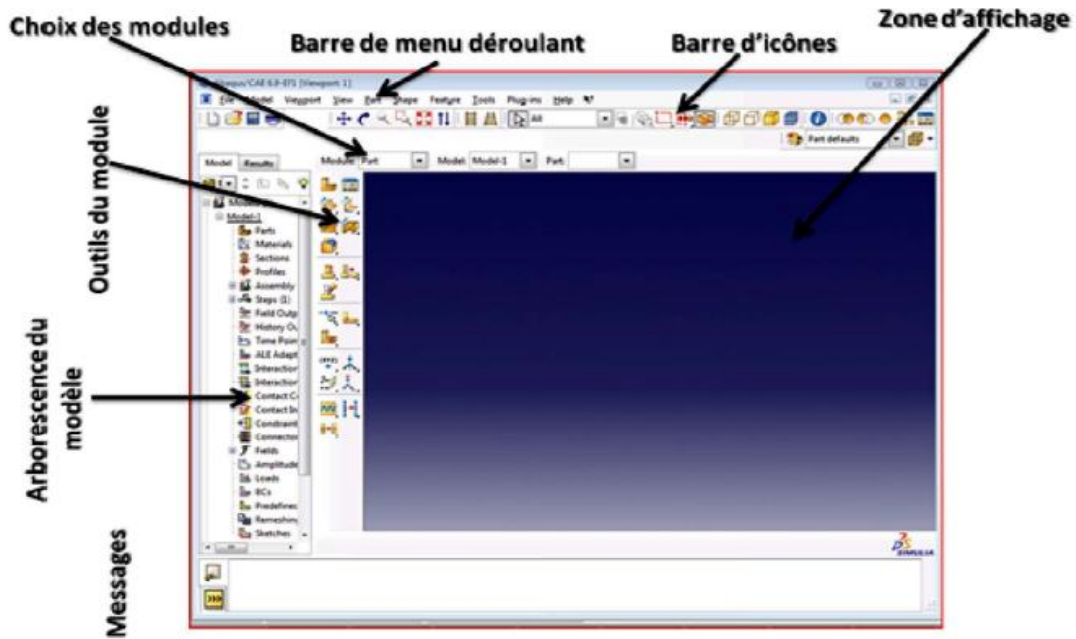


Figure III- 4: Organisation d'ABAQUS[15]

2.6 Les modules [16]

ABAQUS CAE est divisé en unités fonctionnelles appelées modules. Chaque module contient les outils qui sont propres à une partie de la tâche de modélisation. Figure 2.5. [10]

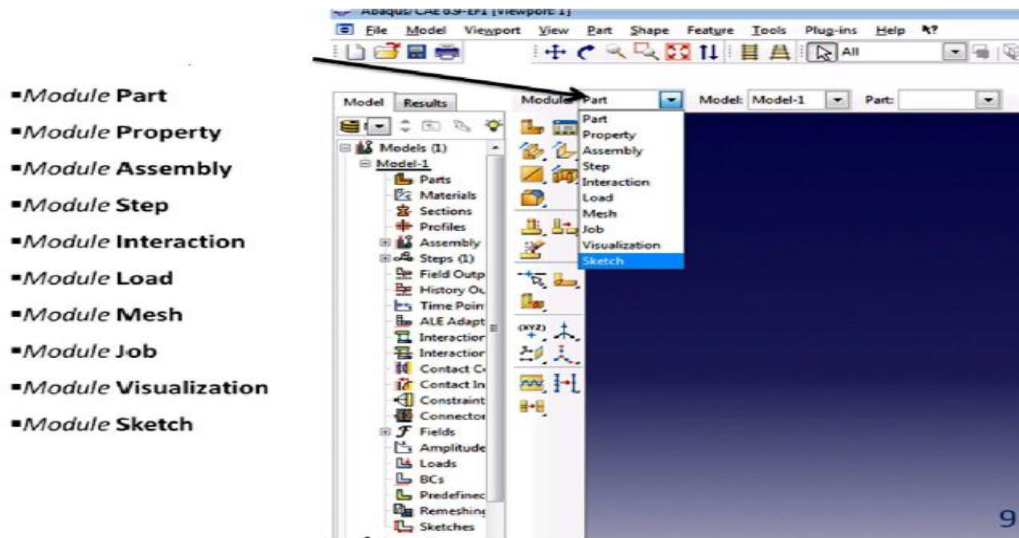


Figure III- 5: Réalisation de la mise en données d'un problème [15]

1- Le module « PART ».

Le module Part permet de créer tous les objets géométriques nécessaires à notre problème, soit en les dessinant dans ABAQUS CAE, soit en les important d'un logiciel de dessin tiers.

2- Le module « PROPERTY ».

Le module propriété permet, comme son nom l'indique, de définir toutes les propriétés d'un objet géométrique ou d'une partie de ces objets.

3- Le module « ASSEMBLY ».

Ce module permet d'assembler les différents objets géométriques créés dans un même repère de coordonnées global. Un modèle ABAQUS contient un seul assemblage.

4- Le module « STEP ».

Ce module permet de définir toutes les étapes et les requêtes pour le post traitement, c'est à dire le moment (temps) à partir duquel une force est appliquée et jusqu'à quand, il est aussi possible de créer des forces ou des conditions limites qui s'activent à des moments donnés.

5- Le module « INTERACTION ».

Grâce ce module, il est possible de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du modèle, qu'elles soient mécaniques, thermiques ou autres. Il faut savoir qu'ABAQUS ne prend en compte que les interactions explicitement définies, la proximité géométrique n'étant pas suffisante.

6- Le module « LOAD ».

Le module load permet de spécifier tous les chargements, conditions limites et champs. Il faut savoir que les chargements et les conditions limites sont dépendants des steps, par exemple une force est appliquée au step 1 mais inactive au step 2.

7- Le module « MESH ».

Ce module contient tous les outils nécessaires pour générer un maillage élément fini sur un assemblage.

8- Le module « JOB ».

Une fois que toutes les tâches de définition du modèle ont été réalisées, il faut utiliser le module Job pour analyser ce modèle. ABAQUS va alors réaliser tous les calculs nécessaires et en tirer des résultats.

9- Le module « VISUALIZATION ».

Ce module permet de visualiser le modèle et les résultats, les courbes de charges, les déformations...

10- Le module « SKETCH ».

Ce module permet de créer des formes bidimensionnelles qui ne sont pas associés à un objet. Il peut être utilisé pour des extrusions par exemple.

2.7 Les différents fichiers pour la simulation sous ABAQUS [15]

2.7.1 Fichier d'entrée (Input file) :

- **Extension .inp** : contient des mots clés décrivant la géométrie, les matériaux, les Conditions limites et les chargements de la structure étudiée.
- **Génération du fichier .inp** :
 - Avec un éditeur (fichier texte) ou programme en connaissant les divers mots clés de commande ABAQUS.
 - Avec l'interface graphique ABAQUS/CAE.

2.7.2 Fichier de résultats (output file) :

- Extension .odb : Contient les contours et courbes de résultats.

2.7.3 Autres fichiers créés par ABAQUS lors de la simulation :

- Fichier **.com** : exécutable de vos calculs.
- Fichier **.log** : fichier de procédure.
- Fichier **.msg** : résumé du déroulement du calcul en cours, message d'erreur.
- Fichier **.dat** : liste des résultats, résumé de votre modélisation.
- Fichier **.res** : fichier binaire de reprise.
- Fichier **.fil** : fichier binaire des résultats.
- Fichier **.sta** : Fichier statistique ... etc.

2.9 Conclusion :

La programmation efficace de la méthode des éléments finis requiert une bonne expérience tant dans le domaine des éléments finis que dans le domaine de l'informatique.

Dans le présent chapitre, un logiciel majeur a été bien détaillés L'ABAQUS, avec les pas de fonctionnement. Nous a permis de prendre une idée détaillée sur le calcul par élément finis.

Dans ce travail on choisit l'élément **S4R** pour modéliser du structure poutre encastree le que nous permet d'obtenir de résultats approchées.

Chapitre IV

Résultats

4.1. INTRODUCTION :

Dans ce chapitre on modélise une structure plaque multicouche sandwich encastree en deux cote en utilisant l'Abaqus, dans tous les cas étudie on va choisir l'élément S4R c'est un élément de type Mindlin

4.2. Structure trois couches :

En basant sur la figure (4- 1) pour montrer la géométrie de la plaque multicouche étudiée

- L : longueur
- E : module de Young
- W : largeur
- ν : le coefficient de poisson
- q : la charge
- h_t : l'épaisseur totale
- E_a : module de Young de l'âme
- E_p : module de Young des peaux (E_p, E_a : cas matériaux isotrope)
- h_a : l'épaisseur de l'âme
- h_p : l'épaisseur des peaux

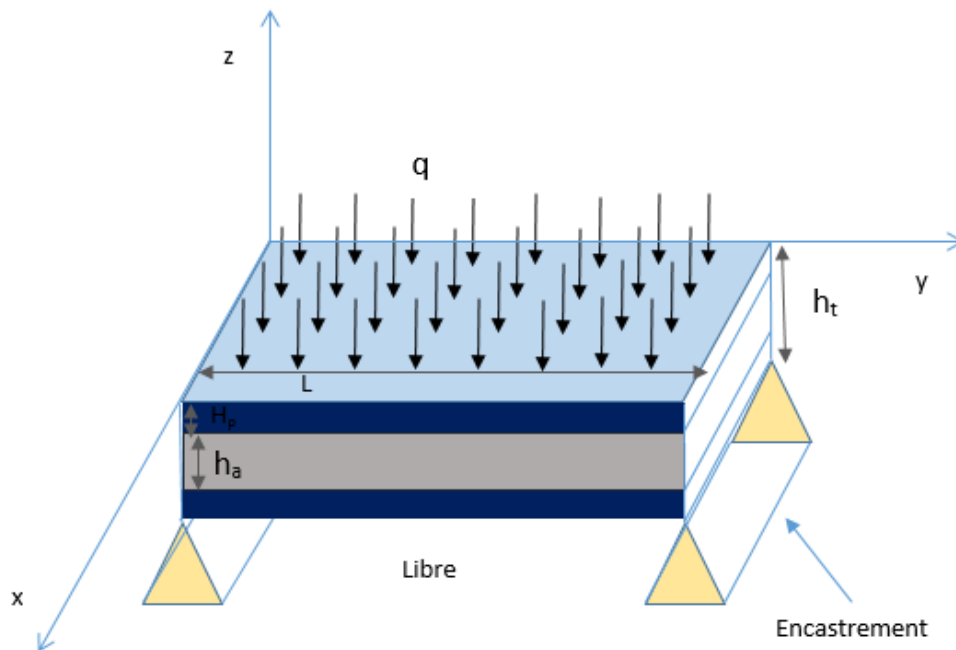


Figure IV- 2 : structure plaque encastree

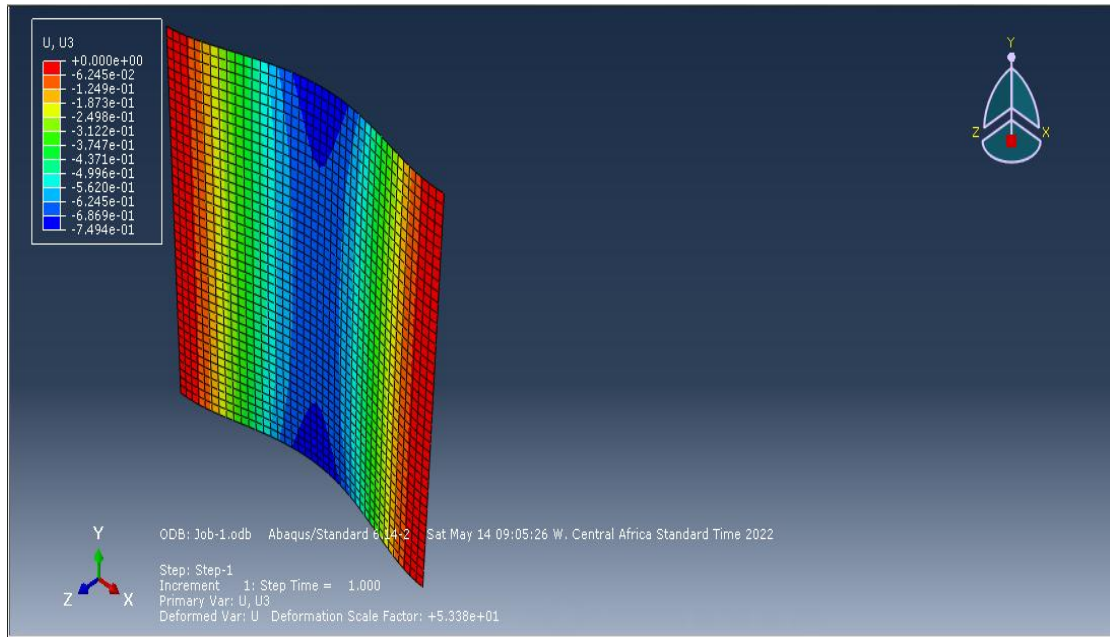


Figure IV- 3 simulation par logiciel ABAQUSE

4.3 Cas(1) : Peaux (isotrope) et Âme (isotrope) :

4.3.1. Influence du module de Young des peaux :

Soit une structure plaque sandwich encastree et sous une charge uniformement repartie sur la surface superieure (voir figure 2) dont les caracteristiques mecaniques et geometriques sont :

$L = 500\text{mm}$, $W = 500\text{mm}$, $H1 = 2\text{mm}$, $H_a = 7\text{mm}$, h_p , $E_a = 8e7$, $\nu_p = 0.3 = \nu_a$,

$q = 12\text{MPa}$

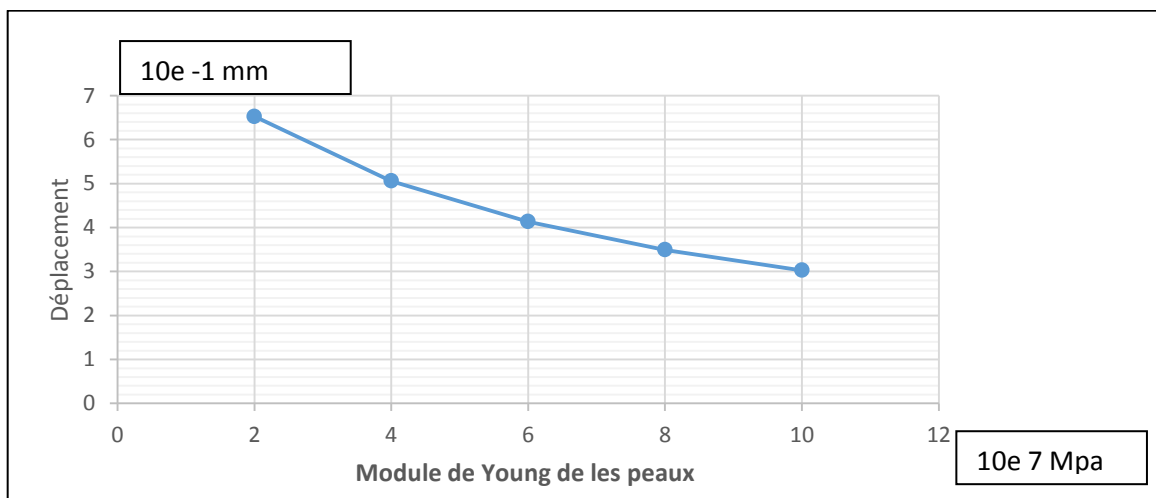


Figure IV- 4 : Influence du module d'Young des peaux sur le déplacement

- Ce graphe nous permet de voir l'effet du module de Young des peaux sur le déplacement transversal au milieu de la plaque. on peut voir clairement que le déplacement diminue progressivement quand l'on augmente la valeur du module de Young.

4.3.2. Influence du module de module d'Young de l'âme :

Soit une structure plaque sandwich encadrée et sous une charge uniformément répartie sur la surface supérieure dont les caractéristiques mécaniques et géométriques sont :

$L = 500\text{mm}$, $W = 500\text{mm}$, $H1 = 2\text{mm}$, $H2 = 7\text{mm}$, $H3 = H1$, $E_p = 2 \times 10^7 \text{MPa}$, $\nu_p = 0.3$, V_a
 $q = 12 \text{Mpa}$

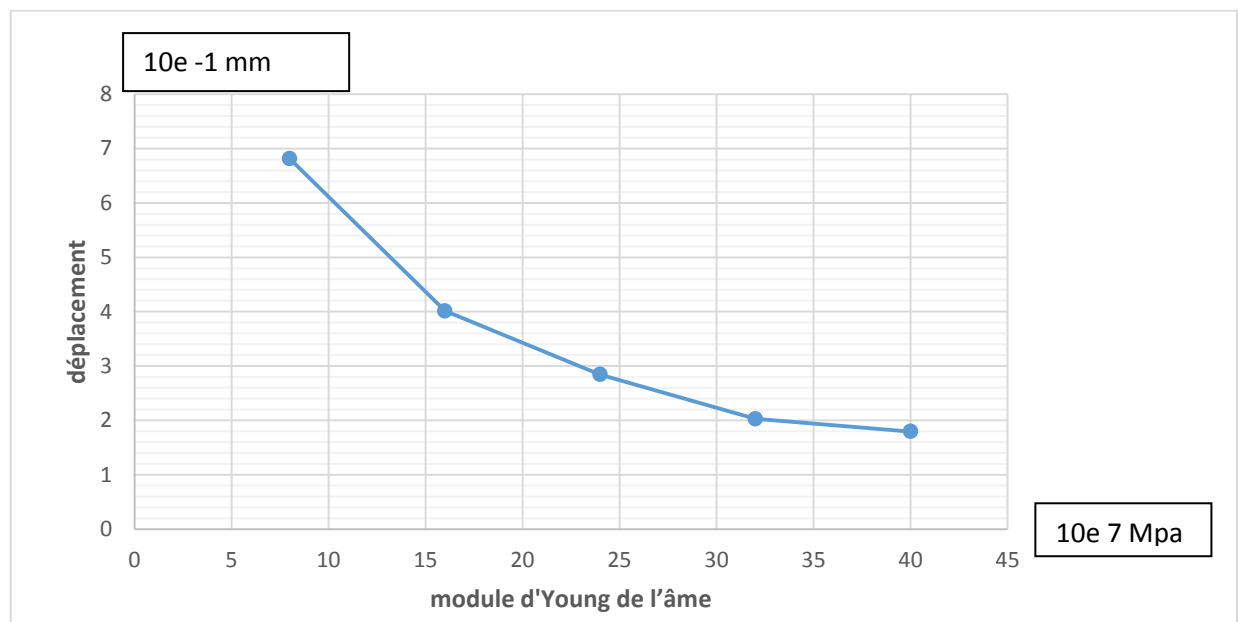


Figure IV- 4 : Influence du module d'Young de l'âme sur le déplacement.

- Ce graphe nous permet de voir l'effet du module de Young de l'âme sur le déplacement maximal la plaque. on peut voir clairement que la relation entre le module et le déplacement est inversement proportionnel.

4.4. Cas(2) : Peaux (isotrope) Âme (lamina)

Les caractéristiques mécaniques d'un matériau lamina sont :

- E_x : module de Young dans la direction (x)
- E_y : module de Young dans la direction (y)
- G_{yz} : module de cisaillement dans le plan (y, z)
- G_{xy} : module de cisaillement dans le plan (x, y)
- G_{xz} : module de cisaillement dans le plan (x, z)

Soit une structure plaque sandwich carré sous une charge uniformément répartie sur la surface supérieure dont les caractéristiques mécaniques et géométriques sont :

$L = 400 \text{ mm}$, $W = 400 \text{ mm}$, $H_a = 5 \text{ mm}$, $H_p = 1 \text{ mm}$ $q = 12 \text{ MPa}$, E_y (peaux) = $50 \times 10^6 \text{ MPa}$,
 V (peaux) = $0.3 = V_a$, $G_{xy} = 25 \times 10^7 \text{ MPa}$, $G_{xz} = 15 \times 10^7 \text{ MPa}$, $G_{yz} = 11 \times 10^7 \text{ MPa}$

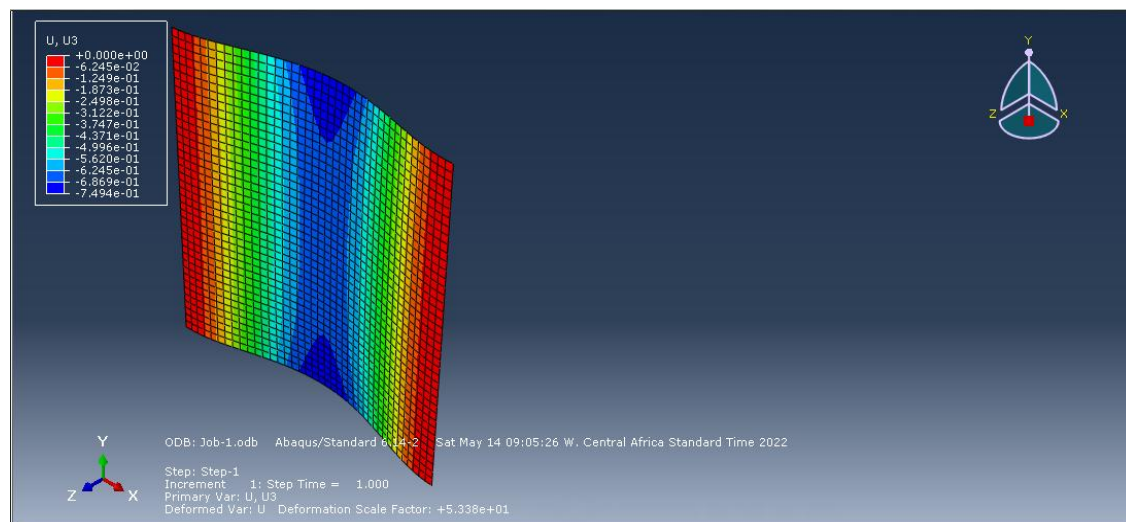
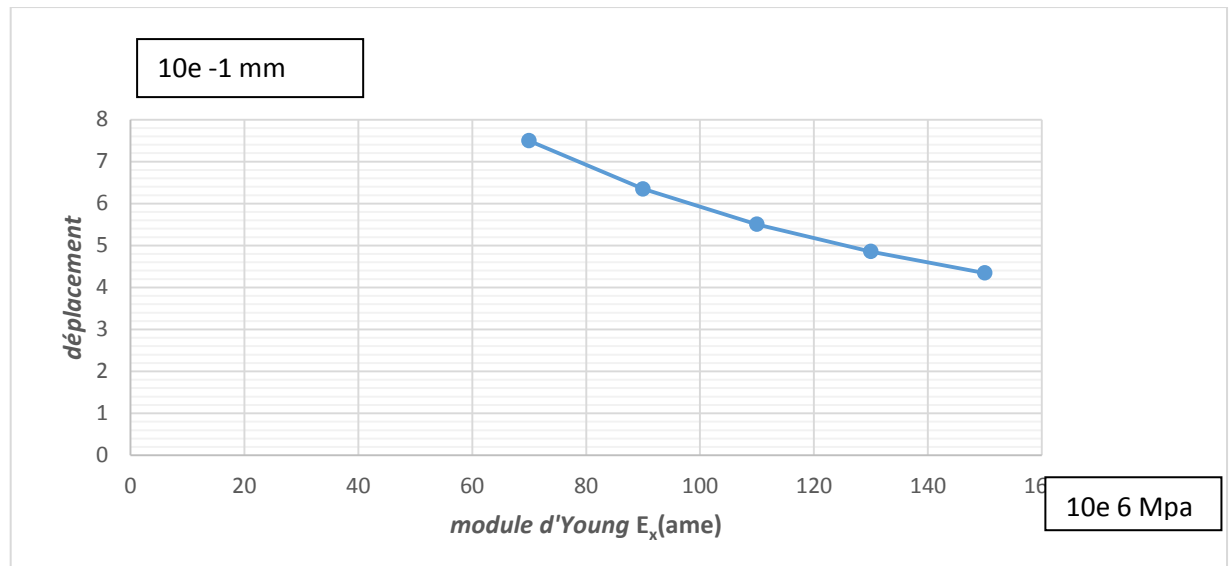


Figure IV- 5 : simulation par logiciel ABAQUSE

4.4.1. Influence du module de Young E_x (Âme) :

Soit une structure plaque sandwich sous une charge uniformément répartie sur la surface supérieur dont les caractéristiques mécaniques et géométriques sont :

$L = 400 \text{ mm}$, $W = 400 \text{ mm}$, $H_a = 5 \text{ mm}$, $H_p = 1 \text{ mm}$ $q = 12 \text{ MPa}$, $E_{yp} = 50 \times 10^6 \text{ MPa}$,
 $V_p = 0.3 = V_a$, $G_{xy} = 25 \times 10^6 \text{ MPa}$, $G_{xz} = 15 \times 10^6 \text{ MPa}$, $G_{yz} = 11 \times 10^6 \text{ MPa}$



• **Figure IV- 6 : Influence du module d'Young E_x de l'âme sur le déplacement.**

- Ce graphe nous permet de voir l'effet du module d'Young E_x sur le déplacement transversal au milieu de la plaque. on peut voir que le déplacement diminue progressivement quand on augmente la valeur du module de Young de l'âme.

4.4.2. Influence du module de Young E_y de l'âme :

Soit une structure plaque sandwich sous une charge uniformément répartie sur la surface avant dont les caractéristiques mécaniques et géométriques sont :

$L = 400 \text{ mm}$, $W = 400\text{mm}$, $H_a = 5\text{mm}$, $H_p=1\text{mm}$ $q = 12 \text{ MPa}$ $E_{xp}=70e6 \text{ MPa}$,
 $V_p=0.3$, $G_{xy}=25e6 \text{ MPa}$, $G_{xz}=15e6 \text{ MPa}$, $G_{yz}=11e6\text{MPa}$

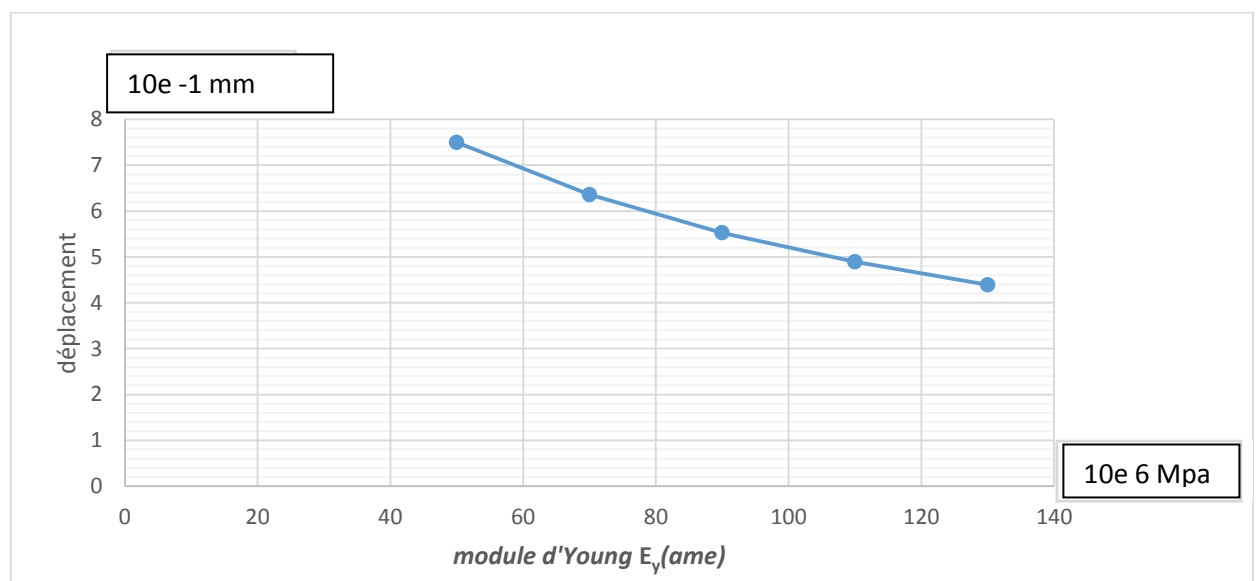


Figure IV- 7 : Influence du module d'Young E_y de l'âme sur le déplacement.

- Ce graphe nous permet de voir l'effet du module d'Young E_y sur le déplacement transversal au milieu de la plaque. On peut voir clairement que le déplacement diminue progressivement quand l'on augmente la valeur du module de Young de l'âme dans la direction y.

4.4.3. Influence du module de cisaillement G_{yz} de l'âme:

Soit une structure plaque multicouche sous une charge uniformément répartie sur la surface avant dont les caractéristiques mécaniques et géométriques sont :

$L = 400 \text{ mm}$, $W = 400 \text{ mm}$, $H_a = 5 \text{ mm}$, $H_p = 1 \text{ mm}$, $q = 12 \text{ MPa}$, $E_{xp} = 70 \cdot 10^6 \text{ MPa}$, $E_{yp} = 90 \cdot 10^6 \text{ MPa}$, $\nu_p = 0.3$, $G_{xy} = 25 \cdot 10^6 \text{ MPa}$, $G_{xz} = 15 \cdot 10^6 \text{ MPa}$, $G_{yz} = 20 \cdot 10^6 \text{ MPa}$

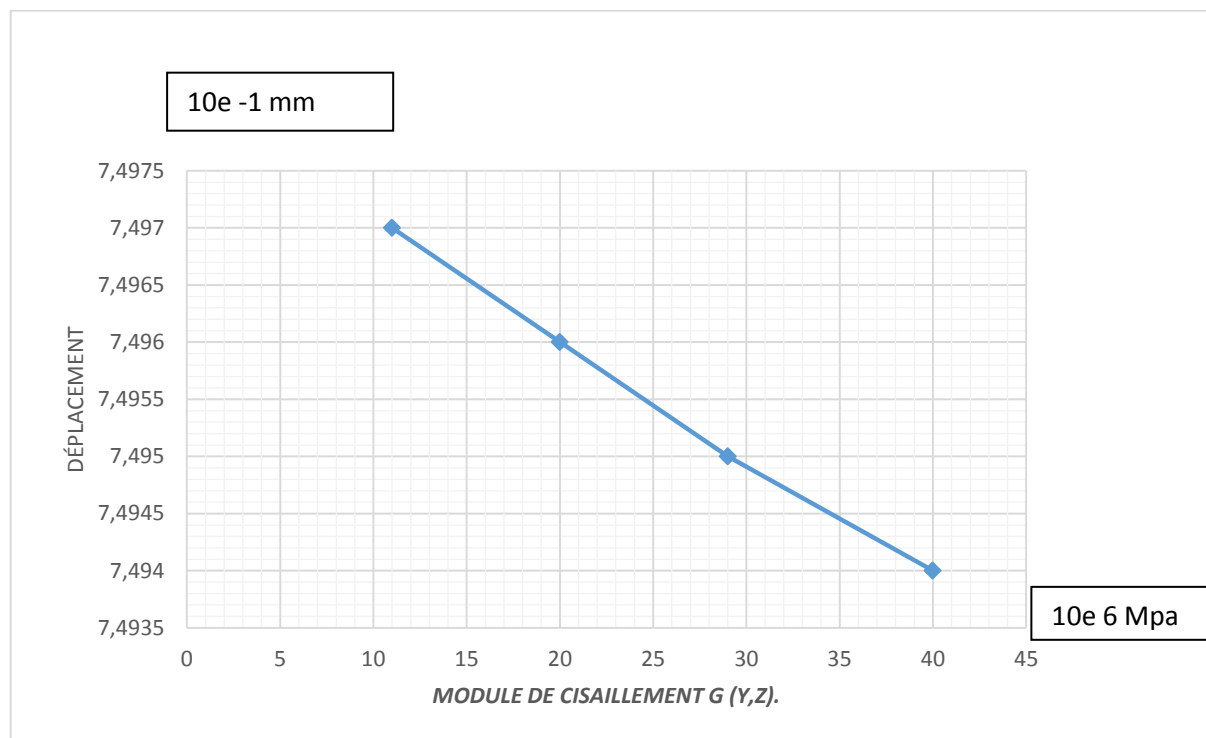


Figure IV- 8 Influence du module de cisaillement G_{yz} de l'âme sur le déplacement.

- Ce graphe nous permet de voir l'effet du module de cisaillement G_{yz} sur le déplacement transversal au milieu de la plaque. On peut voir clairement que la relation entre le déplacement et le module de cisaillement de l'âme est presque linéaire

4.4.4. Influence du module de cisaillement G_{xy} de l'âme :

Soit une structure plaque sandwich sous une charge uniformément répartie sur la surface avant dont les caractéristiques mécaniques et géométriques sont :

$L = 400 \text{ mm}$, $W = 400\text{mm}$, $H_a = 5\text{mm}$, $H_p=1\text{mm}$ $q = 12 \text{ MPa}$ $E_{xp}=70\text{e}6 \text{ MPa}$,
 $E_{yp}=90\text{e}6 \text{ MPa}$, $V_p=0.3=V_a$, $G_{xz}=15^{\circ}6 \text{ MPa}$, $G_{yz}=11^{\circ}6\text{MPa}$

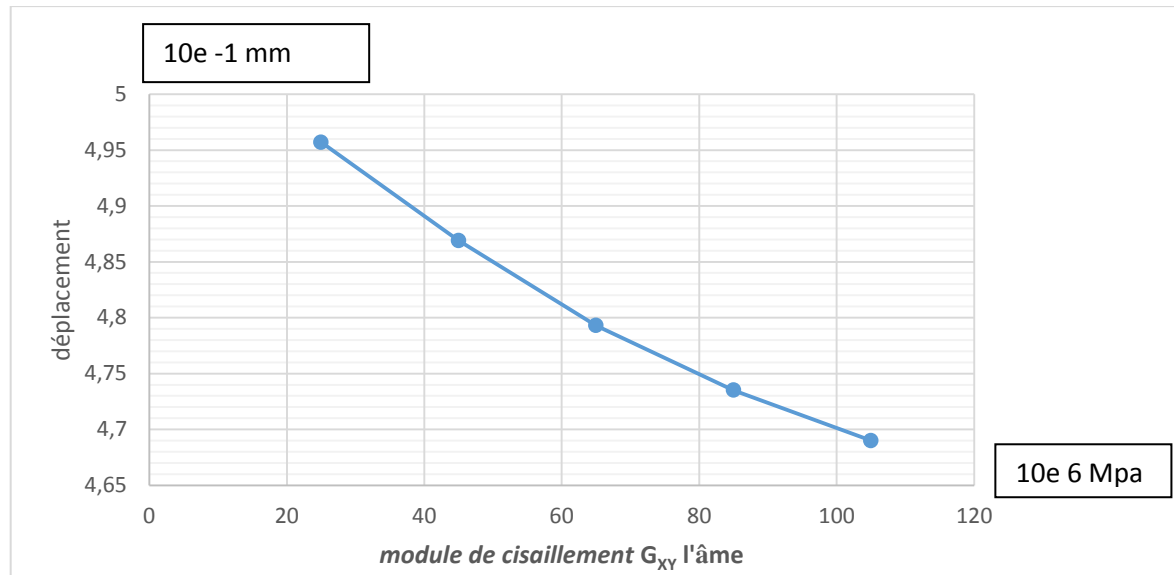


Figure IV- 9 : Influence du module de cisaillement G_{xy} de l'âme sur le déplacement

- Ce graphe nous permet de voir l'effet du module de cisaillement G_{xy} sur le déplacement transversal au milieu de la plaque. On peut voir clairement que le déplacement diminue progressivement quand l'on augmente la valeur du module de cisaillement.

- L'augmentation du module de cisaillement contribue à rigidifier la structure

4.3.5. Influence du module de cisaillement G_{xz} de l'âme:

Soit une structure plaque sandwich sous une charge uniformément répartie sur la surface avant dont les caractéristiques mécaniques et géométriques sont :

$L = 400 \text{ mm}$, $W = 400\text{mm}$, $H_a = 5\text{mm}$, $H_p=1\text{mm}$ $q = 120 \text{ MPa}$ $E_{xp}=70\text{e}6 \text{ MPa}$,
 $E_{yp}=90\text{e}6 \text{ MPa}$, $V_p=0.3$, $G_{xy}=25\text{e}6 \text{ MPa}$, $G_{yz}=11\text{e}6\text{MPa}$

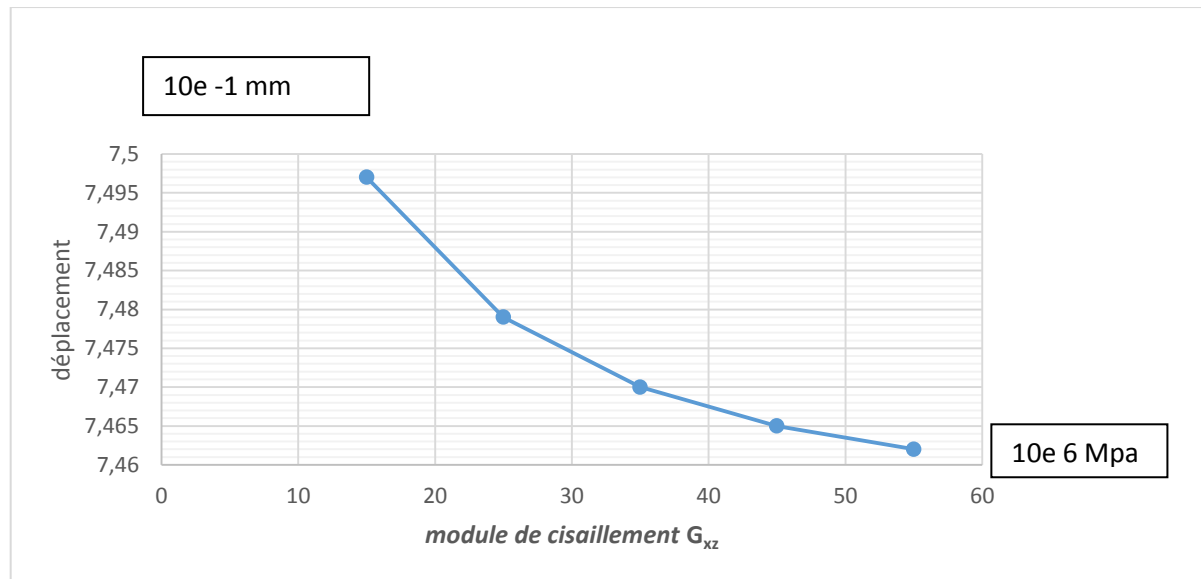


Figure IV- 10 Influence du module de cisaillement G_{xz} de l'âme sur le déplacement.

- Ce graphe nous permet de voir l'effet du module de cisaillement G_{xz} de l'âme sur le déplacement maximale de la plaque. On peut voir clairement que le déplacement diminue progressivement quand on augmente la valeur du module de cisaillement dans le plan (x, z)

4.5. Influence de l'épaisseur

Soit une structure plaque sandwich sous une charge uniformément répartie sur la surface avant dont les caractéristiques mécaniques et géométriques sont :

$L = 400 \text{ mm}$, $W = 400 \text{ mm}$, $H_a = 5 \text{ mm}$, $q = 120 \text{ MPa}$ $E_{xp} = 70 \text{ e}6 \text{ MPa}$, $E_{yp} = 90 \text{ e}6 \text{ MPa}$, $V_p = 0.3$, $G_{xy} = 25 \text{ e}6 \text{ MPa}$, $G_{yz} = 11 \text{ e}6 \text{ MPa}$

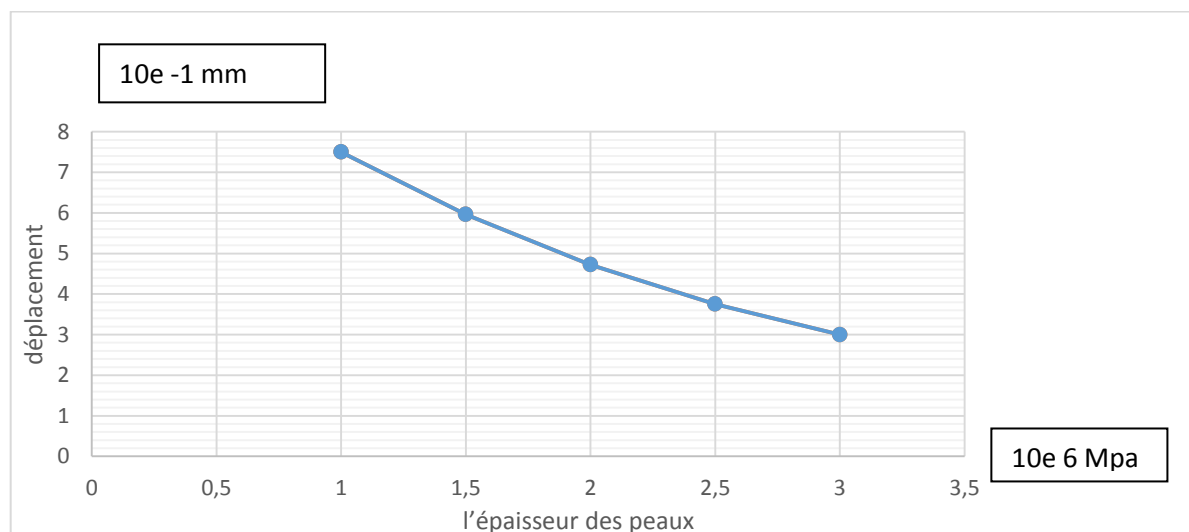


Figure IV- 11 Influence de l'épaisseur des peaux sur le déplacement.

- Ce graphe nous permet de voir la variation du déplacement en fonction de l'épaisseur des peaux, on peut remarquer que cette relation est presque linéaire

Conclusion :

Dans cette partie de travail, nous avons étudié l'influence des caractéristiques mécanique des constituants d'une structure sandwich (âme /peaux) sous sollicitation mécanique sur le déplacement transversal en utilisant un élément finis de type Mindlin (champs de déplacement de premier ordre) , on a remarquer clairement que les caractéristiques mécanique(module d'Young/module de Coulomb) sont très importants pour choisir une structure sandwich ayant une bonne rigidité.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Aujourd'hui, la méthode des éléments finis est une technique récente à caractère pluridisciplinaire, car elle met en œuvre les connaissances de trois disciplines de base, la mécanique des structures, l'analyse numérique et l'informatique appliquée. Notre objet est de modaliser une structure multicouche sous une sollicitation mécanique par la méthode des éléments finis en utilisant un logiciel de calcul (Abaqus).

Dans ce travail nous avons étudié l'influence des caractéristiques mécaniques des constituants d'une structure multicouche sandwich sur le déplacement transversal.

On a observé que les caractéristiques mécaniques choisis (module d'Young, module de Coulomb), influent clairement sur le déplacement soit pour une structure sandwich constitué par des peaux et âme isotropes soit pour le cas d'une âme isotrope et des peaux en lamina.

Dans notre travail on a choisir l'Abaqus car il est considéré parmi les logiciels de calcul les plus puissant et plus utilisé dans le domaine de calcul par éléments finis, l'élément finis utilisé dans ce travail est S4R, c'est un élément coque a cinq degrés de libertés par nœuds. Le travail sur l'Abaqus nous a permet de prendre une idée détaillée sur le calcul par éléments finis et la modélisation des structures.

Références

Références

- [1] G. CHRETIEN. Matériaux composites à matrice organique, Technique et Documentation, Edition EYROLLES 1986
- [2] P. JACQUINET, Utilisation de matériaux composites, Ed. HERMES. Paris 1991
- [3] A.LITIEM, & A.A.HAMDI, vibration liber des plaques composites multicouches en utilisant MEF par le code calcul ANSYS (doctoral dissertation).
- [4] J. MOLIMARD, Mécanique des Matériaux composites, Version 2, EMSE 2004.
- [5] D. GAY. "Matériaux composites". 5ème édition, Lavoisier Paris 2005, ISSN 2-7462- 1098-3
- [6] J-M. BERTHLOT, Matériaux composites, Comportement mécanique et analyse des structures, 4eme édition, Ed TEC&DOC, Lavoisier, 2005
- [7] K.LAAZIZ, introduction aux modélisations et aux méthodes de calcul des matériaux composites, mémoire de magister, université des sciences et technologie d' Tizi-Ouzou, 2010
- [8] D.GAY, Matériaux composites 4e édition revue et augmentée, Ed. HERMES, 1997 multicouches en utilisant MEF par le code calcul ANSYS (Doctoral dissertation).
- [9] Nodal Consultants, L'industrie française des matériaux composites, Etude stratégique, DIGITIP, 2003
- [10] M.HADDADI, Etude numérique avec comparaison expérimentale des propriétés thermophysiques des matériaux composites à matrice polymère, Mémoire de Mastre, Université El Hadj Lakhdar Batna, 2011.
- [12] F. LAURIN, Introduction générale sur les matériaux composites, ONERA THE FRENCH AREOSPACE LAB, 2011
- [13] BERDJI, M. E. B., GHERIBI, N., & Hecini, A. Modélisation d'une structure en matériaux isotropes par la méthode des éléments finis (Doctoral dissertation).
- [14] A. Boulefour, Evaluation d'éléments finis volumiques dans Abaqus sur des cas tests non linéaires géométriques (Masters thesis).
- [15]. Bari Taieb. (2019). Modélisation des structures 3D en élastoplasticité utilisant l'Abaqus (Doctoral dissertation, Génie mécanique, Université Mohamed Khider-Biskra.).
- [16]. J.BRICHE, Thermomécanique. Introduction à la CAO sur le logiciel ABAQUS.

الملخص:

في ظل دراسة و نمذجة هياكل الألواح المتعددة الطبقات في سلوكها الميكانيكي في مختلف الخصائص هدفا مهما للغاية ليس في مجال البناء الميكانيكي بل أيضا في مجالات الهندسة المدنية والطيران وغيرها لفهم نمذجة العناصر المحدودة بشكل كامل يمكننا استعمال Abaqus باستخدام عنصر S4R لدراسة تأثير الخصائص الميكانيكية على الإزاحة العرضية لهيكل الوحة المتعددة الطبقات

الكلمات المفتاحية :
الإزاحة العرضية. هيكل متعدد الطبقات. النمذجة العددية. طريقة العناصر المحدودة .

ABSTRACT :

The study and modeling of plates having a multilayerd structures and anisotropic mechanical behavior remains a very important object not only in the mechanical construction field but also in civil engineering, aeronautics, biomechanics, maritime and military constructions.. etc

To fully understand the finite element modeling process, we exploit the Abaqus software using the shell elements –S4R to study the influence of the mechanical characteristics (YOUNG AND COULOMB modules) on the transverse deflexion of a sandwich structure on mixed supports (clamped and free).

Keywords Numerical modeling, finite element method (MEF), transverse displacement, anisotropic structure, multilayer structure, sandwich structure

Résume :

L'étude et la modélisation des structures plaques ayant une structure multicouche et un comportement mécanique anisotrope demeure un objet très important non seulement dans le domaine de la construction mécanique mais aussi dans les domaines de génie civile, aéronautique, biomécanique, constructions maritime et militaire ... etc.

Pour bien comprendre la modélisation par élément finis, on exploite l'Abaqus en utilisant l'élément coque – S4R pour étudier l'influence des caractéristiques mécaniques sur le déplacement transversal d'une structure sandwich en appuis mixte (encastrement et libre) .

Mots clés : Modélisation numérique, méthode éléments finis (MEF), déplacement transversal, structure anisotrope, structure multicouche, structure sandwich