

République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أمحمد بوقرة بومرداس
Université M'hamed Bougara de Boumerdès



Faculté des Sciences - Département de Chimie

Polycopié pédagogique

Cours destiné au niveau 3^{ième} année Licence du module chimie des matériaux

Présenté par la Candidate: M^{me} BOUSSAK épouse ALLAM Hassina

Maître de Conférences (A) Enseignante-Chercheur à l'Université de Boumerdes, Faculté des Sciences, Département de Chimie,

Discipline : Génie des Procédés

2021-2022

PREAMBULE

Ce cours est proposé dans le cadre de l'obtention de grade de professeur à diriger les recherches. Dans ce document, il s'agit plus de se focaliser sur la partie recherche. Toutefois, pour un enseignant-chercheur, il est difficile de départager arbitrairement son activité de chercheur de celle d'enseignant. Les compétences qu'il développe ne sont pas exclusives d'une activité en particulier. C'est pourquoi, il est utile dans un document support d'évaluation au grade de professeur à diriger des recherches de présenter également les activités pédagogiques et collectives.

Ce cours est structuré en trois parties distinctes :

- Dans la première partie, j'ai choisi de présenter les grandes classes de matériaux que j'ai eu l'occasion d'aborder lors de mon parcours d'enseignement, cela me permet de définir et faire une comparaison entre les matériaux organique et inorganique, puisque la science des matériaux traite l'ensemble des matériaux, métaux, céramiques, polymères, composites de manière unifiée avec les mêmes concepts théoriques et les mêmes outils expérimentaux.
- La deuxième partie concerne la connaissance des matériaux composites qui sont le siège et le thème de plusieurs recherches très récentes, il représente un mélange hétérogène d'en moins de deux matériaux non miscible de différents classes de matériaux qu'ont a cité dans la première partie.
- La troisième partie est consacré sur les différents liaisons chimique dans un matériau, leurs connaissances nous guide à choisir le type d'analyse appliqué que ce soit : mécaniques (compression, traction, fluage,...), physiques (MEB, DRX, FX,), thermiques (ATG, ATD, DSC....)...

Enfin, ce cours se terminera par une conclusion.

RESUME

Toute matière entrant dans une construction devient un matériau. Autrement dit : un matériau est une matière d'origine naturelle ou artificielle que l'homme façonne pour en faire des objets. De nombreuses propriétés physico-chimiques et propriétés d'usage des matériaux sont étroitement liées à la nature des liaisons chimiques entre les atomes qui les constituent. C'est sur cette base qu'est établie la distinction entre les principales classes de matériaux. Les matériaux composites combinent des propriétés intéressantes des autres familles sans en avoir leurs inconvénients. Ils sont légers, rigides et résistants et peuvent être tenace. La majorité des composites disponibles aujourd'hui sont à matrice polymère (en général époxyde ou polyester) renforcés des fibres de verre, carbone, ou kevlar (Le Kevlar est une fibre synthétique qui possède de très bonnes propriétés mécaniques en traction (résistance à la rupture). Pour caractériser certains matériaux, on s'aide de plusieurs types de méthodes (observations : à l'œil nu, observation au microscope, essais : mécaniques, ou autres) et ce en se basant sur certaines propriétés de ces matériaux. Les essais mécaniques sont l'étape indispensable pour accéder aux grandeurs caractéristiques des matériaux, du module d'Young à la limite d'élasticité, en passant par la ténacité ou la résistance à la fatigue, et ce dans des conditions variables, par exemple de température ou de vitesse de sollicitation.

Sommaire

CHAPITRE I : Différents classes des matériaux

- 1-Introduction à la science des matériaux
- 2. Définitions d'un matériau
- 3- Les grandes classes des matériaux
 - 3.2- Matériaux de base et produits
 - 3-3- Structure des matériaux
 - 3.3.1. Atomes
 - 3.3.2.-Les différents types de liaisons dans les matériaux
 - 3.3.2.1. Liaison covalente
 - 3-3-2-2-Liaison métallique
 - 3-3-2-3-Liaison ionique
 - 3-3-2-4-Liaison hydrogène
 - 3-3-2-5-Liaison de Van der Waals
 - 3-3-3- La liaison chimique et les propriétés mécaniques
- 4. Etat amorphe et cristallin
 - 4.1. Etat condensé : ordre à courte distance
 - 4.2. Ordre à longue distance
- 5. Résistances mécaniques des matériaux
 - 5.1. Essai de traction
 - 5.2. Courbes contraintes déformations typiques
- 6. Les types de matériaux
 - 6.1. Les métaux
 - 6.1-1.Alliages à base de fer
 - 6.1.2- Alliages non ferreux
 - 6.1-3.- Alliages de cuivre
 - 6.1.4. Alliages d'aluminium
 - 6.2. Polymères : matières plastiques

6.2.1. Identification des matières plastiques

6.2.2. Injection des matières plastiques

6.3. Céramiques

6.3.1. Méthode de préparation

6.3.1.1. Méthode céramique

6.3.1.2. Méthode sol-gel

6.3.1.3. Méthode hydrothermale

6.3.1.4. Méthode du précurseur

6.3.2. Propriétés générale des céramiques

6.3.2.1. Liaison et structure

6.3.2.2. Microstructure et propriétés

6.3.4. Les verres

CHAPITRE II : Matériaux composites

1. Matériaux composites

1.1. Matériaux composite à matrice métallique

1.2. Matériaux composites à matrices céramiques

2. Agents de renfort

3- Liaisons atomiques et propriétés des matériaux

3.1. Homogénéité

3. 2. Contraintes

3.3. Déformations

3.4. Isotropie

3.5. Elasticité

3.6. Rigidité

3.7. Résistance

3.8. Ductilité

3.9. Malléabilité

3.10. Ténacité

4- Mécanique de rupture

4. 1-Modes de rupture ou modes de propagation de fissure des matériaux composites

4.1.1. Relation contrainte/déformation d'un composite unidirectionnel

4.1.2. Analyse de la rupture

5. Examen au microscope optique

6.- Examen au MEB

7. Etude d'un exemple d'un composite à matrice polymérique renforcé par une matière céramique

7. 1. Matières premières, méthodes et étapes d'élaboration du revêtement tricouche

7. 2 Etapes de fabrication

7.3- Essais mécanique

7.3. 1. Essai d'allongement à la rupture

7.3-2- Comportement au choc

7. 4- Essai thermique

8- Conclusion de cette étude

9-Conclusion

CHAPITRE III: Méthodes d'analyse

1. Introduction

2. Méthodes de caractérisation des matériaux

2.1. Examens métallographiques

3. Examens macrographiques

4. Examen au microscope optique

5. Examen au MEB

6. Les techniques d'analyse chimique de laboratoire

6.1. Spectrophotométrie

6..1.1.Spectrophotométrie d'absorption moléculaire

6.1.2. Spectrophotométrie d'absorption UV et IR

6.1.3. La spectrophotométrie d'absorption atomique (AA)

6.1.4. Spectrophotométrie de plasma à couplage inductif (ICP)

6.1.5. Fluorescence

6.1.6..Chromatographie

7. Conclusion

Introduction générale

La science des matériaux émerge comme un ensemble cohérent. Elle est couplée au génie des matériaux qui a pour objectif la réalisation de matériaux aux propriétés déterminées. La science des matériaux traite l'ensemble des matériaux, métaux, céramiques, polymères, composites de manière unifiée avec les mêmes concepts théoriques et les mêmes outils expérimentaux. La connaissance et la maîtrise des phénomènes microscopiques (diffusion, arrangement des atomes, recristallisation, apparition des phases, etc.) confèrent aux scientifiques et aux industriels la possibilité d'élaborer des matériaux aux propriétés et aux performances voulues.

La structure des matériaux est entièrement déterminée par les liaisons s'établissant entre atomes. Ces liaisons sont une manifestation d'interactions attractives entre atomes, dont l'origine est soit électrostatique (liaison ionique, liaison hydrogène), soit purement quantique (liaisons covalente et métallique, liaisons de type Van der Waals/London). La manière dont les atomes sont empilés (l'empilement atomique) qui va déterminer le nombre de ressorts par unité de surface et l'angle sous lequel ils sont étirés. Les matériaux peuvent se classer selon leurs liaisons en trois classes : Métaux, céramiques et polymères. Les matériaux composites sont des matériaux qui associent deux matériaux différents, appartenant parfois à deux classes distinctes, pour obtenir une combinaison de propriétés qui tire avantage de chacun. Dans un matériau composite, le terme matrice désigne la matière solide qui entoure les renforts pour former une masse compacte. Le premier rôle de la matrice est de maintenir les renforts dans une forme compacte et de donner la forme voulue au produit final.

La complexité du monde ne s'aborde pas uniquement en utilisant des outils, aussi sophistiqués soient-ils. Elle ne s'aborde pas non plus en construisant les couches successives d'un édifice scientifique unique. Elle doit s'aborder aujourd'hui avec une grande ouverture d'esprit, et une insatiable curiosité, qui mettront à profit vos capacités d'abstraction actuelles et futures. L'objectif de ce cours n'est donc pas de vous donner une liste de matériaux, avec leurs principales propriétés, mais plutôt de vous expliquer comment ils sont structurés, d'où viennent ces propriétés, et les principaux modèles qui servent à les représenter et à les prévoir.

Dans ce travail, le module chimie des matériaux englobe différentes notions et relations chimiques de bases dans le but de comprendre la microstructure et la morphologie de différents types de matériaux, la maîtrise de ces notions nous permet d'élaborer des matériaux de haute performance. Avant de fabriquer les pièces d'un produit, on doit choisir un matériau. Il existe de nombreux matériaux, mais chacun est unique par les caractéristiques qu'il présente. Le matériau choisi sera celui dont les caractéristiques permettent de vérifier le maximum de fonctions techniques nécessaires. Il existe de nombreux matériaux de construction utilisés dans les constructions: bois, verre, acier, matières plastiques, plâtre, béton, carrelage, briques, tuiles, pierre... Certains de ces matériaux sont disponibles dans la nature à l'état brut. D'autres sont mélanges des matières premières, et de leurs transformations chimiques.

Il est indispensable pour appréhender un matériau de le caractériser, c'est-à-dire d'en analyser les propriétés. Il existe de nombreuses techniques de caractérisation des matériaux qui reposent sur différents principes physiques de base : les interactions rayonnement-matière, la thermodynamique et la mécanique. Son contenu permet aux étudiants (Spécialité Génie des matériaux) de connaître les différentes techniques et moyens de caractérisation des matériaux utilisés dans les labos.

1-Introduction à la science des matériaux :

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

Les sollicitations auxquelles sont soumis les matériaux sont complexes et multiples. Leur comportement pour une utilisation déterminée est représenté par un ensemble de propriétés. On parle également du comportement des matériaux pendant leur fabrication ou leur mise en forme (par exemple, la coulabilité, la déformabilité...). Le concept de la science des matériaux est né de la nécessité d'acquérir la maîtrise du comportement des matériaux par la connaissance des lois fondamentales qui déterminent leurs propriétés. La science des matériaux a pour objectif d'établir les relations existantes entre la composition et l'organisation atomique ou moléculaire, la microstructure et les propriétés macroscopiques des matériaux. Cette science est complétée par le génie des matériaux qui s'occupe des procédés de fabrication, de transformation et de mise en forme.

Une connaissance fondamentale des matériaux n'était pas nécessaire lorsque l'homme se contentait de l'argile, du bois et de la laine... pour satisfaire la plupart de ses besoins. L'approche empirique et l'expérience accumulée par les métallurgistes et les céramistes depuis des milliers d'années ne sont plus suffisantes pour satisfaire aux besoins contemporains et s'adapter aux exigences complexes de la technologie moderne.

Comme le schématise la figure 1 la science et le génie des matériaux comportent quatre pôles principaux : synthèse, fabrication et transformation, composition et structure, propriétés et performances. Les différents comportements (à la fabrication comme à l'utilisation) ainsi que les facteurs économiques qui y sont associés caractérisent la performance d'un matériau.

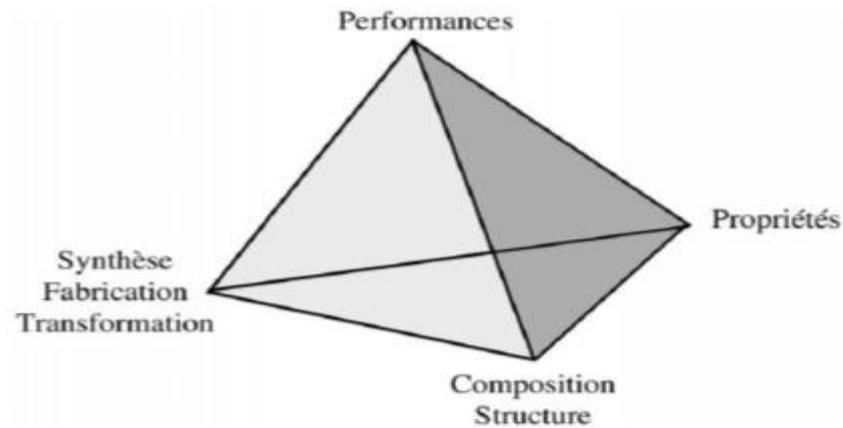


Figure I. 1: Les quatre pôles de base de la science et du génie des matériaux.

Ces quatre pôles sont étroitement associés. Le matériau est élaboré au cours de sa synthèse (polymère) ou de sa fabrication (métaux, alliages, céramiques, etc.). La transformation a comme objectif de mettre en forme le matériau élaboré et d'en préparer un objet fini caractérisé par son comportement. La transformation se fait, en règle générale, en plusieurs étapes. Par exemple, la préparation d'une pièce de carrosserie fait intervenir successivement le laminage de la tôle à partir du lingot d'acier, l'emboutissage de la tôle pour former la pièce et une série d'opérations annexes de finissage (peinture, etc.). Pour atteindre des propriétés optimales, il est indispensable de maîtriser la structure et la composition du matériau et il faut par conséquent posséder une série de techniques d'analyse très sophistiquées.

Ce sont les contributions multiples de la science et du génie des matériaux qui ont complètement remodelé le monde qui nous entoure en libérant l'homme d'un grand nombre de contraintes liées à notre environnement. Notre mode de vie s'est radicalement transformé en quelques décennies et en majeure partie grâce à l'apport de la science et du génie des matériaux qui ont permis la création des outils de la vie moderne: voitures, avions, ponts, téléphériques, ordinateurs, équipements de télécommunications, satellites, substituts biomédicales...

2. Définitions d'un matériau :

Un matériau est tout produit (naturel ou artificiel) qui peut être utilisé pour fabriquer des objets. C'est aussi toute substance, ou matière pouvant destinée à être mise en forme. Il peut être:

✓ **D'origines naturelles comme:**

- les minéraux : ils sont extraits du sol (eau, terre, sable...)
- les organiques d'origine végétale (bois, coton, lin...)
- les organiques d'origine animale (laine, viande, lait, corne...)

✓ **D'origines artificielles:** ils n'existent pas dans la nature ; il faut donc un travail humain ou animal pour transformer des matériaux naturels afin de créer de nouveaux matériaux. C'est ce qu'on appelle **les matériaux de synthèse.**

- Les métaux que l'on extrait à partir des minéraux (cuivre, zinc, argent, aluminium, plomb...)
- Les alliages qui sont des mélanges de plusieurs métaux (bronze, laiton, zamac...)
- Les plastiques que l'on crée à partir d'éléments naturels comme le bois, le charbon et le pétrole... (PVC, caoutchouc, polystyrène, polyamide, Nylon...).

Ces matériaux peuvent être regroupés en grandes familles selon l'organigramme suivant :

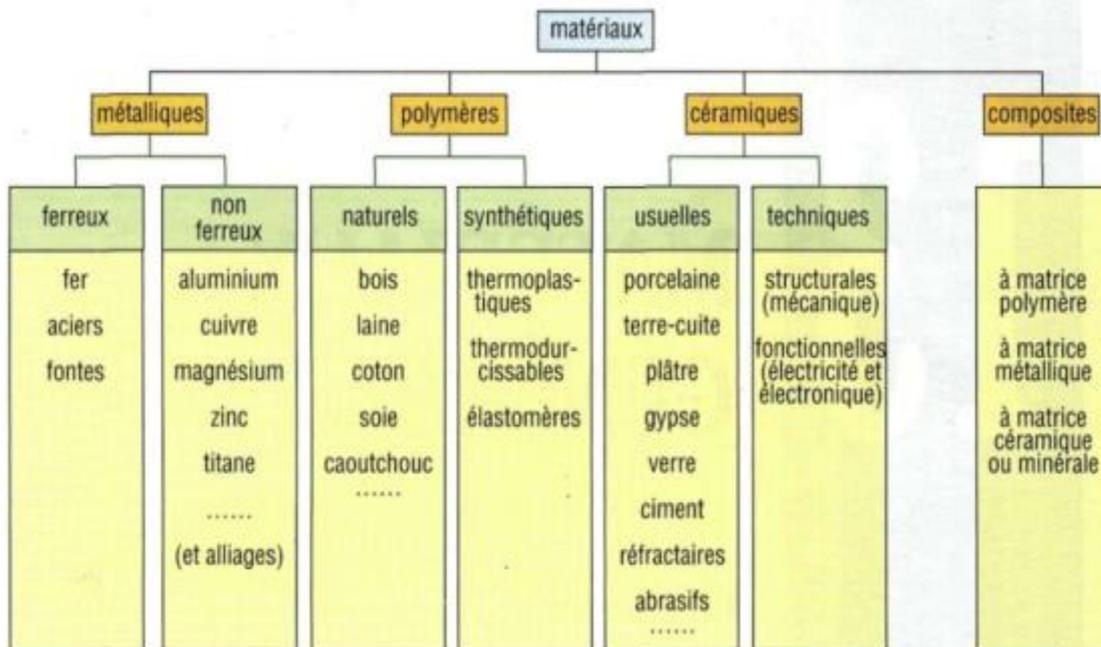


Figure I. 2 : Classification des matériaux

Le choix d'un matériau, dans une utilisation, dépend de plusieurs critères :

- ✓ Caractéristiques mécaniques : limite élastique, dureté, résilience, ténacité, ductilité...
- ✓ Caractéristiques physico-chimiques : masse volumique, point de fusion, conductibilité électrique et conductibilité thermique, comportement à la corrosion, vieillissement...
- ✓ Caractéristiques de mise en œuvre : usinabilités, soudabilité, trempabilité...
- ✓ Caractéristiques économiques : prix, disponibilité, expérience industrielle

Le classement entre grandes familles de matériaux repose en grande partie sur le type de liaison entre les atomes. Il faut le considérer comme indicatif, le passage d'une catégorie à l'autre pouvant se faire en fonction de la composition chimique et des conditions de mise en œuvre (exemple des verres métalliques). Les composites réalisant généralement une combinaison de ces différentes propriétés, optimisée selon l'emploi du matériau considéré. La figure 3 montre quelques possibilités ou combinaisons pour l'obtention des matériaux composites.

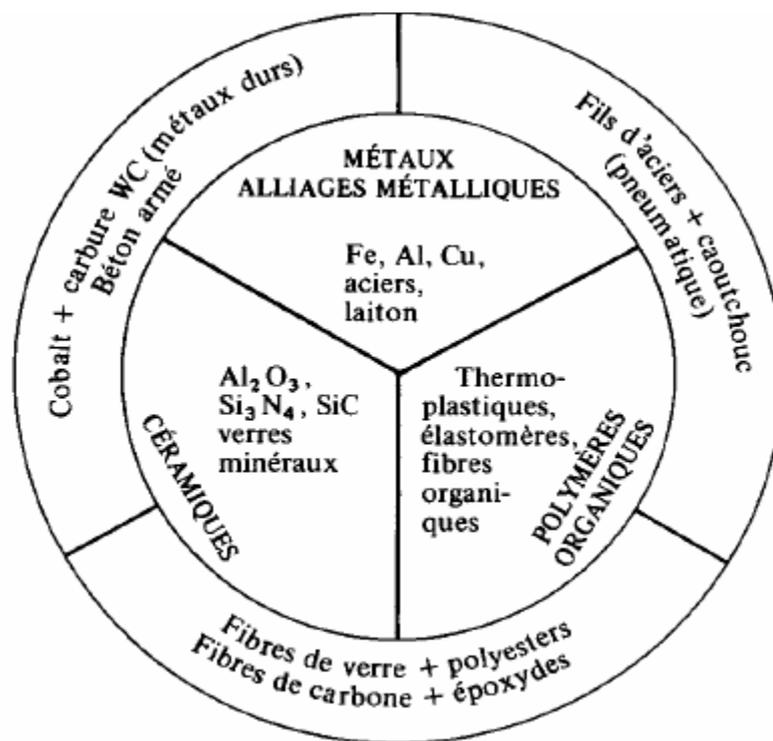


Figure I. 3 : Les différentes possibilités d'obtention des matériaux composites.

3- Les grandes classes des matériaux :

Dans la science des matériaux, selon la composition et la structure, les matériaux sont classés comme suit :

- Métaux et alliages
- Polymères
- Céramiques

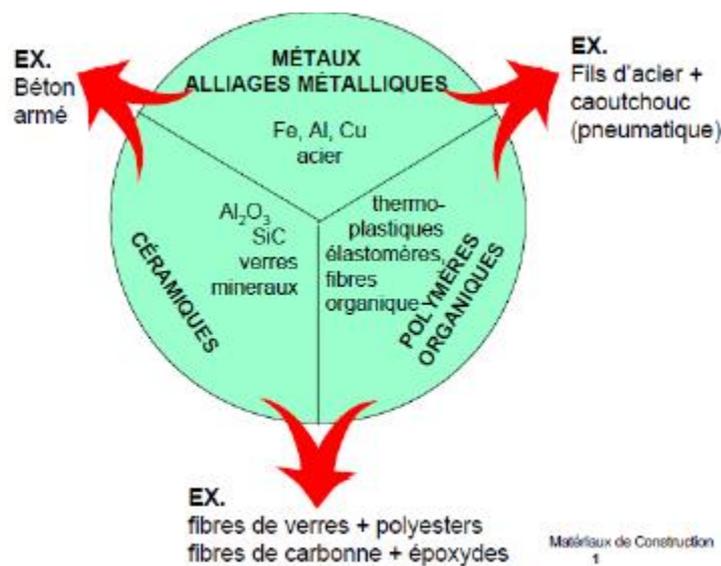


Figure I. 4 : Classification des matériaux

3.2- Matériaux de base et produits :

- Matériaux de base ou matière première (Argiles, pierres, bois, calcaire, métaux)
- Matériaux produits et composites (ciment (calcaire+argile), alliages, béton, ..)

Dans la construction, les matériaux sont classés selon le domaine d'emploi et selon leurs propriétés principales (Résistance, compacité,..) comme suit :

a. Les matériaux de construction (ou de résistance) : matériaux qui ont la propriété de résister contre des sollicitations (forces) importantes (poids propre, surcharge, séisme, chaleur, ..) :

- Pierres, bois, béton, métaux, terre cuite (Brique), etc.

b. Les matériaux de protection : matériaux qui ont la propriété d'enrober et de protéger les matériaux de construction principaux:

- **Revêtement :** Enduits, peintures, bitumes, etc.

-

3-3- Structure des matériaux :

L'évolution spectaculaire de la diversité et des performances des matériaux est due à une compréhension et à une maîtrise de plus en plus fines de leur structure, ainsi que des relations entre

structure et propriétés d'emploi. La diversification des matériaux est également liée à une spécialisation de plus en plus grande, qui repousse toujours plus loin les limites de mise en œuvre et d'utilisation finale de ces matériaux. Cette partie introduit les éléments de base de la structure des matériaux, en partant de l'échelle atomique pour arriver à celle de l'objet « macroscopique ». Ces structures ne sont cependant presque jamais parfaites, et les défauts qui s'y trouvent régissent une grande partie des propriétés des matériaux, nous les examinerons en cours de route. Nous allons considérer la structure d'un matériau depuis les constituants de base, en commençant par les atomes, puis par les liaisons atomiques, pour remonter petit à petit (en travelling arrière) jusqu'à l'arrangement macroscopique.

- Structure cristalline (Roche, métaux)
- Structure vitreuse (Verre, la céramique, le laitier)
- Structure colloïdale (plastiques, caoutchouc, résine,...)

Structure macroscopique du matériau :

- Structure fibreuse (Bois, l'éternite (amiante + ciment))
- Structure capillaire (mastique, mortier de ciment et béton)
- Ou à la fois fibreuse et capillaire (béton de fibre)

3.3.1. Atomes :

La classification périodique des éléments de Mendeleïev (première parution en 1869) est rappelée sur la Figure 4. Les éléments présents sur une même colonne ont la même structure électronique externe, tandis que la progression de gauche à droite, sur une même rangée, traduit le remplissage progressif des couches électroniques. Certains éléments, dits « de transition », ont une couche externe remplie avant que l'une des couches internes (de type d) le soit complètement. Ce sont les éléments des colonnes IIIA à IIB (ou 3 à 12), ainsi que les lanthanides et les actinides (terres rares : remplissage d'une couche f). Les trois quarts des éléments sont des métaux. La première colonne contient les métaux alcalins (sauf H), la deuxième les métaux alcalino-terreux, l'avant-dernière les halogènes et la dernière les gaz nobles (ou gaz rares). Les éléments non métalliques sont les métalloïdes (B, Si, As, Te, Ge, Sb, Po), les halogènes, les gaz rares ainsi que H, C, N, O, P, S et Se.

De la gauche vers la droite de la classification le remplissage des couches atomiques a pour conséquences : • Augmentation : énergie d'ionisation, électronégativité, affinité électronique, activité chimique (non métalliques), rayon atomique (hors éléments de transition), rayon ionique des cations • Diminution : nature métallique, taille atomique, activité chimique (métaux) En allant du haut vers le bas dans une même colonne, les électrons de la couche externe sont « masqués » vis-à-vis du noyau par les électrons des couches inférieures, avec pour conséquences : • Augmentation : énergie d'ionisation, électronégativité, affinité électronique • Diminution : nature métallique, rayon atomique.

CLASSIFICATION PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

Legend:

- CS : Cubique simple
- CC : Cubique centre
- CFC : Cubique faces centrées
- DC : Cubique diamant
- HC : Hexagonal compact
- O : Orthorhombique
- Rh : Rhomboédrique
- T : Tetragonal
- M : Monoclinique

Physical Properties Legend:

- Numéro atomique
- Structure cristalline
- Polymorphisme
- Symbole
- Densité
- Température Fusion °C
- Common (Atomes)
- Oxidation number

1 1.008 H	2 4.003 He																	3 4.003 He					
3 6.939 Li	4 9.012 Be																	5 10.811 B	6 12.011 C	7 14.007 N	8 15.999 O	9 18.998 F	10 20.183 Ne
11 22.99 Na	12 24.31 Mg																	13 26.98 Al	14 28.08 Si	15 30.97 P	16 32.06 S	17 35.45 Cl	18 39.95 Ar
19 39.10 K	20 40.08 Ca	21 44.95 Sc	22 47.90 Ti	23 50.94 V	24 52 Cr	25 54.94 Mn	26 55.85 Fe	27 58.93 Co	28 58.71 Ni	29 63.54 Cu	30 65.37 Zn	31 69.72 Ga	32 72.6 Ge	33 74.9 As	34 78.96 Se	35 80 Br	36 83.8 Kr						
37 85.5 Rb	38 87.6 Sr	39 88.9 Y	40 91.2 Zr	41 92.9 Nb	42 95.9 Mo	43 97 Tc	44 101 Ru	45 103 Rh	46 106 Pd	47 107.8 Ag	48 112 Cd	49 114.8 In	50 118.7 Sn	51 121 Sb	52 127.6 Te	53 126.9 I	54 131.3 Xe						
55 133 Cs	56 137 Ba	57 139 La*	72 178 Hf	73 181 Ta	74 184 W	75 186 Re	76 190 Os	77 192 Ir	78 195 Pt	79 197 Au	80 200 Hg	81 204 Tl	82 209 Pb	83 209 Bi	84 209 Po	85 210 At	86 222 Rn						
87 223 Fr	88 226 Ra	89 227 Ac**																					
			* 58 140 Ce	59 141 Pr	60 144 Nd	61 145 Pm	62 150 Sm	63 152 Eu	64 157 Gd	65 159 Tb	66 162 Dy	67 165 Ho	68 167 Er	69 169 Tm	70 173 Yb	71 175 Lu							
			** 90 232 Th	91 231 Pa	92 238 U	93 237 Np	94 244 Pu	95 243 Am	96 247 Cm	97 247 Bk	98 251 Cf	99 254 Es	100 257 Fm	101 256 Md	102 254 No	103 257 Lw							

Figure I. 5 : Classification périodique des éléments avec quelques-unes de leurs propriétés physiques

3.3.2.-Les différents types de liaisons dans les matériaux :

3.3.2.1. Liaison covalente :

Dans ce chapitre, nous présentons les différents types de liaisons et leurs signatures au niveau des structures atomiques.

Les liaisons entre atomes assurent la cohésion du matériau et en particulier sa déformabilité, sa conductivité (thermique, électrique...), ses propriétés magnétiques, sa fragilité, sa densité... La « taille » d'un atome ou d'un ion dépend du type de liaison concerné, à travers les positions relatives les plus probables de deux particules voisines (minimum d'énergie). Le rayon atomique augmente lorsque l'on descend le long d'une colonne de la classification périodique ; les anions sont d'une manière générale beaucoup plus « encombrants » que les cations, ce qui explique l'arrangement des solides ioniques à l'échelle atomique. On distingue ci-dessous les liaisons selon la nature de l'interaction concernée.

La liaison covalente est obtenue par le recouvrement d'orbitales atomiques associées aux électrons de valence¹ des atomes liés. Le recouvrement donne lieu à des états électroniques collectifs dans lesquels l'énergie potentielle et cinétique des électrons est minimisée. La densité de probabilité de présence des électrons dans les états liants est maximale entre les atomes liés. Ainsi, la liaison covalente peut être vue comme le partage de deux électrons par les atomes liés, chaque atome apportant un électron. Les liaisons covalentes sont directionnelles. La géométrie des liaisons est déterminée par la dépendance angulaire des orbitales atomiques, qu'elles soient pures ou hybridées figure 6. Il est à noter que le recouvrement concerne les orbitales dirigées dans l'axe de la liaison aussi bien que les orbitales dirigées perpendiculairement à l'axe de la liaison. Ces liaisons sont appelées liaisons de type σ et liaisons de type π , respectivement. Les deux types de liaisons peuvent coexister le long d'un même axe, permettant l'établissement de liaisons doubles [$\sigma\pi$] ou triples [$\sigma\pi\pi$] figure 7. La rotation des groupements atomiques autour de leur axe de liaison n'est possible que dans le cas d'une liaison simple de type σ . Les liaisons covalentes sont des liaisons fortes : le gain en énergie des électrons est généralement supérieur à 5 eV par paire liée.

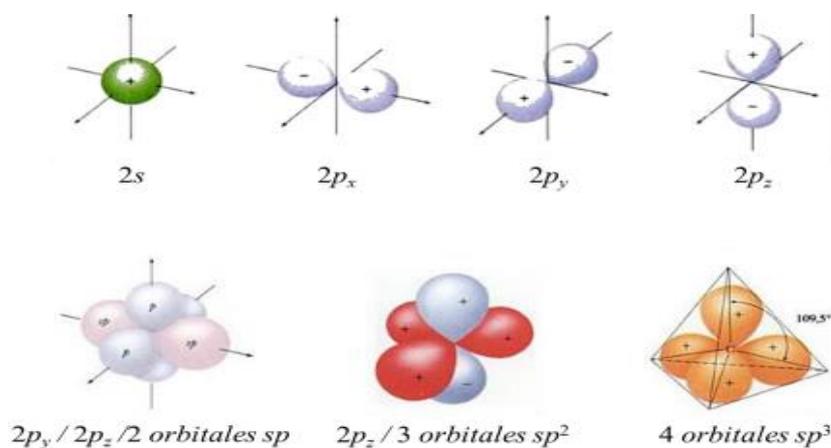


Figure I. 6 : (*Haut*) Orbitales atomiques de nombre quantique principal $n = 2$. (*Bas*) Configuration des orbitales après hybridation sp , sp^2 et sp^3 .

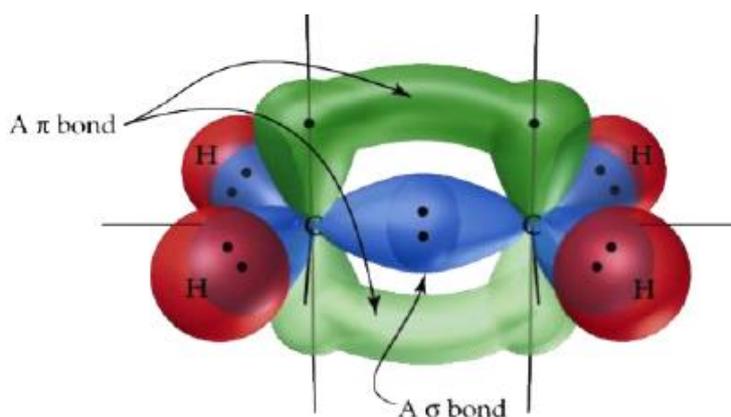


Figure I. 7 : Construction de la molécule d'éthylène ($H_2C=CH_2$) par recouvrement des orbitales $2p_z$ (liaison π) et deux orbitales sp^2 des carbones (liaison σ). Les orbitales hybrides sp^2 restantes se combinent avec les orbitales $1s$ des hydrogènes pour former les 4 liaisons C-H.

3-3-2-2-Liaison métallique :

Elle est assurée par la mise en commun d'électrons de la couche périphérique; le « gaz » constitué par ces électrons libres et délocalisés assure la cohésion de l'ensemble des cations restants. Elle apparaît entre les éléments d'un amas d'atomes métalliques (liaison assurée par les électrons de la bande de conduction). Les électrons de la liaison métallique sont mobiles et disponibles pour assurer la circulation éventuelle d'un courant électrique.

Exemple. Cristal de sodium Na

Les éléments métalliques s'ionisent facilement (1 à 3 électrons sur la couche externe, faiblement liés au noyau), la mise en commun d'un ou de plusieurs électrons dans un nuage « délocalisé », forme la liaison métallique. Les métaux sont donc un assemblage d'ions positifs dans un « gaz d'électrons » qui assure leurs conductivités électrique et thermique élevées, ainsi que l'éclat métallique (interactions entre électrons et photons) et les propriétés mécaniques (plasticité). La liaison métallique « pure » ne se rencontre que pour les métaux normaux (alcalins, alcalino-terreux, Al...) où elle est assez faible. Pour les métaux de transition, les ions sont beaucoup plus rapprochés et l'interaction entre les sous-couches incomplètes crée une composante covalente, qui renforce la liaison parfois de manière considérable. La liaison métallique n'est pas dirigée et conduit à des assemblages compacts, souvent à symétrie élevée.

3-3-2-3-Liaison ionique :

Attraction électrostatique entre deux ions d'électronégativités très différentes (par exemple, entre un halogène et un alcalin : cas classique de NaCl) après transfert d'un électron de valence. La densité électronique s'annule entre les deux ions qui sont donc nettement séparés. La liaison ionique est forte et non dirigée. L'empilement des atomes est régi par une compacité maximale et l'obtention de la neutralité électrique dans un volume le plus faible possible. Parmi les solides ioniques on trouve les halogénures d'alcalins mais aussi, entre autres, des oxydes comme l'alumine Al_2O_3 , la magnésite MgO et la zirconite ZrO_2 .

3-3-2-4-Liaison hydrogène :

Elle vient d'une résonance entre deux positions d'un proton entre deux anions voisins fortement électronégatifs (O^{2-} , F^{-1}), elle a donc un caractère ionique marqué. On la retrouve dans l'eau, la glace, les sels hydratés, les polymères organiques (acides...) et inorganiques (notamment les liants hydrauliques tels que les ciments).

3-3-2-5-Liaison de Van der Waals :

C'est une liaison faible, qui est due à l'attraction électrostatique entre doublets électrons-noyau des molécules. On la trouve dans les polymères organiques, la cristallisation des gaz rares à très basse température, entre les feuillets silicatés des argiles et entre les feuillets de graphite.

3-3-3- La liaison chimique et les propriétés mécaniques :

Pour résister aux efforts qui lui sont appliqués un matériau n'a d'autre ressource que de se déformer de manière à stocker ou à dissiper l'énergie qui lui est fournie. Dans les matériaux cristallins la déformation est associée à de légères variations des distances interatomiques, mais elles entraînent des variations considérables de l'énergie de cohésion (énergie interne). Ainsi, pour comprendre les caractéristiques mécaniques des matériaux comme leur module il faut descendre à l'échelle atomique. Deux facteurs ont un effet prépondérant sur ces propriétés : Les forces qui retiennent les atomes les uns aux autres (les liaisons atomiques). Elles agissent comme de petits ressorts qui lient un atome à ses proches voisins dans l'état solide.

4. Etat amorphe et cristallin :

4.1. Etat condensé : ordre à courte distance :

On s'intéresse ici à la matière à l'état condensé, c'est-à-dire non gazeux, mais sans distinguer a priori entre l'état solide et l'état liquide. Si l'on trace la probabilité de trouver un atome (ou un ion) en fonction de la distance à une particule (atome, ion) de référence, on trouve des oscillations plus ou moins régulières autour de distances caractéristiques, multiples d'une distance unitaire qui correspond à un type de liaison donné. L'arrangement des atomes à petite échelle n'est donc pas aléatoire : on parle d'ordre à courte distance.

A l'état condensé, les atomes (ou ions) sont empilés de la manière la plus compacte possible compte tenu des contraintes de direction des liaisons (pour les liaisons covalentes), de stoechiométrie, de neutralité électrique (liaisons ioniques), d'encombrement stérique (éléments d'espèces chimiques différentes) et de coordinence (nombre de liaisons par atome). Pour les liaisons iono-covalentes à caractère ionique marqué (halogénures, oxydes, silicates), les règles suivantes (dites de Pauling) s'appliquent généralement, par ordre de priorité décroissante :

-Effet de taille (rayon ionique) : suivant les tailles respectives des cations et des anions, un cation peut être en contact avec 2 à 8 anions voisins (nombre de coordinence).

-Conservation de la neutralité électrique.

-Liens entre les polyèdres de coordinence des cations : par un sommet, éventuellement par une arête, très rarement par une face, pour éloigner le plus possible les cations les uns des autres.

4.2. Ordre à longue distance :

Dans de nombreux matériaux à l'état solide, les atomes sont empilés d'une manière régulière et périodique dans les trois directions de l'espace. On parle alors de cristaux (ou d'état cristallin). L'ensemble des points « équivalents » (distants d'une période du réseau) s'appelle le réseau cristallin. Ce réseau peut posséder des symétries, qui doivent être compatibles avec la condition de périodicité. On trouve des rotations d'ordre n , avec $n = 2, 3, 4$ ou 6 (seules valeurs possibles), combinées ou non à des translations selon l'axe de la rotation ou à des inversions. Selon les symétries existantes, on distingue 32 groupes ponctuels et 14 réseaux dits de Bravais, sur 7 systèmes cristallins figure 7. L'absence de symétrie centrale (21 groupes ponctuels sur 32) confère des propriétés particulières à certains matériaux, par polarisation du cristal (exemples : ferroélectricité, piézoélectricité...). La compacité de l'empilement dépend du caractère dirigé ou non des liaisons.

La structure cubique diamant, adoptée par le silicium et le germanium par exemple (liaisons covalentes tétraédriques) est peu compacte (volume effectivement occupé inférieur à 50%, avec un modèle de sphères dures). La structure cubique centrée est plus compacte (68%), les structures cubique à faces centrées et hexagonale compacte présentent la compacité maximale (74%).

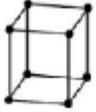
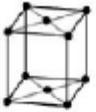
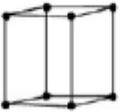
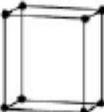
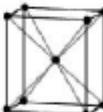
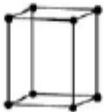
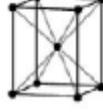
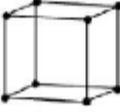
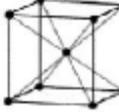
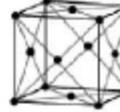
Type de réseau Système cristallin	P (primitif)	C (1 face centrée)	I (centré)	F (toutes faces centrées)
Triclinique $a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$				
Monoclinique $a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ$ $\beta \neq 90 \text{ ou } 120^\circ$				
Rhomboédrique $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$				
Hexagonal $a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ \text{ et } \gamma = 120^\circ$				
Orthorhombique (prisme droit à base rectangulaire) $a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$				
Quadratique ou tétragonal (prisme droit à base carrée) $a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$				
Cubique (cube) $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$				

Figure I. 8: Les 14 réseaux de Bravais des matériaux cristallins.

Dans les matériaux non cristallins, l'ordre à courte distance est maintenu mais on ne trouve pas d'ordre à longue distance. Prenons l'exemple des verres (au sens commun du terme) illustré sur la figure 8 : le réseau cristallin de la silice (tétraèdres SiO_4 reliés par un sommet, selon un réseau cristallin) est perturbé par exemple en remplaçant certains des cations Si « formateurs » du réseau par des cations « modificateurs » (Na, Ca, K), qui « ouvrent » le réseau et brisent la périodicité. Les unités sont alors arrangées au hasard en 3D, avec pour conséquence un abaissement de la température de ramollissement et une mise en oeuvre plus facile du verre.

Ce mécanisme est utilisé empiriquement depuis la plus haute Antiquité mais n'a été rationalisé que récemment (19e et 20e siècles).

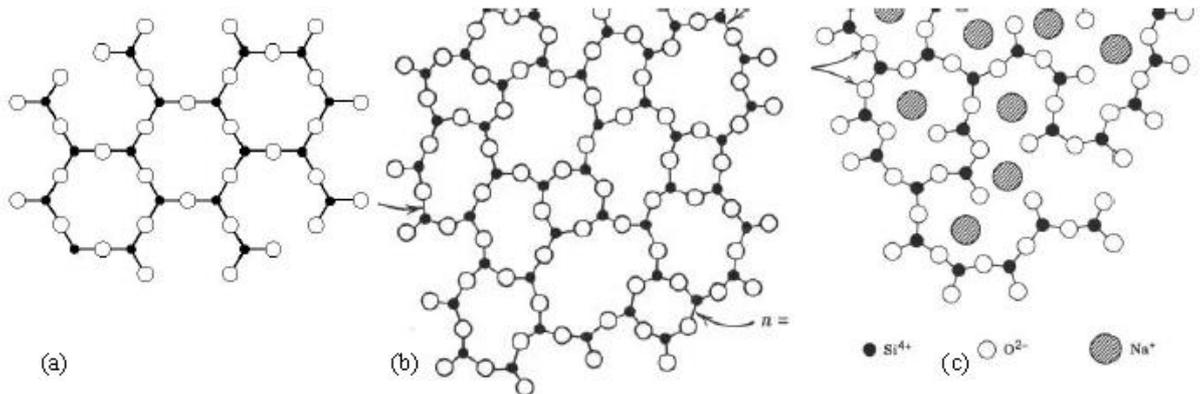


Figure I. 9: Structure ordonnée à longue distance de la silice cristalline (a) et rupture de l'ordre à longue distance (mais conservation de l'ordre à courte distance) dans la silice vitreuse (b) et les verres silicatés (c).

5. Résistances mécaniques des matériaux :

Les essais mécaniques sont l'étape indispensable pour accéder aux grandeurs caractéristiques des matériaux, du module d'Young à la limite d'élasticité, en passant par la ténacité ou la résistance à la fatigue, et ce dans des conditions variables, par exemple de température ou de vitesse de sollicitation. Ils sont donc des expériences dont le but est de caractériser les lois de comportement des matériaux qui établissent une relation entre les contraintes (pression=force/surface) et les déformations (allongement unitaire adimensionnel). Il ne faut pas confondre une déformation avec un déplacement ou une dilatation. Cependant, la déformation d'une pièce dépend de la géométrie de la pièce et de la manière dont sont exercés les efforts extérieurs sur cette pièce. Il faut donc normaliser les essais. Ces normes définissent donc :

- 1) la forme de la pièce d'essai dont on teste le matériau, on parle alors d'éprouvette normalisée ;
- 2) Comment sont exercés les efforts sur l'éprouvette, on parle alors d'essai normalisé.

5.1. Essai de traction :

Il s'agit d'une expérience qui permet de mesurer le degré de résistance à la rupture d'un matériau. Certains objets manufacturés doivent avoir un minimum de solidité pour pouvoir supporter les charges, le poids et bien d'autres efforts. L'essai de traction permet de caractériser les matériaux, indépendamment de la forme de l'objet sollicité, ou la performance d'un assemblage mécanique. Comme tout essai mécanique, l'essai de traction reproduit une sollicitation simple, donc éloignée des sollicitations réelles, mais facilement maîtrisables et reproductibles. Cet essai consiste à placer une éprouvette normalisée (en forme et en dimensions selon le type de matériau) du matériau à étudier entre les mâchoires d'une machine de traction figure 10 qui tire sur cette éprouvette jusqu'à sa rupture. On enregistre l'allongement et la force appliquée, que l'on convertit ensuite en déformation et contrainte.

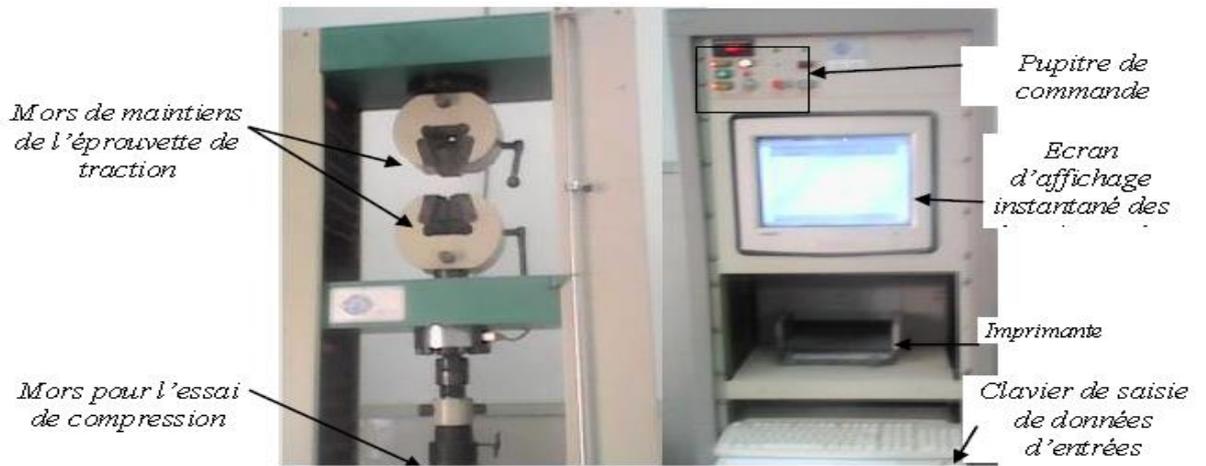


Figure 3.9: Machine de traction du laboratoire Sciences Des Matériaux de ISET Gafsa



Figure 3.10 Epreuves de traction d'un (a) matériau métallique, (b) matériau polymère ou composite

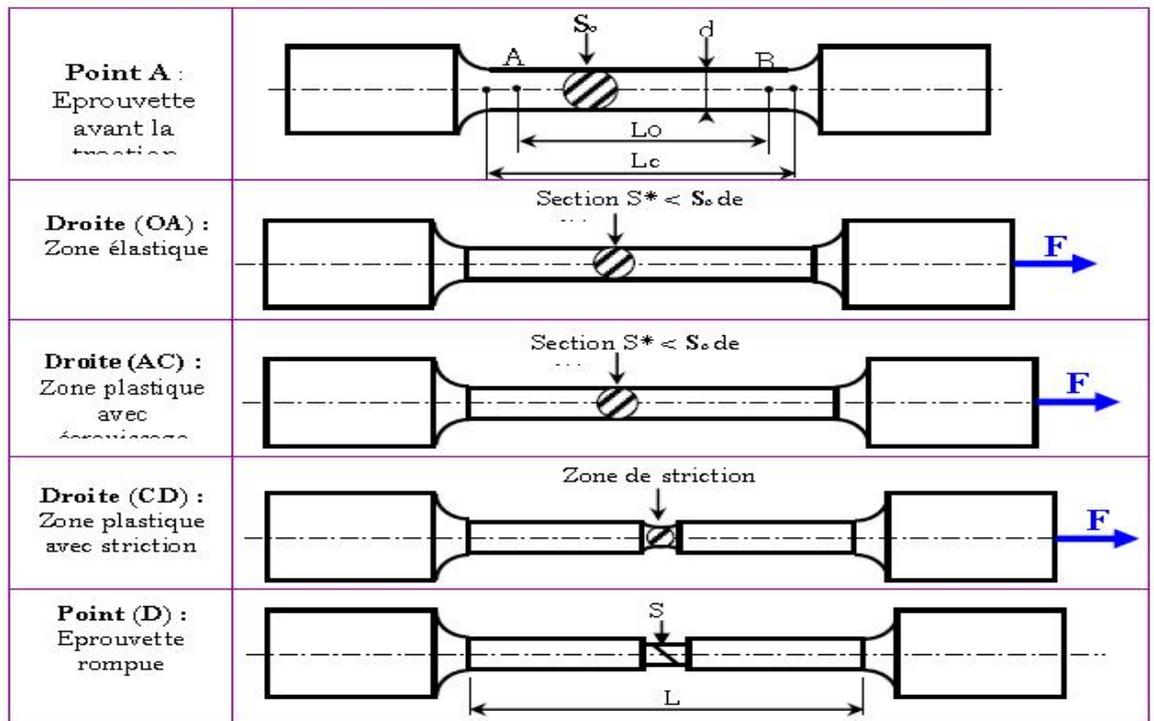


Figure I. 10: Etapes de l'essai de traction sur une éprouvette

5.2. Courbes contraintes déformations typiques :

Pour un grand nombre de matériaux, comme les métaux et les alliages, les courbes obtenues présentent une zone, appelée domaine élastique, où le graphe est une droite (segment OA) Figure 10. Pour tous les points de cette droite, la déformation, où l'allongement, est proportionnelle à la contrainte, où à l'effort exercé, et le matériau (l'éprouvette) est parfaitement élastique (se comporte comme un ressort parfait). De la courbe de traction, on peut dégager les propriétés suivantes :

➤ **Module d'élasticité longitudinale E (N/mm²):** IL caractérise la pente de la droite de proportionnalité précédente et l'élasticité du matériau testé. Plus E est grand, plus le matériau est rigide et inversement.

Exemples : Eaciers = 2.105 MPa, Eélastomères = 1 MPa (1 MPa = 1 N/mm²)

➤ **Loi de Hooke ($\sigma = E\varepsilon$) :** cette loi ou équation de droite OA, traduit la proportionnalité précédent : (σ en N mm², E en N mm² et ε sans unité).

➤ **Limite élastique Re (N/mm²):** elle marque la fin du domaine élastique (point A). Pour les valeurs supérieures, le matériau ne se déforme plus élastiquement mais plastiquement (l'éprouvette ne retrouve plus ses dimensions initiales après déchargement, il subsiste un allongement permanent).

➤ **La résistance à la traction Rm (N/mm²)** qui est définie par la contrainte nominale maximale supportée par l'éprouvette.

➤ **La déformation à la rupture (ε_r)** qui correspond à la déformation plastique nominale à la rupture en traction de l'éprouvette. La valeur de la déformation à la rupture ε_r représente une des grandeurs caractéristiques de la **ductilité**.

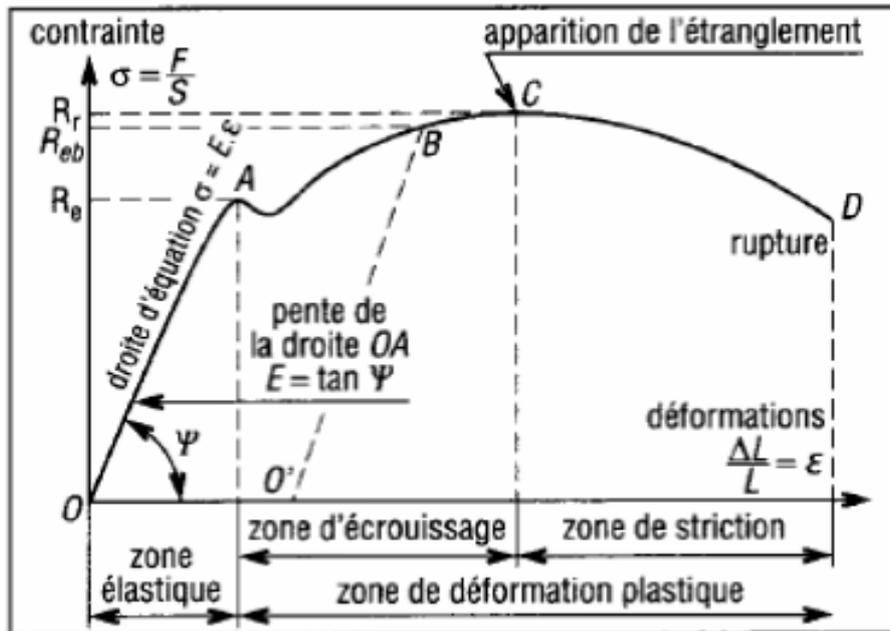


Figure I. 11 : Courbe typique de traction (matériau ductile)

En général la résistance du matériau est sa capacité à supporter les actions de forces externes (charges, conditions d'ambiance). Elle est définie par la contrainte maximale de rupture d'un matériau sous un chargement. On distingue principalement :

- Résistance en compression,
- Résistance en traction (directe ou par flexion),

Les tableaux 1 et 2 résument la forme et les dimensions d'éprouvettes ainsi qu'aux méthodes utilisées pour déterminer respectivement, la résistance à la compression et la résistance en traction des différents matériaux.

Tableau I. 1: Schéma et méthode de détermination de la résistance à la compression

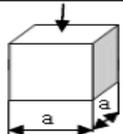
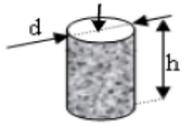
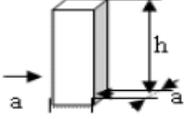
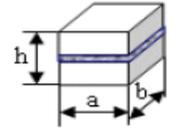
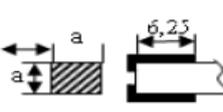
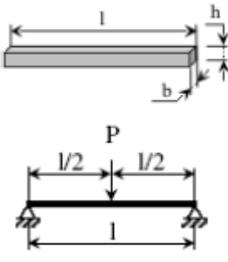
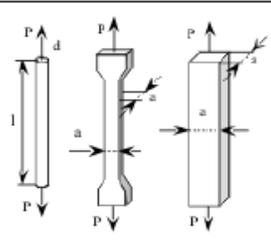
Echantillon	Schéma	Formule de calcul	Matériaux testés	Dimension des échantillons (cm)
Cube		$R = \frac{P}{a^2}$	Béton Mortier Roche	15x15x15 7,07x7,07x7,07 10x10x10 15x15x15 20x20x20
Cylindre		$R = \frac{4P}{\pi d^2}$	Béton Mortier Roche	d=15 ; h=30 d=h= 5; 7; 10; 15
Prisme		$R_{pr} = \frac{P}{a^2}$	Béton Bois	a=10; 15; 20 h=40; 60; 80 a=2; h=3
Échantillons assemblés		$R = \frac{P}{S}$	Brique	a=12; b=12,3; h=14
Moitié d'échantillon de Mortier normalisé		$R = \frac{P}{S}$	Ciment	a=4; S=25 cm ²

Tableau I. 2 : Schéma et méthode de détermination de la résistance à la flexion

Echantillon	Schéma	Formule de calcul	Matériaux testés	Dimension des échantillons (cm)
Essai de traction par flexion				
Prismatique		$R_f = \frac{3Pl}{2bh^2}$	Ciment Brique Bois (4 pts)	4x4x16 15x15x15
Essai de résistance en traction pure				
Cylindrique Prismatique		$R_t = \frac{4P}{\pi d^2}$ $R_t = \frac{P}{a^2}$	Béton Armature	5x5x50 10x10x80 d ₀ =1; l ₀ =5; l≥10

6. Les types de matériaux :

Les matériaux peuvent être classés, selon leurs natures, en plusieurs classes.

6.1. Les métaux :

Les métaux sont des matériaux dont les éléments chimiques ont la particularité de pouvoir former des liaisons métalliques et perdre des électrons pour former des cations (exemple : $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$ ou Fe^{3+}). Ils peuvent être caractérisés aussi bien de manière physico-chimique que de manière électronique. Les métaux se caractérisent par plusieurs particularités physiques. Ils sont de bons conducteurs électriques, cette caractéristique se mesure soit grâce à la conductivité soit grâce à son inverse, la résistivité. Ils sont aussi de bons conducteurs thermiques et possèdent un éclat lumineux. Ils sont généralement paramagnétiques voire ferromagnétiques. Leur température de fusion et de vaporisation sont en général élevées. Les métaux sont pour la plupart ductiles et relativement tenaces et l'association de leur ténacité et de leur ductilité est un atout majeur pour leur mise en forme. Par contre, après mise en forme, on peut facilement donner aux alliages métalliques une bonne résistance mécanique par des traitements thermiques appropriés grâce à la précipitation de phase durcissantes (durcissement structural). Du fait de leur plasticité, leur tenue à la fatigue peut poser des problèmes et ils sont de plus souvent sensibles à la corrosion. Enfin, les métaux sont en général des matériaux lourds et denses ce qui est parfois un handicap.

6.1.1. Alliages à base de fer :

L'acier est un alliage de fer et de carbone renfermant au maximum 2,1 % de ce dernier élément. La fonte contient, quant à elle, de 2,1 à 6,69 % de carbone. Contrairement à cette dernière, l'acier est un métal ductile : il peut subir des changements de forme par compression ou extension à chaud ou à froid.

6.1.2. Alliages non ferreux :

Ils ne représentant que 10 % des matériaux métalliques utilisés dans l'industrie, mais ils les n'en restent pas moins utilisés pour certaines de leurs propriétés spécifiques : masse volumique faible, propriétés électriques, résistance à la corrosion et à l'oxydation, facilitée de mise en œuvre. Ces avantages l'emportent dans certaines applications, malgré le coût de revient plus élevé de ces alliages.

6.1.3. Alliages de cuivre :

Le cuivre et ses alliages sont utilisés par leurs hautes ductilités, leurs basses températures de fusion, bonne conductivité thermique et leurs durabilités par résistance à la corrosion. Applications : utilisés dans la plomberie, pompes,....

6.1.4. Alliages d'aluminium :

L'élément Al est le troisième élément abondant dans la croûte après l'O₂ et Si mais son principale minerais est la bauxite qu'il faut dissoudre avec de la soude puis chauffer pour extraire l'alumine électrolysé pour obtenir l'aluminium, ses alliages sont beaucoup plus cher. C'est un bon conducteur électrique et thermique peu résistant à l'abrasion. Les alliages d'aluminium peuvent durcir dans le temps grâce à des traitements thermiques. Applications : films, feuilles, conducteurs électriques, conteneurs alimentaire, menuiserie, moteurs thermique,...

6.2. Polymères : matières plastiques :

Un polymère est une substance composée de macromolécules organiques (ou parfois minérales). Les macromolécules sont constituées d'un enchaînement répétitif d'au moins un type de monomère. Les monomères sont reliés entre eux par des liaisons covalentes. Les chaînes de polymères interagissent entre elles avec des forces plus faibles comme les liaisons de van der Waals.

Les propriétés des polymères dépendent notamment du type de monomère(s), de la nature de leur assemblage et du degré de polymérisation. On distingue les polymères naturels, les modifiés (polymères artificiels) et les synthétiques. On peut aussi les classer selon leur architecture. On distingue par exemple les polymères linéaires, branchés (avec des ramifications) ou non, les dendritiques (ramifications dans les trois dimensions) et les réticulés ou tridimensionnels qui forment un réseau. Les polymères peuvent être fabriqués de diverses façons. On peut citer :

- les homopolymères : fabriqués avec le même monomère ;
- les copolymères : fabriqués avec des monomères différents.

Les thermoplastiques se trouvent à l'état fondu (état fluide ou déformable) s'ils sont portés à une température suffisante, et sont donc susceptibles de s'écouler sous l'action d'une contrainte. Cela permet leur mise en forme par les techniques d'extrusion, d'injection, de thermoformage, etc. C'est le cas des polyoléfines (PE, PP, PMP, etc.), du PVC, du polystyrène, etc. Ce type de résine est idéalement utilisé dans les composites grandes diffusions. Pour les composites HP au contraire, la proportion de résine thermoplastique reste faible même si des résines dont les propriétés mécaniques égalent celles des résines thermodurcissables sont parfois utilisées (résine PEEK). Leur utilisation peut présenter un intérêt par exemple de par la température élevée de service (de l'ordre de 300°C) que ces résines peuvent supporter.

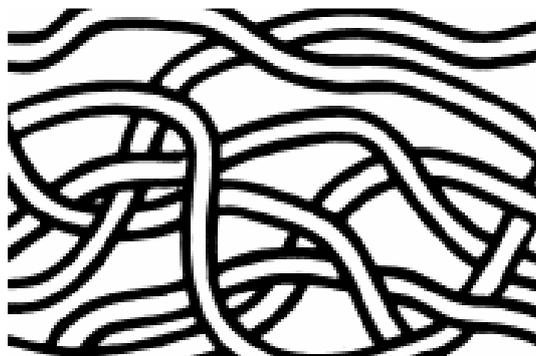


Figure I. 12 : Structure d'un thermoplastique linéaire

Les thermodurcissables durcissent par réaction chimique. On peut citer les résines phénoplastes, polyépoxydes, certains polyuréthanes. Du fait de leurs propriétés intéressantes, les polymères ont peu à peu envahi les industries et la vie quotidienne en remplaçant les matériaux traditionnels. Les molécules de ces polymères se composent de longues chaînes, reliées par de nombreuses liaisons chimiques fortes et des forces de cohésions physiques figure 12. A température ambiante le matériau est dur ; les liaisons chimiques sont si solides qu'elles ne peuvent pas être rompues quand le matériau est chauffé, contrairement aux liaisons physiques qui sont sensibles à la chaleur.

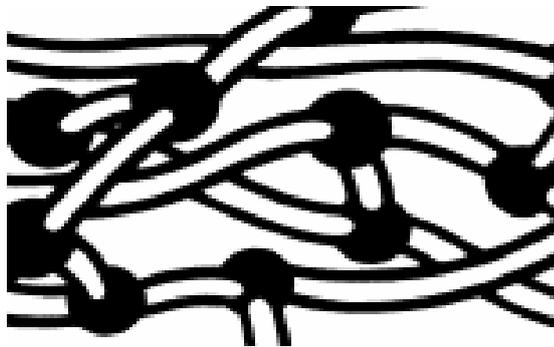


Figure 13: Structure d'un Thermodurcissable

6.2.1. Identification des matières plastiques :

Pour déterminer la composition d'un emballage, on peut se référer soit aux symboles représentant le plastique, soit au numéro qui est associé à chaque symbole. Le symbole se retrouve tel quel sur l'emballage tandis que le numéro est représenté dans un triangle composé de trois flèches. Cette marque d'identification se trouve soit dans le fond de l'emballage soit sur le côté de celui-ci.

Bien souvent un objet en plastique possède une indication sur la nature du polymère utilisé avec un code moulé en surface. Les codes sont :

- 1= PET polyéthylène téréphtalate
- 2= HDPE polyéthylène haute densité
- 3= PVC polychlorure de vinyle
- 4= LDPE polyéthylène basse densité
- 5= pp polypropylène
- 6= PS polystyrène
- 7= OTHERS autre polymère ou mélange de polymère

Le but de cette manipulation est d'identifier les différentes sortes de plastiques et polymères présent dans notre entourage, grâce à quelques tests physico-chimiques simples

→ Le numéro 1 correspond au PET



→ Le numéro 2 correspond au PEHD



→ Le numéro 3 correspond au PVC



→ Le numéro 4 correspond au PELD



→ Le numéro 5 correspond au PP



→ Le numéro 6 correspond au PS



→ Le numéro 7 correspond à l'ensemble des polymères n'ayant pas été cité ci-dessus.



Figure I. 14 : Codes d'identification des polymères

6.2.2. Injection des matières plastiques :

Les techniques de transformation des plastiques dépendent de la nature des polymères et de la destination des produits finis (applications). Les principaux procédés industriels sont:

a) Injection La matière plastique sous forme de granulés, est versée dans une trémie pour alimenter une vis sans fin logée dans un tube chauffé. Elle y est comprimée, malaxée et chauffée. Ce traitement mécanique et thermique fournit une pâte fondante et homogène sans bulle qui est poussée par la vis en rotation vers un orifice.

b) Injection soufflage L'injection –soufflage est un procédé utilisé pour fabriquer la plupart des bouteilles et des flacons. On utilise des pièces semis-finies obtenues par injection. Par exemple pour les bouteilles d'eaux minérales, le plastique est préformé mais le goulot est déjà entièrement formé. Le corps de la préforme est chauffé puis une tige étire la préforme jusqu'au fond du moule. Enfin, un très puissant jet d'air plaque la matière contre les parois du moule. La préforme prend alors la forme et le moule est refroidi puis ouvert pour faire sortir la bouteille. Comme pour l'injection, pour changer la forme de la bouteille, il suffit de changer de moule.

c) Extrusion L'extrusion est un procédé de transformation en continu. Comme pour l'injection, le granulé entre dans un tube chauffé muni d'une vis sans fin. La matière molle homogénéisée est poussée, comprimée, puis passe à travers une filière pour être mise à la forme souhaitée. C'est une sorte de « machine à spaghettis » qui permet obtenir des produits semi-finis de formes diverses. On fabrique avec cette technique de transformation des produits de grande longueur comme des profilés pour les portes et les fenêtres, des canalisations, des câbles, des fibres optiques, des tubes, des grillages, des plaques et des feuilles plastique... Le tube ou le profilé sort en continu, il est refroidi pour être ensuite coupé à la longueur voulue. En additionnant plusieurs couches de matière on peut réaliser des produits ayant des propriétés combinées.

Les lignes d'extrusion se composent généralement de la façon suivante : • Une ou plusieurs extrudeuses, mono-vis ou bi-vis • Une filière d'extrusion • Un dispositif de conformation • Un bac de refroidissement • Un banc de tirage • Un banc de découpe • Un banc de réception ou enrouleur

L'extrudeuse se compose de 5 modules :

- La vis-cylindre et son équipement
- La tête d'extrusion porte filière
- La centrale de commande et de contrôle
- Le groupe moteur
- Le châssis

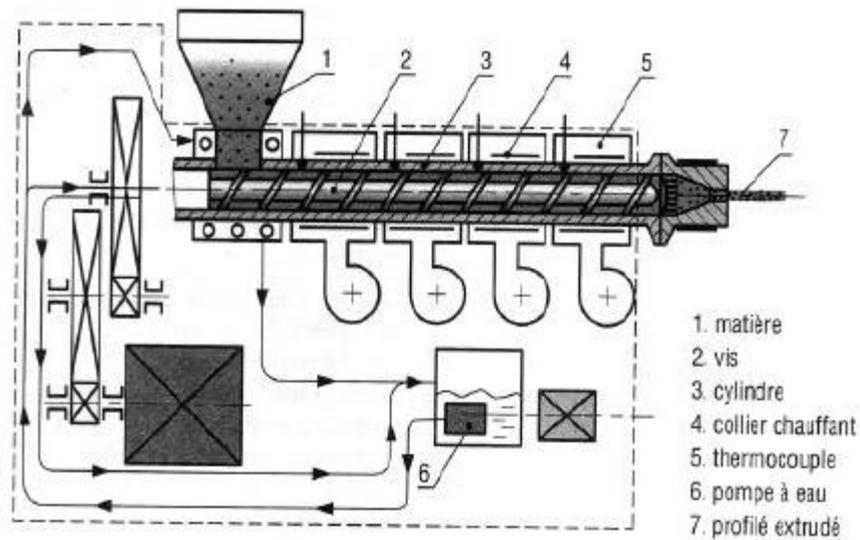


Figure I. 15: Principaux éléments de l'extrudeuse.

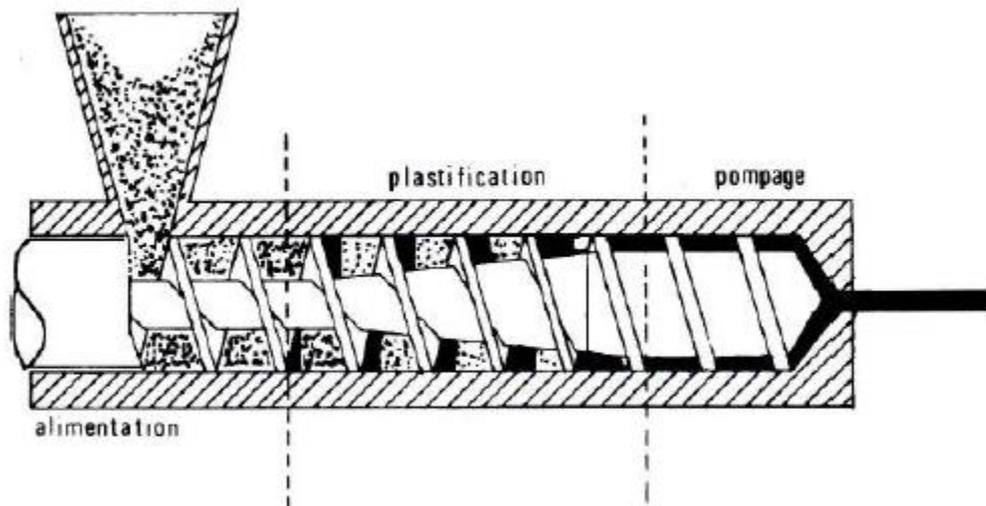


Figure I. 16: Schéma de principe d'une extrudeuse mono-vis

6.3. Céramiques :

Celles-ci sont composées d'éléments métalliques et non métalliques. Elles sont généralement des oxydes, des nitrures, ou des carbures. Le groupe des céramiques englobe une vaste gamme de matériaux, comme les ciments, les verres, les céramiques traditionnelles faites d'argile, etc. La structure cristalline des céramiques est plus complexe que celle des métaux, car au moins deux éléments chimiques différents sont présents. Il existe des céramiques ioniques, composées d'un métal et d'un non-métal (par exemple: NaCl, MgO) et les céramiques covalentes, composées de deux non métaux ou d'éléments purs (diamant, carbure de silicium, etc.). La structure des joints de grain est également plus complexe car des interactions électrostatiques entraînent des contraintes d'équilibre supplémentaires. Les ions de signes contraires ne doivent donc pas se toucher. C'est pourquoi la céramique présente une certaine porosité (environ 20 % en volume). Elles sont caractérisées par des liaisons fortes, ce qui se traduit dans la pratique par une très bonne tenue en température et une excellente rigidité élastique. La faible tendance à la plasticité qui en résulte rend ces matériaux fragiles, peu tenaces, peu ductiles, mais en revanche, résistants à l'usure.

Ces matériaux ont de hauts points de fusion et une bonne résistance à la corrosion. Les céramiques techniques de qualité ont tendance à être chères Les céramiques ont de nombreux avantages :

- propriétés mécaniques : elles présentent, comme les métaux, un module de Young bien défini, c'est-à-dire que le module reste constant pendant l'application d'une charge (contrairement au polymère dont l'élasticité n'est pas linéaire). De plus, elles ont la plus grande dureté de tous les matériaux, et sont d'ailleurs utilisées comme abrasifs pour couper (ou polir) les autres matériaux ;
- résistance aux chocs thermiques en raison d'un faible coefficient de dilatation ;
- bonne résistance chimique ;
- résistance à la corrosion ;
- isolations thermique et électrique.

Les verres : Ils sont essentiellement des solides obtenus par figeage de liquide surfondu. Les quatre principales méthodes de fabrication du verre sont le pressage, le soufflage, l'étirage et le fibrage.

6.3.1. Méthode de préparation :

L'intérêt porté aux propriétés des matériaux a entraîné le développement d'une grande variété de méthode pour leur préparation. La technique choisie pour former un solide ne dépend pas seulement de la composition, mais aussi de l'état sous lequel il doit être utilisé. A l'échelle industrielle, les économies d'énergie favorisant les méthodes ne nécessitant pas de haute température.

Il y a plusieurs méthodes de synthèse dont en va citer quelques unes avec les applications :

6.3.1.1. Méthode céramique :

La méthode céramique consiste à chauffer le mélange de plusieurs solides pour les faire réagir et former le produit désiré. Cette méthode est largement utilisée dans l'industrie et au laboratoire. La simple méthode céramique présente plusieurs inconvénients:

♣ Elle met en jeu de haute température qui nécessite des grandes quantités d'énergie. ♣ La lenteur des réactions à l'état solide, le temps de réaction se mesure en heures, et le déroulement des réactions dépend largement du cycle thermique. ♣ L'hétérogénéité de composition du produit final. Afin d'éviter ces inconvénients et synthétiser un produit avec la composition désirée, il est donc important que les matériaux de départ soient bien broyés pour réduire la taille des particules et qu'ils soient très bien mélangés pour avoir une surface de contact maximum et réduire la distance de diffusion des réactifs, souvent le mélange réactionnel est prélevé après une calcination préliminaire et rebroyé à nouveau pour renouveler les surfaces en contact et ainsi accélérer la réaction.

6.3.1.2. Méthode sol-gel :

Cette méthode a été développée dans la période 1950-1960, lorsqu'on s'est aperçu que les colloïdes forment de très petites particules (de diamètre de 1 à 1000nm), chimiquement très homogènes. Un sol est une suspension de particules colloïdales dans un liquide; les particules ont typiquement un diamètre de 1 à 1000nm. Un gel est un solide semi rigide où le solvant est retenu prisonnier dans le réseau du matériau solide qui peut être colloïdal. Pour synthétiser des solides avec le procédé sol-gel, un solide doit d'abord être préparé dans un liquide convenable. La préparation du sol peut être simplement la dispersion d'un solide insoluble ou l'addition d'un précurseur qui réagit avec le solvant pour former un produit à l'état colloïdal. Le sol est ensuite traité ou simplement laissé pour former après un gel. Ce dernier est chauffé pour obtenir le produit final. Le chauffage sert à plusieurs choses : il permet d'éliminer le solvant, le réarrangement de la structure du solide et sa cristallisation. Les principales étapes du procédé sol-gel sont résumées sur la figure 17.

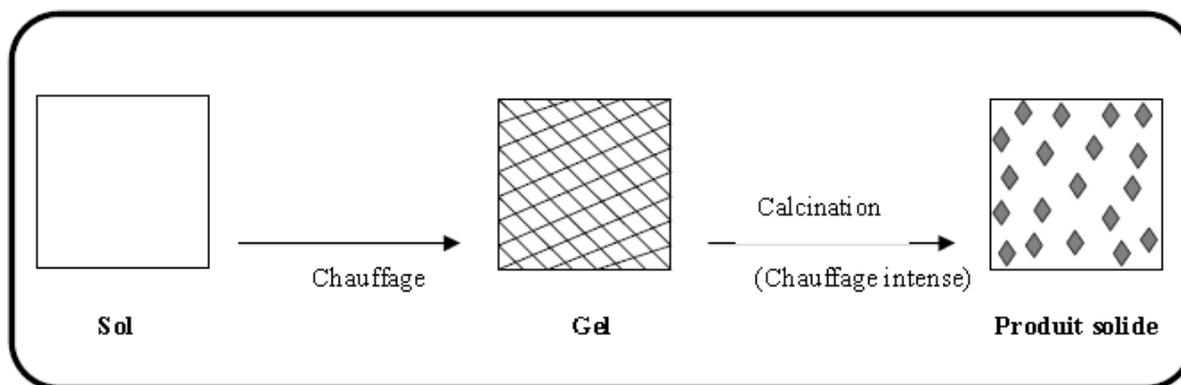


Figure I.17. Etapes de la voie de synthèse sol-gel.

6.3.1.3. Méthode hydrothermale :

La méthode hydrothermale consistait à chauffer des réactifs en présence d'eau dans un récipient clos, un autoclave. Dans ce récipient, la pression augmente et l'eau surchauffée reste liquide au dessus de son point d'ébullition normal, 373K. Dans les conditions hydrothermales, la température est élevée au-dessus du point d'ébullition de l'eau. L'utilisation de plus basse température est l'un des avantages de cette méthode. La méthode est utile pour des oxydes métalliques qui ne sont pas soluble dans l'eau à pression atmosphérique, mais qui le deviennent dans l'eau surchauffée du dispositif hydrothermal. Même si la température et la pression sont insuffisantes pour dissoudre les matériaux de départ, on peut ajouter des sels de métaux alcalins dont les anions formant des complexes permettant de solubiliser le solide.

6.3.1.4. Méthode du précurseur :

Dans la méthode du précurseur, on réalise le mélange au niveau atomique par formation d'un solide, le précurseur, dans lequel les éléments métalliques du composé désiré sont présents dans la stoechiométrie correcte. Par exemple, pour un oxyde $MM'2O4$, on forme un sel mixte d'un oxyacide, tel un acétate, contenant les cations M et M' dans le rapport 1 : 2. Le précurseur est ensuite chauffé pour qu'il se décompose en formant le composé souhaité. Des produits homogènes sont ainsi formés à des températures relativement basses. L'inconvénient est qu'il n'est pas toujours possible de trouver un précurseur convenable.

6.3.2. Propriétés générale des céramiques :

6.3.2.1. Liaison et structure :

Les éléments qui entrent dans la composition des céramiques sont liées entre eux par des liaisons fortes, covalentes ou ioniques, et forment des composés hétéropolaires. Les liaisons ioniques et covalentes impliquent tous les électrons libres: les céramiques sont dans l'ensemble de mauvais conducteurs de l'électricité et de la chaleur; on les utilise fréquemment comme diélectrique et comme isolant thermique. Certaines céramiques présentent également des propriétés piézoélectrique et ferroélectrique.

6.3.2.2. Microstructure et propriétés :

Les propriétés mécaniques des céramiques dépendent, dans une large mesure, des matières premières employées, ainsi que des méthodes de fabrication qui fixent les microstructures finales et déterminent la répartition des différentes phases présentes. Pendant l'étape de frittage, il y a un soudage des particules par diffusion à l'état solide et une diminution graduelle de la porosité.

Un contrôle précis de la qualité des matières premières, de leur composition, de leur granulométrie et des paramètres de frittage permet l'obtention des céramiques entièrement cristallines et non poreuses.

6.3.4. Les verres :

Le matériau verre possède des propriétés qui autorisent des applications dans des domaines de grande diffusion (vitrage...) jusqu'à des applications à très forte valeur ajoutée (bijouterie, optique de précision). Le verre est utilisé essentiellement en optique pour ses propriétés réfringentes (lentilles, vitres, verres de lunettes). Il est également utilisé en chimie et dans l'industrie agroalimentaire : il réagit très peu avec la plupart des composés utilisés dans ces domaines, c'est donc un matériau idéal pour les contenants (bouteilles, pots de yaourt, béchers, colonne de distillation, éprouvettes, tubes à essai...). Un des seuls liquides ayant le pouvoir de dissoudre le verre est l'acide fluorhydrique (HF).

Le verre est le matériau dans lequel sont confinés les déchets nucléaires de haute activité (HAVL). Le verre est aussi un matériau de construction très important dans l'architecture moderne et dans l'industrie automobile. Il est notamment présent sous forme de laine de verre, isolant léger, imputrescible et ininflammable. Les verres d'oxydes classiques sont transparents dans l'IR jusqu'à 3-4 μm , mais il y a des verres d'oxydes à base d'éléments lourds comme l'antimoine qui transmettent plus loin, jusqu'à 6-7 μm , ce qui donne un plus large domaine d'utilisation ; nos travaux porteront essentiellement sur ce type de matériaux.

Ils sont des silicates non cristallins qui contiennent d'autres oxydes (CaO, par exemple) qui en modifient les propriétés. La transparence du verre est l'une de ses propriétés les plus importantes. Ceci est dû à sa structure amorphe et à l'absence de défauts de taille supérieure à la fraction de micromètre. L'indice de réfraction d'un verre est d'environ 1,5. Pour ce qui est de leurs propriétés mécaniques, les verres sont des matériaux fragiles, mais des traitements thermiques ou chimiques peuvent y remédier.

7. Conclusion :

L'évolution spectaculaire de la diversité et des performances des matériaux est due à une compréhension et à une maîtrise de plus en plus fines de leur structure, ainsi que des relations entre structure et propriétés d'emploi. La diversification des matériaux est également liée à une spécialisation de plus en plus grande, qui repousse toujours plus loin les limites de mise en œuvre et d'utilisation finale de ces matériaux. Ce chapitre introduit les éléments de base de la structure des matériaux, en partant de l'échelle atomique pour arriver à celle de l'objet « macroscopique ». Ces structures ne sont cependant presque jamais parfaites, et les défauts qui s'y trouvent régissent une grande partie des propriétés des matériaux, nous les examinerons en cours de route. Enfin, une courte synthèse des grandes familles de matériaux, avec leurs principales propriétés, sera présentée.

1. Matériaux composites :

Un matériau composite est un matériau qui associe deux ou plusieurs matières différentes, appartenant parfois à deux classes distinctes, pour obtenir une combinaison de propriétés qui tire avantage de chacun. C'est aussi un mélange de deux matériaux (ou plus) de base, distincts à l'échelle macroscopique, ayant des propriétés physiques et mécaniques différentes. Ce mélange est effectué de manière à avoir des propriétés optimales, différentes et en général supérieures à celles de chacun des constituants. Un composite est constitué au moins d'une matrice (liant) et d'un renfort. Les constituants sélectionnés (certains sont multifonctions) peuvent améliorer les propriétés suivantes : rigidité, résistance thermomécanique, tenue à la fatigue, résistance à la corrosion, étanchéité, tenue aux chocs, au feu, isolations thermique et électrique, allègement des structures, conception de formes complexes.

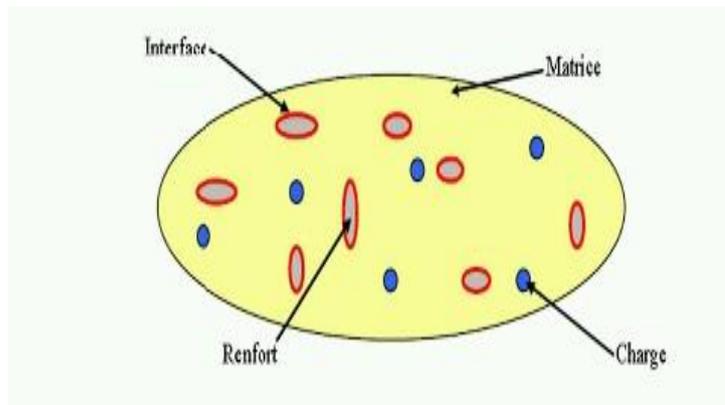


Figure II. 1: Représentation schématique d'un matériau composite

- la matrice est un liant qui protège les fibres et transmet également les sollicitations aux fibres ;
- le renfort ou les fibres apportent la tenue mécanique et supportent les sollicitations ;
- les charges et additifs améliorent les caractéristiques du matériau. Les charges abaissent souvent le coût de la matière (effet de dilution). Exemples d'additifs : anti-UV, fongicides, antioxydants.

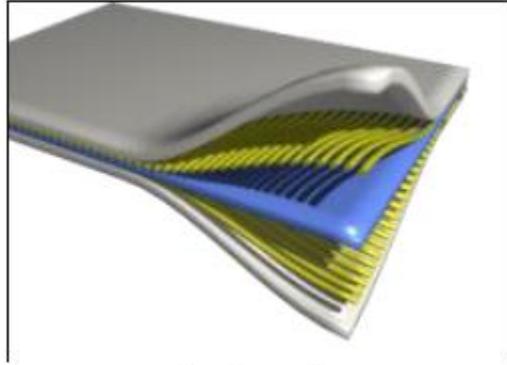


Figure II. 2 : Exemple de matériau composite

1.1. Matériaux composite à matrice métallique :

L'utilisation des matrices métalliques est encore actuellement en grande partie à un stade préindustriel. Plusieurs matériaux composites tels que ; l'Aluminium et ses alliages, Nickel, Titane, présentent une bonne conductibilité électrique et thermique, une bonne tenue à des températures élevées et de plus ils possèdent de bonnes caractéristiques mécaniques transverses. Leur fabrication conduit à des coûts très élevés.

Par définition, un composite à matrice métallique est constitué d'une matrice métallique et d'un renfort métallique ou céramique. Développé à partir des années 1960- 1965, ce type de composite était destiné vers l'aéronautique et l'espace car le cout des fibres était très élevés. Dans les années 80, l'apparition des fibres céramiques a permis d'élargir leur champ d'application à l'automobile. - La matrice peut être :

- Monophasé (métal pur ou solution solide : magnésium, Titane.....).
- Multiphasé (alliage durci par précipitation : Aluminium et ses alliages, acier.....).

Les renforts utilisés peuvent être de deux types :

- Soit des particules ou des fibres courtes (carbure de silicium, nitrure de silicium, titanate de potassium,...), qui apportent des propriétés mécaniques légèrement supérieures à celles du métal formant la matrice, et pouvant être utilisées dans les procédés de mise en forme des métaux.

→ Soit des fibres longues céramiques ou métalliques (carbone, bore, aluminium, céramique, tungstène,...) générant des propriétés bien supérieures à celles de la matrice, mais avec des procédés de mise en forme plus coûteux (Infiltration de métal fondu autour d'un renfort libre). Comparativement aux matrices organiques, les matrices métalliques présentent plusieurs avantages :

- Meilleure tenue en température permettant de reculer les limites d'utilisation en environnement moteur,

- Meilleures propriétés mécaniques intrinsèque de la matrice, permettant l'utilisation de renforts localisés ou unidirectionnels,

- Meilleure tenue au vieillissement et au feu, - Ductilité élevée de la matrice, - Meilleure étanchéité aux gaz (herméticité)....

1.2. Matériaux composites à matrices céramiques :

Les composites à matrice céramiques (CMC) sont l'une des solutions envisagées notamment ceux basés sur le carbure de silicium (SiC). Le carbure de silicium est cependant un matériau intrinsèquement fragile, ce qui empêche son utilisation en tant que matériau de structure. Il offre néanmoins des propriétés de réfractarité, de dureté, de résistance au fluage le tout avec une densité faible qui font de lui un matériau très intéressant. Le passage à un composite (matrice, interphase et fibre), permet de s'affranchir de la fragilité du SiC massif et d'obtenir un matériau tenace alliant un comportement mécanique non fragile à une faible densité et une forte réfractarité. Cette non-fragilité est la conséquence de la présence d'une interphase déposée sur la fibre, judicieusement choisie et venant jouer le rôle de « fusible mécanique » entre la fibre et la matrice. Cette interphase offre au composite un comportement endommageable non-linéaire via sa capacité à dévier les fissures matricielles d'un mode I à un mode II en surfaces des fibres. Ces propriétés très intéressantes ont d'abord été mises à contribution pour des applications dans l'aéronautique militaire et le spatial. Leur première application remonte à la fin des années 1980, sur les volets secondaires de la tuyère du turboréacteur M88 équipant l'avion de chasse Rafale, ou encore les divergents et les chambres

de combustion dans le spatial. Cependant, dans le cas d'une application dans l'aéronautique civile, les motoristes sont confrontés au problème de la durée de vie des pièces (dépassant souvent plusieurs dizaines de milliers d'heures) sur une plage de température très grande (20-1300°C) pouvant favoriser une oxydation du matériau. Lorsque l'environnement est agressif (présence d'O₂), cette dégradation du matériau aura lieu à cœur au niveau du renfort fibreux et des différentes couches carbonées (sensibles à l'oxydation dès 400°C).

2. Agents de renfort :

Les matériaux de renfort confèrent aux composites leurs caractéristiques mécaniques et permettent également d'améliorer certaines propriétés physiques. Les composites sont souvent désignés selon le type de renfort. Ainsi, il existe des composites à particules, des composites sandwichs, des composites à phases dispersées ou encore des composites fibreux. Les principaux agents de renfort sont fibreux, et constituent une fraction volumique du matériau composite généralement comprise entre 0,3 et 0,7. Les renforts peuvent être d'origines diverses:

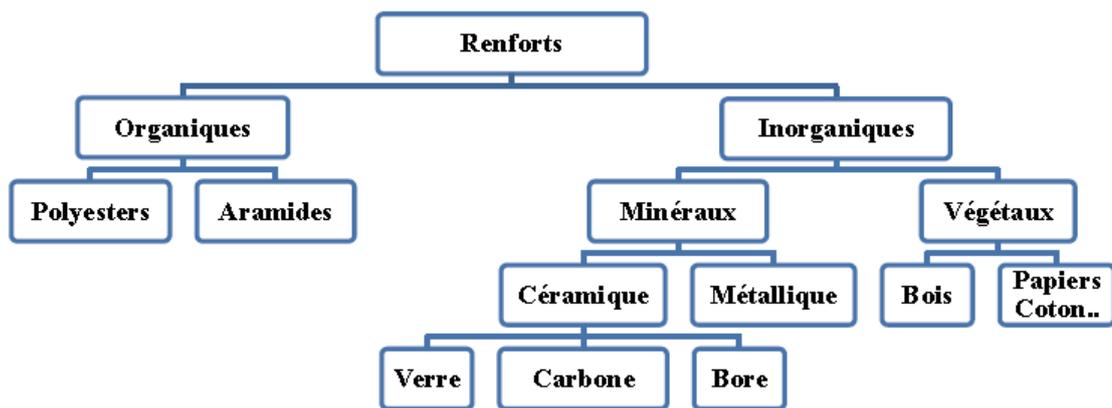


Figure II.3. Différente famille de renforts

Dans un matériau composite, le terme matrice désigne la matière solide qui entoure les renforts pour former une masse compacte. Le premier rôle de la matrice est de maintenir les renforts dans une forme compacte et de donner la forme voulue au produit final.

Elle sert également à protéger les fibres contre l'abrasion et un environnement agressif, contrôler le fini de surface et assurer le transfert de charges entre les fibres. Le solide formant la matrice peut être d'origine métallique, céramique ou polymère. A partir de la nature de la matrice les matériaux composites sont classés en trois catégories :

- Les composites à matrice polymère ou organique (CMO)
- Les composites à matrice métallique
- Les composites à matrice céramique

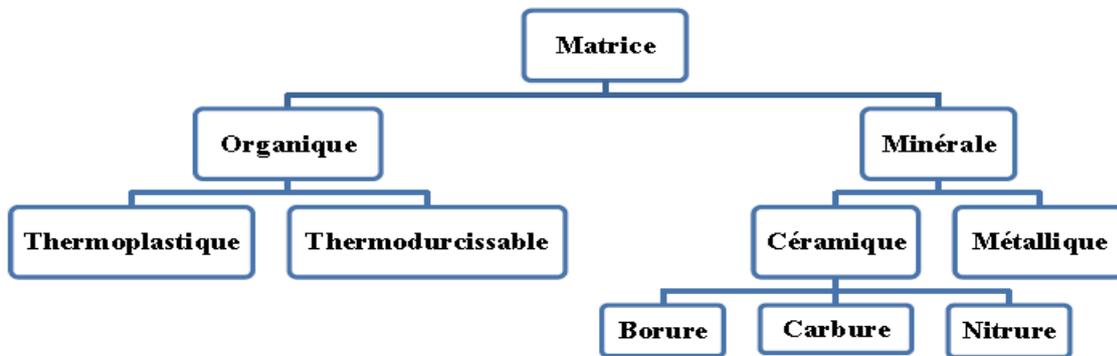


Figure II. 4. Différente famille d'une matrice

Il existe une multitude de types de fibres employées pour renforcer une matrice polymère. Cependant, les fibres les plus utilisées sont les fibres de verre, les fibres de carbone et les fibres de polyamide aromatique (Kevlar). Il existe d'autres fibres qui sont également commercialisées, mais elles restent peu fréquentes en raison de la complexité de leur mise en œuvre et de leur coût. On peut citer les fibres de bore, de carbure de silicium, d'alumine, de silice, de zircone, etc. Les fibres de verre représentent les fibres les moins dispendieuses, mais ceci au dépend d'une extrême fragilité qu'elles possèdent. Un traitement d'ensimage est donc requis afin de limiter, dans la mesure du possible, la formation de microfissures en surface, même si elles conservent toujours un comportement fragile par la suite. La majorité des fibres de verre employées (environ 95%) sont des borosilicates d'aluminium (type E). Elles présentent néanmoins des propriétés mécaniques moyennes, telles que montrées dans le tableau 1.

Tableau II.1. Caractéristiques mécaniques des fibres de verre, de carbone et de polyamide

Fibres	Module de flexion E (GPa)	Résistance mécanique R_m (GPa)
Verre	70	3,6
Carbone:		
- haut module	500	2,3
- haute résistance	230	4,0
Polyamide aromatique	131	2,8

Les fibres de carbone, quant à elles, sont synthétisées à partir de plusieurs précurseurs et diverses méthodes de mise en œuvre. Le graphite est un matériau particulier possédant une structure cristallographique sous forme de feuillets, appelés des plans hexagonaux. Il présente des propriétés mécaniques très limitées lorsqu'il est sollicité dans une direction perpendiculaire aux plans hexagonaux. Cependant, ses propriétés mécaniques de résistance et de module sont très élevées dans le sens parallèle aux plans hexagonaux. Effectivement, les plans hexagonaux comprennent des liaisons carbone-carbone les plus fortes qu'elles soient, et l'idée réside, en fait, en l'alignement des plans hexagonaux avec la direction d'application de la charge, à partir d'un précurseur.

L'autre type de fibre couramment utilisée est la fibre de polyamide aromatique. Elle présente des propriétés mécaniques intermédiaires entre celles de la fibre de verre et celles de la fibre de carbone. Par contre, ses propriétés en compression sont très médiocres. Néanmoins, la fibre de Kevlar est souvent utilisée pour les applications à plus haute température, étant donné que des liaisons hydrogènes se répètent régulièrement le long des chaînes polymères, engendrant ainsi une cohésion significative entre les chaînes de Kevlar qui les stabilise thermiquement.

Il est vrai que la synthèse de ces fibres émane d'une grande ingéniosité humaine. Cependant, grâce à des réactions de biosynthèse complexe, la nature crée des matériaux aux propriétés inimitables. Dans ces horizons, les fibres naturelles incitent beaucoup de curiosité et attirent beaucoup les chercheurs.

3- Liaisons atomiques et propriétés des matériaux :

3.1. Homogénéité :

Un matériau est homogène s'il possède, en tous points, les mêmes propriétés chimiques et physiques. La plupart des métaux et alliages sont considérés comme homogènes. Le bois et les composites ne le sont pas, ils sont hétérogènes.

3.2. Contraintes : (en N/mm² ou MPa)

Elles caractérisent par des indications chiffrées les efforts de cohésion qui existent entre les grains de matière. On trouve des contraintes normales ou de tension, ayant pour symbole σ (sigma) et des contraintes de cisaillement, ayant pour symbole τ (tau).

3.3. Déformations :

Elles résultent et varient avec les charges appliquées sur les objets. Elles sont mises en évidence par la variation des dimensions, et peuvent être élastiques ou plastiques.

3.4. Isotropie :

Un matériau est isotrope s'il présente les mêmes caractéristiques mécaniques dans toutes les directions de la matière. Les métaux et les alliages sont généralement isotropes. Les matières plastiques, les matériaux composites et le bois ne sont pas isotropes. Le bois est plus résistant dans le sens des fibres que dans le sens perpendiculaires aux fibres.

3.5. Elasticité :

Elle caractérise l'aptitude qu'a un matériau à reprendre sa forme et ses initiales après avoir été déformé. Un ressort, chargé normalement, a un comportement élastique. La propriété contraire est la plasticité déformé est dit plastique. La plupart des métaux et des alliages ont un comportement élastique sous charges modérées et plastique sous charges excessives.

3.6. Rigidité :

Est fonction de l'énergie des liaisons entre les atomes ou les molécules constituant le matériau. On mesure la rigidité principalement par le module d'YOUNG (module d'élasticité) E . Plus ce module est élevé, plus le matériau est rigide.

3.7. Résistance :

Caractérise la contrainte maximale qu'un matériau supporte avant de se rompre. Cette résistance est fonction de l'intensité des liaisons mais également de la forme des pièces ou de ses défauts. La limite élastique R_e et la résistance maximale R_m sont des indicateurs de résistance.

3.8. Ductilité :

C'est l'aptitude qu'à un matériau à se déformer plastiquement sans se rompre. Elle est caractérisé par l'allongement pour cent $A\%$ (plus $A\%$ est grand, plus le matériau est ductile).

- ✓ Si $A\% \geq 5\%$ les matériaux sont considérés comme ductile.
- ✓ Si $A\% < 5\%$ les matériaux sont considérés comme fragiles ou « cassants ».
- ✓ $Z\%$ (striction) et K (résilience) sont également des indicateurs de ductilité.

La ductilité est une propriété déterminante pour les matériaux devant être déformés à froid (emboutissage, pliage ...)

3.9. Malléabilité :

Cette propriété est identique à la ductilité mais appliquée à la compression. L'aluminium, le cuivre, l'or, certains laitons et certains aciers inoxydables sont très malléables ($A\% > 35\%$) et acceptent des emboutissages profonds.

3.10. Ténacité :

Qui représente la quantité d'énergie absorbée à la rupture par un matériau. Elle caractérise la résistance à la propagation brutale de fissures. Sa valeur est égale à l'aire de la surface sous la courbe contrainte-déformation. Cette caractéristique est importante pour les céramiques.

4- Mécanique de rupture :

La rupture ou fracture d'un matériau est la séparation, partielle (une crique, une fissure, une brisure) ou complète, en deux ou plusieurs pièces sous l'action d'une contrainte. Une rupture peut être souhaitée par le concepteur de la pièce (cas de la conception de dispositifs de sécurité) ou au contraire celui-ci cherche à éviter cette rupture en mettant en adéquation la fonction de cette pièce avec les dimensionnement et choix des matériaux utilisés et des procédés de réalisation. La rupture fragile, au contraire de celle ductile, est caractérisée par l'absence de déformation plastique macroscopique, et donc par la propagation très rapide des fissures avec faible consommation d'énergie. Dans le cas d'un cristal, la rupture est bien nette, elle suit des plans cristallographiques, on parle de rupture par clivage.

Le matériau rompt avant d'avoir quitté le régime élastique (cas des céramiques), et à basse température les métaux cubiques centrés ou certains polymères. La rupture par fissuration rapide peut aussi intervenir pour des conditions anormales :

- i.* Basse température relative ;
- ii.* Grandes vitesses d'application de la charge (choc mécanique) ;
- iii.* Fatigue ;
- iv.* Défauts préexistants ou créés en service (le critère de Griffith permet alors d'estimer la contrainte à la rupture) ;
- v.* Ambiance radioactive ou en présence d'hydrogène atomique fragilise l'acier.

La **mécanique de la rupture** tend, donc, à définir une propriété du matériau qui peut se traduire par sa résistance à la rupture fragile (*fracture*). Car si les structures sont calculées pour que les contraintes nominales ne dépassent pas, en règle générale, la limite d'élasticité du matériau et soient donc par voie de conséquence à l'abri de la ruine par rupture de type ductile ; elles ne sont pas systématiquement à l'abri d'une ruine par rupture de type fragile que ce soit à partir d'une fissure préexistante à la mise en service ou créée en service par fatigue.

Ella a aussi pour objet l'étude le comportement mécanique d'un matériau en présence de fissures macroscopiques. Cela revient notamment à déterminer le champ des contraintes et des déformations au voisinage de la pointe d'une fissure. L'étude de ces champs mécaniques permettent ensuite de juger de la stabilité ou non d'une fissure. Il est également possible d'aborder la mécanique de la rupture à travers une étude énergétique du solide fissuré.

4-1-Modes de rupture ou modes de propagation de fissure des matériaux composites

4.1.1. Relation contrainte/déformation d'un composite unidirectionnel :

Les matériaux de base est constitué, dans les structures avancées, de fibres unidirectionnels dans une matrice de résine figure 5 :

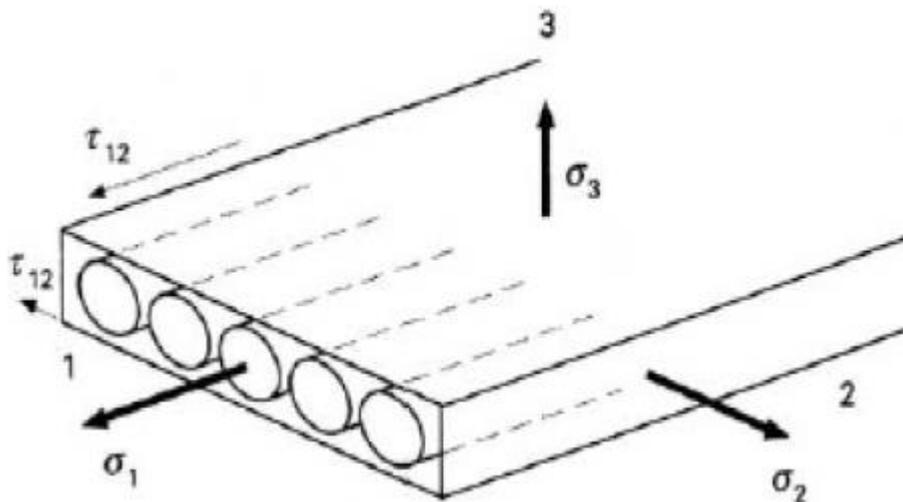


Figure II.5. Pli composite unidirectionnel

La loi de Hooke généralisée d'un tel matériau peut s'écrire sous la forme classique :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & -\nu_{31}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{32}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{31} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix}$$

Avec :

E_i : Module d'Young dans la direction i du matériau,

ν_{ij} : Coefficient de Poisson dans le plan correspondant,

G_{ij} : Module de cisaillement dans le plan correspondant,

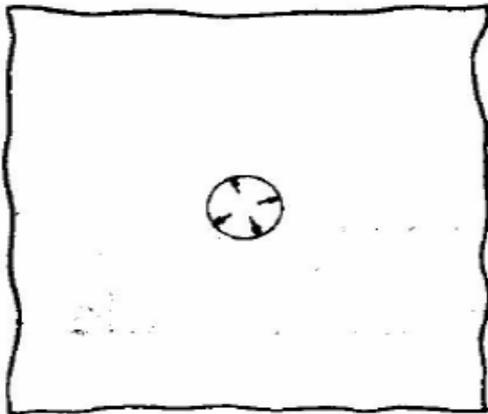
γ_{ij} : Glissement de cisaillement dans le plan,

σ_i : Contraintes dans la direction i ,

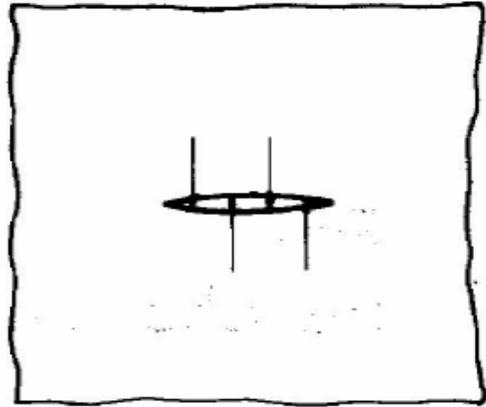
τ_{ij} : Contrainte de cisaillement dans le plan correspondant.

4.1.2. Analyse de la rupture :

René LABBENS dans son ouvrage, reprend une analogie intéressante, qui est une bonne présentation du comportement d'une fissure figure 6:



Bulle de vapeur dans un liquide.



Fissure soumis à une pression.

Figure II.6. Mécanisme de rupture.

Dans un grand volume de liquide, on considère une bulle sphérique dans laquelle règne une tension de vapeur ; cette tension tend à faire croître la bulle, mais la tension superficielle du liquide s'y oppose et la bulle est en équilibre dans la masse du liquide. En chauffant, on fait croître la tension de vapeur et on peut arriver à l'instabilité des bulles qui est l'ébullition.

L'analogie en mécanique de la rupture est une fissure dans un solide infini, avec une pression sur les faces de la fissure ; la pression tend à ouvrir et à faire croître la fissure, mais le matériau oppose une résistance et la fissure reste en équilibre ; si la pression croît, l'équilibre peut être rompu et la fissure peut croître de façon instable.

La fissuration se manifeste par la séparation irréversible d'un milieu continu en deux parties, appelées lèvres de la fissure, ce qui introduit une discontinuité au sens des déplacements. Les mouvements possibles des lèvres de chaque fissure sont des combinaisons de trois modes indépendants et il existe trois façons d'appliquer une force pour permettre à une fissure de se propager :

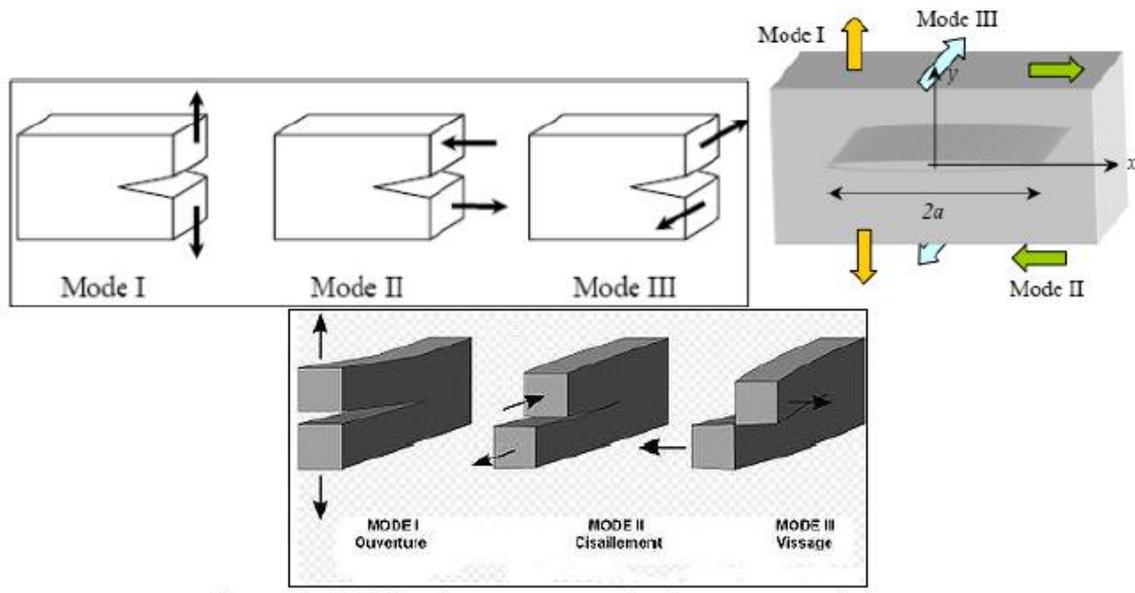


Figure II.7. Modes de rupture ou modes de propagation de fissures

- **Mode I** : ouverture (ou clivage) : une contrainte de traction normale au plan de fissure,
- **Mode II** : cisaillement plan : Une contrainte de cisaillement agissant parallèlement au plan de la fissure et perpendiculaire au front de fissure.
- **Mode III** : cisaillement anti-plan : Une contrainte de cisaillement agissant parallèlement au plan de la fissure et parallèlement au front de fissure.

Le mode I est le plus dangereux pour l'extension d'une fissure ; cependant, une fois amorcée et pour des sollicitations mixtes ou des géométries complexes, la fissure a tendance à bifurquer (à se propager par des dérivations), et reste donc rarement rectiligne (2D) ou plane (3D).

D'une manière générale, une fissure se propage dans un matériau sous une combinaison de contraintes dans les trois modes.

5. Examen au microscope optique :

On utilise des grossissements moyens. La surface de rupture n'est pas observable du fait de la faible profondeur de champ et des polissages nécessaires. On observera des coupes qui permettent d'identifier les fissures et de les situer par rapport à la microstructure. Quelques images fissurent trans et inter granulaires, chemin de fissuration sur un joint soudé.

Le microscope est un instrument permettant l'observation de petits objets ou détails d'objets proche de l'observateur qui sont invisibles à l'œil nu.. Cette technique ne modifie pas l'état de dispersion de la charge, les fibres peuvent être observées sur une microscopie optique occupée d'une caméra avec un agrandissement objectif (x40).

6.- Examen au MEB :

La profondeur de champ du MEB permet d'examiner les détails de la surface de rupture sans préparation ni altération. Si le MEB est équipé d'une analyse X, on pourra identifier des oxydes ou des phases différentes ayant participé à la rupture.

La microscopie électronique à balayage (MEB ou SEM pour Scanning Electron Microscopy) est une technique de microscopie basée sur le principe des interactions électrons-matière, capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon. Il a été utilisé afin de caractériser essentiellement la présence ou l'absence des agglomérats et la dispersion du refort dans les mélanges ou non. Le principe de fonctionnement du microscope électronique à balayage (MEB) est le suivant : Un faisceau d'électrons primaire est focalisé sur l'échantillon à l'aide de lentilles électromagnétiques. L'intensité des électrons réémis par la surface dépend de l'orientation et de la composition de celle-ci. Les électrons réémis sont collectés par un détecteur et le signal électrique obtenu, amplifié, sert à moduler l'intensité du faisceau d'électrons d'un écran cathodique.

7. Etude d'un exemple d'un composite à matrice polymérique renforcé par une matière céramique :

Ce travail s'est consacré à l'étude de l'adhésion et du comportement d'un revêtement polymère tri-couche assurant la protection externe des canalisations en acier. Afin d'éviter les problèmes liés à la corrosion, stabilité thermique, résistance à la rayure et rigidité de ces canalisations, on a pu renforcer le PEHD (matière organique) utilisé comme couche extérieure de revêtement par une poudre en porcelaine (matière inorganique). Si la taille des domaines inorganiques devient nanométrique, les propriétés finales du matériau hybride organique/inorganique (O/I) que l'on pourrait également nommer nanocomposite, s'en trouvent améliorées en raison d'une plus grande surface inorganique spécifique développée pour interagir avec la phase polymère. Le PEHD a besoin de charges pour obtenir une tenue mécanique suffisante en sortie d'extrudeuse, la porcelaine contient aussi du dioxyde de titane qui sert d'écran aux rayons UV.

Le choix de poudre de porcelaine, est plutôt pour son coût accessible à une utilisation industrielle. Les échantillons sont préparés par l'incorporation de particules de céramique (poudre de porcelaine) dans une matrice polymère.

7. 1. Matières premières, méthodes et étapes d'élaboration du revêtement tricouche :

Il s'agit de tubes en acier revêtus extérieurement destiné au transport de fluide (gaz naturel), d'un diamètre externe de 273 mm et recouvert de trois couches polymères superposées, formant un revêtement protecteur épais, de l'ordre de 3,5 mm, dans cette étude différents pourcentages de la poudre porcelaine dans le revêtement extérieur (PEHD) pour étudier l'influence de celle-ci sur le PEHD.

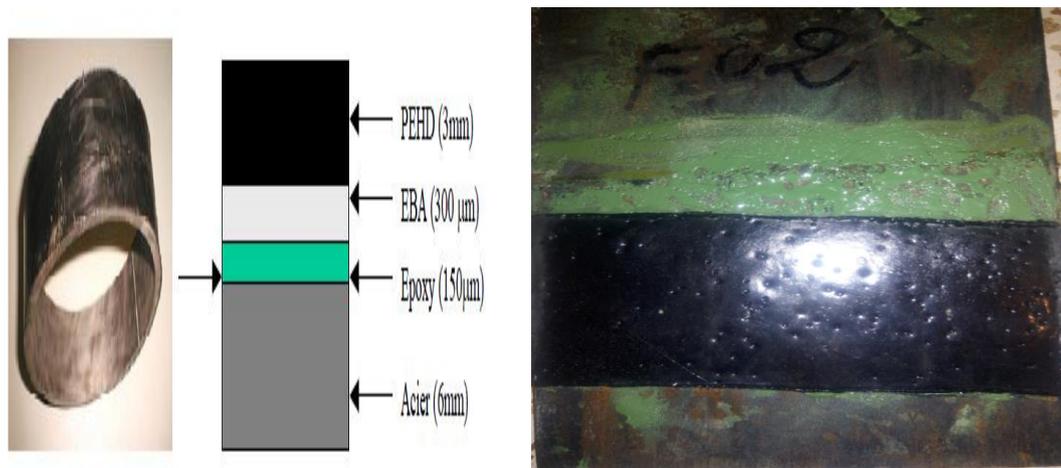


Figure II. 8: Revêtement tricouche sur un substrat métallique

7. 2 Etapes de fabrication :

Etape 1: La surface des tubes d'acier de 6 mm d'épaisseur, subit un nettoyage, ce traitement permet, d'une part, d'augmenter la rugosité de surface, ce qui favorise vraisemblablement le mécanisme d'adhésion.

Etape 2: la canalisation est chauffée par induction, à une température comprise entre 200 et 220°C.

Etape 3: une épaisseur moyenne de 150 µm de résine époxy (initialement à l'état de poudre) est pulvérisée sur la canalisation chaude.

Etape 4: , l'EBA et le PEHD, d'épaisseurs respectives 300µm et 3mm, sont déposés sur l'époxy par co-extrusion latérale.

Etape finale: l'ensemble du revêtement déposé sur la canalisation est refroidi, puis les extrémités de la zone revêtue de part et d'autre du tube sont chanfreinées par meulage.

Les mélanges de différents taux (0, 10, 20, 40 %) de poudre de porcelaine sont mélangés dans le mélangeur interne deux pales permettent de malaxer les produits introduits.

L'extrusion est une autre opération de mélange. Contrairement au mélangeur interne, la matière est entraînée par une vis et ne réside dans l'extrudeuse que pendant un temps limité par la longueur de la vis ainsi que par sa vitesse de rotation.

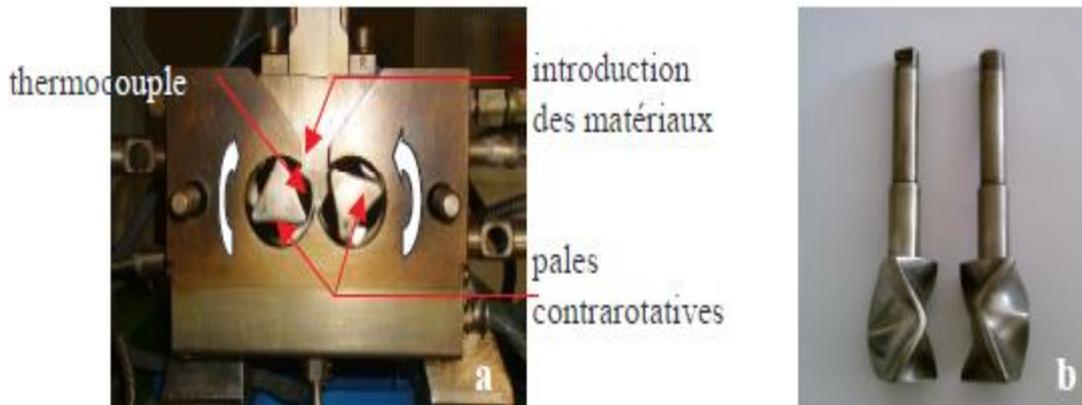


Figure II. 9: Mélangeur interne



Figure II. 10: Schéma du dispositif de l'extrudeuse (Laboratoire de Sétif)

7.3- Essais mécanique :

7.3. 1. Essai d’allongement à la rupture :

D’après la figure 10 on observe une augmentation de la contrainte au seuil et de module de Young pour les échantillons : 10, 20 et 40% de porcelaine par rapport au PEHD 0% de porcelaine. Les courbes de traction obtenues avec une vitesse de 1 mm/min montrent que l’allongement à la rupture augmente en présence des particules de porcelaine dans le PEHD plus précisément dans le matériau (80% PEHD + 20% porcelaine), bien que la contrainte maximale augmente elle aussi dans le domaine élastique. Il y a donc bien un effet de renforcement de la rigidité des composites en présence des particules de porcelaine. La porcelaine augmente la densité et résistance à la traction qui eu vont augmenter la résistance du revêtement.

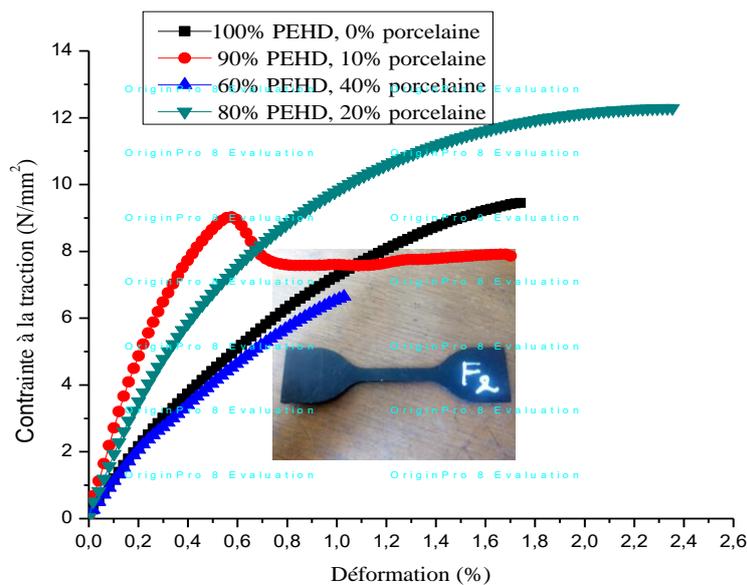


Figure II. 11 : Courbe contrainte déformation pour des échantillons PEHD avec (0, 10, 20, 40% de porcelaine)

7.3-2- Comportement au choc :

Nous constatons que la première couche extérieure du revêtement de PEHD se déforme sans aucune apparition de fissure beaucoup plus dans le pourcentage de porcelaine 20%, dans ce cas le revêtement est ductile. Dans le PEHD 0%, la déformation est marquée par quelques fissures.

Pour le pourcentage de porcelaine 40% l'impact était par des fissures de manière très accentuée donc il ya un revêtement fragile. Nous pouvons constater, d'après ces résultats que la résistance au choc augmente de façon brusque pour un pourcentage en porcelaine compris entre 10 et 20%. Néanmoins, la résistance au choc augmente sous l'effet de l'ajout de porcelaine ne dépassant pas 20%, dans ce cas la dureté du revêtement augmente en présence de la poudre de porcelaine dans le PEHD. Donc la porcelaine augmente la résistance au choc du PEHD, cette dernière augmente la densité et diminue la porosité de PEHD.

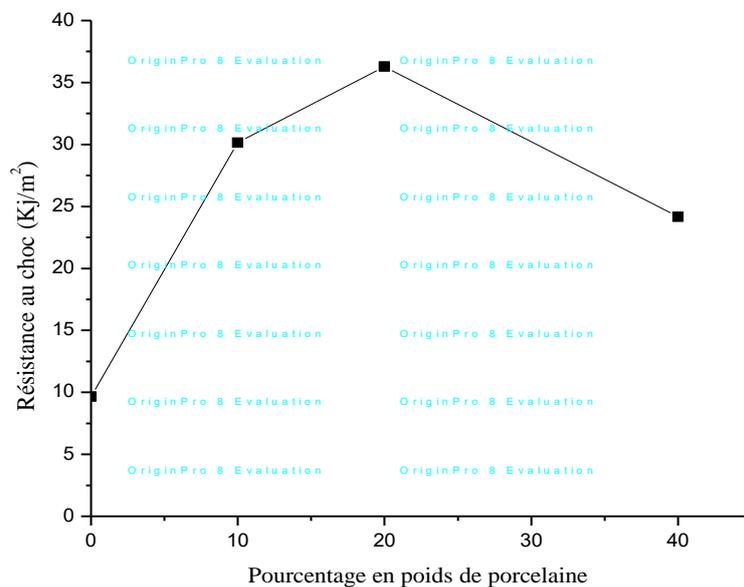


Figure II.12: Variation de la résistance au choc en fonction du pourcentage de porcelaine

7. 4- Essai thermique :

Les résultats montrent qu'il y a bien un effet de renforcement de la rigidité des échantillons en présence des particules de porcelaine. La porcelaine est classer parmi les matériaux réfractaires, lors d'un traitement thermique, les phyllosilicates perdent leur structure en feuillet, et, lorsque les températures sont suffisamment hautes (> 1000°C), après refroidissement, ils sont constitués d'un mélange d'une phase vitreuse et de cristaux, typiquement la mullite.

Les propriétés thermiques s'améliorent et, par conséquent, une augmentation de la température de fusion et de densification du produit 20% en porcelaine.

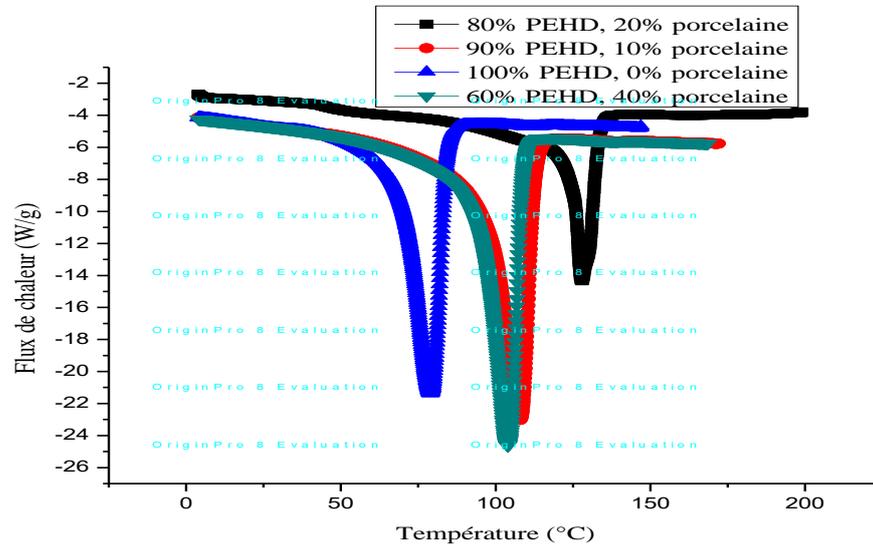


Figure II. 13: DSC thermogrammes obtenus sur PEHD-porcelaine composites

8- Conclusion de cette étude :

Dans ce travail, des polymères composites ont été élaborés par incorporation des particules de céramique de porcelaine d'un diamètre moyen de 51,961 μm , dans une matrice de PEHD. Par la suite, l'influence de la présence de particule de porcelaine sur les propriétés, mécaniques, thermiques et structurales des polymères composites a été étudiée expérimentalement. A partir de la courbe contrainte-déformation du matériau vierge, en particulier la contrainte au seuil de plasticité, la contrainte à la rupture et l'allongement à la rupture ont été analysés en fonction de l'incorporation de la poudre de porcelaine utilisé comme renfort dans un une matrice polymère le PEHD. Les différentes valeurs des propriétés mécaniques du matériau tel que le module de Young, la contrainte au seuil, la contrainte à la rupture, augmentent par rapport à l'ajout de porcelaine. Par contre, l'allongement à la rupture augmente brusquement qui se traduit par un gain de ductilité du matériau qui est liée au phénomène de rigidité qui s'accompagne par un fort attachement des chaînes.

Les thermogrammes DSC ont permis l'accès à la température de fusion (position du sommet du pic exothermique). Les résultats montrent une augmentation brusque de température de fusion avec le taux d'ajout de porcelaine, qui provient de la température de cuisson de porcelaine qui 1380°C.

9. Conclusion :

Toute matière entrant dans une construction devient un matériau. Autrement dit : un matériau est une matière d'origine naturelle ou artificielle que l'homme façonne pour en faire des objets. La connaissance et la maîtrise des phénomènes microscopiques (diffusion, arrangement des atomes, recristallisation, apparition des phases, etc.), confèrent aux scientifiques et aux industrielles la possibilité d'élaborer des matériaux aux propriétés et aux performances voulues.

1. Introduction :

Les matériaux et les métaux prennent une place importante dans le secteur d'industrie actuel. L'industrie moderne exige des matériaux ou des métaux plus performants, moins coûteux et avec des caractéristiques bien définies, est dans ce contexte que les spécialistes des matériaux développent des méthodes et de techniques nouvelles d'élaboration pour bien maîtriser les différentes caractéristiques, ainsi que les techniques et moyens de caractérisation des échantillons des matériaux.

Il est indispensable pour appréhender un matériau de le caractériser, c'est-à-dire d'en analyser les propriétés. Il existe de nombreuses techniques de caractérisation des matériaux qui reposent sur différents principes physiques de base : les interactions rayonnement-matière, la thermodynamique et la mécanique.

Son contenu permet aux étudiants (Spécialité Génie des matériaux) de connaître les différentes techniques et moyens de caractérisation des matériaux utilisée dans les labos.

2. Méthodes de caractérisation des matériaux :

Il est indispensable pour appréhender un matériau de le caractériser, c'est-à-dire d'en analyser les propriétés. Il existe de nombreuses techniques de caractérisation des matériaux qui reposent sur différents principes physiques de base : les interactions rayonnement-matière, la thermodynamique et la mécanique.

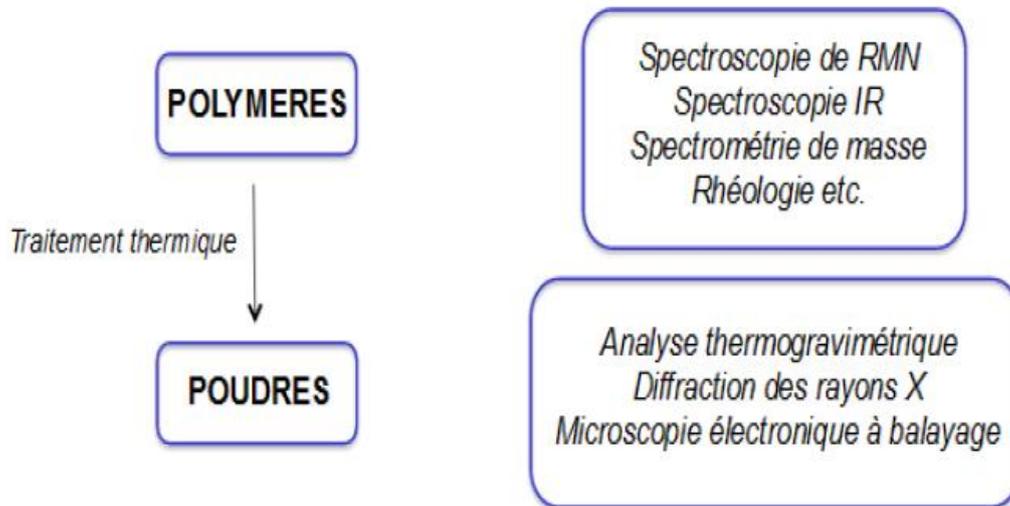


Figure III. 1. Exemple de caractérisation des polymères et poudres.

2.1. Examens métallographiques :

Pour caractériser certains matériaux, on s'aide de plusieurs types de méthodes (observations : à l'oeil nu, observation au microscope, essais : mécaniques, ou autres) et ce en se basant sur certaines propriétés de ces matériaux. Dans ce qui suivra on va s'intéresser dans cette partie aux méthodes de caractérisation de matériaux par des examens métallographiques.

a. Généralités sur la métallographie :

La Métallographie étudie la structure cristalline des métaux et des alliages, et les relations entre cette structure et les propriétés physiques des métaux. Les principaux outils utilisés en métallographie sont le microscope et le générateur de rayons X. L'observation au microscope, d'échantillons convenablement préparés, permet de déterminer la taille, la structure et l'orientation des cristaux du métal. Grâce à de telles observations, les métallurgistes peuvent fréquemment identifier un métal ou un alliage, découvrir d'éventuelles impuretés et vérifier l'efficacité des traitements de trempe et de recuit. Les échantillons de métaux utilisés pour l'observation métallographique sont généralement parfaitement polis puis décapés au moyen d'acides dilués. Ce traitement révèle

la structure granulaire du métal en entamant les zones situées aux frontières des grains, ou en attaquant un des constituants d'un alliage.

b. Échelles d'examens métallographiques :

L'échelle moléculaire est la première étape pour accéder à la topologie des chaînes polymères, même si certaines propriétés nécessitent une description de la matière à plus grande échelle. L'échelle mésoscopique fait donc le lien entre l'échelle moléculaire et l'échelle macroscopique, dans le but d'obtenir une relation structure-propriétés du produit fini.

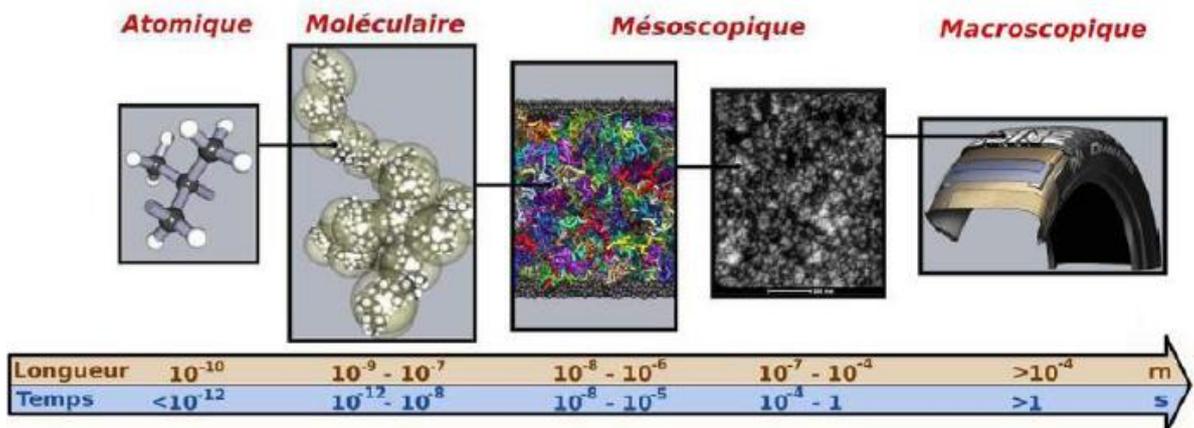


Figure III. 2 : Approche hiérarchique bottom-up nécessaire à la compréhension des propriétés de matériaux polymères. À l'échelle atomique, la microstructure des polymères est accessible (distinction des motifs monomères).

3. Examens macrographiques :

La macrographique est examen d'ensemble, fait à l'œil nu ou avec des instruments à faible grossissement (loupe) d'un produit métallurgique poli et attaqué. Sa technique ne présente aucune différence essentielle avec celle de la micrographie. Il est beaucoup utilisé pour les aciers.

a. Les essais mécaniques :

Les essais mécaniques sont l'étape indispensable pour accéder aux grandeurs caractéristiques des matériaux, du module d'Young à la limite d'élasticité, en passant par la ténacité ou la résistance à la fatigue, et ce dans des conditions variables, par exemple de température ou de vitesse de sollicitation.

Ils sont donc des expériences dont le but est de caractériser les lois de comportement des matériaux qui établissent une relation entre les contraintes (pression=force/surface) et les déformations (allongement unitaire adimensionnel). Il ne faut pas confondre une déformation avec un déplacement ou une dilatation.

Cependant, la déformation d'une pièce dépend de la géométrie de la pièce et de la manière dont sont exercés les efforts extérieurs sur cette pièce. Il faut donc normaliser les essais. Ces normes définissent donc :

- la forme de la pièce d'essai dont on teste le matériau, on parle alors d'éprouvette normalisée;
- Comment sont exercés les efforts sur l'éprouvette, on parle alors d'essai normalisé.



Figure III. 3. Poutre en composite sur une machine de traction pour un test de flexion trois points.

4. Examen au microscope optique :

On utilise des grossissements moyens. La surface de rupture n'est pas observable du fait de la faible profondeur de champ et des polissages nécessaires. On observera des coupes qui permettent d'identifier les fissures et de les situer par rapport à la microstructure. Quelques images fissurent trans et inter granulaires, chemin de fissuration sur un joint soudé...



Figure III.4. Microscopes optiques

La métallographie par microscopie optique sert à observer la microstructure du matériau. a- Microscope optique qui contient 4 phases avec un agrandissement de 50 jusqu'au 400.

b- Microscope optique à haute résolution 3D.

c- Microscope optique piloté un logiciel qui traite les images de métallographies.

5. Examen au MEB :

La profondeur de champ du MEB permet d'examiner les détails de la surface de rupture sans préparation ni altération.

Si le MEB est équipé d'une analyse X, on pourra identifier des oxydes ou des phases différentes ayant participé à la rupture.

Le MEB permet de réaliser des observations morphologiques détaillées de l'ordre du centième à nanomètre, grâce à la profondeur de champ. Les images qui résultent ont une qualité de définition tridimensionnelle. Sous l'impact du faisceau d'électrons, il y a rétro diffusion d'électrons du faisceau incident, émission d'électrons secondaires de faible énergie,

provenant de l'ionisation des atomes de l'échantillon, et émission d'électrons Auger et de rayons X caractéristiques des éléments présents dans l'échantillon.



Figure III.5 : Microscope Electronique à Balayage MEB-EDX (SEM-EDX).

6. Les techniques d'analyse chimique de laboratoire :

6.1. Spectrophotométrie :

6.1.1. Spectrophotométrie d'absorption moléculaire :

C'est la méthode analytique la plus utilisée en analyse d'eau. Elle nécessite la mise en œuvre préliminaire d'une réaction colorée spécifique de (élément recherché. Elle s'appuie sur le fait que toute solution colorée traversée par un faisceau de lumière laisse passer une fraction de la lumière incidente; la quantité de lumière absorbée est proportionnelle à la concentration du composé coloré recherché (loi de Beer-Lambert). Cette technique a permis le développement de chaînes analytiques de laboratoire à flux continu, l'utilisation industrielle de photolorimètres pour la mesure "séquentielle-en continu" de nombreux paramètres (silice, ammonium, etc.).

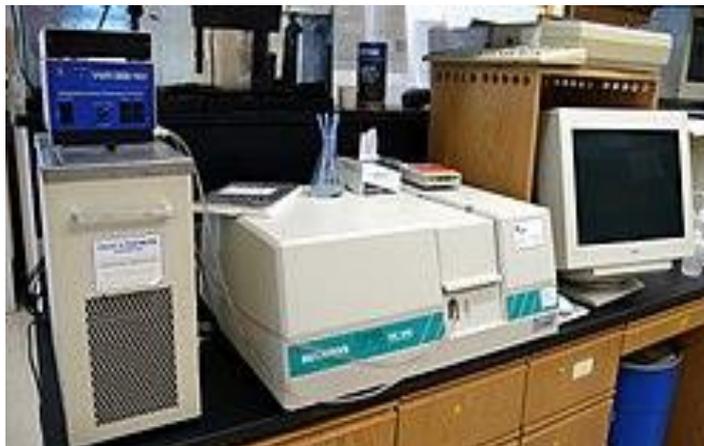


Figure III. 6. Un spectromètre UV/Visible

6.1.2. Spectrophotométrie d'absorption UV et IR :

Dans le domaine de l'eau, ces techniques sont surtout utilisées pour quantifier des familles de matière organique (MO). La mesure de l'absorption UV à 254 nm est un indice caractéristique des substances possédant une ou plusieurs doubles liaisons. La même mesure à d'autres longueurs d'onde complète l'examen (par exemple, acides humiques). La mesure du COT (Carbone organique total) fait intervenir une minéralisation du carbone organique par oxydation chimique et UV ou par combustion et une détection du CO₂ par IR. La limite de détection de la méthode est de 0,2 mg.l⁻¹ et la précision est de 10 % figure 7. L'indice CH₂ permet de mesurer les pollutions par les hydrocarbures, on fait en général appel à une technique fondée sur l'absorption des liaisons - CH, - CH₂, - CH₃, dans le domaine infrarouge compris entre les nombres d'ondes 2 800 et 3 000 cm⁻¹ . Plusieurs méthodes opératoires existent dont les champs d'application peuvent être incertains et l'interprétation difficile.

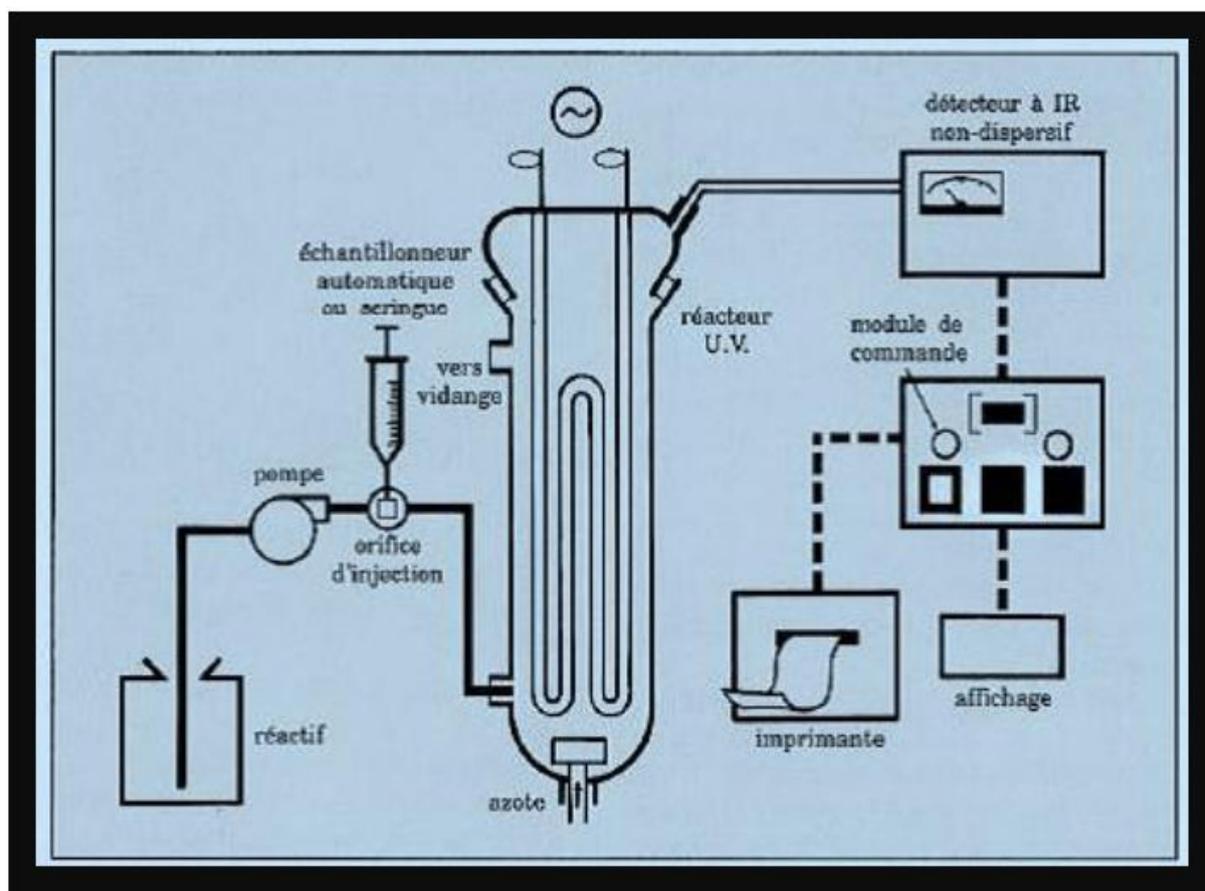


Figure III. 7. Principe de la mesure du COT.

6.1.3. La spectrophotométrie d'absorption atomique (AA) :

Cette méthode d'analyse dite élémentaire permet de doser des éléments chimiques à l'état de traces (en très faible quantité : quelques ppm) contenus dans une solution. Ainsi est on capable à partir d'un échantillon de connaître les concentrations des espèces présentes. Cette méthode est quantitative notamment dans le domaine UV-visible. La spectrométrie d'absorption est basée sur la théorie de la quantification de l'énergie des atomes. En effet un atome qui passe de son état (d'énergie) fondamental à un état excité quelconque absorbe un ou plusieurs photons. La fréquence ν du photon dépend de l'énergie ΔE acquise par l'atome.

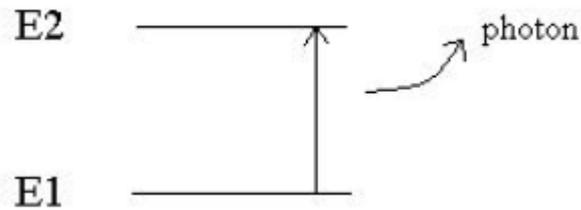


Figure III. 8. Schéma d'une transition électronique

On réalise cette manipulation pour chaque élément de l'échantillon en se plaçant à une longueur d'onde fixée. Il faut donc à chaque manipulation choisir une source adaptée pour éclairer l'élément que l'on cherche à exciter.

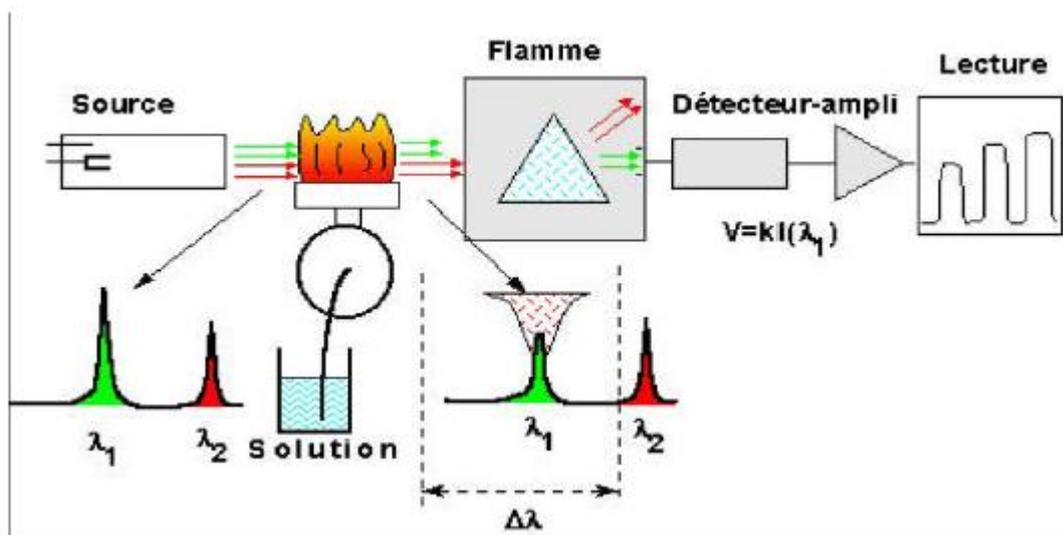


Figure III. 9. Principe de la spectrométrie d'AA.

Dans le cas de **l'atomisation sans flamme**, obtenue par voie électrique, les volumes utilisés sont plus faibles. Le dispositif d'atomisation est constitué d'un tube de graphite que l'on chauffe à une température comprise entre 1500 et 2800 °C. Il a pour objectif de produire une vapeur atomique à partir de l'échantillon d'eau.

6.1.4. Spectrophotométrie de plasma à couplage inductif (ICP) :

La spectroscopie de plasma à couplage inductif est une technique qui fait appel aux phénomènes d'émission atomique dont la source d'atomes est un plasma d'argon. A haute température, il se forme au sein de l'argon un mélange d'atomes et de particules chargés suivant un équilibre. Le plasma est produit par voie inductive par une génératrice haute fréquence. Sa température varie entre 6 000 et 8 000°C. Les éléments recherchés sont introduits dans le plasma et transformés en vapeur atomique et éventuellement ionique par excitation lors de leur collision avec les éléments constitutifs du plasma. Cette technique a un champ d'application plus large que l'absorption atomique sans flamme mais son pouvoir de détection est plus faible. La haute température du plasma permet de limiter les interférences de matrices et de ce fait l'ICP peut être très largement employée pour la recherche des métaux lourds. Tous les spectrophotomètres comportent un système de dispersion de la lumière pour le choix de la longueur d'onde appropriée ainsi qu'un photomultiplicateur pour la mesure de l'intensité reçue.



Figure III. 10. Un spectromètre ICP-AES.

6.1.5. Fluorescence :

La fluorescence est un phénomène de luminescence: des molécules émettent un rayonnement dans toutes les directions grâce à l'énergie reçue d'une lumière incidente. Elle est

la propriété des composés cycliques aromatiques. Sa mesure s'effectue à partir de spectrofluorimètres avec lumière incidente UV et lecture à 90° en lumières UV et visible.



Figure III. 11. Appareil Fluorescence

6.1.6..Chromatographie :

Pour l'identification et le dosage des MO, on a, en général, recours à des techniques chromatographiques. En chromatographie en phase gazeuse (CG), la technique en colonne capillaire est utilisée en raison de son pouvoir de résolution inégalé, de la disponibilité de détecteurs universels et de son couplage aisé à la spectrométrie de masse (SM). Un chromatographe en phase gazeuse ou liquide comporte trois parties: un injecteur, une colonne de séparation et un détecteur.

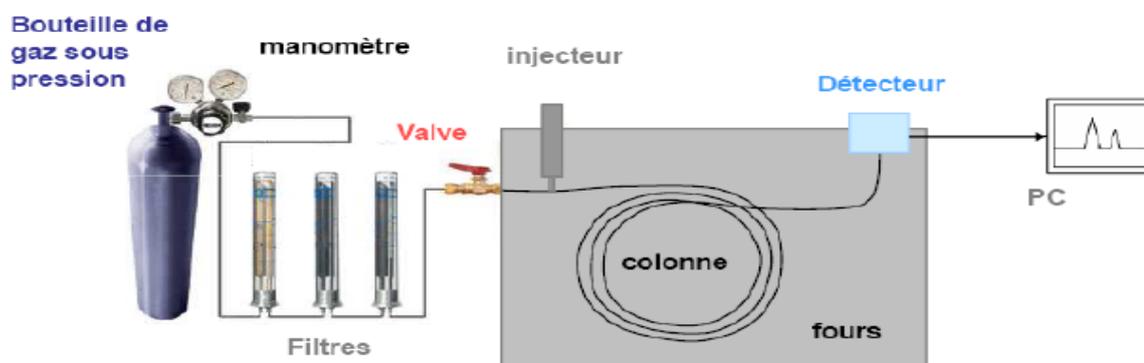


Figure III. 12. Schéma d'un chromatographe en phase gazeuse.

Après avoir introduit l'échantillon au moyen d'une microsiringue par l'injecteur, la séparation des molécules s'effectue dans la colonne en fonction d'un gradient de température.

A leur sortie de la colonne chromatographique, les composés séparés passent individuellement dans un détecteur dont la fonction est de donner un signal (sous forme de pic) dont l'intensité est proportionnelle à la quantité de composé injecté, ce qui permet d'assurer, par le biais d'un étalonnage, une analyse quantitative. Les détecteurs universels présentent une sensibilité moyenne pour la plupart des composés organiques, alors que les détecteurs "spécifiques" donnent une réponse beaucoup plus intense pour certaines familles chimiques. Le détecteur universel par excellence est celui à ionisation de flamme (FID). Des détecteurs spécifiques sont le détecteur à capture d'électrons (ECD) sensible aux composés halogénés, le détecteur thermo-ionique pour des composés azotés et phosphorés, le détecteur à photoionisation (PID) pour des composés aromatiques. La chromatographie en phase liquide haute pression (HPCL) utilise normalement pour phase mobile des solvants aqueux ou organiques. Les techniques de mise en oeuvre sont plus diversifiées qu'en phase gazeuse. La chromatographie en phase inverse qui utilise une phase liquide polaire pour éluer une colonne contenant une phase apolaire permet de déterminer les HPA. La chromatographie ionique (par échange d'ions) permet de séparer un grand nombre de cations et d'anions. La chromatographie d'exclusion sépare sur gel poreux des composés en fonction de leur taille, et permet de déterminer leur poids moléculaire apparent; des fractions de poids moléculaires différents sont ainsi disponibles pour des analyses complémentaires.

7. Conclusion :

Pour un tel domaine et devant un marché aussi diversifié, il serait hasardeux de prévoir une évolution à long terme ; cependant, les soucis en matière de contrôle de l'environnement, les besoins de diagnostic en temps quasi réel, liés au développement des microtechniques et aux progrès de la biologie moléculaire peuvent susciter l'émergence de nouvelles techniques de faible coût unitaire. On peut dire des capteurs chimiques ou biochimiques que l'on recherche pour eux la compacité, les conceptions technologiques simples et un faible coût. Leur petite taille et leur faible consommation d'énergie permettent leur utilisation sur site, même quand celui-ci est difficile d'accès. Ils disposent de temps de réponse aussi brefs que possible, qui les rend aptes à une utilisation en temps réel (surveillance, régulation). En revanche, il est clair que pour l'analyse des mélanges l'utilisation d'un système multicapteur est nécessaire, chacun d'eux étant le plus sélectif possible à une espèce.

Conclusion générale

Le monde des matériaux ne cesse d'évoluer et de se diversifier, depuis les quelques matériaux naturels utilisés à l'âge de pierre, jusqu'aux dizaines de milliers de matériaux disponibles aujourd'hui sur un marché hautement concurrentiel et sans cesse en mutation. A titre d'exemple, la moitié des aciers que nous utiliserons dans cinq ans n'existe pas encore, les « matériaux nouveaux » d'aujourd'hui (nanotubes de carbone, quasi-cristaux...) seront peut-être les grands gagnants de demain... Tout ceci nécessite un développement continu des connaissances à la fois sur la structure des matériaux, sur le moyen de l'obtenir d'une manière fiable, robuste et rentable, et sur les relations entre cette structure et les propriétés d'emploi.

La science des matériaux repose sur la relation entre les propriétés, la morphologie structurale et la mise en œuvre des matériaux qui constituent les objets qui nous entourent (métaux, polymères, semi-conducteurs, céramiques, composites, etc.). Elle se focalise sur l'étude des principales caractéristiques des matériaux, ainsi que leurs propriétés mécaniques, chimiques, électriques, thermiques, optiques et magnétiques. La science des matériaux est au cœur de beaucoup des grandes révolutions techniques.

L'utilisation de matériaux composites, préférentiellement aux matériaux traditionnels (polymères, céramiques, métaux, et alliages métalliques) se justifie par de meilleures propriétés spécifiques. Les matériaux composites peuvent être produits par plusieurs techniques telles que l'extrusion ou la synthèse chimique. Ces voies de synthèses peuvent s'avérer délicates à mettre en œuvre. Lors de la synthèse chimique, des limitations liées au choix du solvant ou au mode de dispersion de la charge peuvent apparaître, alors que l'on peut être confronté à un risque d'incompatibilité thermique des constituants lors d'une extrusion.

Il s'agit dans ce cours de concevoir, de synthétiser, de caractériser des matériaux pour des applications spécifiques mais aussi des nouveaux matériaux pour les applications de demain. Simultanément, la création de connaissances doit rester l'essence même de notre activité.

Pour réaliser ces objectifs nous devons focaliser nos recherches sur la chimie qui doit rester (ou dans certains cas redevenir) notre cœur de métier tout en nous ouvrant autant que possible vers l'extérieur en développant le côté interdisciplinaire de nos recherches. La chimie des matériaux se situe au carrefour entre la physique au sens large, la biologie et le génie des procédés.

Références bibliographiques

1. Métallurgie structurale théorique et appliquée. ALBERT DE SY, JULIEN VIDTS, 2ème édition. NICI, DUNOD.
2. Métallurgie du minerai au matériau. Jean Philibert, Alain Vignes, Yves Bréchet et Pierre Combrade, 2ème édition. DUNOD.
3. Matériaux tome 1 : propriétés et applications. M.F Ashby et D.R.H. Jones. DUNOD.
4. Matériaux tome 2 : Microstructure et mise en oeuvre. M.F Ashby et D.R.H. Jones. UNOD.
Des matériaux. Jean-Paul Bailon et Jean-Marie Dorlot, 3ème édition, Presses internationales polytechniques.
5. Didacticiel Des Matériaux : Presses Internationales Polytechniques. Montréal Canada
Guide des sciences et technologies industrielles. Jean-Louis Fanchon, 3ème édition, Nathan-Afnor.
6. Y. PERROT, « Matériaux composites et construction navale de plaisance - Analyse des propriétés matériaux », Rapport à destination de la Fédération des Industries Nautiques, http://www.groupe.polymtl.ca/mec6405/Receuil/M6405_Chap2_H06.
7. Mécanismes de ruptures et croissance de fissures : Claude ROBIN, Ecole des Mines de Douai, Mai - Décembre 2010.
8. Bulletin technique de la suisse romande 101' année 13 mars 1975 n° 6. Matériaux pour l'ingénieur, comportement, endommagement et rupture par fatigue A.-F.
9. GOURGUES-LORENZON et L. NAZE 2008 Support de cours de propriétés des matériaux
H. Abdelmoumen, M. Mosbah, G. Khaled 2013- 2014
10. M.GEIER D.DUEDAL «Guide pratique des matériaux composites», TEC & DOC (Lavoisier), Paris, 1985.
11. ABDERREZAK GHARBI « Analyse des f Y. PERROT, « Matériaux composites et construction navale de plaisance - Analyse des propriétés matériaux », Rapport à destination de la Fédération des Industries Nautiques,issurations des matériaux composites et détermination de leur délaminage utilisant des capteurs piézo-électriques » thèse de magister .Universite Mentouri- Constantine 2005.
12. H. Boussak, « Effet de la température sur les performances des céramiques contenant la bentonite de Maghnia », thèse de doctorat, université de Boumerdes (FSI) (2015).

13. J. BERTHO « Vieillissement hygrothermique d'un assemblage acier galvanisé adhésif époxy : évolution de la tenue mécanique en fonction de l'état physico-chimique de l'adhésif », thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (2011).
14. R. Madeleine, « Amélioration de l'adhésion de revêtements épais sur acier : étude expérimentale et numérique », thèse de doctorat, Université de Toulon -Paris- (2013).
15. A. ATLI, J-Ph. NOYEL, S. SIMON, « Comparaison des propriétés des polymères nanocomposites de Polyéthylène haute densité (PEHD)-Al₂O₃ obtenues par approche théorique et expérimentale », 22ème Congrès Français de Mécanique, Lyon, 24 au 28 Août 2015.
16. H. Celik, « Technological characterization and industrial application of two Turkish clays for the ceramic industry », Applied Clay Science, 50, 245–254 (2010).
17. A. Michot, « Caractéristiques thermophysiques de matériaux à base d'argile : évolution avec des traitements thermiques jusqu'à 1400°C ». Thèse doctorat, université de Limoges (2008).
18. J. Gonzalez-Benito, J. Martinez-Tarifa, M.E. Sepúlveda-García, R.A. Portillo, G. Gonzalez-Gaitano, « Composites based on HDPE filled with BaTiO₃ submicrometric particles. Morphology, structure and dielectric properties », Polymer Testing 32, 1342-1349 (2013).
19. M. Fontanille, Y. Gnanou., Chimie et Physicochimie Des Polymères (cours), 2^e et 3^e cycles ., Ecoles d'ingénieurs., Nouvelle présentation 2005. Dunod, Paris, 2002, p. 4-8 et 478-485.
20. N. HASEGAWA, M. KAWASUMI, M. KATO, A. USUKI and A. OKADA, Journal Of Applied Polymer Science, 67, 87, 1998.
21. J.L. Halary, F. Lauprêtre, « De la macromolécule au matériau polymère : synthèse et propriétés des chaînes », Ed Belin, 2007, pp 40.
22. S. Drapier « Mécanique des Composites Hautes Performances », cours École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne (2014).
23. A. ATLI, J-Ph. NOYEL, S. SIMON, « Comparaison des propriétés des polymères nanocomposites de Polyéthylène haute densité (PEHD)-Al₂O₃ obtenues par approche théorique et expérimentale », 22ème Congrès Français de Mécanique, Lyon, 24 au 28 Août 2015.
24. Vézeau B. (2010). Caractérisation mécanique de composites LMDPE/bois en vue d'une application en rotomoulage (Mémoire M.Sc.), Université Laval, Québec, 152 p.

25. Bourai K. (2010). Étude du comportement thermique d'un composite bois-polymère pour une application en rotomoulage (Mémoire M.Sc.), Université Laval, Québec, 128 p.
26. Bourban P.-É., Carlsson L., Mercier J.P., Manson, J.-A.E. (2004). Matériaux composites à matrice organique: constituants, procédés, propriétés, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 233 p.
27. Prundus G.C. (2009). Résines époxydes renforcées avec des fibres naturelles (Mémoire M.Sc.), Université Laval, Québec.
28. Clyne T.W., Hull D. (1996). An Introduction to Composite Materials, 2e Ed., Cambridge University Press, Cambridge, UK.
29. Le Centre de Recherche Scientifique et Technique en Analyses Physico- Chimiques (C.R.A.P.C)
30. Cours de caractérisation des matériaux au profil des étudiants de 1ere année licence génie mécanique, Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Gafsa Département de Génie Mécanique.