

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET  
POPULAIRE**

**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA**

**FACULTÉ DE TECHNOLOGIE**

**DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE**

MEMOIRE

PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE

**MASTER**

FILIÈRE : GÉNIE MÉCANIQUE

SPÉCIALITÉ : GÉNIE DES MATÉRIAUX

PAR :

**HAMADOUCHE FARID**

## Thème

---

**Simulation numérique d'un catalyseur à base d'alumine**

---

Soutenu le 04/06/2024 devant le jury composé de :

Pr. Khelfaoui Y

Président

Mr. YOUNES. R

Rapporteur

Mr. IDIR. A

Examineur

Mr HARA H

Invite -

**ANNÉE UNIVERSITAIRE 2023-2024**

# Remerciements

# *Remerciements*

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu qui m'a donné la santé, la volonté et le courage d'accomplir ce travail.

Mes vifs remerciements sont destinés à Dr YOUNES Rassim, mon promoteur, pour son aide, ces critiques constructives, ses explications et suggestions pertinentes et pour la qualité de ses orientations tout au long de ce travail et pour avoir apporté tant de soins à la réalisation de ce mémoire.

Je ne peux pas oublier de présenter ma gratitude à mes parents pour les efforts inlassables qu'ils ne cessent de déployer pour moi.

je remercie également les membres de jury qui m'ont fait l'honneur en acceptant d'examiner et de juger mon travail.

Sans oublier l'équipe du hall technologie, pour leurs soutiens et disponibilité.

Que tous ceux qui ont contribué à ma formation trouvent ici l'expression de mes sincères gratitude.

Enfin, un merci particulier à tous ceux qui m'ont apporté leur soutien.

# *Dédicace*

## *Dédicace*

*Je dédie ce travail  
A mes très chers parents  
A mes frères et ma sœur  
A tous les enseignants*

*A MON AMI AOURLANE MOULOUD*

*Hamadouche Farid*

# Liste des figures

## Liste des figures

<b>Chapitre I</b>		
<b>Figure I.1</b>	Matériaux Composites.....	3
<b>Figure I.2</b>	Structure d'un matériau composite.....	4
<b>Figure I.3</b>	Matériaux composites à haute performance.....	5
<b>Figure I.4</b>	Principaux matériaux de renforts.....	6
<b>Figure I.5</b>	Chaine et trame d'un tissu.....	8
<b>Figure I.6</b>	Tissus multidirectionnels.....	9
<b>Figure I.7</b>	Fibre en carbone.....	10
<b>Figure I.8</b>	Pli a renforcement unidirectionnel.....	14
<b>Figure I.9</b>	Constitution d'un sandwich.....	14
<b>Figure I.10</b>	10. Composite stratifié.....	15
<b>Figure I.11</b>	Représentation schématique de la technique de moulage au contact.....	19
<b>Figure I.12</b>	Représentation schématique de la technique de moulage par projection.....	20
<b>Figure I.13</b>	L'influence de l'orientation des fibres.....	21
<b>Chapitre II</b>		
<b>Figure II.1</b>	Schéma principe d'un Catalyseur.....	23
<b>Figure II.2</b>	Schéma de principe catalyse homogène.....	23
<b>Figure II.3</b>	Schéma principe d'un catalyseur hétérogène.....	24
<b>Figure II.4</b>	Le processus catalytique.....	27
<b>Figure II.5</b>	Action de fluide en mouvement dans la convection.....	30
<b>Figure II.6</b>	Catalyseur sous forme de nid d'abeille.....	32
<b>Chapitre III</b>		
<b>Figure III.1</b>	La pièce simulée sur SolidWorks (a) avant et (b) après maillage	34
<b>Figure III.2</b>	Différentes sollicitations effectuées (a) traction (b) compression (c) flexion	35

## Liste des figures

<b>Figure III.3</b>	Concentration et distribution de contraintes de traction sur (a) TiO <sub>2</sub> et (b) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	36
<b>Figure III.4</b>	Résultats de déplacement.....	37
<b>Figure III.5</b>	Courbe de traction transversale (a) alumine (b) TiO <sub>2</sub> .....	38
<b>Figure III.6</b>	Courbe de traction longitudinale (a) alumine (b) TiO <sub>2</sub> .....	39
<b>Figure III.7</b>	Concentration et distribution de contrainte de compression sur (a) TiO <sub>2</sub> et (b) alumine.....	39
<b>Figure III.8</b>	Résultats déplacement (a) alumine et (b) dioxyde titane.....	39
<b>Figure III.9</b>	Courbe d'essai de compression transversale sur (a) alumine et (b) TiO <sub>2</sub>	40
<b>Figure III.10</b>	Courbe d'essai de compression longitudinale sur (a) l'alumine et (b) TiO <sub>2</sub>	40
<b>Figure III.11</b>	Concentration et distribution de contrainte de flexion sur (a) alumine et (b) dioxyde titane	41
<b>Figure III.12</b>	Courbe d'essai de flexion sur (a) l'alumine et (b) TiO <sub>2</sub>	42
<b>Figure III.13</b>	Injection de l'air	43
<b>Figure III.14</b>	Vue en coupe transversale sur SolidWorks	44
<b>Figure III.15</b>	Courbe de l'évolution de la Température sous 5 C° pour : (a) TiO <sub>2</sub> , (b) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .	44
<b>Figure III.16</b>	Courbe pression Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> et TiO <sub>2</sub> pour température 5 c°	45
<b>Figure III.17</b>	Courbe température TiO <sub>2</sub> (a) et AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (b) pour température 10 C°	46
<b>Figure III.18</b>	Courbe pression TiO <sub>2</sub> (a) et AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (b) pour température 10 c°	47
<b>Figure III.19</b>	Courbe température TiO <sub>2</sub> (a) et AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (b) pour température 20 c°	48
<b>Figure III.20</b>	Courbe Pression TiO <sub>2</sub> (a) et AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (b) pour température 20C°	49
<b>Figure III.21</b>	Courbe température TiO <sub>2</sub> (a) et Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (b) pour température 30C°	50
<b>Figure III.22</b>	Courbe de Pression : a- TiO <sub>2</sub> b- Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> pour température 30C	51



# Liste des tableaux

## Liste des tableaux

---

	<b>Chapitre I</b>	
<b>Tableau I.1</b>	Types de fibres verres.....	10
	<b>Chapitre II</b>	
<b>Tableau II.1</b>	Le dioxyde de titane dans la production d'hydrogène et la photo-dégradation des polluants.....	29
<b>Tableau II.2</b>	Les propriétés importantes des trois phases cristallines de TiO <sub>2</sub> .....	29
	<b>Chapitre III</b>	
<b>Tableau III.1</b>	Les propriétés des matériaux utilisés	33

# Sommaire

## Sommaire

I	<b>Introduction générale</b>	3
	<b>CHAPITRE I : généralité sur les matériaux composites</b>	
<b>I.1.</b>	Définition d'un matériau composite.....	3
<b>I. 2.</b>	Différents types matériaux composites .....	
<b>I.2.1.</b>	Matériaux composites de grande diffusions.....	4
<b>I.2.2.</b>	Matériaux composites de haute performance .....	4
<b>I.3.</b>	Classification des matériaux composites .....	5
<b>I.3.1.</b>	Classification des matériaux composites suivant la forme des constituants.....	5
<b>I. 3. 2.</b>	Classification des matériaux composites suivant la nature des constituant	5
<b>I. 4.</b>	Constituant des matériaux composites .....	6
<b>I. 4. 1.</b>	Les renfort .....	6
<b>I. 4. 2.</b>	Les fibres.....	6
<b>I. 4. 3.</b>	Les formes linéique .....	7
<b>I. 4. 4.</b>	La forme surfacique .....	7
<b>I. 4. 5.</b>	Les mats .....	7
<b>I. 4. 6.</b>	Les tissus et rubans.....	8
<b>I. 4. 2.</b>	La forme multidirectionnelle .....	9
<b>I. 4. 2. 1.</b>	Les principales fibres.....	9
<b>I. 4. 2. 2.</b>	Les fibres de verre .....	9
<b>I. 4. 2. 3.</b>	Les fibres de carbone .....	10
<b>I. 4. 2. 4.</b>	Les fibres de bore les fibres de carbure de silicium .....	10
<b>I. 4. 2. 5.</b>	Les fibres d'aramides .....	11
<b>I. 4. 2. 6.</b>	Les fibres céramiques .....	11

## Sommaire

I. 4. 3.	Les charges et les additifs .....	11
I. 4. 3. 1.	Les charges .....	11
I. 4. 3. 2.	Les additifs .....	12
I. 4. 4.	La matrice .....	12
I. 4. 4. 1.	Les diffèrent types de la matrice .....	12
I. 4. 4. 2.	Les matrice organiques .....	12
I. 4. 4. 3.	Les matrices métalliques .....	12
I. 4. 4. 4.	Les matrices céramiques .....	13
I. 4. 4. 5.	Les matrices carbonée.....	13
I. 5.	Architecture des composites .....	13
I.5.1.	Les monocouches .....	13
I.5.2.	Les sandwichs.....	14
I. 5. 3.	Les stratifiés .....	15
I. 6.	Les avantages .....	15
I. 7.	Les inconvénients.....	15
I. 8.	Domaine d'applications des matériaux composites .....	16
I. 8. 1.	Construction aéronautique .....	16
I. 8. 2.	Construction automobile .....	17
I. 8. 3.	Secteur bâtiment .....	18
I. 9.	Elaboration des matériaux composites .....	18
I. 9. 1.	Cas des composites à matrices polymères.....	19
I. 9. 2.	Technologies dites en moule ouvert.....	19
I. 10.	Intérêt de l'orientation des fibres sur la déformation.....	20
	<b>CHAPITRE II : études technologiques et conceptions des catalyseurs</b>	

## Sommaire

<b>II. 1.</b>	Définition.....	22
<b>II. 2.</b>	Description d'un catalyseur.....	22
<b>II. 3.</b>	Les différents types catalyseur.....	23
<b>II. 4.</b>	Le rôle d'un catalyseur.....	24
<b>II. 5.</b>	Les propriétés d'un catalyseur.....	25
<b>II. 6.</b>	Les avantages de catalyseur.....	26
<b>II. 7.</b>	Domaine d'utilisation des catalyseurs.....	27
<b>II. 8.</b>	Conception et dimension SolidWorks d'un catalyseur.....	28
<b>II. 9.</b>	Structure cristalline de TiO <sub>2</sub> .....	29
	<b>CHAPITRES III : la simulation numériques</b>	
<b>III. 1.</b>	Introduction.....	33
<b>III. 2</b>	Description des matériaux.....	33
<b>III.3.</b>	Modèle géométrique.....	34
<b>III. 4.</b>	Propriété Mécanique du catalyseur en forme de nid d'abeille.....	34
<b>III.5.</b>	Critère de Tresca.....	35
<b>III. 6.</b>	Critère de Von Mises.....	36
<b>III. 7.</b>	Résultats et discussion.....	36
<b>III.7. 1.</b>	Essai de traction .....	36
<b>III. 8.</b>	Simulation du flux d'air traversant le catalyseur en format nid d'abeille.....	42

# Introduction générale

## I. Introduction générale

Ces dernières années les matériaux composites se sont des matériaux remarquables dans divers secteurs comme le spatiale, l'aéronautique la construction navale et l'automobile Les matériaux composites sont comme leur nom l'indique, constitués des divers matériaux, chacun ayant des propriétés et fonctions spécifique. Généralement, un composite comprend une matrice (resine) dans laquelle est distribué un renfort (des fibres) afin d'améliorer les propriétés du produit. L'avantage des matériaux composites comparés aux autres matériaux est que ceux-ci associent forte résistance et légèreté et de varier les propriétés lors de la fabrication. Par ailleurs, il est possible d'obtenir le produit final {partir des matériaux de base en une seule étape.

La connaissance du comportement mécanique d'un matériau composite est le premier souci des chercheurs du domaine. Mais cela s'avère insuffisant puisque les matériaux composites généralement utilisés sont susceptibles d'être exposés à tous les milieux ambiants et en particulier à l'atmosphère extérieure ou les gaz, les fumées, l'humidité, et le soleil sont autant de facteurs qui modifient notablement le comportement mécanique des matériaux, contribuant ainsi à leur vieillissement. Les fibres de carbone ont été sélectionnées grâce à leurs très bonnes caractéristiques spécifiques (résistance et rigidité). Elles ont été alliées à une matrice résineuse (époxy) qui permet la mise en forme aisée.

Le composite sous forme de plis arrangés en fonction des directions de chargement constitue un composite stratifié : l'orientation judicieuse des plis permet de faire correspondre les axes de charge et les axes de rigidité ou de résistance de la structure c'est-à-dire d'optimiser. Le problème lié à ce matériau est la prédiction de son comportement à la fois complexe et multiple (lié à l'hétérogénéité et l'anisotropie) : la compréhension des phénomènes et prise en compte dans des modèles ne sont pas encore abouties que pour les matériaux métalliques.

Dans ce travail, nous nous intéressons à l'étude de l'influence de divers paramètres, entre autres : La géométrie de nid d'abeille et son comportement mécanique, puis nous abordons la caractérisation mécanique du la mêmes pièce avec deux matériaux différents, dans le but de de designer le plus performant pour tells sollicitations. A ce fait nous avons structuré ce mémoire autour de ces objectifs comme suit :



## **Introduction générale**

---

Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à la présentation des matériaux composites ainsi que leur domaine d'utilisation ;

Le second chapitre, porte une étude sur un catalyseur à base d'alumine .

Le troisième chapitre comporte une étude de simulation numérique sur SolidWorks de différentes sollicitations mécaniques ainsi que l'injection de l'air.

On terminera ce mémoire par une conclusion générale, ou on exposera les principaux résultats obtenus.



# Chapitre I

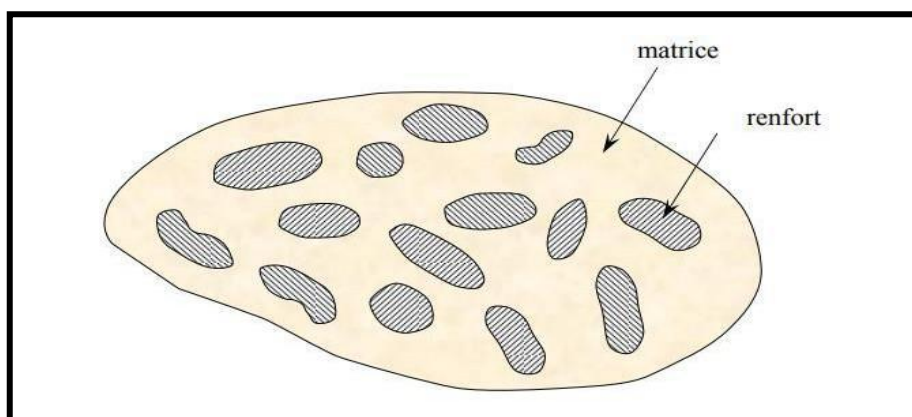
## Généralités sur les matériaux composites

## I. Introduction

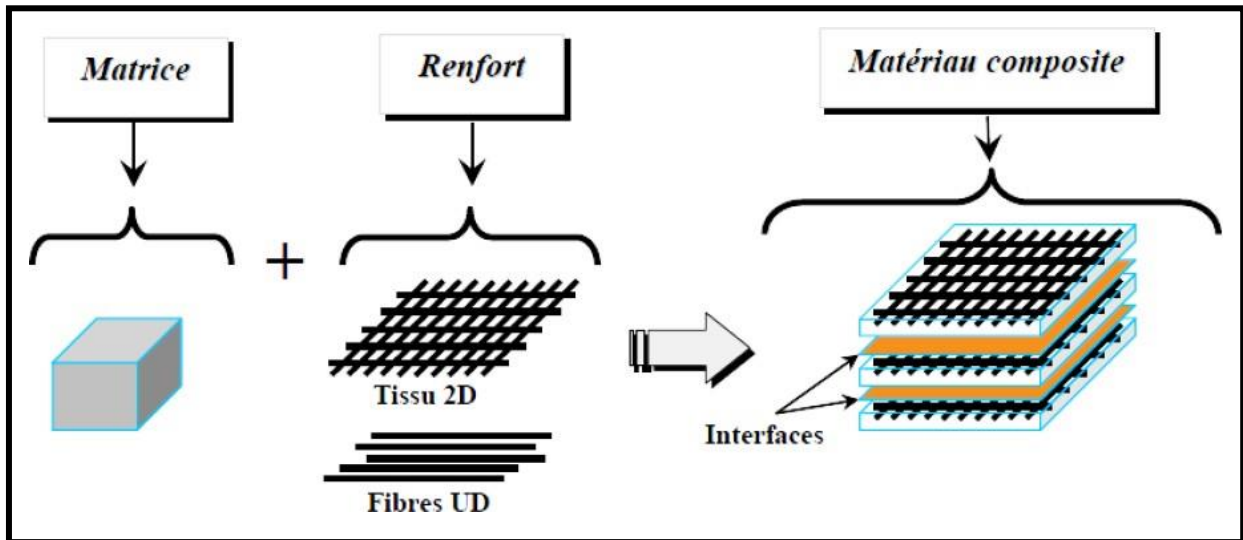
Les origines des matériaux composites sont inconnues mais tous les écrits historiques contiennent des références à certaines formes des matériaux. Par exemple, la paille a été utilisée par les arabes pour renforcer les briques ; le contreplaqué a été utilisé par les anciens Egyptiens afin d'obtenir une meilleure résistance tant aux chargements mécaniques qu'à l'environnement, les épées et les armures médiévales ont été fabriquées par des couches des différents matériaux. Aujourd'hui, les matériaux composites font partie courante de notre vie que cela soit des objets très excitants et à la mode comme la canne de golf et le kayak, ou beaucoup plus usuels tels que le contreplaqué et le béton. [1].

### I.1. Définition des matériaux composites

Un matériau composite est un matériau hétérogène formé d'au moins deux constituants non miscibles. Un composite est un matériau qui essaie de combiner les propriétés de ses composants pour permettre d'améliorer certaines caractéristiques comme la résistance à la rupture, ou la rigidité. Un matériau composite est constitué dans le cas le plus général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue ; La phase discontinue appelée renfort ou matériau renforçant, est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue (matrice). [2].



**Figure. I. 1.** Matériaux Composites



**Figure I. 2.** Structure d'un matériau composite

## I. 2. Différents types de matériaux composites

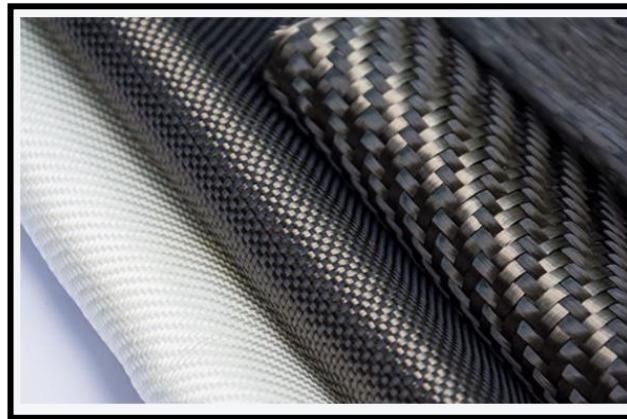
On distingue deux types de composites : les composites de grandes diffusions et les composites de hautes performances. [3]

### I. 2. 1. Matériaux de grande diffusion

Les matériaux composites à grande diffusion offrent des avantages essentiels, qui sont : Optimisation des coûts par diminution des prix de revient, leur composition de polyester avec des fibres de verre longues ou courtes (sous forme de mat ou tissu) et la simplicité du principe d'élaboration du matériau [5]

### I. 2. 2. Matériaux composites de haute performance

Ils sont principalement utilisés dans l'aéronautique et sont d'un cout élevé. Les renforts sont plutôt des fibres longues. Le taux de renfort est supérieur à 50 % de masse, et ce sont les renforts qui influent sur le cout. Les propriétés mécaniques (résistance mécanique et rigidité) sont largement supérieures à celle des métaux, contrairement aux composites à grande diffusion. [5]



**Figure I.3.** Matériaux composites à haute performance

### **I. 3. Classification des matériaux composites**

Le classement des matériaux composites est fait suivant la forme et la nature des constituants.

#### **I.3.1. Classification suivant la forme des constituants**

- ✓ **Composites à particules** : le renfort se trouve sous forme de particules
- ✓ **Composites à fibres** : le renfort se trouve sous forme de fibres qui à leur tour se divisent :
  - **Composites à fibres longues** : représente par un ensemble de fibres continues alignées et immergées d'une matrice qui assure leur cohésion.
  - **Composites à fibres courtes** : le renfort se trouve sous forme de fibres discontinues disposées de façon aléatoire non orientée.

**Composites à renfort tissus** : un tissu est constitué de fils tissés dans deux directions perpendiculaires qui sont les directions de chaîne (associée à la chaîne longitudinale de la couche composite) les tissus différents par le type de fils utilisés et par le mode d'entrecroisement des fils de chaîne et de trame. [6]

#### **I.3. 2. Classification des matériaux composites suivant la nature de constituant**

On trouve des matériaux composites à la matrice :

- Matrice organique
- Matrice métallique
- Matrice céramique
- Matrice de carbone

#### I. 4. Constituants des matériaux composites

##### I. 4. 1. Les renforts :

Les renforts contribuent à améliorer la résistance mécanique à la traction et la rigidité des matériaux composites et se présentent sous forme filamentaire (des fibres organiques ou inorganiques). [7]

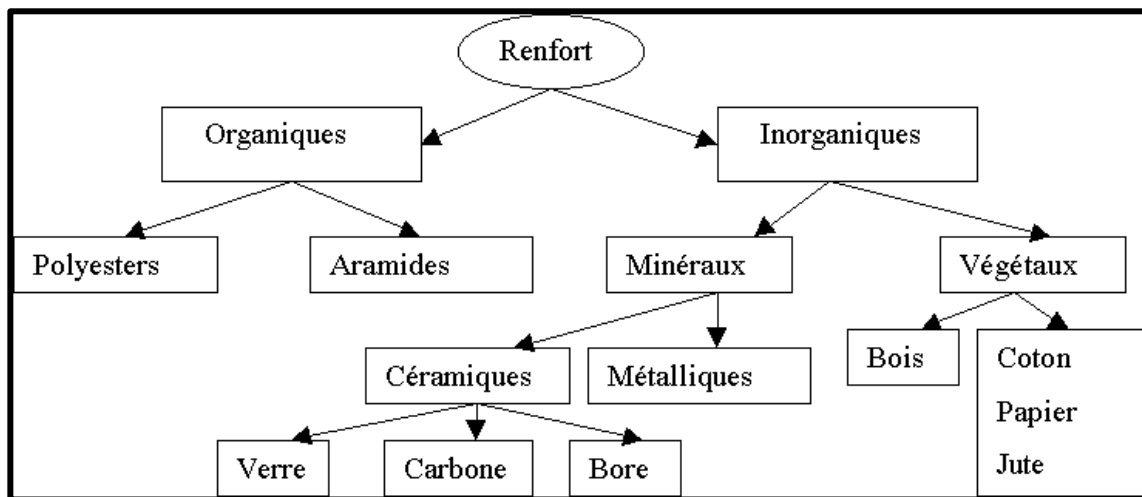


Figure I.4. Principaux matériaux de renforts

##### I.4. 2. Les fibres

Les matériaux de renfort confèrent aux composites leurs caractéristiques mécanique : rigidité, résistance à la rupture, dureté, etc. Ces renforts permettent également d'améliorer certains des propriétés physiques : comportement thermique, tenue au feu, résistance à l'abrasion, propriétés électriques, etc. Les caractéristique recherche pou

Renfort sont : caractéristiques mécaniques élevés, masse volumique faible, bonne compatibilité avec les résines, facilite de mise en œuvre, faible cout. En fonction d'utilisation, les renforts peuvent être d'origine diverses : végétales, minérales, artificielle synthétique. Toutefois, les renforts les plus utilisés sont présentés sous forme de fibre ou forme dérivées et constituent une fraction volumique du matériau composite généralement comprise entre 0,3 et 0,7. Les renforts fibres se présentent sous diverses formes :

- Forme linéique (fils, mèche)
- Forme de tissus (tissus simple, mats)
- Sous forme multidirectionnelle (tresses, tissus complexe)

#### **I.4. 3. La forme linéique**

Les fibres sont élaborées suivant un diamètre de quelque micromètre (une dizaine), et ne peuvent par conséquent être utilisées sous forme unitaire pour leur utilisation pratique, ces fibres sont réunies en fils ou en mèche de différentes formes. La nomenclature générale des diverses formes linéiques est encore mal déterminée et généralement de celle utilisée pour les fibres de verre. La fibre unitaire est généralement appelée filament élémentaire ou monofilament. Les monofilaments sont ensuite réunis en fils ou en mèches. Les fils continus ou discontinus sont caractérisés par leur masse linéique ou titre, qui dépend du diamètre et du nombre de monofilaments. L'unité de masse linéique est le tex, masse d'un fil de longueur égale à 1000 mètres.

$$1 \text{ tex} = 1 \text{ g/km}$$

En fait, on devrait plutôt écrire :

$$1 \text{ tex} = 10^{-6} \text{ kg/m. [8]}$$

#### **I. 4. 4. La forme surfacique**

Les fils peuvent être utilisés pour réaliser les formes surfaciques suivantes :

#### **I. 4. 5. Les mats**

C'est des nappes de fils continus ou discontinus, disposés dans un plan sans aucune orientation préférentielle, et maintenus ensemble par un liant soluble ou non dans les résines. L'absence



D'orientation préférentielle des fibres conduit à une isotropie des propriétés mécaniques du mat dans son plan.

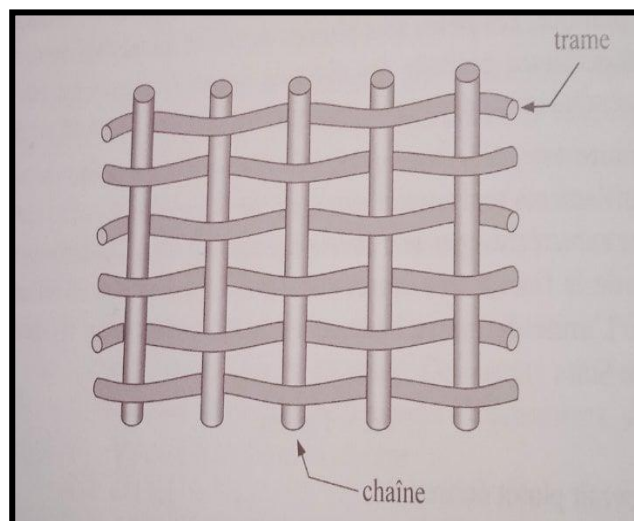
Il existe deux types de mats : mats à fibres courtes ; et mats à fibres continues. [9]

#### I. 4. 6. Les tissus et rubans

Ensemble de fils, stratifiés ou mèches réalisées sur un métier à tisser, composé d'une chaîne et d'une trame

Selon le schéma d'entrecroisement des fils de chaîne et les fils de trame, que l'on nomme du l'armure tissu, on distingue plusieurs types de tissage :

- Armure toile ou taffetas
- Armure satin ;
- Armure sergée ;
- Armure à haut module ;
- Armure unidirectionnelle. [9]



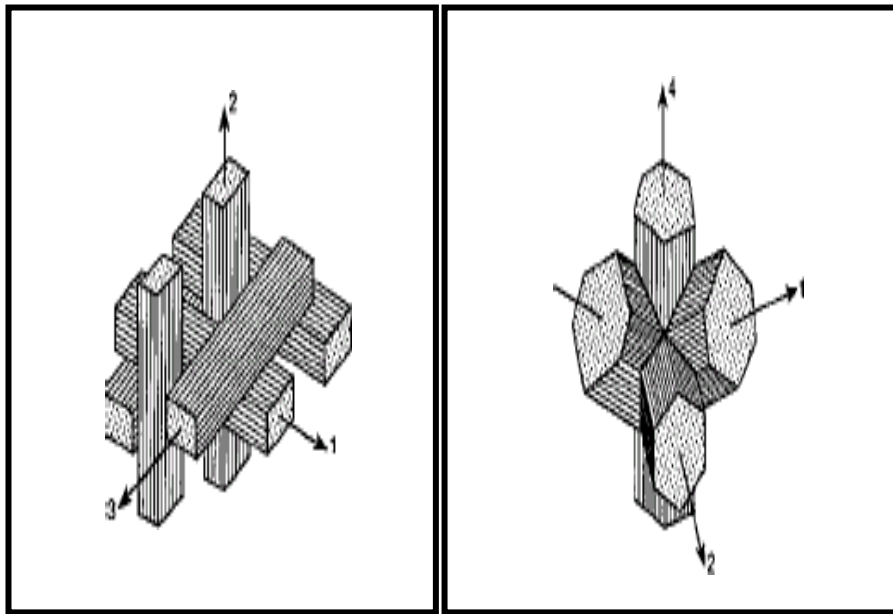
**Figure I. 5.** Chaîne et trame d'un tissu

## I. 4. 2. La forme multidirectionnelle

### I. 4. 2. 1 Les principales fibres

Tissage cylindrique ou conique avec des entrecroisements réguliers des fils qui a la particularité d'être modulable en diamètre. Les fils s'entrecroisent en hélice. Le diamètre de la tresse est lié au pas de l'hélice, par conséquent à l'angle que font les fils entre eux.

Ce tissage nous permet des révolutions très résistantes ayant un diamètre variable le long de l'axe. [10]



(a) : tissage 3D

(b) : tissage 4D

**Figure I. 6.** Tissus multidirectionnels

### I. 4. 2. 2. Les fibres de verre

C'est la fibre la plus utilisée vu son excellent rapport performances mécaniques/ prix, ça place est au premier rang des renforts utilisés dans les matériaux composites. Les fibres de verre sont fabriquées à partir d'un mélange à base de silice ( $\text{SiO}_2$ ), qui est fondu à une température  $1200^\circ\text{C}$  puis passé dans une filière en platine, et les filaments sont étirés avant refroidissement à un diamètre de 5 à 13 mm à une vitesse de 60 m/s. En faisant varier la composition du mélange (silice, kaolin, chaux...etc.) on peut Obtenir différents types de verre. [10]

Principaux constituents (%)	Types des fibres de Verres		
	E	D	R
Silice SiO <sub>2</sub>	53-54	73-74	60
Alumine AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14-15	0	25
Chaux CaO- Magnésie MgO	20-24	0.5-0.6	9
Oxyde de bore B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6-9	22-23	6

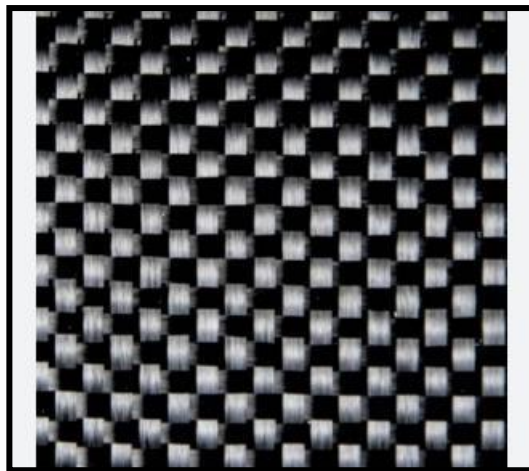
**Tableau I.1** Types des fibres de verres

#### I. 4. 2. 3. Les fibres de carbone

C'est la fibre la plus utilisées dans les applications hautes performances. Elle est obtenue par carbonisation de la fibre de PAN (Polyacrylonitrile).

Selon la température de combustion, on distingue deux types de fibres :

- Fibres haute résistance (HR) : pour une combustion de 1000 à 1500 °C ;
- Fibres haut module (HM) : pour une température de combustion de 1800 à 2000 °C. [11]



**Figure I. 7.** Fibre en carbone

#### I. 4. 2. 4. Les fibres de bore

Obtenues par dépôt chimique de chlorure de bore (BCI) et de l'hydrogène (H<sub>2</sub>) sur un fil de tungstène de diamètre 13mm chauffé à une température comprise entre 1100 et 1300°C par effet joule. [12]

#### **I. 4. 2. 5. Les fibres de carbure de silicium**

Le principe d'élaboration est analogue à celui de fibres de bore, le dépôt résulte de la décomposition chimique à 1200°C du méthyl tri chlorosilane en présence d'hydrogène. [12]

#### **I. 4. 2. 6. Les fibres d'aramide (kevlar)**

Ce sont des polyamides des aromatiques (ou polyamide) dont la structure est composée de noyaux benzéniques reliés par des groupes CO et HN ; Elles résistent très bien aux chocs, aux vibrations, excellente résistance à la traction mais sa résistance est très faible à la compression. Kevlar : marque déposée de leur société créative. [13]

#### **I. 4. 2. 7. Les fibres céramiques**

Elles sont obtenues par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil support, leur prix de revient est très élevé. [13]

### **I. 4. 3. Les charges et les additifs**

#### **I. 4. 3. 1. Les charges**

On désigne sous le nom général de charge toute substance inerte, minérale ou végétale qui est ajoutée à un polymère de base, permet de modifier de manière sensible les propriétés mécaniques, électriques ou thermiques, d'améliorer l'aspect de surface ou bien, simplement, de réduire le prix de revient du matériau transformé. A l'inverse des matières thermoplastiques, les matières thermodurcissables ont toujours contenu des charges de nature et de forme variées, à des taux souvent élevés pouvant atteindre 60 % en masse, dépassant ce pourcentage le composite arrive à saturation. Pour un matériau donné, le choix d'une charge est déterminé en fonction des modifications recherchées pour l'objet fini. Mais, d'une manière générale, les substances utilisables comme charges des matières plastiques devront d'abord satisfaire à un certain nombre d'exigences : Compatibilité avec la résine de base ;

- Mouillabilité
- Uniformité de qualité et de granulométrie
- Faible action abrasive
- Bas prix de revient. [14]

### **I. 4. 3. 2. Les additifs**

Un additif désigne une substance qui est introduite dans un mélange pour apporter une Propriété spécifique, ils se trouvent en faible quantité (quelque % et moins) et interviennent Comme :

- Adjuvants ;c
- Lubrifiants et agents de démoulage ;
- Pigments et colorants ;
- Agents anti-retrait ;
- Agents anti-ultraviolets. [14]

### **I. 4. 4. La matrice**

Le rôle de la matrice est principalement de lier les fibres, mais aussi, d'assurer une répartition spatiale est homogène du renfort. D'un point de vue mécanique, la matrice transmet et répartie les efforts extérieurs vers le renfort. D'un autre côté, elle apporte à la structure une tenue chimique et donner la forme désirée au produit. [15]

#### **I. 4. 4. 1. Les différents types de matrices**

#### **I. 4. 4. 2. Les matrices organiques**

Les matrices en polymère de synthèse sont les plus couramment rencontrées dans les composites de grande diffusion. Associées à des fibres de verre, d'aramide ou de carbone, elles ont un faible module et une faible résistance à la traction, mais se prêtent facilement à l'imprégnation des renforts pour leur fabrication. La structure des thermoplastiques (TP) se présente sous forme de chaînes linéaires, ils ont besoin d'être chauffés pour les mettre en forme. Le refroidissement par contre permet de les fixer (les chaînes se bloquent). Pour le cas des thermoplastiques (TP) l'opération est réversible. La structure des thermodurcissables (TD) possède la forme d'un réseau tridimensionnel, le durcir dans ce cas est définitive, la transformation est donc irréversible matrice. [16]

#### **I. 4. 4. 3. Les matrices métalliques**

L'imprégnation de renforts par un alliage liquide étant une opération techniquement délicate, en pratique seuls les alliages d'aluminium sont utilisés dans ce type de technique, Associés à des fibres ou particules de graphite ou de céramiques. Ils sont faciles à mettre en œuvre car leur température de fusion est relativement basse. Le compromis obtenu entre la ténacité de la matrice métallique et la rigidité des renforts donne au composite des caractéristiques mécaniques intéressantes par rapport à l'alliage seul, surtout au-dessus de 200 °C. Leur coût de mise en œuvre élevé réserve les composites à matrice métallique aux Applications aéronautiques et spatiales. [17]

#### **I. 4. 4. 4. Les matrices céramiques**

Des composites à matrices céramiques peuvent être obtenus par imprégnation de Préforme mes de fibres (métaux, verres, aramides, carbone, céramique) soit par des suspensions liquides, ensuite frittées en température sous haute pression, soit par des gaz réactifs permettant un dépôt entre les fibres (notamment pour les composites carbone-carbone). [18]

#### **I. 4. 4. 5. La matrice carbonée**

Elles sont produites par le même principe que celui utilisé pour la production des fibres de carbones : carbonisation d'une matrice organique à haute température. Elles sont constituées de grains de carbone pyrolytique qui se dépose à chaud sur les fibres, ce qui assure une liaison mécanique entre celle-ci et ferme les vides laissés entre elles. On obtient ainsi un matériau composite dont la masse volumique se rapproche de celle du carbone massif. [19]

### **I.5. Architecture du composite**

Les structures des matériaux composites peuvent être classées en trois types :

- Les monocouches
- Les stratifiées
- Les sandwiches. [19]

#### **I.5.1. Les monocouches**

La composite monocouche (couche élémentaire ou strate) correspond à l'unité élémentaire D'épaisseur, elle est constituée d'un ou plusieurs plis identiques (tissé, UD, mats,) assemblés Sans aucune orientation. Un pli est un semi produit de composites (fibres +matrice) présenté Sous forme quasi-bidimensionnelle, feuille d'épaisseur faible ( $\approx 0.125$  mm). On distingue, le Pli UD (Le renfort est à structure UD), le pli tissé (Le renfort est à structure orienté) et le pli

Mat (Le renfort est à structure aléatoire). [20]

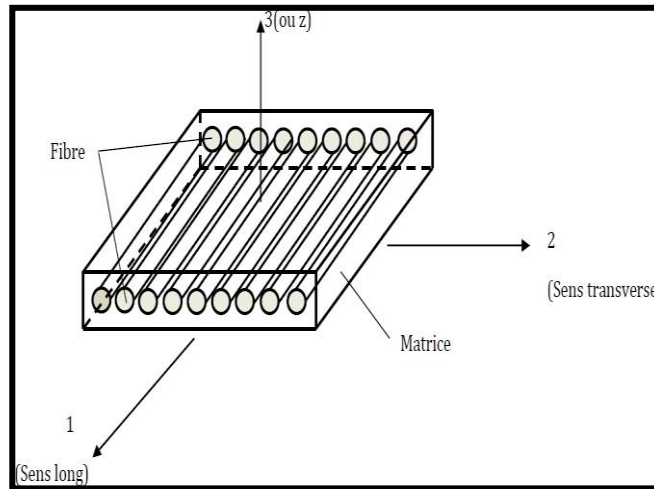


Figure I. 8. Pli a renforcement unidirectionnel

### I. 5. 2. Les sandwichs

Les matériaux sandwichs résultent généralement de l'association de deux semelles ou Peaux de faible épaisseur, constituées de matériaux a haute résistance et haut module et d'une Âme beaucoup plus épaisse et de faible densité. Ils ont 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. [21]

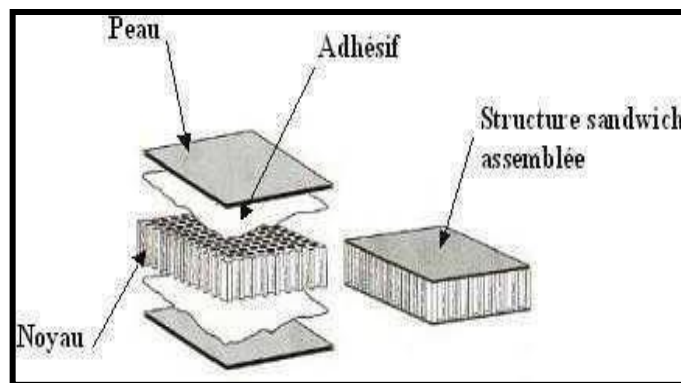


Figure I. 9. Constitution d'un sandwich



### I. 5. 3. Les stratifiés

Le composite stratifié ou multicouche est un ensemble de couches empilées et orientées suivant un ordre de drapage défini et rendues solidaires par l'opération de polymérisation. Le drapage c'est l'orientation des plis par rapport à un référentiel donné. Il définit les propriétés mécaniques, électromagnétiques et thermiques globales du matériau composite. [22]

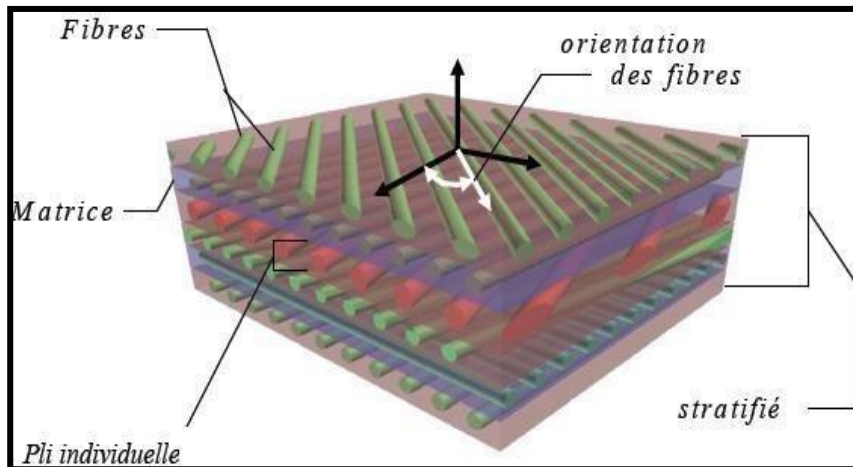


Figure I. 10. Composite stratifié

### I. 6. Les avantages

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

- 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. [23]

### I.7. Les inconvénients

Cependant certains inconvénients freinent leur diffusion :

- 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.

De plus, dans ce dernier point, le recyclage est actuellement très limité parce que le broyage ou les autres procédés sont très coûteux et fournissent une matière de faible qualité. Ces quelques inconvénients et défis à relever, ont poussé les chercheurs et les pouvoirs publics à investir et orienter les recherches vers les ressources renouvelables et biodégradables. [23]

## **I. 8. Domaines d'application des matériaux composites**

Les composites sont largement utilisés dans l'industrie, parce qu'ils présentent de bonnes caractéristiques telles la rigidité, légèreté et résistance à des contraintes d'origine mécanique ainsi qu'à celles d'origine thermique. [24]

### **I.8. 1. Construction aéronautique**

Le choix des matériaux, tel que l'industrie aéronautique, aérospatiale, automobile, ferroviaire, sports et loisirs, bâtiment, génie civil est toujours un problème complexe où le comportement coût/performance règne en maître.

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 :

- Coûts élevés par rapport à l'aluminium,
- Risques de délaminage interdisant le vol sur les structures aérodynamiques chargées. Les

premières pièces composites ont été introduites sur les satellites à la fin des années 1970. Les matériaux utilisés sont essentiellement des fibres de carbone à haut module d'Young avec résine d'époxyde. Les premiers matériaux composites ont été introduits sur les missiles balistiques dans le milieu des années 1960 par l'utilisation de structures bobinées fibres de verre/résine époxyde, les structures bobinées fibres d'aramide/9 ayant été introduites

Dans la fin des années 1970. Les fibres de carbone pour la réalisation de structures bobinées ont été introduites dans le milieu des années 1970.

L'utilisation des matériaux composites dans les constructions aéronautiques entraîne un gain de poids substantiel. Leur emploi permet, à performances égales, des gains de masse variant de 10% à 20%. Le poids de l'avion moyen-courrier Boeing 767 a été réduit, par l'emploi des composites, de 921 kilogrammes par rapport à la solution conventionnelle. Les matériaux composites sont essentiellement utilisés pour la conception et réalisation des propulseurs à poudre des lanceurs de satellites et de leur tuyère d'éjection des gaz de propulsion, obtenue par bobinage de fibres de verre, de kevlar ou de carbone, afin de résister à la pression interne résultant de la combustion du propergol carbone, afin de résister à la pression interne résultant de la combustion du propergol solide et aux efforts de lancement qui, dans certain cas, se traduisent par des chocs et des vibrations.

Sur les avions commerciaux, les premiers appareils produits industriellement en grande série utilisaient essentiellement des alliages d'aluminium, de l'acier et du titane, aujourd'hui ; les avions commerciaux les plus récents utilisent en masse encore 54% d'alliage d'aluminium, mais 20% de matériaux composites ont été introduits dans la structure, 13% d'acier, 6% de titane et 7% de matériaux divers.

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 a été mis au point un nouveau procédé permettant de développer des ailes en composites 20% moins chères 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 fuselages de ses futurs A A380 en technologie composite . [25]

### **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, chez les grands constructeurs étrangers (Volvo, Mercedes) pour développer des coffres et hayons.

La société LOHEAC de transports routiers, a pu réduire substantiellement sa consommation de carburant grâce à l'économie du poids obtenue en remplaçant les cabines conventionnelles de ses tracteurs par de nouveaux éléments moulés en une seule pièce renforcés de fibre à haute résistance.

Les composites sont choisis pour la conception de ressorts à lames. Ce sont des pièces de suspension routières très sollicitées, utilisées par les véhicules de gros tonnage et dont la lame secondaire, assurant 80% de la fonction suspension en évitant des ruptures brutales. [26]

### **I.8.3. Secteur du bâtiment**

Hormis le béton, les composites ont relativement peu pénétré le secteur du BTP, notamment du fait :

- D'un prix élevé comparé aux matériaux traditionnels (6 €/kg contre 3 €/kg pour l'acier et 1€/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 (légereté, résistance au feu, résistance mécanique et chimique), permettent de prévoir un développement prometteur. 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. [27]

### **I. 9. Elaboration de matériaux composites :**

Les techniques de fabrication jouent un rôle considérable dans les composites car chacune des opérations influe de manière irréversible sur le produit finale. De nombreuses méthodes de fabrication ont été développées pour répondre aux besoins, et leurs choix dépendent surtout des caractéristiques mécaniques dérivées et de la géométrie du produit.

On peut citer :

### I.9.1. Cas des composites à matrices polymères :

Il existe différentes techniques de mise en forme des matériaux composites à matrices polymères mais la plus utilisée est la technique du moulage :

### I.9.2. Technologies dites en moule ouvert

#### a) Moulage au contact

Procédé manuel pour la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables, à température ambiante et sans pression. Les renforts sont déposés sur le moule et imprégnés de résine liquide, accélérée et catalysée. Après durcissement de la résine, la pièce est démoulée et détournée. [28]

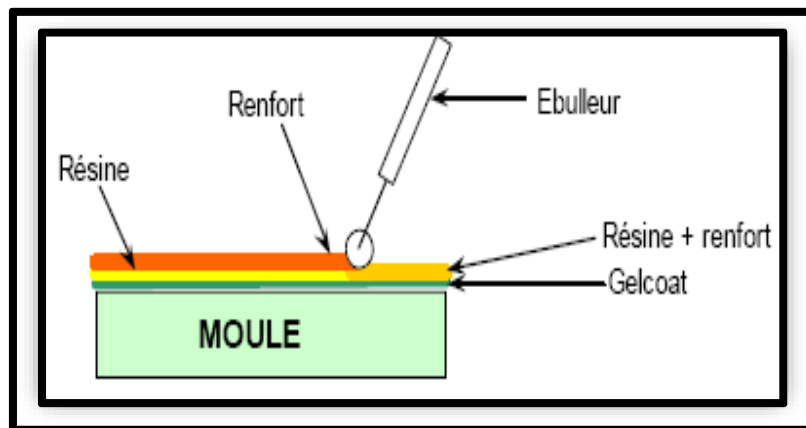


Figure I.11. Représentation schématique de la technique de moulage au contact

#### Cas d'utilisation

- Procédé pour petites séries : de 1 à 1000 pièces / an.
- Pièces de grandes à très grandes dimensions.
- Revêtement sur supports divers et in situ.

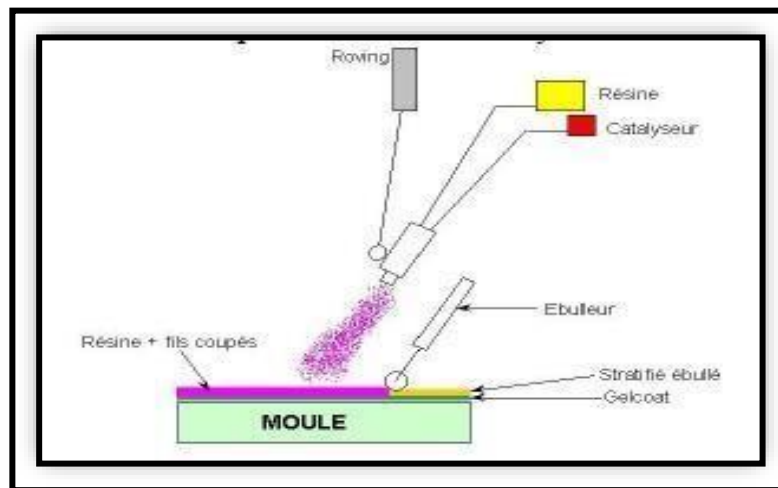
#### Domaines d'application

Nautisme ; Piscine ; Génie chimique ; Transport, carrosserie (petites séries) ; Bâtiment, travaux public (coffrage).

### b) Moulage par projection simultanée

Procédé manuel ou robotisé permettant la réalisation des pièces à partir de résines thermodurcissables à température ambiante et sans pression. Les matières premières sont mises en œuvre à l'aide d'une machine dite "de projection" comprenant

- Un dispositif de coupe - projection du renfort (roving).
- Un ou deux pistolets projetant simultanément la résine.
- Les fils coupés et la résine sont projetés sur la surface du moule puis compactés et déboulés à l'aide de rouleaux et d'ébulleurs.
- La résine pré accélérée est catalysée en continu lors de sa projection. [28].



**Figure I. 12.** Représentation schématique de la technique de moulage par projection

### I. 10. Intérêt de l'orientation des fibres sur la déformation

L'orientation de la fibre est choisie de façon adaptable avec les directions d'efforts. Les fibres sont disposées de sorte qu'elles résistent aux efforts de traction et de compression. Pour résister aussi à l'effet de cisaillement, on met deux fibres orthogonales de façon à ce que l'une d'elle supporte l'effet de compression ou traction et l'autre l'effet de cisaillement. En outre, il y a une influence de la forme de renfort sur la déformation. En effet, la raideur obtenue avec un renfort tissé sera moindre que celle que l'on observait en superposant deux directionnels croisés à 90°. Cela est dû à la courbure des fibres du fait de l'opération de tissage, qui rend le pli tissé plus déformable que les unidirectionnels croisés sous une même sollicitation. [29].

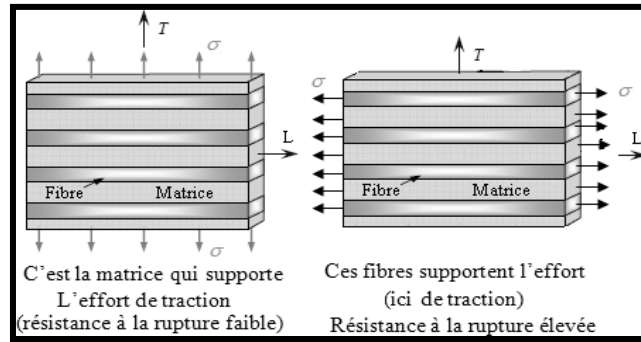


Figure 1.13. L'influence de l'orientation des fibres.

# Chapitre II

## Matériaux composites à matrice céramique



## Chapitre II : Etudes technologique et conception d'un catalyseur

---

### II. 1. Généralité sur les catalyseurs

La catalyse a une riche et longue histoire. Malgré son ancienneté, l'intérêt industriel est énorme dans tous les domaines notamment en pétrochimie. La première application de la catalyse prit place au début des années 1800 avec la découverte, en 1823 par Dobereiner, de l'action catalytique du platine lors de la réaction du dihydrogène avec le dioxygène. Cette réaction a été utilisée dans un briquet qui s'est vendu en très grand nombre. Les matériaux utilisés ainsi que la méthode de préparation des catalyseurs jouent un rôle considérable pour l'activité et la stabilité catalytiques. Le développement des méthodes de préparation a donné naissance à un flux continu de produits de haute technologie. De nombreuses voies ont été proposées. Parmi celles-ci, on peut citer la catalyse supportée (la catalyse sur support) qui bien qu'existante depuis plusieurs décennies, reste une voie très étudiée. La catalyse supportée s'est largement développée avec la mise au point de catalyseurs supportés dans lesquels la substance active est fixée sur une matrice (ou support) par une liaison ionique ou covalente. Le support confie au précurseur ses propriétés, le choix du support est donc un élément clé. Les supports de catalyseurs les plus usités sont la silice, l'alumine, les zéolithes et les charbons actifs. L'objectif de ce travail est de déterminer l'effet du support sur les différentes propriétés structurales, morphologiques des catalyseurs bimétalliques Ni- Pt déposés sur oxydes. Les catalyseurs bimétalliques à base de Ni- Pt et supportés sur  $Al_2O_3$  ou (Si  $O_2$ ) sont testés expérimentalement dans l'hydrogénation catalytique du benzène. [30].

### II. 2. Définition d'un catalyseur

Un catalyseur est un dispositif susceptible d'accélérer par sa présence la transformation chimique. Il ne modifie en aucune façon les possibilités réactionnelles qui sont fixées par la thermodynamique, de telle sorte à favoriser la production des produits désirés, au Détriment des sous-produits, un tel catalyseur est dit sélectif. En présence d'un catalyseur, la réaction est caractérisée par une augmentation de la vitesse de la transformation des réactifs et la réduction de l'énergie d'activation. [31].



**Figure II .1.** Schéma principe d'un Catalyseur

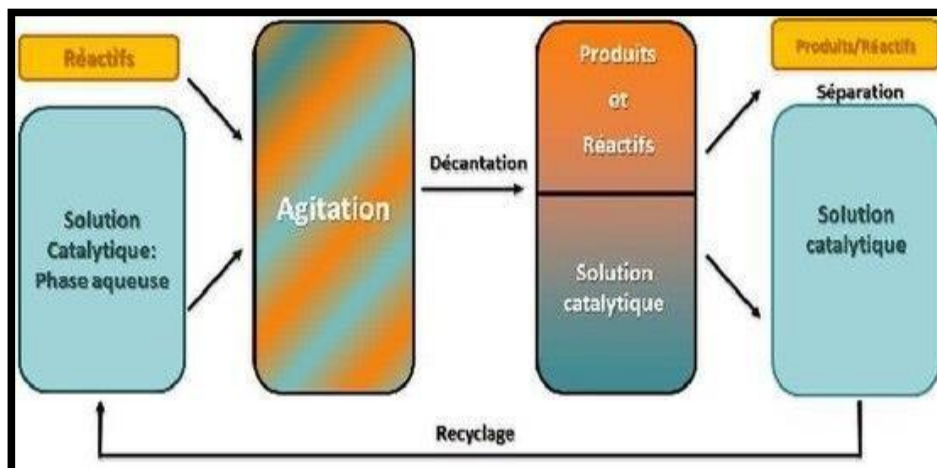
### II. 3. Les différentes classes de catalyse

Les différents types de catalyse sont classés selon le genre de catalyseur utilisé ou le mécanisme de la réaction. On distingue plusieurs types : catalyses acido-basique, électro-catalyseur photo-catalyse enzymatique, catalyse d'oxydo-réduction, catalyse nucléophile, catalyse par transfert de phase...etc.

En réalité, on distingue deux grandes catégories de réactions catalytiques ;

#### II. 3. 1. Catalyse homogène ou monophasique

Lorsque le catalyseur et les réactifs sont dans la même phase thermodynamique, le plus souvent liquide. Le catalyseur est donc soluble dans le milieu réactionnel



**Figure II. 2.** Schéma de principe catalyse homogène

### II. 3. 2. Catalyse hétérogène

Elle concerne les réactions dans lesquelles les réactifs sont dans une phase distincte du catalyseur Généralement solide. Le catalyseur est insoluble et donc facilement éliminable par filtration en fin de réaction. Un autre avantage notable est que l'on peut chauffer à des températures très élevées, bien au-delà de ce que peuvent supporter les catalyseurs homogènes, et donc effectuer des réactions Cinétiquement beaucoup plus difficiles sans affecter le catalyseur[32].

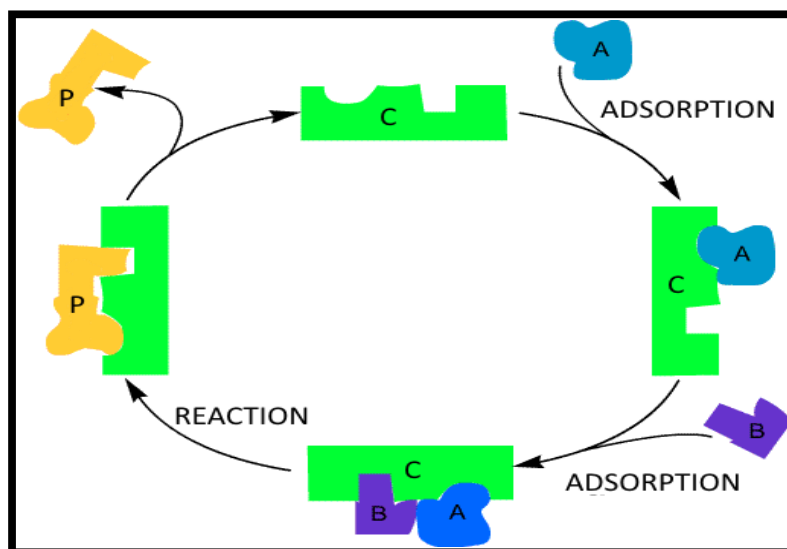


Figure. II. 3. Schéma principe d'un catalyseur hétérogène

### II. 4. Propriétés fondamentales des catalyseurs

Trois propriétés fondamentales définissant la qualité d'un catalyseur

#### II. 4. 1. L'activité

La surface catalytique est généralement inactive dans la nature. Lorsqu'un réactif est adsorbé sur la surface du catalyseur, il active ce catalyseur. Ce dernier a la capacité d'augmenter le taux de réaction. Cette capacité est connue comme activité du catalyseur. Mathématiquement, elle est calculée par le rapport entre la vitesse de la réaction (ou la constante cinétique) sur un catalyseur à un instant. L'activité d'un catalyseur dépend de plusieurs facteurs : sa méthode de préparation, son état physique de surface, sa température de travail et la composition chimique. L'adsorption est le principal facteur qui régit l'activité des catalyseurs. La liaison formée pendant l'adsorption entre la surface catalytique et les réactifs ne doit pas être trop forte ou trop faible. Il doit être assez fort pour que le catalyseur soit actif alors qu'il n'est pas si fort que les molécules réactives s'immobilisent sur la surface catalytique, ce qui laisse plus d'espace pour que les nouveaux

## Chapitre II : Etudes technologique et conception d'un catalyseur

---

Réactifs puissent être adsorbés. En conséquence, plus la température de seuil de travail d'un catalyseur est basse, plus l'activité est élevée. L'utilisation répétée d'un catalyseur diminue son activité jusqu'à l'empoisonnement. Cependant, la désactivation du catalyseur peut être causée par d'autres raisons, telles que la reconstruction de la surface du catalyseur, la lixiviation de la phase active est par forte adsorption des molécules. Les catalyseurs platinoïdes montrent une activité catalytique forte.

### II. 4. 2. La sélectivité

La sélectivité est définie comme étant l'aptitude d'un catalyseur à favoriser une réaction dans un sens désiré, en réprimant les réactions secondaires, concurrentes et consécutives, qui sont considérées comme parasites. Un même catalyseur peut posséder une activité différente pour diverses réactions. Il peut être actif pour une réaction donnée, et être absolument inactif pour une autre. La sélectivité est exprimée simplement par le rendement en produit désiré par rapport au réactif. Elle peut être améliorée en jouant soit sur la méthode de préparation, soit sur la nature et la caractéristique de support, soit sur les conditions de réaction (rapport de concentration des réactifs)

### II. 4. 3. La stabilité

La stabilité, c'est-à-dire la durée de vie du catalyseur qui détermine le temps d'utilisation avant régénération ou changement du matériau. Ce ne qu'en théorie que le catalyseur reste inchangé. En réalité, les propriétés catalytiques évoluent pendant la réaction. Une bonne stabilité est caractérisée par une très lente évolution de ces propriétés. En outre, le catalyseur ne doit pas s'affecter rapidement devant l'attaque de l'agent actif et de support. Comme les catalyseurs travaillant généralement haute température, ils perdent leur stabilité suite au frittage des cristallites du métal actif. D'autres caractéristiques essentielles dites secondaires ou techniques que doit, en supplément, posséder le catalyseur : régénérable, reproductibilité, le prix. [33].

### II. 5. Structure des catalyseurs

Les catalyseurs sont des substances qui accélèrent les réactions chimiques en abaissant l'énergie d'activation nécessaire pour que la réaction se produise. Ils agissent en fournissant une voie de réaction alternative qui permet aux réactifs de se convertir en produits plus rapidement.

Du point de vue structurel, les catalyseurs peuvent présenter différentes formes et compositions en fonction de leur nature et de leur application spécifique voici quelques exemples de structures couramment observées chez les catalyseurs. [34].

## Chapitre II : Etudes technologique et conception d'un catalyseur

---

### II. 5. 1. Catalyseurs hétérogènes

Dans les catalyseurs hétérogènes, les catalyseurs sont présents sous forme de phases distinctes par rapport aux réactifs. Ils sont généralement solides et se présentent souvent sous forme de particules ou de surfaces étendues.

Les catalyseurs hétérogènes peuvent être des métaux, des oxydes métalliques, des sulfures métalliques ou des matériaux supportés sur des supports poreux tels que l'alumine, la silice ou le carbone. La structure des catalyseurs hétérogènes peut être sous forme de nanoparticules, de couches minces, de grilles ou de structures en nid d'abeilles.

### II. 5. 2. Catalyseurs homogènes :

Les catalyseurs homogènes sont généralement sous forme de liquides ou de gaz et sont mélangés de manière homogène avec les réactifs. Ils sont souvent des complexes métalliques ou organométalliques qui peuvent être solubles dans le solvant réactionnel. Les catalyseurs homogènes peuvent présenter une structure complexe avec des ligands organiques entourant le centre métallique, ce qui influence leur activité catalytique et leur sélectivité.

### II. 5. 3. Catalyseurs enzymatiques :

Les enzymes sont des catalyseurs biologiques qui présentent une structure protéique tridimensionnelle. Ils agissent comme des catalyseurs hautement spécifiques dans les réactions biochimiques. La structure des enzymes est cruciale pour leur fonction Catalytique et peut comprendre des sites actifs, des sites de liaison des substrats et des cofacteurs, ainsi que des régions régulatrices. La structure des catalyseurs est étroitement liée à leur activité catalytique. Les caractéristiques structurales telles que la taille des particules, la surface spécifique, la porosité, la distribution des sites actifs et la présence de défauts de surface peuvent influencer l'efficacité catalytique, la sélectivité et la durabilité du catalyseur. Il convient également de noter que les catalyseurs peuvent subir des modifications de structure pendant la réaction, notamment par adsorption de réactifs, formation de complexes réactionnels intermédiaires, réarrangement structural ou modification de la surface catalytique. Ces changements structuraux peuvent avoir un impact significatif sur la cinétique et la sélectivité de la réaction catalysée. [35].

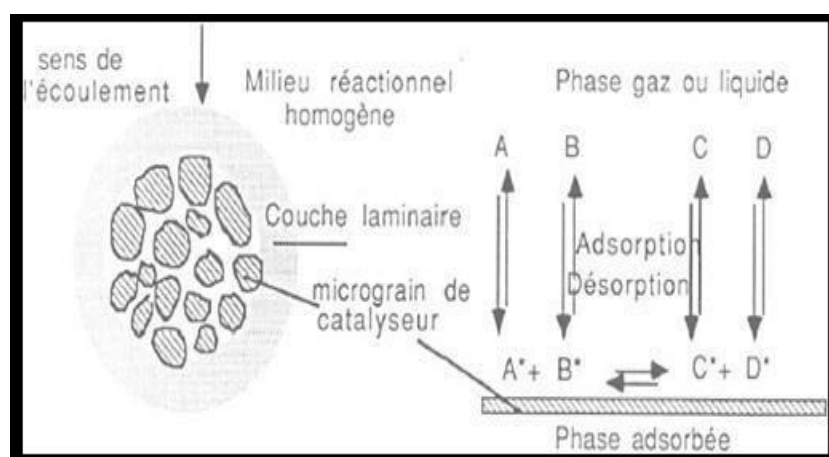
## II. 6. Caractérisation physico-chimique

Un catalyseur est une substance qui permet d'augmenter la vitesse d'une transformation chimique et qui se retrouve inaltérée en fin de réaction. Le catalyseur peut aussi avoir, outre son effet accélérateur, un effet orienteur permettant d'obtenir sélectivement les produits désirés.

La catalyse hétérogène correspond au cas particulier où le catalyseur mis en œuvre est un solide, constituant ainsi une phase distincte du milieu réactionnel gazeux, liquide ou mixte. Pour être transformées, les molécules doivent entrer en contact avec le catalyseur, d'où le nom de catalyse

## Chapitre II : Etudes technologique et conception d'un catalyseur

de contact souvent donné à la catalyse hétérogène qui est le plus utilisé dans l'industrie. Le processus catalytique implique alors les étapes schématisées sur la figure. Les étapes sont Diffusion des réactifs présents dans le milieu réactionnel homogène vers la surface du catalyseur. Réaction catalytique elle a lieu à la surface du catalyseur, en phase dite "adsorbée" et on distingue généralement encore trois étapes pour la réaction catalytique elle-même : Une étape d'adsorption des réactifs sur la surface du catalyseur qui porte les molécules au niveau énergétique du complexe activé intermédiaire : c'est l'étape dite de chimisorption ; Une étape de réaction chimique en surface du catalyseur entre réactifs adsorbés ; Une étape de désorption qui donne les produits de réaction sous leur forme stable dans le milieu réactionnel. Diffusion des produits formés, depuis la surface du catalyseur vers le milieu réactionnel. [36].



**Figure II. 4.** Le processus catalytique

### II. 7. L'oxyde d'aluminium (l'Alumine) comme support en catalyse

L'alumine ( $Al_2O_3$ ) est souvent employée comme support en catalyse. L'un des principaux domaines de son utilisation, on cite : la catalyse à trois voies (oxydation du monoxyde de carbone, des hydrocarbures et des oxydes d'azote). L'alumine n'est pas utilisée en tant que catalyseur car elle n'a pas des propriétés catalytiques intéressantes vis-à-vis de ces réactions, mais elle a des propriétés particulières qui en font d'elle un support idéal pour de telles applications. Tout d'abord, l'alumine est stable thermiquement ( $< 1000^\circ C$ ). Ce support possède une aire spécifique importante grâce à des procédés de synthèse particulière telle que la voie sol-gel. Cette importante surface spécifique permet une bonne dispersion des composants actifs du catalyseur, même pour des teneurs élevées. Elle présente également une grande surface de contact catalyseur/gaz, ainsi qu'une capacité accrue d'absorption d'eau. Pour ces raisons, l'alumine est un support privilégié dans la réaction du reformage montrant que l'alumine serait un support hydrophile présentant une mobilité d'OH tout à fait intéressante à partir de  $400^\circ C$ . C'est un très bon support de vaporeformage de l'hydrocarbure à des températures n'excédant

## Chapitre II : Etudes technologique et conception d'un catalyseur

Pas 400-500°C. [37].

### II. 8. Applications de TiO<sub>2</sub> en photocatalyse

La propriété physiques et chimiques ainsi que l'abondance de la matière première et la maîtrise du processus industriel de fabrication de TiO<sub>2</sub> lui permettent d'être utilisé sur une large gamme d'applications comme : l'agriculture, les équipements médicaux, la construction, la cosmétique, les cellules solaires, l'industrie des papiers, les capteurs de gaz ...etc. L'une des applications les plus intéressantes de TiO<sub>2</sub> est la photocatalyse, spécialement en production d'hydrogène et la destruction de nombreux polluants. Le tableau II.1 regroupe différents photocatalyseur à base de TiO<sub>2</sub> utilisés dans ce contexte. [9].

Production d'hydrogène	Photocatalyseur	Source de lumière	Agent sacrificiel	Production H <sub>2</sub>
	Au/TiO <sub>2</sub> Pt/TiO <sub>2</sub>	15 W tubes fluorescent	25% vol méthanol	1118 μmol.h <sup>-1</sup> 2125 μmol.h <sup>-1</sup>
	TiO <sub>2</sub>	300 W lampes Xe	10% vol. méthanol	3200 μmol.h <sup>-1</sup> .g <sup>-1</sup>
	Cu/TiO <sub>2</sub>	300 W lampes Xe	20% vol. méthanol	1023,8 μmol.h <sup>-1</sup>
	TiO <sub>2</sub> /WO <sub>3</sub> /Au	300 W lampes à arc Xe	35% vol. méthanol	269,63 μmol.h <sup>-1</sup>
	M/TiO <sub>2</sub> /rGO M = Au ou Pt	300 W lampe Xe	20% vol. méthanol	670 μmol.h <sup>-1</sup>
	MoSe <sub>2</sub> /TiO <sub>2</sub>	300W lampes à arc Xe	10% vol. méthanol	4,9 μmol.h <sup>-1</sup>
	BCN-TiO <sub>2</sub>	300W lampes Xe avec un filtre UV	20% vol. tri éthanolamine	68,54 μmol.h <sup>-1</sup> .g <sup>-1</sup>
	TiO <sub>2</sub> /C <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	300 W lampes Xe	20% vol. méthanol	10,1 mmol.h <sup>-1</sup> .g <sup>-1</sup>
	ZnS C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /TiO <sub>2</sub>	300 W lampes Xe	10% vol. tri éthanolamine	422 μmol.h <sup>-1</sup> .g <sup>-1</sup>
Photo-	<b>Photocatalyseur</b>	<b>Source de lumière</b>	<b>Polluant organique</b>	<b>Efficacité (%)</b>
	TiO <sub>2</sub> /rGO	11 W lampes Mg(180min)	2, 4, 6 Trichlorophénol	90
	TiO <sub>2</sub> /Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /GO	500 W lampes halogène (90)	Bleu de méthylène	76

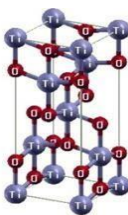
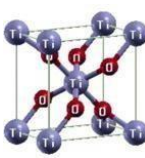
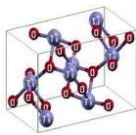
## Chapitre II : Etudes technologique et conception d'un catalyseur

Nanotubes GO/ TiO <sub>2</sub>	8 W lampes UV 240 Min	Acide	97
N- TiO <sub>2</sub> /Ag <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> @G O	250 W Lampe à incandescence halogène (20 min)	Acid Blue 25	98
Ag et rGO /TiO <sub>2</sub>		Tétrabromobisphénol A	99,6

**Tableau II.1.** Le dioxyde de titane dans la production d'hydrogène et la photo-dégradation des polluants.

### II. 9. Structure cristalline de TiO<sub>2</sub>

Le titane (Ti) est le neuvième élément le plus abondant de la croûte terrestre (0,57% massique) et c'est le deuxième métal de transition le plus abondant après le fer (Fe). Le composé à base de Ti le plus important est le dioxyde de titane (TiO<sub>2</sub>). Ce dernier existe sous forme de trois polymorphes cristallins : l'anatase, le rutile (les plus répandus en photocatalyse) et la brookite, avec différents propriétés physiques (tableau II. 2). [38].

Propriété	Anatase	Rutile	Brookite
Structure cristalline	Tétraogonale 	Tétraogonale 	Orthorhombique 
Groupe d'espace	I 41/amd	4/mmm	Pbca
Densité (g.cm <sup>-3</sup> )	3,895	4,24	4,120
Taille des NPs (nm)	< 11	> 35	11-35

**Tableau II.2.** Les propriétés importantes des trois phases cristallines de TiO<sub>2</sub>

#### La pression appliquée par fluide

La pression est l'une des propriétés de base de tout fluide. La pression (p) est la force (F) exercée sur un fluide ou par un fluide sur une unité de surface (A).

Cela s'exprime mathématiquement comme suit :

$$p = \frac{F}{A}$$

L'unité de base de la pression est le pascal (Pa). Si un fluide exerce une force de 1 N sur une



## Chapitre II : Etudes technologique et conception d'un catalyseur

Surface de  $1 \text{ m}^2$ , la pression produite est égale à un pascal, c.-à-d.

$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ . Le pascal est une unité très petite. Dans les applications types dans une centrale, nous utilisons des unités plus grandes, à savoir :

1 kilopascal (kPa) =  $10^3 \text{ Pa}$ ,

1 mégapascal (MPa) =  $10^6 \text{ Pa} = 10^3 \text{ kPa}$ .

### II. 11. Transfert de chaleur

La convection est un mode de transport d'énergie par l'action combinée de la conduction, de l'accumulation de l'énergie et de mouvement de milieu, elle est considérée comme le mécanisme le plus important de transport de l'énergie entre une surface solide et un liquide ou gaz. Le transport d'énergie par convection d'une surface dont la température est supérieure à celle du fluide qui l'entoure s'effectue en plusieurs étapes. D'abord la chaleur s'écoule par conduction de la surface aux molécules du fluide adjacent. L'énergie ainsi transmise sert à augmenter la température est l'énergie interne de ces molécules du fluide. Ensuite les molécules vont se mélanger avec d'autres molécules et transférer une partie de leur énergie. Dans ce cas l'écoulement transporte simultanément, le fluide et l'énergie. L'énergie est à présent, emmagasinée dans les molécules du fluide et elle est transportée sous l'effet de mouvement [39].

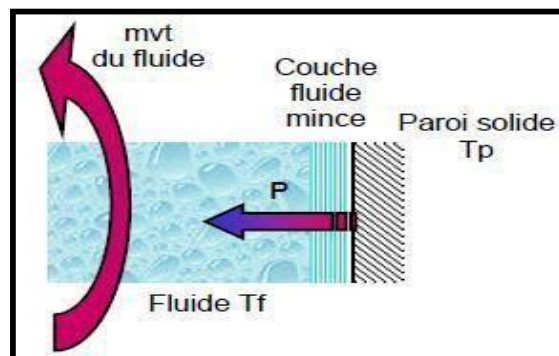


Figure II. 5. Action de fluide en mouvement dans la convection

La puissance transférée par convection est donnée par la relation

$$\Phi = h S (T_s - T_a) \quad \text{Avec :}$$

$\Phi$ :	Flux de chaleur transmis par convection	(W)
$h$ :	Coefficient de transfert de chaleur par convection	( $\text{W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ )
$T_s$ :	Température de surface du solide	( $^\circ\text{C}$ )
$T_a$ :	Température du fluide loin de la surface du solide	( $^\circ\text{C}$ )
$S$ :	Aire de la surface de contact solide/fluide	( $\text{m}^2$ ).

## Chapitre II : Etudes technologique et conception d'un catalyseur

---

La transmission de chaleur par convection est désignée selon le mode d'écoulement du fluide, par convection libre (naturelle), convection forcée et convection mixte.

### II. 11. 1. Convection forcée

La convection forcée dans laquelle le mouvement est provoquée par un procédé mécanique indépendant des phénomènes thermiques ; c'est donc un gradient de pression extérieur qui provoque les déplacements des particules du fluide. L'étude de la transmission de chaleur par convection est donc étroitement liée à celle de l'écoulement des fluides.

La convection est dite forcée quand il existe une cause du mouvement autre que les variations de températures du fluide, cette cause étant la seule à prendre en compte en raison de son importance relative. [40].

La relation générale pour la convection forcée est  $Nu = f(Re, Pr)$ . En microélectronique, le transfert de chaleur obéit alors à l'expression suivant :

$$Nu = c \cdot Re^n \cdot Pr^m$$

Où  $c$ ,  $n$  et  $m$  sont des constantes dépendant des caractéristiques du solide et du fluide.

### II. 11. 2. Convection naturelle

C'est celle dans laquelle le mouvement du fluide est créé par des différences de densité, celles - mêmes dues à des différences de température existant dans le fluide. La convection naturelle dans laquelle le mouvement résulte de la variation de la masse volumique du fluide avec la température ; cette variation crée un champ de forces gravitationnelles qui conditionne les déplacements des particules fluide. La convection naturelle est due au contact du fluide avec une paroi plus chaude ou plus froide et qui crée des différences de masse volumique, génératrice du mouvement au sein du fluide. On retrouve dans plusieurs applications industrielles ce mode de transfert de chaleur, Par exemple, dans les échangeurs de chaleur où deux fluides en mouvement, séparés par une paroi solide s'échange de l'énergie. [41].

### II. 11. 3. Convection mixte

Il existe une cause externe au mouvement du fluide mais insuffisante pour que la poussée d'Archimède puisse être négligée (frontière entre la convection libre et la convection forcée) c'est le cas des transferts de chaleur dans un habitacle d'automobile :

L'air est soufflé dans l'habitacle par un ventilateur, mais la poussée d'Archimède n'est pas négligeable, surtout lorsqu'on se place loin des entrées d'air [42].

### II. 12. Résistance mécanique

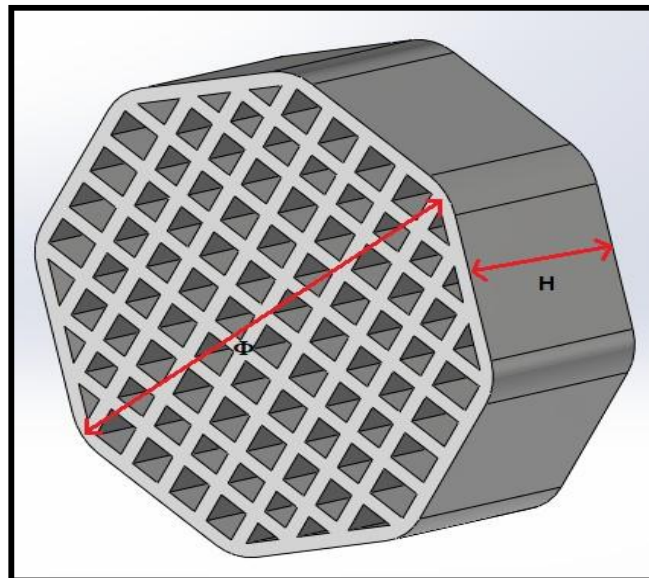
Une bonne résistance mécanique évite au catalyseur l'écrasement dû à son poids et aussi aux différentes contraintes mécaniques résultant du déplacement entre réacteur et régénérateur et aussi évite l'abrasion des grains, qui par frottement les uns contre les autres, produisent des fines particules qui peuvent créer une augmentation des pertes de charge dans le lit catalytique.

### II. 13. Résistance thermique

Les réactions catalytiques sont, soit exothermiques ou endothermiques. Ainsi un catalyseur doit avoir une activité thermique et une capacité thermique appropriées afin de maintenir un gradient de température en facilitant le transfert de chaleur à l'intérieur et à l'extérieur du grain catalytique. [43].

### II. 14. Conception d'un catalyseur sur SolidWorks :

La figure nous montre un catalyseur sous forme de nid d'abeille réalisé sur solidworks avec 88 canaux tel que :  $H = 6$  mm,  $\Theta = 16$  mm



**Figure II. 6.** Catalyseur sous forme de nid d'abeille.

# Chapitre III

## Simulation numérique

**III.1. Introduction**

La modélisation et la simulation mécanique d'un catalyseur à base d'alumine ( $Al_2O_3$ ) sont des outils cruciaux dans la recherche et le développement de matériaux catalytiques utilisés dans diverses applications industrielles, notamment la pétrochimie, l'automobile et les procédés environnementaux. L'alumine, en tant que support catalytique, offre une grande surface spécifique, une résistance mécanique élevée et une stabilité thermique, ce qui la rend idéale pour de nombreuses réactions catalytiques.

Dans ce chapitre nous allons présenter la conception des catalyseurs en termes de structure poreuse et de distribution des sites actifs, Les simulations permettent de prédire comment le catalyseur se comportera sous différentes conditions de température et de pression, réduisant ainsi les coûts et le temps nécessaires aux essais expérimentaux. Les tests effectués sont la traction, la compression, la flexion, l'injection de l'air.

**III. 2. Description des matériaux**

On a deux (02) types de matériaux alumine ( $Al_2O_3$ ) et dioxyde titane  $TiO_2$  dont les propriétés mécaniques fournies par le tableau suivant. Ces propriétés sont les paramètres de notre simulation.

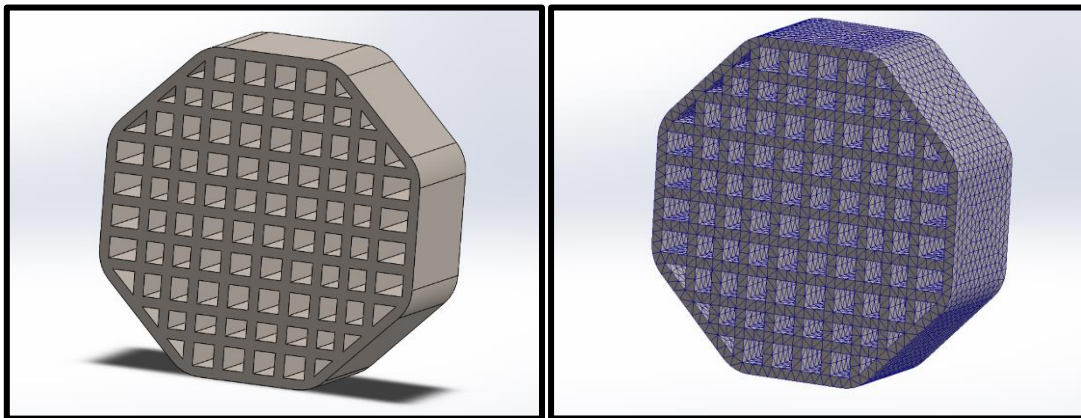
Propriétés	Alumine	TiO <sub>2</sub>	Unités
Module d'élasticité	370000	113000	N/mm <sup>2</sup>
Coefficient de Poisson	0.22	0.34	S.O.
Module de cisaillement	150000	44000	N/mm <sup>2</sup>
Masse volumique	3960	4.51	kg/m <sup>3</sup>
Limite de traction	300	434	N/mm <sup>2</sup>
Limite de compression	3000	380	N/mm <sup>2</sup>
Coefficient de dilatation thermique	7.4e-06	8.4 e-06	/K
Conductivité thermique	30	17	W/(m·K)
Chaleur spécifique	850	520	J/(kg·K)

Tableau III. 1. Les propriétés des matériaux utilisé

### III.3. Modèle géométrique

-Un catalyseur à nid d'abeille, souvent utilisé dans les systèmes de contrôle des émissions automobiles et dans les réacteurs industriels, est caractérisé par sa structure géométrique qui optimise le contact entre les gaz réactifs et le matériau catalytique. Cette configuration maximise l'efficacité des réactions chimiques tout en minimisant la perte de charge et la résistance au flux de gaz. La figure III.1 nous montre la structure de notre pièce et le type de maillage utilisée :

-Pour le maillage choisi nous avons utilisé un système tétraédrique libre automatique et très fin.

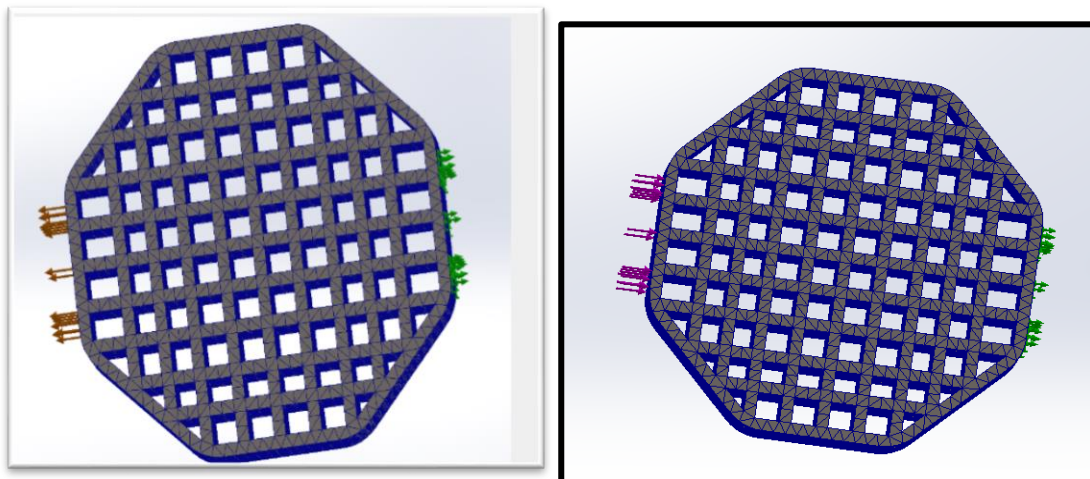


(a)

(b)

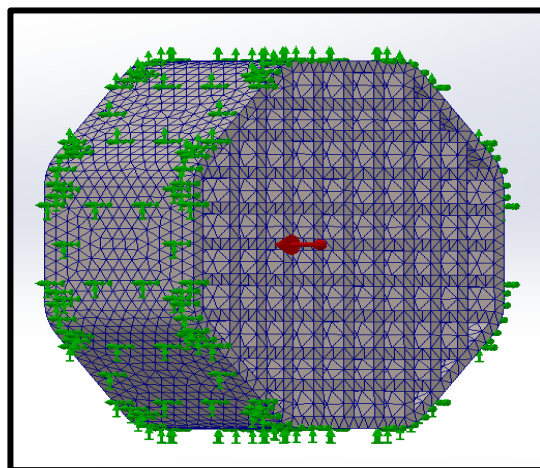
Figure III. 1. La pièce simulée sur SolidWorks (a) avant et (b) après maillage

**III. 4. Propriété Mécanique du catalyseur en forme de nid d'abeille** Cette étude consiste à appliquer des forces sur catalyseur en forme de nid d'abeille afin d'évaluer le champ de contrainte et **déplacement**, les études effectuées sont la traction sous une force de 5 N (Figure III.2. (a)), une étude de compression avec une contrainte sur les parois externes la force est de 5N (Figure III. 2.(b)) suivi d'une dernière étude de flexion (figure III.2. (c)) les flèches vertes représentent la zone de fixation de notre catalyseur en forme de nid d'abeille alors que la flèche rouge représente le sens de la force appliquée.



(a)

(b)



(c)

**Figure III. 2.** Différentes sollicitations effectuées (a) traction (b) compression (c) flexion

**III. 5. Critère de Tresca** Ce critère, aussi appelée de critère de cission maximale, a été proposé par Tresca en 1864. Il suppose que la plasticité en un point du matériau est atteinte quand, en ce point, la valeur de la contrainte de cisaillement est égale à la contrainte tangentielle maximale. Son expression mathématique est :  $\tau_{ij} = \frac{1}{2}(\sigma_i - \sigma_j)$  où  $\sigma_i$  et  $\sigma_j$  désignent les valeurs des contraintes principales,  $\sigma_0$  la limite de résistance en traction simple,  $\sigma_0/2$  représentant la cohésion du matériau. [44]

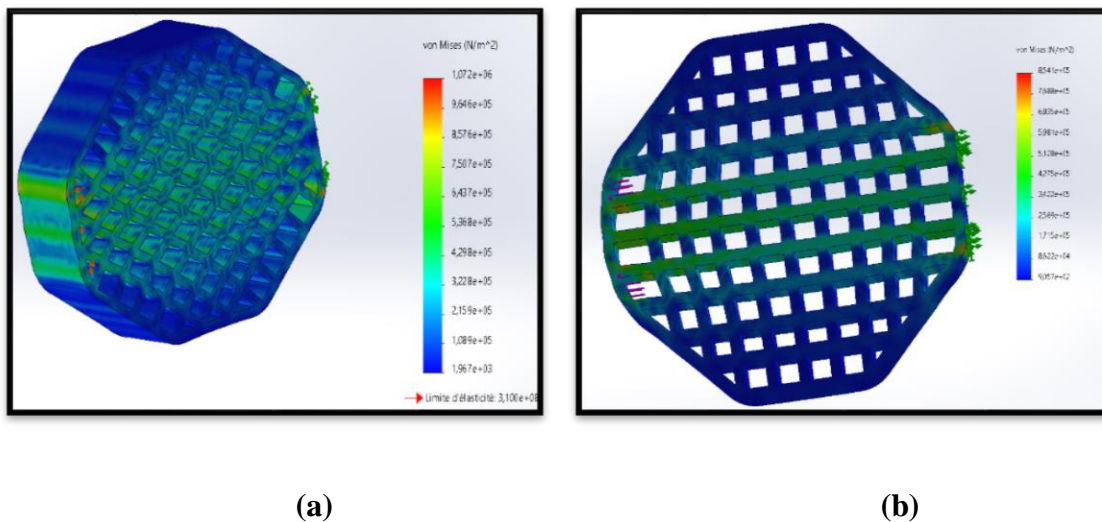
**III. 6. Critère de Von Mises.** Dans ce critère, la plasticité est liée à l'énergie élastique de cisaillement, ce qui revient à négliger l'influence du troisième invariant et conduit à l'expression :  $\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{3}{2} s : s}$  où  $s$  désigne le deuxième invariant du déviateur du tenseur des contraintes et  $k$  la limite d'élasticité en cisssion simple ;  $\sigma_{VM} = k$  (respectivement  $\sigma_{VM} = -k$ ) correspond à la limite d'élasticité en traction simple (respectivement, compression simple). [45]

**III. 7. Résultats et discussion**

La force appliquée dans les tests mécanique qui suivront sont de 5 N, (5N = 500Gr qui est la force applique au plaquage de notre catalyseur dans son étui), la longueur initial  $l_0$  est de 16 mm

**III.7.1 Essai de traction**

(La figure III. 3). Montre la distribution et la concentration de contrainte sur notre pièce.



**Figure III.3.** Concentration et distribution de contraintes de traction sur (a) TiO<sub>2</sub> et (b) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

La contrainte de von Mises minimale pour dioxyde titane est de  $1,967 \cdot 10^{+3}$  N /m<sup>2</sup> et  $1,072 \cdot 10^{+6}$  N/m<sup>2</sup> pour la contrainte maximale, et pour la contrainte de von mises minimale pour l’alumine est de  $9,057 \cdot 10^2$  N /m<sup>2</sup> et  $8,541 \cdot 10^5$  pour la contrainte maximale à notre catalyseur avec



matériaux ( $\text{TiO}_2$ -  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) est compris dans un intervalle de tolérance très large alors il supporte toutes les contraintes et les charges induite par nos conditions aux limites.

Quant au déplacement on voit que sa valeur minimale est  $1,000 \cdot 10^{-27}$  et la valeur maximale et de  $1,056 \cdot 10^{-1}$  pour dioxyde titane mm et la valeur minimale pour l'alumine est de  $1 \cdot 10^{-30}$  et sa valeur maximale est de  $1,555 \cdot 10^{-5}$  et on conclue que notre échantillon modélisé est apte à l'utilisation. On remarque que pour les deux matériaux notre pièce résiste au chargement appliqué.

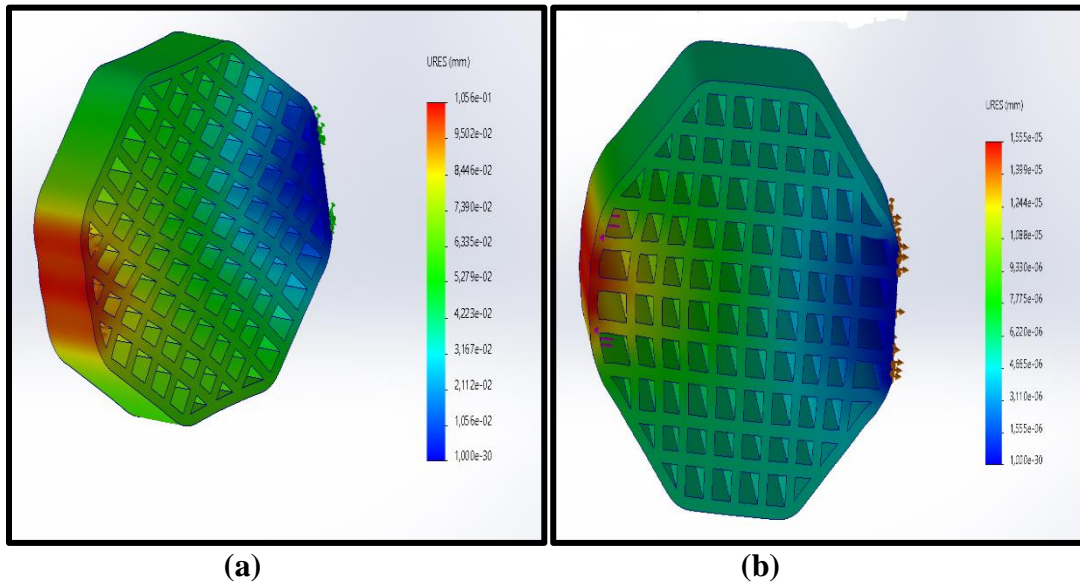


FIGURE. III. 4. Résultats de déplacement

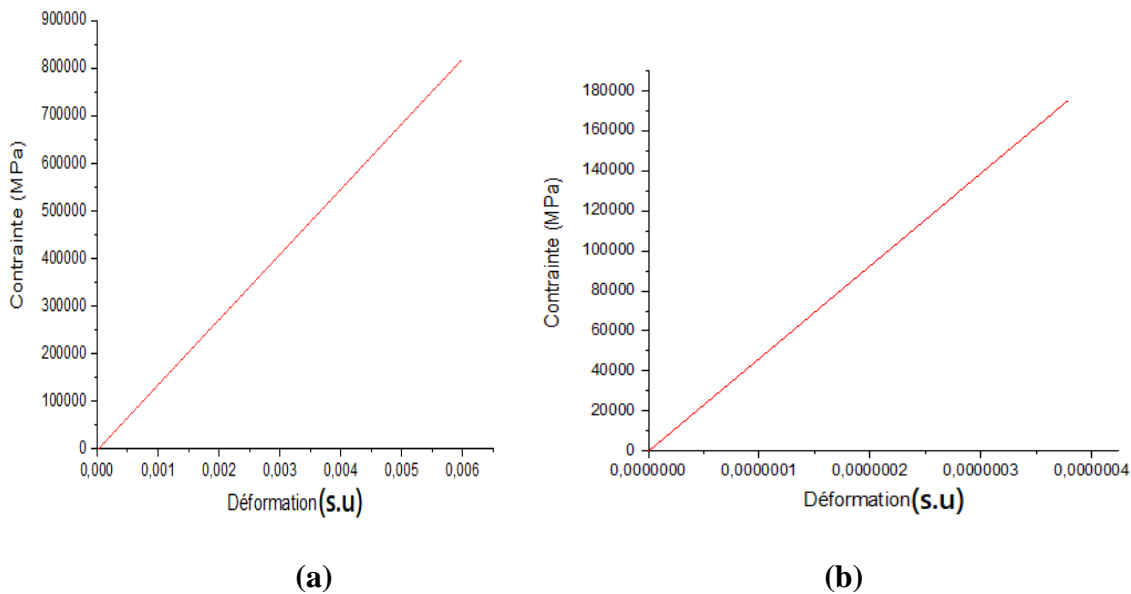
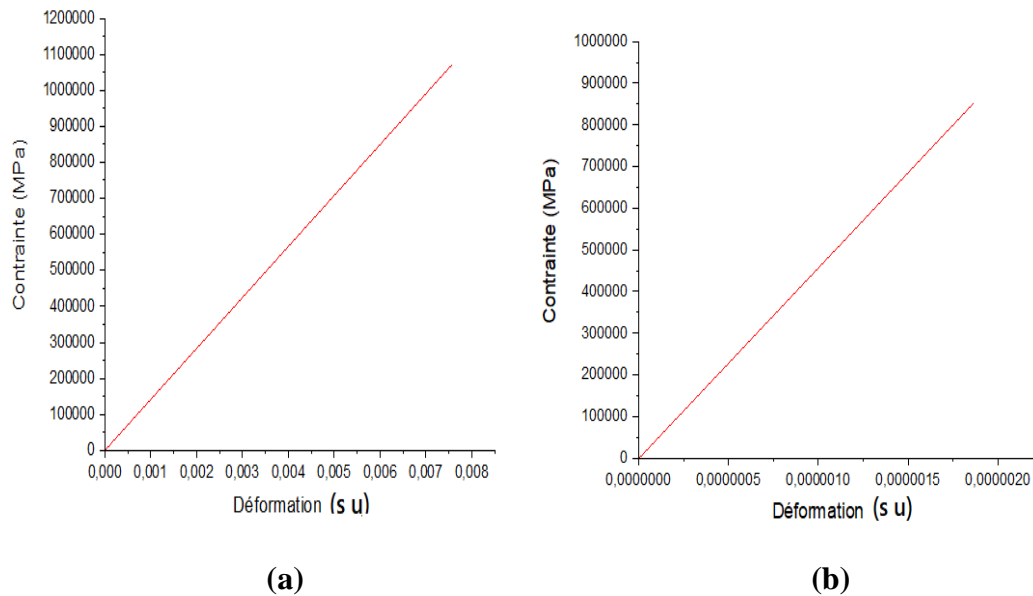


Figure III. 5. Courbe de traction transversale (a) alumine (b)  $\text{TiO}_2$ .



**Figure III. 6.** Courbe de traction longitudinale (a) alumine (b) TiO<sub>2</sub>

La figure III.5 et III.6 nous montre la courbe de contrainte en fonction de la déformation pour un essai de traction transversale et longitudinale pour les deux matériaux différents (alumine et TiO<sub>2</sub>).

Les deux courbes nous révèlent une relation linéaire entre la contrainte et la déformation, ce qui veut dire qu'on est dans le domaine élastique réversible.

On remarque qu'il y a une différence dans la pente qui représente le module de Young de chaque matériau, à partir de là on peut déduire que le module de Young d'alumine est plus élevé.

On remarque aussi à partir des deux courbes que la force appliquée a causé plus de déformation et contrainte sur le dioxyde de titane, ce qui veut dire l'alumine résiste mieux.

### III.7.2. Essai de compression

(La figure III.7.) (a) et (b) nous montre la distribution et la concentration de contrainte pièce après essai de compression.

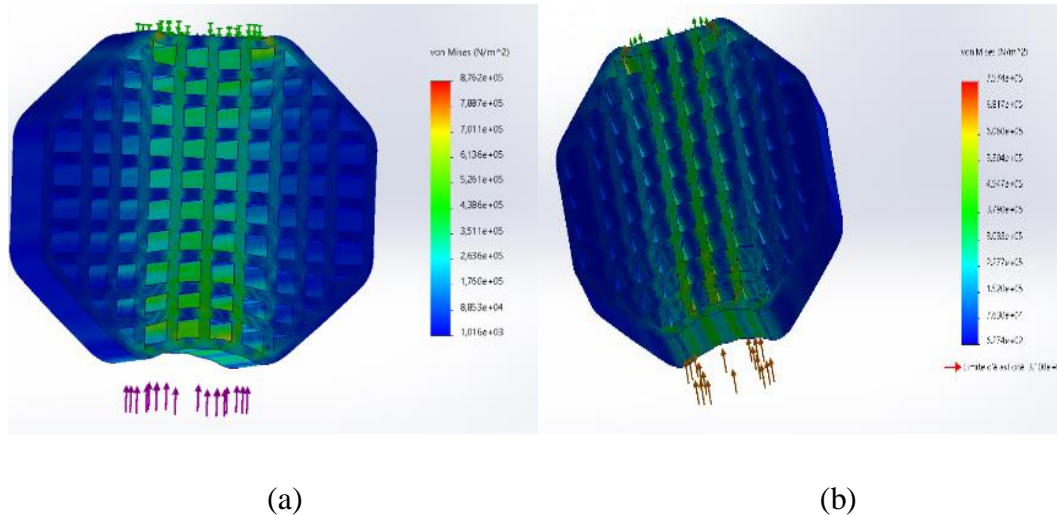
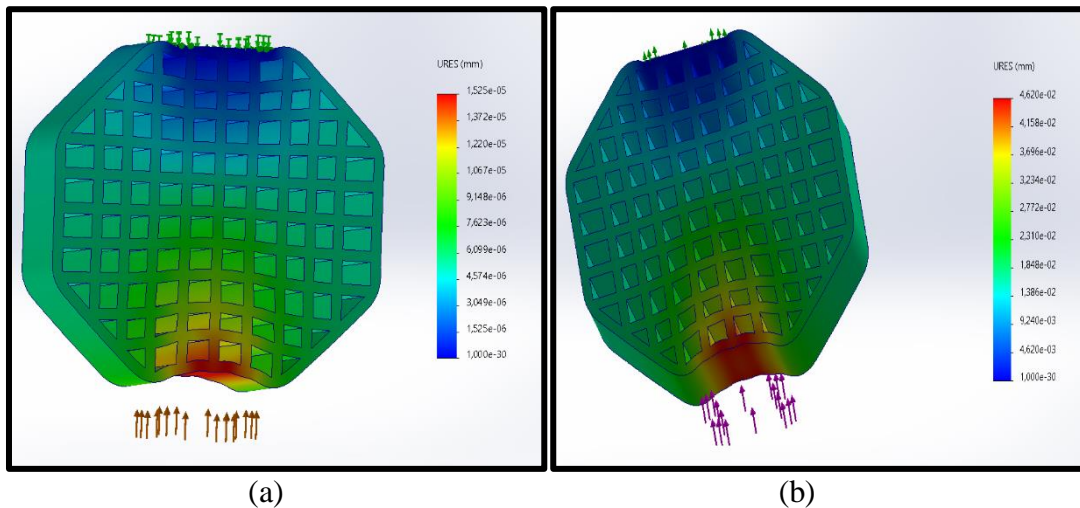


Figure III. 7. Concentration et distribution de contrainte de compression sur (a) TiO<sub>2</sub> et (b) alumine



Figures III. 8. Résultats déplacement (a) alumine et (b) dioxyde titane

La contrainte de von Mises minimale est de  $6,274 \cdot 10^2 \text{ N/m}^2$  et  $7,574 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$  pour la contrainte maximale pour dioxyde titane, et la contrainte de von mises minimale de l'alumine est de  $1,016 \cdot 10^2 \text{ N/m}^2$  et la contrainte maximale est de  $8,762 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$  notre catalyseur avec matériaux (alumine et dioxyde titane) est compris dans un intervalle de tolérance très large alors il supporte toutes les contraintes et les charges induite par nos conditions aux limites. Quant au déplacement d'alumine on voit que sa valeur minimale est  $1 \cdot 10^{-30} \text{ mm}$  et la valeur maximale et de  $1,525 \cdot 10^{-5} \text{ mm}$  et pour dioxyde de titane sa valeur minimale au déplacement est de  $1 \cdot 10^{-30} \text{ mm}$  et sa valeur maximale est de  $4,620 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$  et on conclue que notre échantillon modélisé est apte à l'utilisation. On remarque que pour les deux matériaux notre pièce résiste au chargement appliqué. de  $1 \cdot 10^{-30} \text{ mm}$  et sa valeur maximale est de  $4,620 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$  et on conclue que notre échantillon modélisé est apte à l'utilisation. On remarque que pour les deux matériaux notre pièce résiste au chargement appliqué.

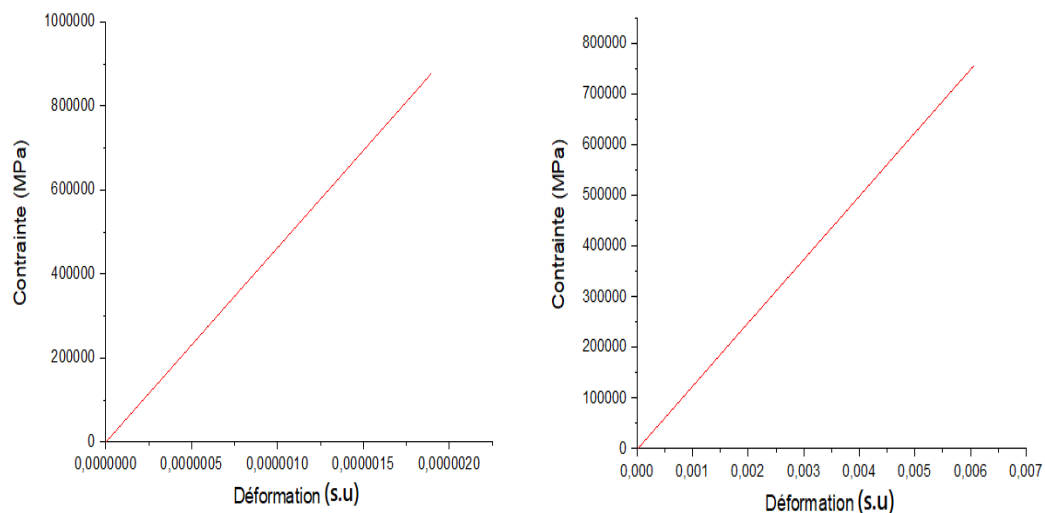


Figure III. 9. Courbe d’essai de compression transversale sur (a) alumine et (b) TiO<sub>2</sub>

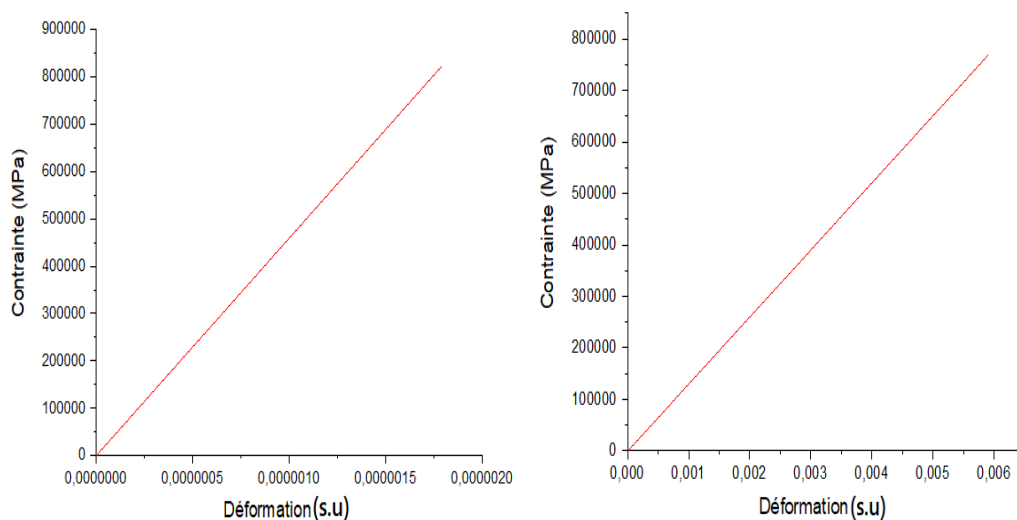


Figure III. 10. Courbe d’essai de compression longitudinale sur (a) l’alumine et (b) TiO<sub>2</sub>

(La figure III.9) et (la figure III.10) nous montre la courbe de contrainte en fonction de la déformation pour un essai de compression transversale et longitudinale pour les deux matériaux différents (alumine et TiO<sub>2</sub>). Les deux courbes nous révèlent une relation linéaire entre la contrainte et la déformation, ce qui veut dire qu’on est dans le domaine élastique réversible.

On remarque qu’il y a une différence dans la pente qui représente le module de compressibilité de chaque matériau, à partir de là on peut déduire que le module de compressibilité d’alumine est plus

élevé. On remarque aussi à partir des deux courbes que la force appliquée a causé plus de déformation et contrainte sur le dioxyde de titane, ce qui veut dire l'alumine résiste mieux.

**III.7.3. Essai de flexion**

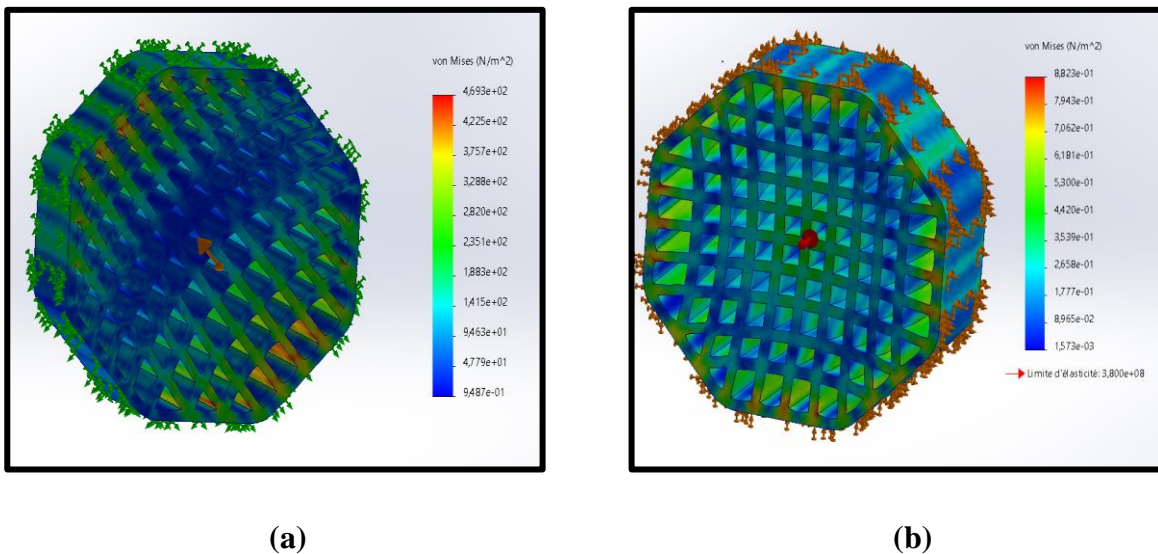
La figure III. 10. nous montre la distribution et la concentration de contrainte après essai de Flexion

Les paramètres de flexion utilisé dans notre étude sont :

La force applique = 5N

Le moment de flexion = 15 N.m

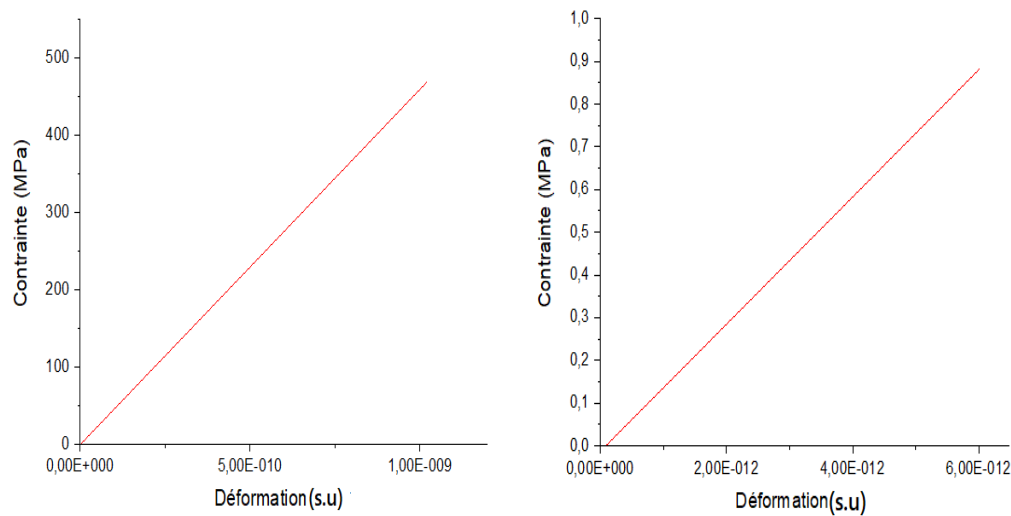
Contrainte de flexion = 0.082 MPa



**Figure III. 11.** Concentration et distribution de contrainte de flexion sur (a) alumine et (b) dioxyde titane

(La figure III.11.) nous montre la distribution et la concentration de contrainte de flexion sur notre pièce. La valeur maximale de l'alumine est de  $4.10^2$  N/m<sup>2</sup> et la valeur maximale de dioxyde titane est de  $8.10^{-1}$  N/m<sup>2</sup> à partir de la on peut déduire que l'alumine est plus résistante à la flexion que

le dioxyde de titane.

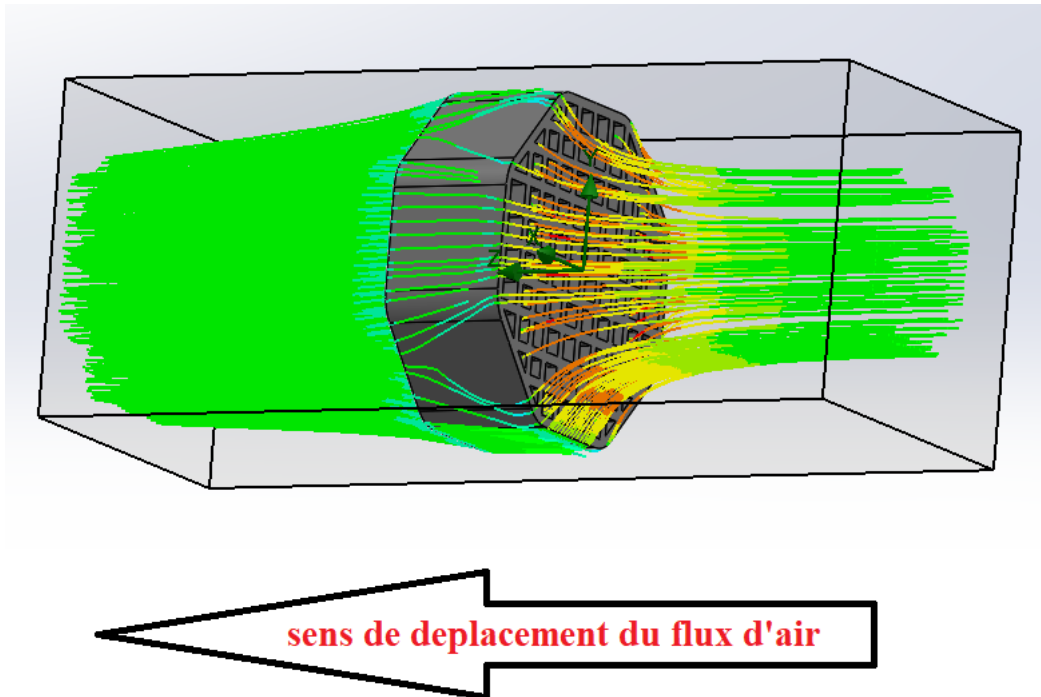


**Figure III. 12.** Courbe d'essai de flexion sur (a) l'alumine et (b) TiO<sub>2</sub>

(La figure III.12) nous montre la courbe de contrainte en fonction de la déformation pour un essai de flexion pour les deux matériaux différents (alumine et TiO<sub>2</sub>). Les deux courbes nous révèlent une relation linéaire entre la contrainte et la déformation, ce qui veut dire qu'on est dans le domaine élastique réversible. On remarque qu'il y a une différence dans la pente qui représente le module de compressibilité de chaque matériau, à partir de là on peut déduire que le module de compressibilité d'alumine est plus élevé. On remarque aussi à partir des deux courbes que la force appliquée a causé plus de déformation et contrainte sur le dioxyde de titane, ce qui veut dire l'alumine résiste mieux à la flexion.

### III. . Simulation du flux d'air traversant le catalyseur en format nid d'abeille

Cette étude consiste à injecter de l'air comprimé dans notre catalyseur en format nid d'abeille à une température de 5c° avec une pression de 1,01325 bar pour vérifier la circulation du flux d'air à l'intérieur de nos catalyseurs lors de l'injection et de la ventilation ainsi que sa vitesse.



**Figure III.13.** Injection de l'air

(La figure III.13) illustre un schéma illustratif de la façon d'injection de l'air. Le cube noir au tour de la pièce indique le domaine de calcul et les lignes vertes représentent l'air injecté. Après avoir effectué cette simulation sur SolidWorks on a obtenu des différentes courbes tel que la température et la pression causé par l'air sur deux arrêtes différentes dans notre pièce. La première arrête se situe à l'extérieur (la surface avant qui reçoit l'air injecté) et la deuxième arrête se situe à l'intérieur des canaux (figure III. 14).

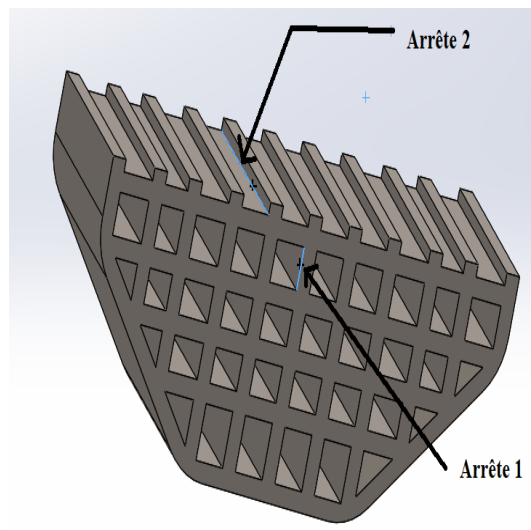


Figure III. 14. Vue en coupe transversale sur SolidWorks

Cette simulation est effectuée sous certaines conditions qui sont :

- La pression atmosphérique 1,01325 bar
- Une vitesse de l'air de 600 km/h
- Et on fait varier la température (5, 10, 20, 30) C°.

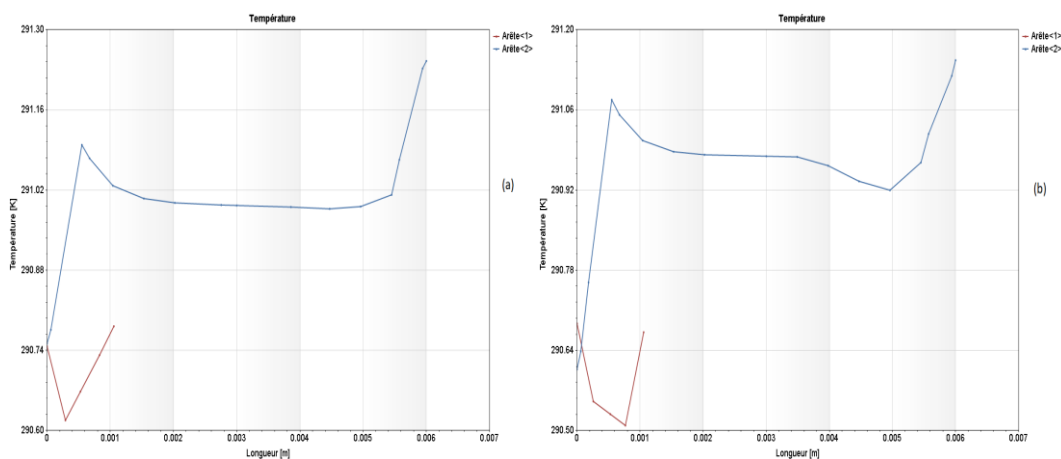


Figure III. 15. Courbe de l'évolution de la Température sous 5 C° pour : (a) TiO<sub>2</sub>, (b) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

(La figure III.15) illustre l'évolution de la Température sous 5 C° pour les catalyseurs en format nid d'abeille pour les deux matériaux, on remarque



Il semble que l'évolution de la température après l'injection d'air à 5 degrés dépende de la direction dans laquelle on mesure.

Les valeurs d'entrée de l'air sont de : La vitesse :600km/h, la pression : 1.01325 Bar, la température : 278.15 K pour les deux catalyseurs mais la température en fonction de la face (probablement la surface), elle reste stable. Cependant, les mesures obtenues pour la température en fonction de la profondeur (à l'intérieur ou à une certaine distance sous la surface), elle augmente légèrement de 290 K jusqu'à 291K. Cela pourrait être dû à par exemple, la surface peut être exposée à des conditions extérieures constantes qui maintiennent une température relativement stable, tandis que plus vous descendez en profondeur, plus vous pouvez rencontrer des conditions de confinement thermique ou des processus qui génèrent de la chaleur, comme la chaleur géothermique. Cela pourrait entraîner une augmentation de la température à mesure que vous vous éloignez de la surface.

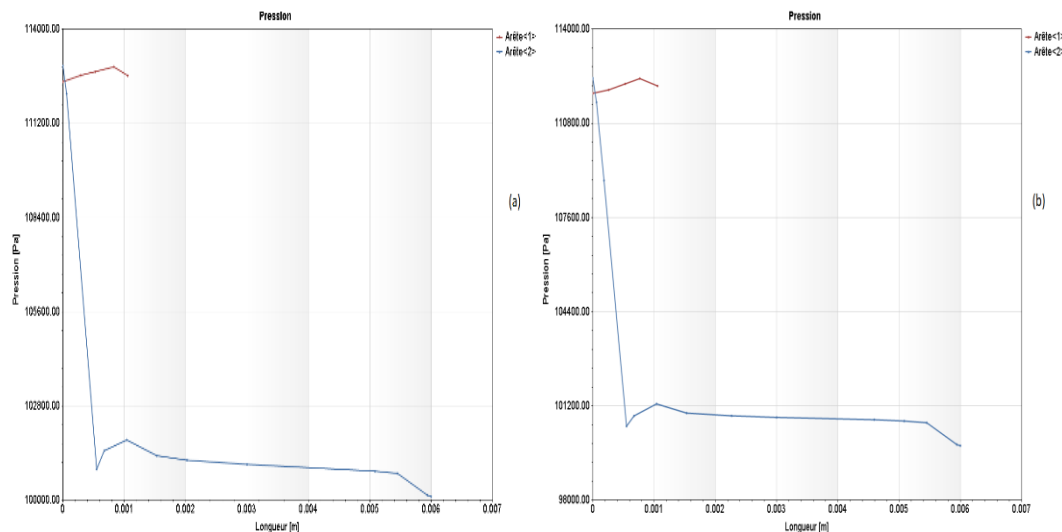


Figure III. 16. Courbe pression Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et TiO<sub>2</sub> pour température 5 c°

Suite l'analyse des échantillons durant le procédé d'injection sous une pression de 1 ,01325 bar, une observation significative émerge : le flux d'air devient plus dense, adoptant un régime turbulent. Ce régime turbulent se manifeste par un flux d'air de dépressurisation, induisant une stabilité de pression avec une légère différence entre la surface extérieure, et la profondeur des canaux, où les pressions appliquées sont respectivement de 1.13 et 1.01 bar. Cette observation est cohérente pour les deux matériaux constitutifs des catalyseurs étudiés.

Cette densification du flux d'air peut être attribuée à plusieurs facteurs. Notamment, une augmentation de la température de l'air, comme observé en profondeur des canaux, peut engendrer une augmentation de la pression, en accord avec la loi des gaz parfaits ( $P = nRT/V$ ).

Cependant, il convient de souligner que d'autres paramètres, tels que la vitesse de l'air et la complexité géométrique de la pièce, exercent également une influence significative sur la distribution et l'évolution de la pression dans le système.

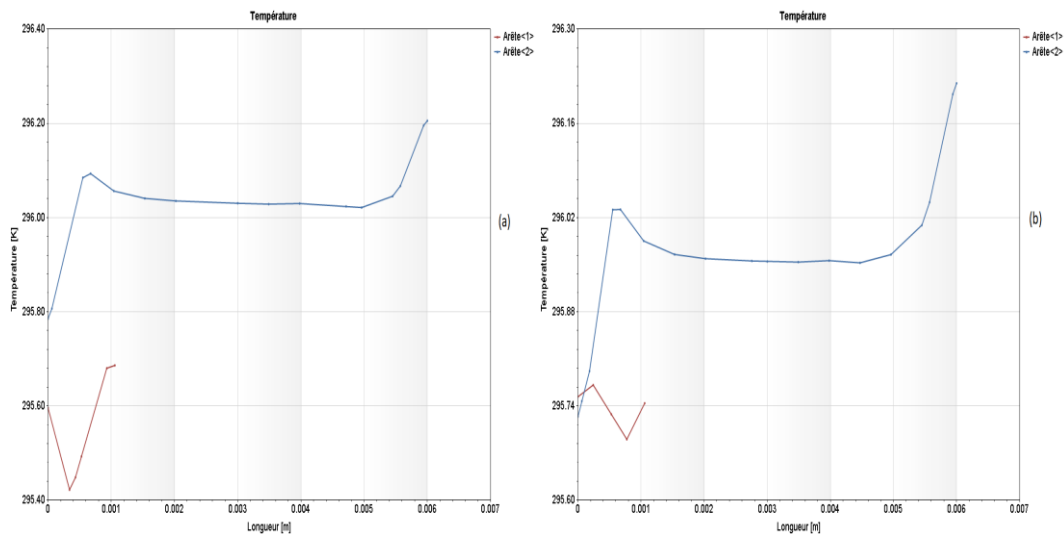
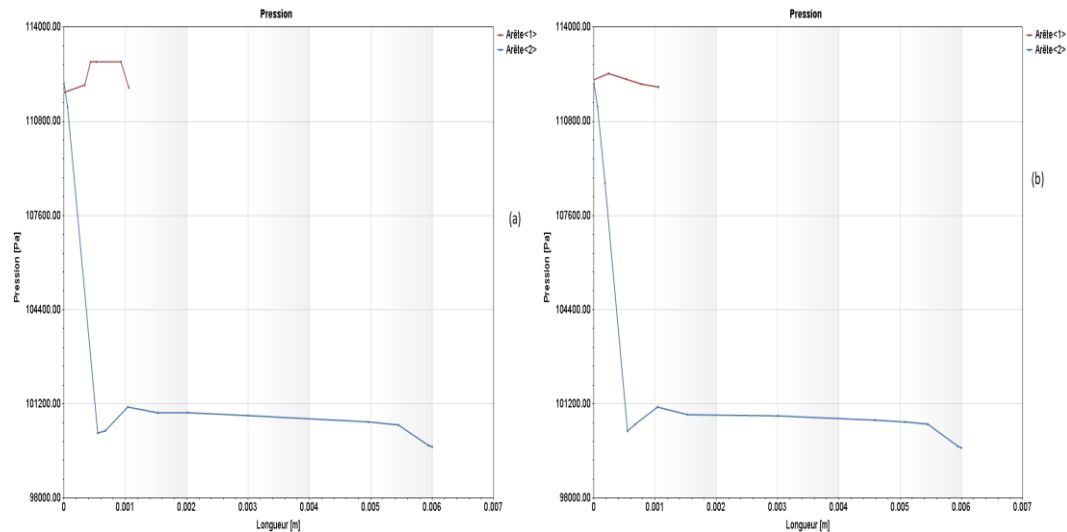


Figure III. 17. Courbe température TiO<sub>2</sub> (a) et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(b) pour température 10 C°

(La figure III.17) illustre l'évolution de la température sous 10C° pour les catalyseurs en format nid d'abeille pour les deux matériaux, on remarque Il semble que l'évolution de la température après l'injection d'air à 10 degrés dépende de la direction dans laquelle on mesure.

Les valeurs d'entré de l'air sont de : La vitesse :600km/h, la pression : 1.01325 Bar, la température : 283.15 K pour les deux catalyseurs mais la température en fonction de la face (probablement la surface), elle reste stable. Cependant, les mesures obtenues pour la température en fonction de la profondeur (à l'intérieur ou à une certaine distance sous la surface), elle augmente légèrement de 295K jusqu'à 296K. Cela pourrait être dû à par exemple, la surface peut être exposée à des conditions extérieures constantes qui maintiennent une température relativement stable, tandis que plus vous descendez en profondeur, plus vous pouvez rencontrer des conditions de confinement thermique ou des processus qui génèrent de la chaleur, comme la chaleur géothermique. Cela pourrait entraîner une augmentation de la température à mesure que vous vous éloignez de la surface.

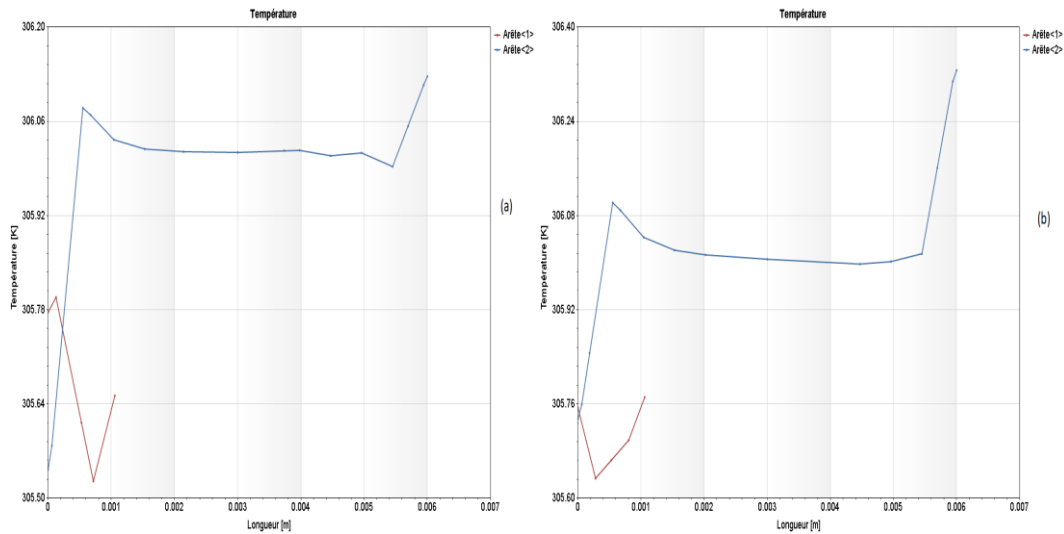


**Figure III.18.** Courbe Pression  $\text{TiO}_2$  (a) et  $\text{Al}_2\text{O}_3$ (b) pour température  $10\text{ C}^\circ$

Suite l'analyse des échantillons durant le procédé d'injection sous une pression de 1,01325 bar, une observation significative émerge : le flux d'air devient plus dense, adoptant un régime turbulent. Ce régime turbulent se manifeste par un flux d'air de dépressurisation, induisant une stabilité de pression avec une légère différence entre la surface extérieure, et la profondeur des canaux, où les pressions appliquées sont respectivement de 1.13 et 1.01 bar. Cette observation est cohérente pour les deux matériaux constitutifs des catalyseurs étudiés.

Cette densification du flux d'air peut être attribuée à plusieurs facteurs. Notamment, une augmentation de la température de l'air, comme observé en profondeur des canaux, peut engendrer une augmentation de la pression, en accord avec la loi des gaz parfaits ( $P = nRT/V$ ).

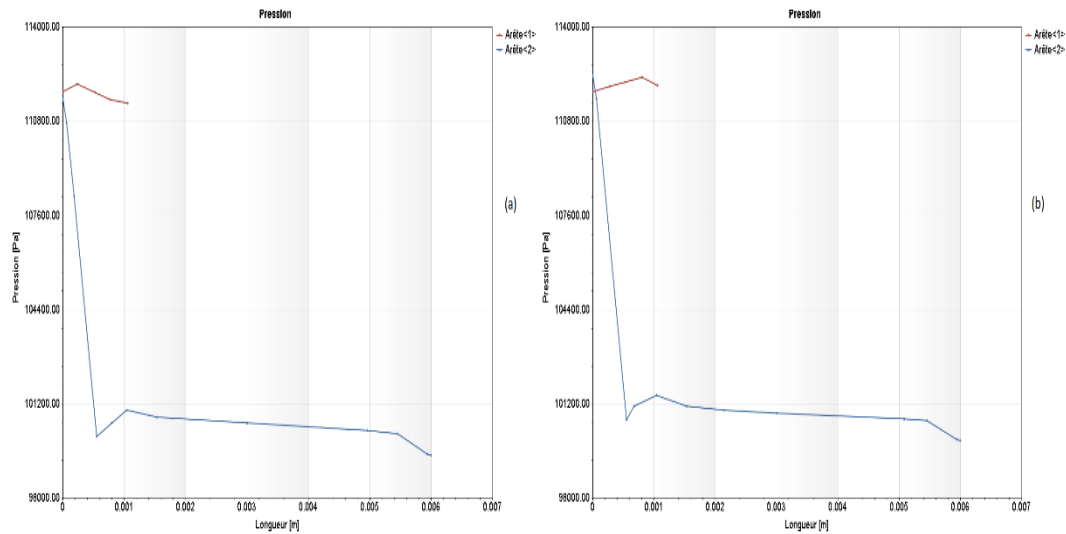
Cependant, il convient de souligner que d'autres paramètres, tels que la vitesse de l'air et la complexité géométrique de la pièce, exercent également une influence significative sur la distribution et l'évolution de la pression dans le système.



**Figure III. 19.** Courbe température TiO<sub>2</sub> (a) et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(b) pour température 20 C°

(La figure III.19) illustre l'évolution de la Température sous 20 C° pour les catalyseurs en format nid d'abeille pour les deux matériaux, on remarque il semble que l'évolution de la température après l'injection d'air à 20 degrés dépende de la direction dans laquelle on mesure.

Les valeurs d'entré de l'air sont de : La vitesse :600km/h, la pression : 1.01325 Bar, la température : 293.15 K pour les deux catalyseurs mais la température en fonction de la face (probablement la surface), elle reste stable. Cependant, les mesures obtenues pour la température en fonction de la profondeur (à l'intérieur ou à une certaine distance sous la surface), elle augmente légèrement de 305 K jusqu'à 306K. Cela pourrait être dû à par exemple, la surface peut être exposée à des conditions extérieures constantes qui maintiennent une température relativement stable, tandis que plus vous descendez en profondeur, plus vous pouvez rencontrer des conditions de confinement thermique ou des processus qui génèrent de la chaleur, comme la chaleur géothermique. Cela pourrait entraîner une augmentation de la température à mesure que vous vous éloignez de la surface.

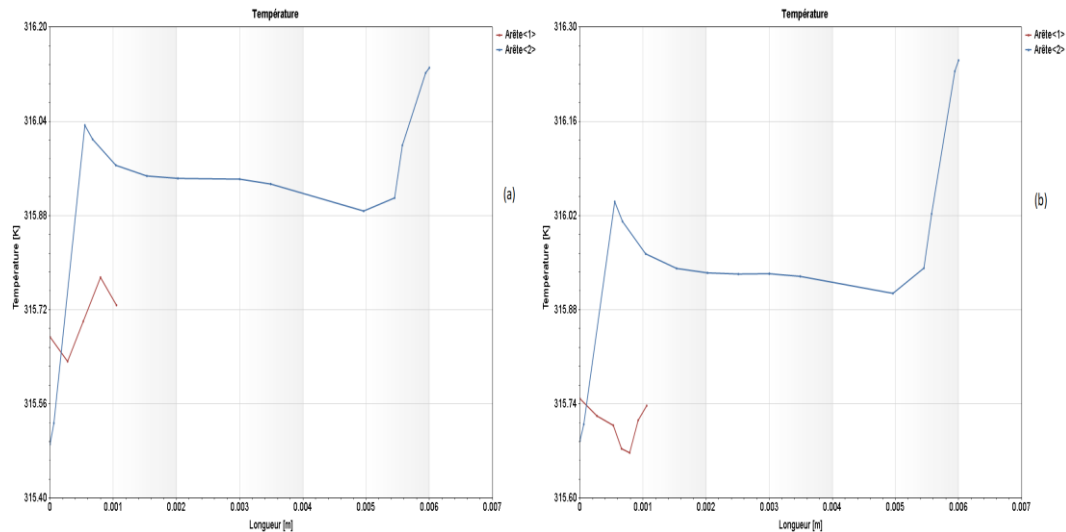


**Figure III. 20.** Courbe Pression  $TiO_2$  (a) et  $Al_2O_3$ (b) pour température  $20C^\circ$

Suite l'analyse des échantillons durant le procédé d'injection sous une pression de 1 ,01325 bar, une observation significative émerge : le flux d'air devient plus dense, adoptant un régime turbulent. Ce régime turbulent se manifeste par un flux d'air de dépressurisation, induisant une stabilité de pression avec une légère différence entre la surface extérieure, et la profondeur des canaux, où les pressions appliquées sont respectivement de 1.12 et 1.01 bar. Cette observation est cohérente pour les deux matériaux constitutifs des catalyseurs étudiés.

Cette densification du flux d'air peut être attribuée à plusieurs facteurs. Notamment, une augmentation de la température de l'air, comme observé en profondeur des canaux, peut engendrer une augmentation de la pression, en accord avec la loi des gaz parfaits ( $P = nRT/V$ ).

Cependant, il convient de souligner que d'autres paramètres, tels que la vitesse de l'air et la complexité géométrique de la pièce, exercent également une influence significative sur la distribution et l'évolution de la pression dans le système.

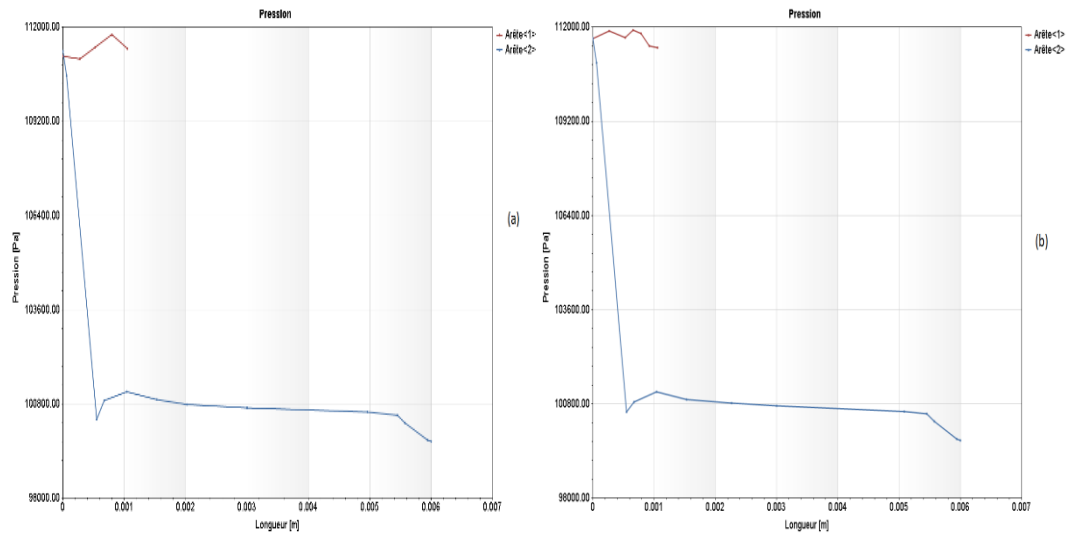


**Figure III.21.** Courbe température  $\text{TiO}_2$  (a) et  $\text{Al}_2\text{O}_3$ (b) pour température  $30\text{C}^\circ$

(La figure III.21) illustre l'évolution de la Température sous  $30\text{C}^\circ$  pour les catalyseurs en format nid d'abeille pour les deux matériaux, on remarque

Il semble que l'évolution de la température après l'injection d'air à  $30\text{ degrés}$  dépende de la direction dans laquelle on mesure.

Les valeurs d'entrée de l'air sont de : La vitesse :  $600\text{km/h}$ , la pression :  $1.01325\text{ Bar}$ , la température :  $303.15\text{ K}$  pour les deux catalyseurs mais la température en fonction de la face (probablement la surface), elle reste stable. Cependant, les mesures obtenues pour la température en fonction de la profondeur (à l'intérieur ou à une certaine distance sous la surface), elle augmente légèrement de  $315\text{K}$  jusqu'à  $316\text{K}$ . Cela pourrait être dû à par exemple, la surface peut être exposée à des conditions extérieures constantes qui maintiennent une température relativement stable, tandis que plus vous descendez en profondeur, plus vous pouvez rencontrer des conditions de confinement thermique ou des processus qui génèrent de la chaleur, comme la chaleur géothermique. Cela pourrait entraîner une augmentation de la température à mesure que vous vous éloignez de la surface.



**Figure III.22.** Courbe Pression TiO<sub>2</sub> (a) et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(b) pour température 30C°

Suite l'analyse des échantillons durant le procédé d'injection sous une pression de 1 ,01325 bar, une observation significative émerge : le flux d'air devient plus dense, adoptant un régime turbulent. Ce régime turbulent se manifeste par un flux d'air de dépressurisation, induisant une stabilité de pression avec une légère différence entre la surface extérieure, et la profondeur des canaux, où les pressions appliquées sont respectivement de 1.11 et 1.01 bar. Cette observation est cohérente pour les deux matériaux constitutifs des catalyseurs étudiés.

Cette densification du flux d'air peut être attribuée à plusieurs facteurs. Notamment, une augmentation de la température de l'air, comme observé en profondeur des canaux, peut engendrer une augmentation de la pression, en accord avec la loi des gaz parfaits ( $P = nRT/V$ ).

Cependant, il convient de souligner que d'autres paramètres, tels que la vitesse de l'air et la complexité géométrique de la pièce, exercent également une influence significative sur la distribution et l'évolution de la pression dans le système.

# Conclusion générale



## Conclusion générale :

La décomposition de l'ozone a été étudiée à différentes températures sur des catalyseurs à base d'alumine présentant différentes propriétés texturales, ainsi que supportés sur du  $\text{TiO}_2$ . Cette étude a clairement démontré l'importance de la simulation des propriétés mécaniques dans la réduction des pressions et les températures du flux d'air durant le fonctionnement. La modélisation et la simulation mécanique d'un catalyseur en alumine et titanate d'oxyde sont des outils essentiels pour comprendre et optimiser le comportement de ces matériaux dans diverses applications. Voici quelques conclusions générales que l'on peut tirer de cette étude :

- L'étude technologique nous a permis d'approfondir notre idée de conception positionnement des modifications à apporter aux catalyseurs nid d'abeille, plus particulièrement le changement géométrique par rapport au catalyseur conventionnelle.
  - la distribution de contrainte nous a montré que sous une charge de 5N, appliqué sur les deux catalyseurs en alumine et titanate, le déplacement optimal engendré est celui d'alumine ayant une valeur de  $3,04 \times 10^{-6}$  mm, ce déplacement qui reste infime par rapport au domaine de ductilité de nos matériaux
  - le catalyseur ayant le matériau d'alumine présente une meilleure résistance à la flexion
  - La distribution de température du catalyseur en alumine nous montre que l'obtention du gradient thermique généré par cette simulation est largement convergente en termes de stabilité thermique, le matériau joue un rôle crucial durant la phase de mise en forme.
  - La structure poreuse du catalyseur de charge peut avoir un impact significatif sur la diffusion des réactifs vers les sites actifs de catalyse. Une structure poreuse bien conçue peut favoriser une diffusion efficace des réactifs, améliorant ainsi l'efficacité catalytique du matériau.
  - si la résistance mécanique et thermique sont des facteurs critiques, l'alumine peut être un choix plus sûr en raison de sa réputation bien établie dans ces domaines. Cependant, il est important de considérer d'autres facteurs tels que la conductivité thermique, la porosité et la compatibilité chimique avec les réactifs et les produits de réaction.

Perspectives d'avenir :

- Nous espérons effectuer des essais expérimentaux afin de comparer les résultats.
- Nous espérons qu'à l'avenir nous continuerons à améliorer ces résultats avec des tests de torsion.
- Vu que les céramiques résistent à des hautes températures, nous espérons effectuer des tests de fluage.

Enfin, nous espérons que ce modeste travail sera une référence pour d'autres projets de fin d'étude et aussi un point de départ pour entamer d'autres études dans la vie professionnelle.

# Références bibliographiques

## Chapitre I

- [1] Hamla, inès. Etude de l'effet de la temperature sur le comportement vibratoire des plaques composites stratifiees. Thèse de doctorat. 2022.
- [2] Benameur, heythem. Elaboration et caractérisation des biocomposites à matrice thermoplastique renforcés par des fibres végétales. 2022.
- [3] Mettouchi.l, <<l'influence de la charge particule de cuivre et du renfort couche de fibres de verre sur le comportement mécanique d'un composite>>, master, université mouloud mammeri tizi ouzou.
- [4] Ghizlane, yaich et zineb, chahud jillali. Rapport à propos les composites et nanocomposites. Mémoire de magister. Université hassan II, 2019.
- [5] Moumene, taqiyeddine. Les composites. master. universite tiaret . 2022.
- [6] Mettouchi, lotfi. Influence de la charge particule de cuivre et du renfort couches defibres de verre sur le comportement mécanique d'un composite. 2018. Thèse de doctorat. Université mouloud mammeri tizi-ouzou.
- [7] Ghizlane, yaich et zineb, chahud jillali. Rapport à propos les composites et nanocomposites. Mémoire de magister. Université hassan II, 2019.
- [8] Jean-marie-b, matériaux composites mécanique et analyse des structures, (2005),75008 paris, 4<sup>eme</sup> edition.
- [9] Bouzouaid, samia. Contribution à la modélisation numérique des bétons de fibre en flexion. Thèse de doctorat.
- [10] KHerbouche, laaziz. Introduction aux modélisations et aux méthodes de calcul des matériaux composites. 2010. Thèse de doctorat. Université mouloud mammeri.
- [11] KHeira, boutouba, ahmed, djafar henni, et ahmed, arab. Revue exhaustive sur les méthodes et procédés de renforcement des sols par : liant hydraulique et fibres synthétiques. *Le30 mai 2016*.
- [12] Taqiyeddine, m. Les composites, master, université tiaret
- [13] Aisset, mohamed amine et benamara, nacer. Vibration libre des plaques fgm peroser sur fondation elastique 2019. Thèse de doctorat. Université ibn khaldoun-tiaret.
- [14] C.a.r.m.a « glossaire des matériaux composites ». Centre d'animation

régional en matériaux avance, octobre 2006.

[15] Zaid, mohammed said et zeghabi, moussa. *Modélisation d'une plaque multicouche mince*. Thèse de doctorat. Université kasdi merbah ouargla.

[16] Fadhila, mme mohellebi et moussa, mr hamouma. Etude comparative des propriétés mécaniques deux résines thermodurcissable époxy et polyester en flexion.

[17] Otmani, abdelmounaim et achbi, soheib. Etude numérique du comportements tripologiques des composites hybrides al/sic/gr. Thèse de doctorat. Université kasdimerbah ouargla.

[18] Toumi.w, <<optimisation de la configuration des tubes en matériaux composites sous pression >>, master, université de biskra, (2019).

[19] Otmani, abdelmounaim et achbi, soheib. Etude numérique du comportements tripologiques des composites hybrides al/sic/gr. Thèse de doctorat. Université kasdimerbah ouargla.

[20] Bensaid, samir. Contribution à la caractérisation et à la modélisation électromagnétique et thermique des matériaux composites anisotropes. 2006. Thèse de doctorat. Université de nantes.

[21] Assarar, mustapha, el mahi, abderrahim, farooq, mohammed khawar, et al. Comportement en flexion des poutres en matériaux sandwichs. *Mécanique & industries*, 2005

[22] Bensaid, samir. Contribution à la caractérisation et à la modélisation électromagnétique et thermique des matériaux composites anisotropes. 2006. Thèse de doctorat. Université de nantes.

[23] Benida, anwar et belmokhtar, mohamed. Modélisation des contraintes de cisaillement et normale dans les poutres consoles en béton armé endommagée réparé par différents types de composites : effet d'orientation des fibres. 2023. Thèse de doctorat. Université ibn khaldoun

[24] Merad, laarej. Etude par spectroscopie raman et modélisation d'une résine composite. 2010. Thèse de doctorat. Université de metz.

[25] Rouag, hichem. Fabrication de fibre technique nanocomposite à base de polymère thermoplastique. 2018. Thèse de doctorat.

[26] Benras, ahmed et fayçal, b. A. R. A. Modélisation d'une structure multicouche sous sollicitation mécanique par la méthode des éléments finis. Thèse de doctorat. Université kasdi Merbah ouargla.

[27] Merad, laarej. Etude par spectroscopie raman et modélisation d'une résine composite, 2010. Thèse de doctorat. Université de metz.

[28] Chahraoui, Yamina, et al. Analyse numérique par la méthode des éléments finis du comportement en rupture des matériaux composites. 2021. Thèse de doctorat.

[29] Chammah Dr, Safaa, mémoire de master, conception et calcul des structures, université Biskra 2020.

## Chapitre II

[30] Kralfallah, Imane. Etude du comportement catalytique des composés Ni-Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Ni-Pt/SiO<sub>2</sub> préparés sous irradiation dans la réaction d'hydrogénation de benzène. 2022.

[31] P. Brun : catalyse et catalyseurs en chimie organique. Edition Masson et Cie Paris 1970.

[32] P. Brun : catalyse et catalyseurs en chimie organique. Edition Masson et Cie Paris 1970.

[33] J. Guo, D.E. Ellis, D.J. Lam, Electronic structure and energetics of sapphire (0001) and (1-102) surfaces, Phys. Rev. B 45 (1992) 13647.

[34] Hui-feng Wang, Hiroko Ariga, Rhys Dowler, Martin Sterrer\*, Hans-Joachim Freund, Journal of Catalysis 286 (2012)

[35] Yu, Qian Michelle Wu. Etude de procédés de conversion de biomasse en eau supercritique pour l'obtention d'hydrogène. : application au glucose, glycérol et bio-glycérol. 2012. Thèse de doctorat. Institut national polytechnique de Toulouse-INPT.

[36] B. Khaoula, I. Nesrine, K. Zineb, élaboration et préparation catalyseurs hétérogènes à base d'oxyde de nickel application la conversion du glycérol

[37] X. Courtois, V. Perrichon, M. Primet, Comptes rendus de l'Académie des sciences series II - Chemistry 3 (2000) 429-436

[38] El Marouazi, Hamza. Elaboration, caractérisation et évaluation photocatalytique de matériaux de type TiO<sub>2</sub> dopé-graphène. 2021. Thèse de doctorat. Université de Strasbourg.

[39] Barbri, Halima et Haddi, Sakina. Etude numérique de la convection naturelle dans une cavité chauffée avec un flux imposé. 2016. Thèse de doctorat. Université Ibn Khaldoun.

[40] Labidi, Adel. Effet des nano-fluides sur la convection forcée dans une conduite de section rectangulaire. 2021. Thèse de doctorat.

[41] Boudjelli, Mohand. *Simulation numérique des échanges convectifs dans une cavité*. 2012. Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.

[42] Ayache, asma. Etude analytique et numérique d'un transfert de chaleur dans une plaquemince.

[43] H- yasmine, b fatma zohra, estimation des paramètres d'un craqueur catalytique à litfluide de la raffinerie d'alger, master, université blida1,2021.

[44] ANTAO, Armando Manuel Sequeira Nunes. Analyse de la stabilité des ouvrages souterrains par une méthode cinématique régularisée. 1997. Thèse de doctorat. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

[45] ANTAO, Armando Manuel Sequeira Nunes. Analyse de la stabilité des ouvrages souterrains par une méthode cinématique régularisée. 1997. Thèse de doctorat. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

## Bibliographie

---



## Résumé

### Résumé

Les matériaux composites occupent une place de plus en plus importante dans la Réalisation de structures à hautes performances mécaniques (aérospatiale, aéronautique, automobile)

L'objectif de notre travail est axé en premier lieu sur l'orientation préférentielle d'un renfort dans un matériau composite, les différentes caractéristiques du matériau, la matrice, les Renforts, et les fibres. Dans la deuxième partie, j'ai principalement abordé la conception des catalyseurs. La dernière partie a été consacrée à des tests de simulation numérique d'un essai de traction et compression et de flexion et injection de l'air sur la géométrie de nid d'abeille.

Mot clé : (matériaux composites, contrainte,  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ , simulation numérique).

### Abstract

Composite Materials occupy an increasingly important place in the creation of structures with high mechanical performance (aerospace, aeronautics, automobile)

The objective of our work is primarily focused on the preferential orientation of a reinforcement in a composite material, the different characteristics of the material, the matrix, the reinforcements, and the fibers. In the second part, I mainly discussed the design of catalysts. The last part was devoted to numerical simulation tests of a traction and compression test and of bending and air injection on the honeycomb geometry

Keyword : ( composite materials, constraint,  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ , simulation numérique).

### الملخص

تحتل المواد المركبة مكانة متزايدة الأهمية في إنشاء الهياكل ذات الأداء الميكانيكي العالي (الطيران، الطيران، السيارات)

يركز هدف عملنا في المقام الأول على التوجه التفضيلي للتعزيز في مادة مركبة، والخصائص المختلفة للمادة، والمصفوفة، والتعزيزات، والألياف. في الجزء الثاني، ناقشت بشكل رئيسي تصميم المحفزات. أما الجزء الأخير فقد خصص لاختبارات المحاكاة العددية لاختبار الجر والضغط والانحناء وحقن الهواء على هندسة

## Résumé

قرص العسل.

كلمة مفتاحية : (المواد المركبة، الإجهاد،  $\text{TiO}_2$ ،  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ، المحاكاة العددية)