

Remerciements

Ce travail a été effectué *au sein* du *Laboratoire* Matériaux et Systèmes Electroniques (LMSE) de l'Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi de Bordj Bou Arréridj nous tenons à exprimer toute nos reconnaissances à Monsieur le professeur N. CHELALI le Directeur du LMSE et notre encadreur. Nous le remercions pour son accueil, son encadrement son aide et sur tout ses conseils.

Aucun travail ne s'accomplit que dans la solidarité donc, nous tenon à remercier dieu pour son aide durant toutes ces années puis à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé nos réflexions et ont accepté à nous rencontrer et répondre à nos questions durant nos recherches. Nous remercions nos très chers parents, qui ont toujours été là pour nous, « Vous avez tout sacrifié pour vos enfants n'épargnant ni santé ni efforts. Vous m'avez donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. Je suis redevable d'une éducation dont je suis fier ». nous remercions nos frères, et sœur M'hamed, Abd Elrahman, Hassan, Omar, Abd Elrahim, Sifeddine et Ahlem pour leur encouragement. Nous remercions très spécialement Rime, Amani..... qui ont toujours été là pour nous. Enfin, Nous remercions tous nos Ami(e)s qu'on aime tant, Pour leur sincère amitié et confiance, et à qui nous devons notre reconnaissance et notre attachement. À tous ces intervenants, nous présentons nos remerciements, respect et gratitude

Introduction générale

L'une des tendances majeures des sciences et des technologies d'aujourd'hui est la course à la miniaturisation. Faire toujours plus petit est le maître mot de nombreux scientifiques et industriels. Faire toujours plus petit pour mieux connaître et utiliser les lois fondamentales du comportement de la matière. Faire toujours plus petit pour être moins cher...¹

Les matériaux ont fait l'objet de diverses études dans tous les domaines de la science. L'objet de notre présente étude est de rassembler les connaissances acquises sur certains matériaux.

Dans le premier chapitre, nous tenterons développer l'histoire des matériaux durant les différentes périodes

Dans le deuxième, nous présenterons les classes de matériaux par leurs définitions et leurs différentes propriétés

Enfin, les nanomatériaux feront l'objet de notre troisième chapitre

¹ Miche Wautelet et coll. Les Nanotechnologies, 3^e édition, préface de Jean-Marie Lehn, Dunod, Paris, 2006,2014

CHAPITRE I : Historique

1- Un peu d'histoire ...

Quel est l'âge de la Terre ? Déterminer l'origine du monde est d'abord lié aux croyances et aux religions. On retrouve déjà des estimations de cet âge dans l'Antiquité puis au Moyen Âge

En 1655, l'archevêque anglican James Ussher calcule l'âge de la Terre en se basant sur les textes de l'ancien Testament : elle s'est formée en 4004 avant J-C.

Vers 1755, Georges Louis Leclerc, comte de Buffon (1707-1788), réalise des expériences sur la durée de refroidissement de sphères métalliques de différents diamètres. Il propose alors un âge de la Terre de 10 millions d'années (Ma) environ.

Fin XVIIIe, des fossiles s'amassent dans les cabinets de curiosités ; des hommes observent les phénomènes géologiques et s'interrogent. Comment, en si peu de temps, autant de restes d'êtres vivants ont-ils pu être accumulés ? Comment, en aussi peu de temps, autant de sédiments ont-ils pu se déposer ? On remet en question l'idée d'un monde jeune et on affirme que l'âge de la Terre devrait être nettement supérieur à celui énoncé auparavant.

Le XIXe siècle est de fait marqué par de nombreuses querelles entre scientifiques au sujet de l'âge de la Terre. Vers 1860, le physicien anglais Lord Kelvin, propose un âge de 100 millions d'années à partir d'expériences basées sur les lois de la thermodynamique.




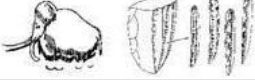


C'est la découverte de la radioactivité naturelle par Henri Becquerel en 1896 et le développement de son application à la datation qui y mettra fin. En 1906, les premières méthodes de radiochronologie sont expérimentées par Ernest Rutherford.

En 1953, Patterson procède à l'analyse de la composition isotopique du plomb contenu en traces dans les météorites et montre que la Terre et les météorites se sont formées à la même époque, il y a 4,55 Ga . En se référant au corpus de connaissances acquis depuis, l'étude de Patterson est considérée comme ayant fourni la première estimation correcte de l'âge de la formation du Système solaire et de la Terre. Cet âge sera confirmé par d'autres méthodes isotopiques (potassium/argon et rubidium/strontium). C'est l'âge qui figure dans tous les manuels.

2- Qu'est-ce que la Préhistoire ?

La Préhistoire, selon une définition historique et globale, est l'étude des sociétés humaines ayant vécu avant l'invention de l'écriture. Les écrits n'existant pas à la préhistoire, l'archéologie représente alors la source d'information principale. La découverte d'os, d'outils ou d'autres artefacts permettent la reconstitution de la chronologie. L'évolution des données est incessante grâce aux découvertes régulières, les dates sont donc ici approximatives. De plus, science historique et science archéologique présentent des désaccords sur les datations mais aussi sur les concepts et la périodisation. Par exemple, est parfois inclus par les archéologues l'âge des métaux, appelé aussi période gauloise ou protohistoire, dans la préhistoire alors que l'écriture est déjà apparue ailleurs. L'Histoire inclut la naissance de l'écriture dans l'Antiquité. Le tableau suivant résume la outils et la période de leurs découvertes.

Tableau1 : les outils des différente périodes de la préhistoire.

2 600 000 ans		Premiers outils en Afrique		
2 400 000 ans	Homo habilis		Paléolithique inférieur = Oldowayen	
1 800 000 ans	Homo erectus			
1 500 000 ans		Temps des bifaces		
500 000		Premiers foyers		= Acheuléen
300 000	Homme de Néandertal	Le temps des éclats		Paléolithique moyen = Moustérien et Châtelperronien
35 000	Homme de Cro-Magnon (en France)	L'âge du renne		Paléolithique supérieur
12 000		Les derniers chasseurs		Mésolithique
8 000		Les agriculteurs		Néolithique
4 500				Âge du bronze
				Aurignacien 35 000-28 000
				Gravettien 28 000-22 000
				Solutréen 22 000-18 500
				Badegoulien 18 500-17 000
				Magdalénien 17 000-12 000

2

² Jean-Luc Piel-Desruisseaux Encyclopédie pratique des outils préhistoriques 150 outils et gestes techniques Dunod ISBN 978-2-10-055632-8 . 2011

3- Périodes de la préhistoire :

Traditionnellement la Préhistoire est divisée en quatre grandes périodes :

- Le Paléolithique
- Le Mésolithique
- Le Néolithique
- L'Âge des Métaux : l'âge du bronze et le premier âge du fer

3.a- Le Paléolithique : de -800 000 à -10500

Les scientifiques font débuter le Paléolithique il y a trois millions d'années. Le Paléolithique commence avec l'apparition des premiers outils façonnés par l'Homme, dont les bifaces et se termine à la dernière glaciation. L'industrie lithique a permis d'établir la chronologie car le silex notamment se conserve très bien. Ces outils sont en silex et à deux faces et émergent en même temps que l'homme erectus. Ce dernier a domestiqué le feu.³






Figure1 : Biface en silex. Paléolithique moyen, entre - 300 000 et - 40 000. H. 8,5 cm. Louvres, Le Cottage-Delacroix.²

³ Préhistoire et premiers âges des métaux L'homme transforme la nature, Dossier pédagogique ARCHÉA (Archéologie en Pays de France) 2012

3.a.1- Les armes et outils du paléolithique :

le tableau suivant représente les outils de la période paléolithique


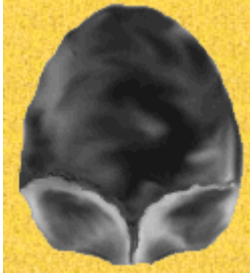



Tableau2 : quelques armes et outils du paléolithique

<p>Le biface est un outil à tout faire : il coupe, creuse et racle</p>	
	<p>Pointe constituée de microlithes insérées dans un morceau d 'os de cerf</p>
<p>Les hameçons de la fin de la période paléolithique sont de bonne fabrication. On retrouve très souvent des arêtes de brochets et d'autres poissons sur les sites bordant les lacs.</p>	

3.a.2- Méthode de fabrication

le tableau suivant présente la méthode de fabrication et d'évolution des outils

Tableau3 : méthode de fabrication des outils

<p>Au début, ces outils sont de pierres éclatées</p>	
<p>En dégageant des éclats, on obtient un outil primitif comme le "chopping tool" qui, comme son nom l'indique, servait probablement à broyer ou hacher.</p>	
<p>Peu à peu, les techniques se raffinent. Une "industrie" dite de la pierre taillée se développe. On utilise habituellement le silex (facile à tailler) et on refaçonnent le tranchant de la pierre éclatée pour obtenir un outil plus performant. En utilisant un percuteur, on dégage un éclat.</p>	
<p>Cet éclat est retravaillé à l'aide d'une pierre plus fine ou d'un bois de cervidé afin d'obtenir un tranchant plus affilé.</p>	
<p>On obtient finalement un outil très efficace : Le choper est un galet sur lequel un tranchant était façonné par des enlèvements sur une face</p>	

3.b- Le Mésolithique : de -9600 à -5200

Le Mésolithique est la période intermédiaire entre le Paléolithique et le Néolithique. Les outils sont plus petits que ceux du Paléolithique. Il était possible de les retoucher afin de leur donner la forme voulue. On pourra découvrir des pointes de flèches et racloirs en silex fabriqués entre -9600 et -5000 et aussi des outils prismatiques en silex ou en grès dont l'utilité reste assez énigmatique. Ils sont peut-être liés au travail du bois mais d'autres hypothèses sont aujourd'hui avancées comme celle d'enclumes portatives destinées à tailler des pointes de flèche. Ces outils se caractérisent par une forme irrégulière et plutôt grossière.

la figure2 représente des outils préhistoriques



Figure2 : Outils dits prismatiques en silex ou en grès, Mésolithique moyen (- 8000 à - 7000). H. 12,6 cm, H. : 12,3 cm, H. 10,1 cm. Louvres, La Borne-Jérusalem. ⁴

3.c- Le Néolithique : de -5200 à -2200

C'est l'âge de la « nouvelle pierre », de la pierre polie. Le polissage constitue une réelle innovation technique. Le polissoir, bloc de roche dure permettait d'affûter les tranchants des haches notamment et d'en polir les faces. Les deux opérations créent stries et cuvettes.

Figure3 :

Polissoir de la Remise du Grand Atelier à Belle fontaine Crédit : JPGF Villiers-le-Bel



⁴ Préhistoire et premiers âges des métaux L'homme transforme la nature, Dossier pédagogique ARCHÉA (Archéologie en Pays de France) .2012

Malgré l'invention de l'agriculture, la chasse demeure une pratique importante comme en atteste la découverte de pointes de flèches de plusieurs types. Les flèches tranchantes sont les plus répandues mais la présence de flèches perçantes découle probablement d'échanges avec d'autres peuples. Les échanges de matériaux à longue distance se multiplient. Cette période voit l'émergence d'innovations très importantes: la poterie et le tissage notamment. Peu de vestiges subsistent néanmoins. L'élément phare du Néolithique est la meule qui permettait grâce à un jeu de va-et-vient de mouler le grain. un racloir, probablement utilisé comme couteau à moissonner. Ces objets sont datés entre le 3e et le 4e millénaire avant Jésus-Christ.

les figure4 et 5 : représente une meule et un racloir néolithiques

figure4 : Meule du Néolithique. Elle permet de mouler les grains en farine à l'aide d'un broyeur grâce à un mouvement de va-et-vient.



Figure5 : Racloir à encoches en silex. Néolithique final, entre – 2400 et -2200.H. 6,5cm. Louvres, Le Bois-aux-Moines.⁵

Des haches polies servant dans le domaine agricole sont également présentées au musée datées entre -4500 et -3000. En réalité, on voit l'émergence d'une innovation technique, le polissage d'outils qui permet la fabrication de ces haches, utiles pour abattre des arbres et défricher ou utilisées dans l'agriculture mais aussi comme objets d'apparat. Ces haches en silex sont exposées dans les vitrines du musée. Elles étaient probablement insérées dans des manches en bois.

⁵ Préhistoire et premiers âges des métaux L'homme transforme la nature, Dossier pédagogique ARCHÉA (Archéologie en Pays de France) .2012

La figure suivante représente des haches polies



Figure6 : Haches polies en silex, Néolithique moyen et récent, entre - 4500 et - 3000. H. 13,9 cm et L. 19 cm. Marly-la-Ville, Le Bois-Maillard et Puiseux-en-France, Fontaine Sainte-Geneviève.

Mais la naissance de l'agriculture n'implique pas la disparition de la chasse comme en témoignent les pointes de flèches, tranchantes ou perçantes (-2300 et -2200), trouvées dans les environs du Pays de France.

La figure7 représente des pointes de flèche







Figure7 : Pointe de flèche tranchante et pointes de flèches perçantes à pédoncules et ailerons en silex. Néolithique final, entre - 2300 et - 2200. H. entre 1,9 et 3 cm. Marly-la-Ville, Le Bois-Maillard et Louvres, au-dessus du Bois d'Orville.

3.c.1- Les armes et outils du néolithique.

Le tableau suivant résume les armes et les outils néolithique :

Tableau4 : les armes et les outils néolithique

Hache en jadéite (Ploemeur en Bretagne)	
	Faucille en silex
	Les aiguilles servent à coudre les peaux pour faire des tentes ou les vêtements.
Une meule	

3.d- L'Âge des métaux :

l'âge du bronze et le premier âge du fer entre -2200 et -450 La classification de l'Âge des métaux dans la préhistoire reste discutée entre archéologues et historiens. En effet, historiquement, la préhistoire s'arrêterait à la naissance de l'écriture. Grâce aux métaux, les hommes ont pu fabriquer des armes et des outils plus solides et plus précis. L'émergence de ces nouvelles matières premières a favorisé le commerce à plus longue distance qui lui-même a modifié les structures sociales avec l'émergence de petits chefs guerriers contrôlant sites et chaînes de production. Le second âge du fer, l'époque celte, est traitée dans une autre partie de l'exposition permanente et fait l'objet d'un autre dossier pédagogique.⁶

les deux figures résument la récapitulatif de l'âge des métaux.

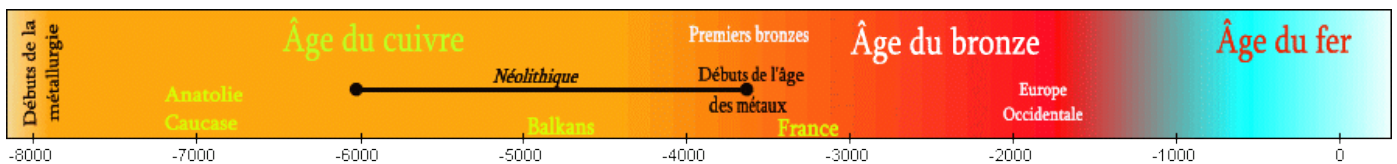


Figure8 : l'échelle historique de l'âge des métaux -1-

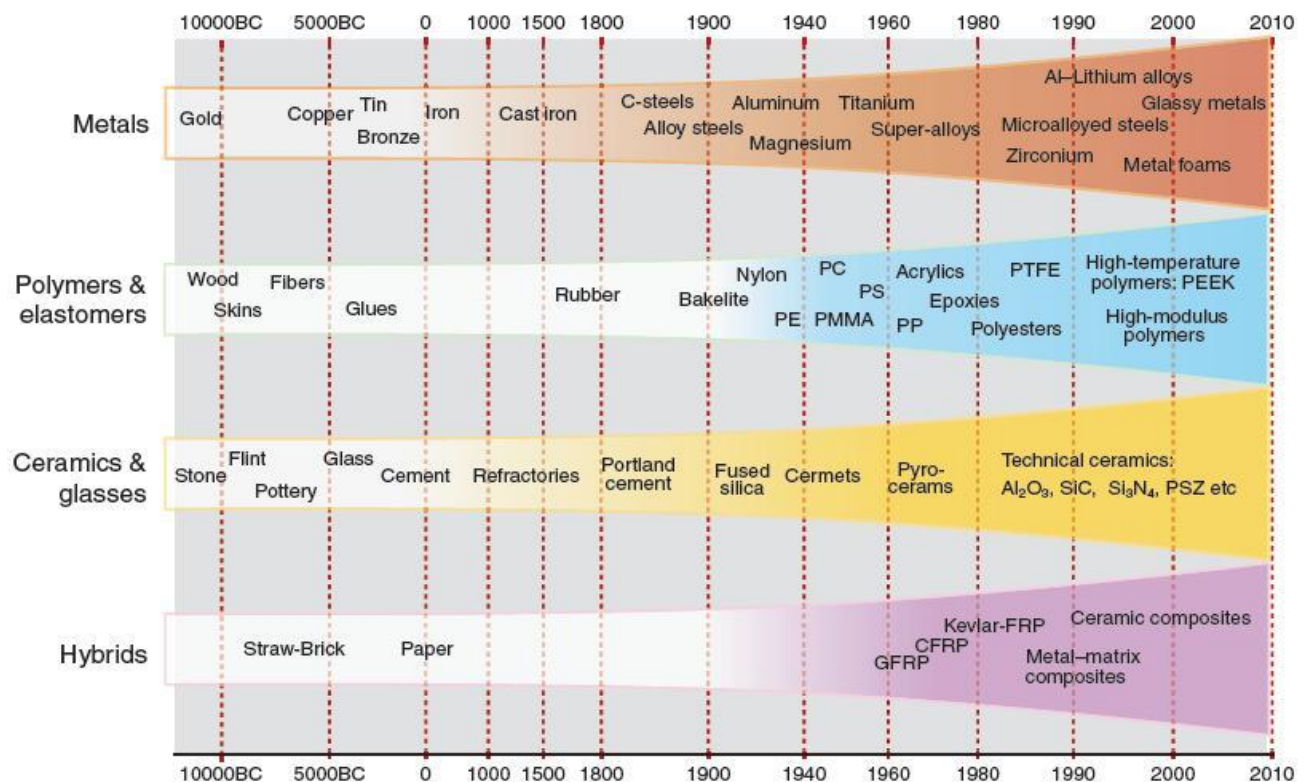


Figure9 : l'échelle historique de l'âge des métaux -2-

⁶ Préhistoire et premiers âges des métaux L'homme transforme la nature, Dossier pédagogique ARCHÉA (Archéologie en Pays de France). 2012

CHAPITRE II « Les classes des matériaux »

1- Qu'est-ce qu'un matériau ?

Les objets qui nous entourent, que nous manipulons quotidiennement, sont tous constitués d'une matière choisie pour sa bonne adaptation à la fonction de l'objet en question et au procédé utilisé pour conférer à l'objet la forme souhaitée. La notion de matériau est donc rigoureusement indissociable de l'intérêt que peut présenter la substance en question pour l'obtention d'un objet fini

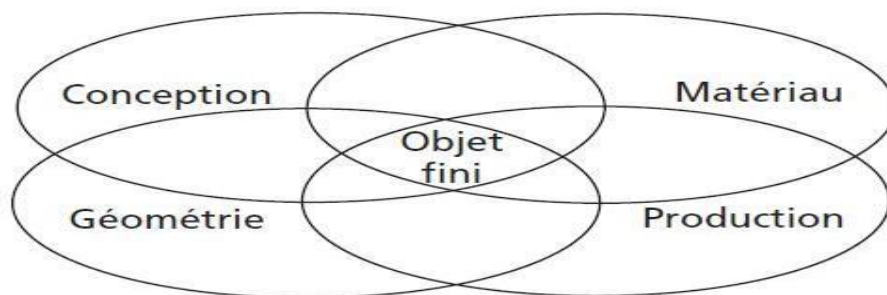


Figure10 : interaction présidant à la réalisation d'un objet fini .

2- Définition :

La notion de matériau est indissociable de l'intérêt que peut représenter la substance choisie dans le but d'obtenir un objet fini ayant une fonction précise. La fabrication d'un objet nécessite une réflexion sur la fonction qu'il devra remplir, le matériau qui le constituera et le procédé de fabrication qui permettra d'aboutir à la forme souhaitée. Le choix du matériau pour une pièce donnée et une fonction à remplir reste donc un exercice important pour le concepteur de pièces, d'objets ou de structures.

3- Propriétés :

3.1- Les propriétés d'usage des matériaux ont essentiellement deux origines :

- leur composition chimique (nature des espèces atomiques qui les constituent);
- leur micro structure (organisation des atomes constitutifs).

3.2- La caractéristique la plus évidente de la matière non vivante qui nous entoure est son état physique : solide, liquide ou gazeux. Ces différents états physiques proviennent essentiellement des effets de la température sur la micro structure, perceptibles à travers les variations de la viscosité de la matière, c'est-à-dire sa résistance à l'écoulement (figure 1.2). La température de la matière mesure essentiellement le degré d'agitation et de désordre (ou entropie) des atomes qui la constituent. Lorsqu'elle s'élève, les atomes vibrent autour de leur position moyenne à la fréquence de Debye, occupant ainsi un espace plus important (d'où la dilatation thermique) et se déplaçant plus facilement (d'où la diffusion et la mobilité atomique). Ce n'est qu'au zéro absolu de l'échelle Kelvin qu'ils seraient rigoureusement immobiles.

– À température élevée, la matière est à l'état gazeux, état caractérisé par une distance importante entre atomes ou molécules disposés alors en désordre. Un gaz est donc compressible et très fluide. Sa viscosité est de l'ordre de 10^{-5} poiseuilles (Pl) ou Pa ·

– À température plus basse, les forces d'attraction interatomiques ou intermoléculaires deviennent non négligeables devant l'agitation thermique et peuvent provoquer le passage à l'état liquide. Les atomes ou molécules sont alors en désordre, mais à courte distance. Un liquide est donc fluide et peu compressible. Sa viscosité est de l'ordre de 10^{-3} ou 10^{-4} Pl.

– À température encore plus basse, les forces d'attraction interatomiques devenant encore plus prépondérantes, la matière peut passer à l'état solide cristallisé, augmentant ainsi en général sa compacité. Les atomes sont alors ordonnés et à courte distance. Un solide cristallin est donc très peu fluide et très peu compressible. Sa viscosité est de l'ordre de 10^{17} Pl.

– Si l'abaissement de température s'effectue rapidement par rapport à la mobilité atomique, les atomes n'ont pas la possibilité de s'ordonner avant que l'arrêt de la diffusion ne les immobilise. Le liquide se fige alors en solide amorphe ou vitreux, les atomes y sont en désordre à courte distance. La viscosité d'un solide vitreux varie continûment avec la température depuis celle d'un liquide jusqu'à celle d'un solide, la limite liquide/solide s'établissant à une viscosité d'environ 10^{15} Pl.⁷

⁷ Michel Dupeux . AIDE-MÉMOIRE SCIENCE DES MATÉRIAUX Nouveau tirage corrigé 2005© Dunod, Paris, 2004

-La pression joue également un rôle dans les changements d'état de la matière (figure 10) : une augmentation de pression tend à élever les températures de changement d'état, car son action stabilise les états condensés (solide, liquide), par rapport à l'état dispersé (gazeux). Cet effet est perceptible sur la plupart des matériaux (à l'exception notable de la glace, forme solide de l'eau).

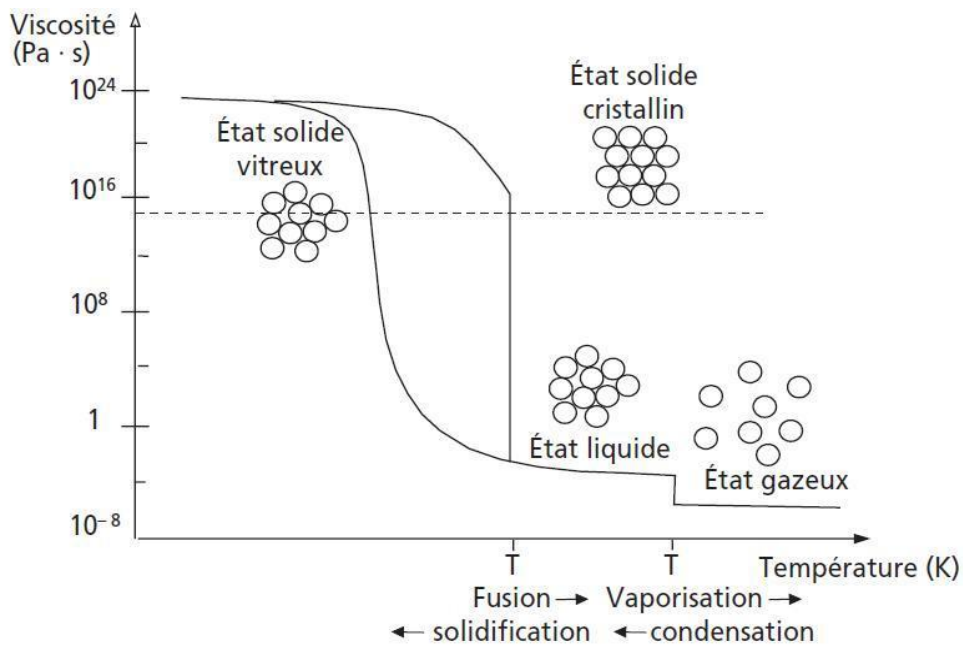


Figure11 : changement d'état de la matière en fonction de température

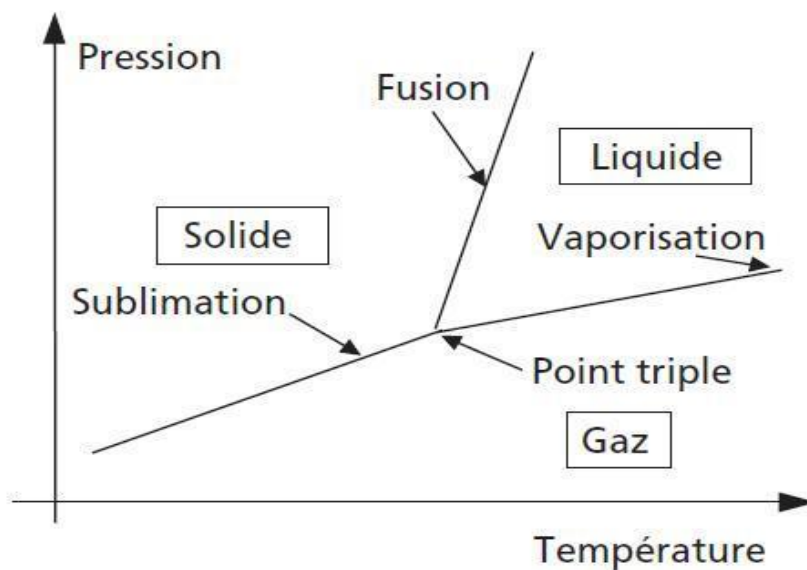


Figure12 : variation des états physiques en fonction de la pression et de la température

4- Les grandes classes de matériaux :

-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.

4.1- Matériaux métalliques. Ce sont les métaux purs et leurs mélanges, ou alliages, comportant essentiellement des liaisons métalliques (fer, acier, aluminium, cuivre, bronze, fonte, etc.).

4.2- Matériaux organiques. Ce sont les matériaux d'origine biologique (animale ou végétale), les polymères et élastomères de synthèse, comportant des liaisons covalentes et des liaisons faibles.

4.3- Matériaux minéraux. Ce sont les roches, oxydes, verres minéraux, céramiques comportant des liaisons ioniques et/ou des liaisons covalentes.

4.4- Matériaux composites. Ils associent de manière structurée à fine échelle des matériaux différents, appartenant éventuellement à des classes différentes parmi les trois précédentes.(fibres de verre, fibres de carbone, contreplaqué, béton, béton armé, kevlar, etc.)

5- Les propriétés d'usage

Les propriétés physico-chimiques et les propriétés d'usage des matériaux sont multiples et peuvent faire l'objet de diverses classifications. Certaines sont principalement conditionnées par la nature des atomes et des liaisons chimiques présentes majoritairement dans le matériau : masse volumique, stabilité mécanique et thermique, température de fusion, souplesse ou rigidité élastique, fragilité ou ductilité,

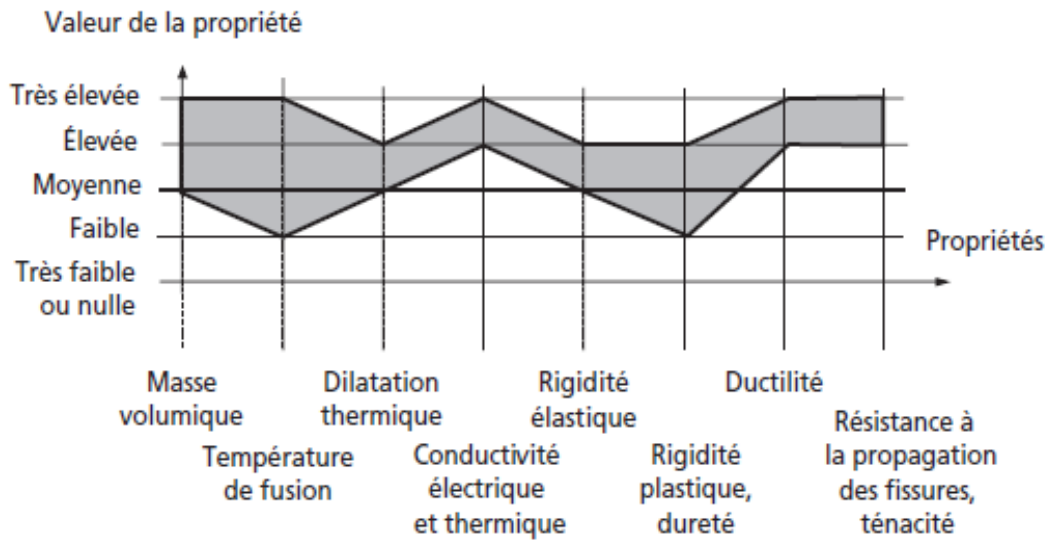
conductivité électrique et thermique, propriétés magnétiques... Certaines sont sensibles à la structure suivant laquelle les atomes sont disposés et organisés : rigidité plastique, dureté, ductilité, ténacité...

Ces propriétés seront définies et caractérisées de manière plus détaillée dans cette partie de notre mémoire.

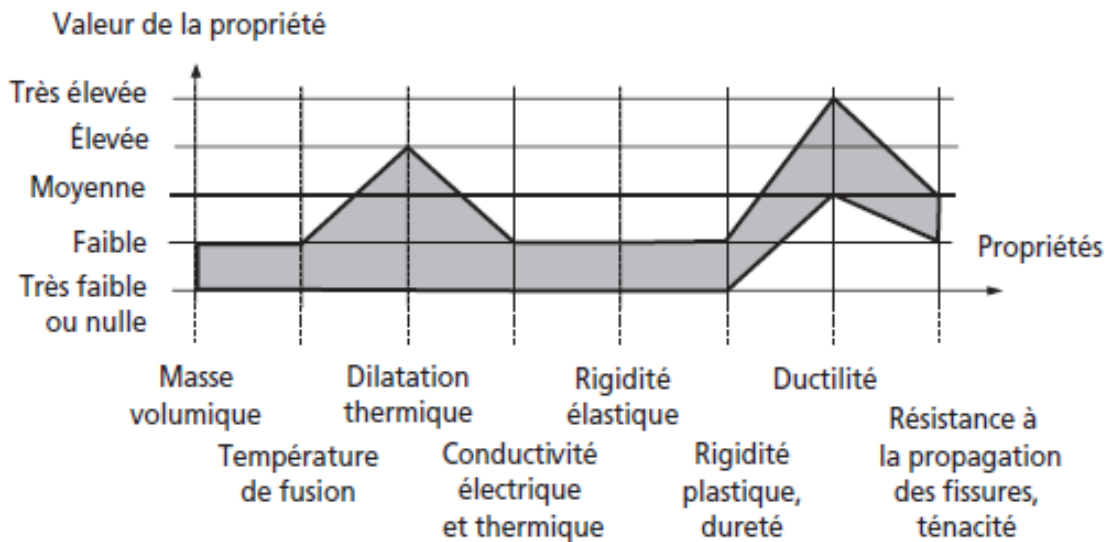
6- Les principales propriétés des grandes classes de matériaux

Dans cette partie on résume la comparaison des valeurs de propriétés des différents classes de matériaux en fonction de leurs propriétés

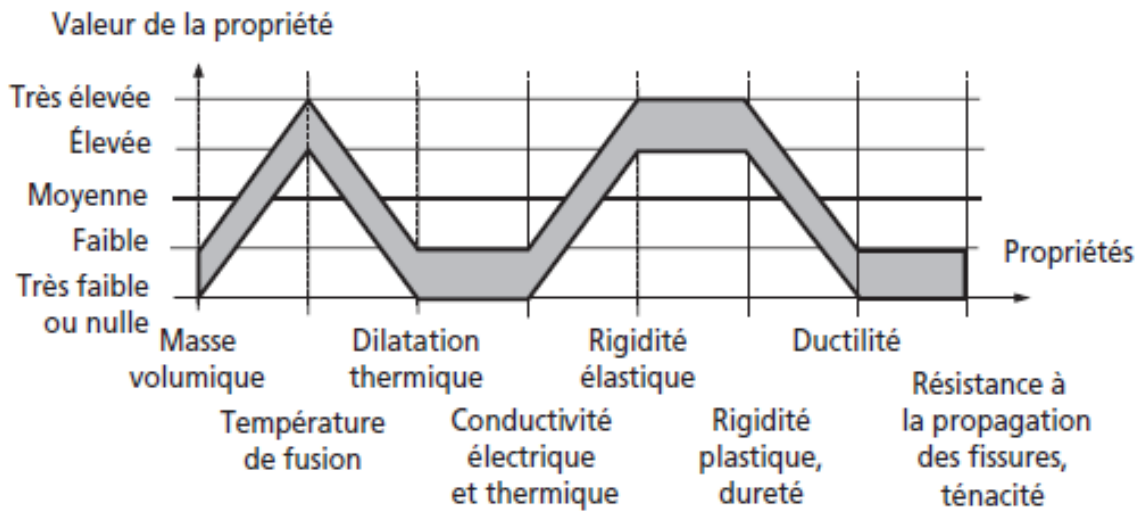
Matériaux métalliques



Matériaux organiques



Matériaux minéraux :



Matériaux composites :

Selon leur structure et la nature de leurs composants, les propriétés des matériaux composites sont extrêmement variables : pour la plupart, elles sont intermédiaires entre les propriétés des matériaux qui les constituent. Parfois cependant, certaines propriétés émergentes (propriétés résultant de l'ensemble de la structure et des constituants du matériau) peuvent prendre des valeurs inattendues.⁸

Afin de mettre en valeur chaque type de matériaux, nous présenterons dans les paragraphes suivants des exemples de matériaux ; nous avons sélectionné le bois, le verre et les renforts.

⁸ Michel Dupeux. AIDE-MÉMOIRE SCIENCE DES MATÉRIAUX , Nouveau tirage corrigé 2005, Dunod, Paris, 2004

7- Exemples de matériaux

7.1- LE BOIS

7.1 .1- LE BOIS : MATÉRIAU DE TOUJOURS

Plus que tout autre, le matériau bois évoque le temps et l'âge : le temps parce que sa production est assurée par la croissance des arbres qui deviennent récoltables après une période assez longue, variable selon l'espèce et la station ; l'âge, parce qu'il est, dans l'histoire, celui qui est utilisé par l'homme depuis le plus longtemps. C'est sans doute parce que la dépense d'énergie nécessaire à sa transformation est particulièrement faible (il suffit de rompre les branches, de couper, de scier...), par comparaison avec l'élaboration des métaux ou l'exploitation des minéraux, qu'il a été mis en œuvre très tôt par l'homme, que ce soit pour se défendre, pour chasser ou s'abriter. C'est aussi parce que, dès l'origine des temps, la forêt a joué son rôle de "forêt-abri" et de "forêt nourricière" que religieux, brigands, maraudeurs, contestataires de tout poil, et bien avant encore, l'ancêtre de l'honnête homme y ont trouvé refuge et matière première en abondance.

C'est donc l'histoire d'une rencontre entre l'homme et la forêt qui initia, depuis l'aube de l'humanité, une "filière-bois" qui démarra exactement le jour où une première lueur d'intelligence brilla dans la pupille caverneuse de nos ancêtres descendus des arbres. Cette filière s'organisa immédiatement autour de trois axes principaux :

- filière biens d'équipement et construction (armes, outils, huttes...),
- filière agro-alimentaire (cueillette, baies, champignons...),
- filière-bois-énergie (le feu...).

L'usage du bois a été longtemps lié à l'arbre. L'homme a observé et compris tout le parti qu'il pouvait tirer de cette architecture particulière et exceptionnelle. La nature a pourvu l'arbre d'un fût rond. L'arbre qui, à travers son organisation structurelle, apporte un éclairage intéressant sur l'équilibre des contraintes sans lequel il ne pourrait s'élever. Parfois l'homme força la nature pour mieux en tirer profit, avec à l'origine une complicité certaine : la disposition naturelle des branches, des racines était utilisée pour concevoir immédiatement un siège, un élément de charpente, l'étambot d'un vaisseau, une fourche à fourrage, etc.

Puis l'homme et son insatisfaction permanente, source de créativité, a inventé le bois... rectangulaire ; l'industrie du sciage était née. Cette dernière n'a cessé de se développer et de s'adapter aux produits générés par la forêt d'une part, aux attentes des prescripteurs d'autre part.

Si l'âge du bronze, l'âge du fer sont à ce jour dépassés, l'âge du bois est une telle évidence d'actualité que les experts s'efforcent de l'ignorer. Depuis l'origine, les arbres et le bois représentent l'un des succès majeurs de l'évolution des espèces . Ils nous sont devenus si familiers que nous ne réalisons plus à quel point il y a là un matériau ultra perfectionné, à la structure ingénieuse et optimisée : un matériau composite naturel et renouvelable, vraie réponse à l'ensemble des problèmes des sociétés et civilisations qui nous ont précédés et vraie réponse aux problématiques du siècle qui s'avance.

Matériau de toujours est, dans ce contexte, la qualification la plus pertinente que l'on puisse donner au bois.

7.1.2- LE BOIS MATÉRIAU COMPOSITE NATUREL

C'est l'anatomie du bois qui en fait un véritable matériau "high-tech", matériau composite naturel dont le modèle d'optimisation sert de base à de nombreux matériaux composites artificiels. Ces matériaux composites naturels ou artificiels présentent en effet les points communs suivants :

- structure au caractère périodique marqué,
- fibres aux propriétés mécaniques élevées, englobées dans une matrice en général thermodurcissable. (Ce sera l'ensemble cellulose/hémicellulose/lignine dans le composite bois massif).

Sur cette base de définition, à un premier niveau d'observation, la section droite du tronc de l'arbre met en évidence les accroissements annuels dont la largeur et l'hétérogénéité relèvent du caractère saisonnier des périodes de croissance et des aléas climatiques. La structure alvéolaire périodique du bois, dans la section droite, apparaît à des niveaux de grossissement faibles ; on est alors en présence d'un matériau constitué d'éléments tubulaires orientés dans la direction longitudinale (direction de croissance en hauteur de l'arbre). Ces éléments sont renforcés par d'autres constituants anatomiques, les rayons ligneux, orientés dans la direction radiale. La paroi des éléments du bois est constituée de différentes couches, chaque couche étant caractérisée par un angle d'enroulement de "micro-fibrilles de cellulose".

C'est sur ce modèle d'enroulement en couches que repose aujourd'hui la technique de base pour la fabrication des éléments tubulaires réalisés en composites artificiels (mâts de bateau en fibres de kevlar par exemple). De manière générale, toutes les performances physico-mécaniques du bois, pertinentes pour la construction, découlent de cette anatomie sophistiquée.

7.1.3- LE BOIS MATÉRIAU PÉRENNE

Dans des conditions optimales respectant les principes de base de la conception des ouvrages, le bois peut durer des siècles sans détérioration notable ; l'histoire du patrimoine bâti est là aussi explicite. L'une des plus anciennes constructions en bois, symbole de durabilité, est le sanctuaire bouddhiste Horyu-ji près de Nara au Japon. Témoin de l'architecture du VIIe siècle, il va sans encombre vers le IIIe millénaire (Natterer *et al.*, 1995).

Les facteurs d'agression du bois sont bien connus : l'eau et le soleil avec, en corollaire, les champignons et les insectes. Dans le même esprit, les autres matériaux de construction ont aussi à lutter contre les nuisances : l'oxydation, la corrosion, l'érosion, la photodégradation. Pour faire face, les secteurs correspondants développent eux aussi des techniques d'entretien, préventives ou curatives, et des modalités de préservation : il faut 50 tonnes de peinture tous les 7 ans pour assurer l'entretien de la célèbre Tour Eiffel. Dans le cas des structures en béton, le phénomène de corrosion des armatures, consécutif à la carbonatation naturelle des bétons, pose d'énormes problèmes d'entretien : il fait gonfler les armatures et éclater le béton. La majorité des ouvrages d'art antérieurs aux années 1980 sont confrontés aujourd'hui à ce problème majeur.

Pour le bois, les attaques biologiques sont de deux types :

- les attaques cryptogamiques : elles se développent au-delà d'un seuil d'humidité minimal dans le bois (entre 20 et 30 %, selon les conditions de température et, parfois, d'éclairement),
- les attaques d'insectes : elles sont favorisées par des températures suffisamment élevées pour permettre la reproduction et le développement des larves.

D'une manière générale, les dispositions constructives permettent d'éviter le dépassement du seuil d'humidité à partir duquel une attaque cryptogamique est possible ; elles reposent sur des règles simples :

- la limitation des reprises d'humidité (par le sol et par exposition directe),
- la ventilation des bois et l'évacuation rapide de l'eau lorsque le bois est exposé,

— l'utilisation de bois possédant une durabilité naturelle suffisante ou traité de manière adéquate.

Pour une grande partie des usages actuels, il est possible de faire appel à des essences ayant naturellement le niveau de durabilité requis pour répondre aux exigences de la classe de risque et compatible avec la durée de vie souhaitée en l'absence de tout traitement.

7.1.4- LE BOIS MATÉRIAU SÛR

Le bois est certes un bon combustible, mais il possède dans ses usages en structures l'avantage unique vis-à-vis de tous les autres matériaux de construction de conserver ses propriétés portantes à haute température pendant l'incendie ; sa réaction est alors prévisible et planifiable. Les éléments porteurs brûlent en périphérie (de l'ordre de 0,5 mm/mn), ne s'effondrent pas, permettent l'évacuation des occupants (contrairement à l'acier qui voit ses capacités portantes décliner immédiatement avec l'augmentation de la température).

Le bois ne dégage pas de gaz toxiques contrairement au PVC, ne se dilate pas contrairement à l'acier (qui provoque aux interfaces avec le béton des éclatements). Dans les constructions bois conséquentes, les assemblages métalliques sont maintenant protégés par l'intégration complète de l'assemblage en métal dans le bois ou par bouchonnages en bois des tiges de connexion. C'est donc le bois qui protège l'acier vis-à-vis de l'incendie et pas l'inverse. Pour les petites sections de bois plus vulnérables, les règles de conception (plâtre, vernis ignifugés...) permettent d'apporter une réponse technique.

7.1.5- LE BOIS MATÉRIAU PERFORMANT

Comparer les propriétés mécaniques du bois, des matériaux de construction et des composites artificiels, sur la base simpliste du module d'élasticité ou de la contrainte de rupture par exemple, aboutit à des conclusions sans appel mais dénuées de sens. Le tableau présente cette comparaison sur les trois matériaux de base de la construction. Sur ces critères classiques et en dehors de tout contexte, le bois présente des niveaux de performance médiocres. Un acier de construction à 210 000 MPa (mégapascal) de module d'élasticité, et un résineux à moins de 10 000 MPa sont-ils raisonnablement comparables. Cette comparaison est seulement réaliste à partir du contexte d'utilisation et par rapport :

- aux caractéristiques spécifiques (module et contrainte ramenés à la densité),
- à l'usage ou à la fonction,
- au meilleur compromis "performances mécaniques/coûts",

— au bilan énergétique (et écologique).

Tableau5 : Comparaison des caractéristiques admissibles (états limites)

Matériau	Acier	Béton	Bois
	S355	B30	Lamellé-collé GL28
Propriétés de résistance (MPa)			
Flexion	270	18	12,3
Traction axiale	270	2,4	8,6
Traction perpendiculaire	270	2,4	0,2
Compression axiale	270	18	12,3
Compression perpendiculaire ...	270	18	2,4
Cisaillement	213	1,8	1,3
Propriétés de rigidité (MPa)			
Module axial moyen	210000	11500	12600
Module transversal moyen	210000	11500	1020
Module de cisaillement moyen ..	8100	4800	790

7.1.6- LE BOIS MATÉRIAU “ÉCOLOGIQUE”

L’importance des écobilans dans la conception de produits et dans la démarche constructive à l’image du label HQE (Haute Qualité Environnementale) devrait ouvrir de nouvelles perspectives pour le bois et le positionner de manière objective dans l’ensemble des matériaux de construction.

Si un écobilan se définit comme « *le bilan quantifié des flux matière et énergie aux frontières d’un système, d’un produit ou d’un procédé* », ou, plus prosaïquement, du berceau à la tombe, le bois a un rôle essentiel à jouer. Les premières études montrent que le bois présente, par rapport à l’acier, l’aluminium, les matériaux issus de la pétrochimie, un “écobilan” favorable (Guinard, 1995).

Des matériaux utilisés couramment dans le bâtiment comme le zinc ou le cuivre présentent des potentiels de disponibilité de l’ordre de quelques dizaines d’années seulement au rythme actuel de leur exploitation. Le caractère renouvelable de la matière ligneuse positionne le bois de manière forte dans cette logique environnementale.

Si le dioxyde de carbone représente à lui seul près de 60 % des gaz à effet de serre, les conséquences liées à des choix de matériaux dans la construction prennent rapidement de l'importance, les climatologues s'accordent aujourd'hui sur la quasi parfaite corrélation entre les deux phénomènes ; les mesures effectuées sur les derniers millénaires confortent cette analyse. La persistance et l'évolution de l'effet de serre conduisent également à s'interroger sur les dérèglements climatiques qui en résultent.⁹

⁹ **P. TRIBOULOT - B. REITZ.** LE BOIS DANS LE CONTEXTE DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION *l'École nationale du Génie rural, des Eaux et des Forêts (ENGREF) de Nancy octobre 1999*

7.2- Le Verre.

Le verre existe déjà naturellement depuis plusieurs centaines de milliers d'années. L'Homme l'utilisa pour la première fois il y a 100 000 ans sous forme d'obsidienne, (verre naturel d'origine éruptive) pour fabriquer des outils, des armes coupantes et des bijoux. L'origine des verres remonte à la plus haute Antiquité. Il y a six mille ans, des potiers Egyptiens ont fabriqué le premier verre tout à fait par accident en cuisant leurs poteries. Le premier verre était un émail, mélange de sable et d'autres minéraux fondus sur la surface d'objets en céramique. Il y a trois mille ans, des artisans découvrirent que si l'émail avait une épaisseur suffisante, il pouvait servir seul à fabriquer des objets sans pour autant qu'il soit supporté par la terre cuite. ¹⁰

7.2.1- Définition :

Le verre est un corps solide, non cristallin, homogène, provenant du refroidissement progressif de certaines substances après fusion. Le verre est l'un des matériaux les plus utiles car il possède de nombreuses qualités. Il est facile à modeler, transparent et peut prendre de nombreuses formes.

7.2.2- Le verre et l'état vitreux :

Si, dans le langage courant le mot verre est généralement associé à un matériau fragile et transparent, une approche scientifique de l'état vitreux est à la fois beaucoup plus large (par exemple tous les verres ne sont pas transparents) et beaucoup plus difficile à définir.

Propriétés essentielles de l'état vitreux :

Le verre est un solide :

- _ Isotrope
- _ imperméable et non poreux
- _ Élastique, à rupture fragile
- _ Peu conducteur

Une définition phénoménologique du verre serait alors :

"le verre est un liquide surfondu figé". ¹¹

¹⁰ Dr. Fouad GHOMARI . cours SCIENCE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION ; UNIVERSITE ABOUBEKR BELKAID

¹¹ Le Verre de l'antiquité à nos jours ; Conférence d'Etienne VERNAZ *Directeur de Recherche* CEA - Marcoule

7.2.3- Elaboration du verre :

Matières premières :

la silice : c'est à la silice que le verre doit sa haute viscosité et son état vitreux. La silice fond à haute température (1730°C); on y ajoute généralement des fondants. Le sable de verrerie utilisé est un sable très fin dont les plus purs contiennent 99,5 % de silice (les sables quartzeux),

la soude : pour certains verres c'est plutôt la potasse que l'on introduit sous forme de carbonate ou de sulfate. Les silicates alcalins formés sont des corps très fusibles; ils permettent d'opérer en milieu liquide plusieurs centaines de degrés en dessous du point de fusion de la silice (1400°C),

le carbonate de chaux : réduit l'intervalle de plasticité de la pâte de verre et accroît son inaltérabilité,

le groisil : composé de débris de verre cassé, constituant un fondant facilitant l'entrée en réaction des autres constituants.

Outre ces produits de base, on y ajoute pour certains verres :

- l'oxyde de zinc qui améliore l'éclat, l'élasticité et la résistance à la corrosion des verres,
- l'oxyde de baryum B_2O_3 qui diminue le coefficient de dilatation du verre et améliore la résistance aux chocs thermiques ; il est aussi plus résistant à l'eau (très utilisé dans les verres d'optique et le pyrex),
- l'oxyde de plomb qui entre dans la composition du cristal, Il rend le verre plus éclatant tout en lui conférant une légère teinte jaunâtre, il est plus agréable à couper et à travailler.
- l'oxyde de phosphore P_2O_5 , employé dans le domaine de l'optique.

le tableau6 résume la composition des différentes verres

Tableau6 :Composition des verres

Type de verre	Sodo-calciq	Cristal (verre au plomb)	Borosilicate	Verres spéciaux
Principaux éléments chimiques	SiO ₂ Na ₂ O CaO	SiO ₂ PbO Na ₂ O	SiO ₂ B ₂ O ₃ Na ₂ O	très varié
Catégories	Verre creux et plat	Verre creux	Verre creux et plat	Verre creux et plat
Applications	bouteille vitrage grande majorité des autres applications	bouteille verre décoratif verre table	plat cuisson verre pharmaceutique plaque de cuisson fibre de verre	tubes cathodiques panneaux LCD verre optique electrodes etc...
Recyclabilité	très bonne	difficile	bonne	difficile

7.2.4- Procédé de fabrication :

1. Préparation des mélanges.

Le verre se fabriquant au bois, les verreries étaient implantées au voisinage des forêts. Avec l'apparition de la houille, ce combustible remplaça le bois; mais aujourd'hui les fours de verrerie sont chauffés au gaz, au fuel ou à l'électricité. On mélange les composants : silice (corps vitrifiant : 70% en masse), carbonate de soude (fondant : 15%), carbonate de chaux (stabilisant : 10%) et autres constituants. La préparation des mélanges est soumise à des dosages stricts des matières premières auxquelles s'ajoute le groisil. Le mélange est ensuite envoyé vers le four pour y être calciné.

2. Fusion dans le four à bassin.

On les calcine pour en chasser l'eau, cette opération porte le nom de fritte. La température du four est élevée progressivement jusqu'à 1500°C, sous l'effet de puissants brûleurs au fuel et/ou au gaz. Au cours de sa fusion, le mélange vitrifiable s'écoule lentement dans le four où il sera progressivement affiné. L'affinage consiste à éliminer les bulles de gaz prisonnières du verre fondu en le maintenant plusieurs heures à haute température.

Pour obtenir du verre de couleur, on ajoute au mélange de base les différents colorants suivants :

- violet : oxyde de manganèse,
- jaune : chrome, argent,
- rouge : oxyde de cuivre,
- bleu : oxyde de cobalt,
- vert : oxyde de chrome ou de fer.

On abaisse ensuite la température à 800°C. A cette température, la masse du verre formée est encore fluide; mais elle peut être travaillée.

Le façonnage peut se faire par soufflage, coulage ou étirage.

Le verre soufflé : Le cueilleur va chercher le verre en fusion dans le pot installé dans le four où la composition a été enfournée la veille. A l'aide d'une longue canne creuse, il constitue sa boule en plusieurs passes jusqu'à ce qu'elle soit parfaitement homogène. Le souffleur prend alors le relais. Il va dilater avec art cette ébauche par combinaison de son souffle à la bouche dans la canne creuse et d'un geste de balancement au dessus d'une fosse. Il transforme ainsi peu à peu la boule en un cylindre long de 80 centimètres dont les parois ont une épaisseur de 3 à

4 millimètres. Puis le cylindre (appelé manchon) est coupé en ses extrémités, refroidi et fendu dans le sens de la longueur. Cette opération s'appelle le fendage. Le manchon est déplié à l'aide d'une taloche en bois pour donner la feuille de verre. La plaque ainsi obtenue est refroidie progressivement dans un tunnel de recuisons, ce qui permet de

diminuer les tensions dans le verre et, de ce fait, d'en faciliter la découpe.

Le verre laminé : A la sortie du four on déverse le verre à 1200°C entre deux rouleaux horizontaux espacés de quelques millimètres. Ces rouleaux sont refroidis par circulation d'eau pour éviter le collage du verre. Des rouleaux transporteurs entraînent le large ruban de verre en direction de l'arche de recuisons où il sera recuit. Ce verre translucide, aussi appelé « verre coulé », a généralement une surface irrégulière.

Le verre étiré : Le verre étiré est un verre produit industriellement car obtenu par étirage mécanique. Les plaques de verre étiré sont d'une épaisseur régulière de 2 à 5 millimètres. Ce procédé a été créé au début du XXe (1902). Le four à fusion électrique d'étirage mécanique vertical de procédé

Fourcault fonctionne en continu 24 heures sur 24, 7 jours sur 7. La composition toute entière est réglementée par un automate de pesage ; seuls, les colorants sont rajoutés à la main dans la mélangeuse en fin d'opération. L'enfourneuse automatique dépose la substance obtenue de façon homogène dans le four. Celle-ci vient en effet recouvrir toute la surface du bain. Après fusion, le verre passe dans une gorge pour arriver dans une cellule d'affinage où les bulles sont éliminées. Puis le verre est étiré selon un procédé vertical dans le puits d'étirage grâce à une débiteuse en réfractaire. Il est enfin recuit dans une machine d'étirage. La formation de la feuille se fait en plongeant une barre d'amorce horizontale qui entraîne une lame de verre verticalement dans un puits d'étirage. Le puits est muni d'un dispositif de refroidissement pour que le verre devienne suffisamment rigide et où il recuit et refroidit. L'épaisseur recherchée varie suivant la vitesse de l'élévation de la barre : si celle-ci est lente, le verre est épais ; si elle est rapide, le verre est mince. Ce procédé est utilisé pour fabriquer le verre à vitre car il obtient en continu du verre transparent. Mais la qualité du poli et la planéité des faces ne sont pas aussi satisfaisantes qu'avec le verre float.

Le verre flotté : Le verre en fusion est coulé sur un bain d'étain fondu. Le principe est basé sur la différence de densité des deux matières qui permet à l'une de flotter sur l'autre (densité du verre 2,5 et de l'étain 7). Sous l'effet de son propre poids, la glace se stabilise en une feuille continue aux faces planes. Elle s'éloigne du four sur des rouleaux transporteurs vers l'étenderie. On obtient une glace avec une surface sans défaut utilisable sans traitement ultérieur.

7.2.5- Propriétés :

-Transparence.

Le verre incolore ou blanc, laisse filtrer à peu près toute l'énergie solaire. Une vitre de 5 mm d'épaisseur n'arrête qu'environ 15% de l'énergie solaire. Aussi, il peut être opaque ou opalescent. On fabrique actuellement des verres perméables aux rayons infrarouges.

-Densité et porosité.

La densité du verre varie avec celles des constituants, ex. : le verre ordinaire présente une densité variant entre 2,5 et 2,7 (qu'une feuille d'un mètre carré et d'un millimètre d'épaisseur pèse 2,5 kg), le verre à glaces offre une densité de 2,46 et le cristal une densité de 3,4. La porosité est nulle. La grande compacité du verre le rend bon conducteur de l'électricité et de la chaleur.

-Coefficient de dilatation

Il se brise s'il subit un brusque changement de température car les différentes parties du verre ne se réchauffent pas en même temps. Le verre ordinaire a un coefficient de dilatation peu différent de ceux du béton et de l'acier (verre = 9.10^{-6} , béton et acier = $10 / 11.10^{-6}$).

-Résistance mécanique

Plus le pourcentage de silice est élevé et plus le coefficient de dilatation est faible ; donc, plus le verre est résistant. Le verre résiste mieux à la compression qu'à la traction; pour le verre ordinaire la résistance à la compression est de 200 MPa et la résistance à la traction de 20 MPa (RT /RC = 1/10).

-Résistance chimique.

Le verre est pratiquement inaltérable. Toutefois, l'eau dissout en quantité extrêmement faible l'alcali du verre, forment un dépôt en surface qui devient peu à peu opaque ; le verre perd de sa transparence. Cette attaque se produit très lentement même à froid. Les silicates alcalins se combinent avec l'acide carbonique contenue dans l'air ce que donne un dépôt blanchâtre à la surface du verre. Exposés aux ultraviolets, certains verres se colorent ou se décolorent. Les verres sont en général attaqués par l'acide fluorhydrique (utilisé pour graver le verre). Le verre peut donc être dissout. Il est ininflammable, incombustible et imputrescible.

-dureté.

Seuls les diamants et le carbure de tungstène le rayent. Le verre le plus dur est le verre de Bohême et le cristal est le plus tendre

-Imperméabilité

Elle est extrêmement grande mais le verre reste poreux pour certains liquides comme le kérosène ; on dit « qu'il sue ».

-Conductivité.

Il est mauvais conducteur (environ 500 fois moins que le cuivre); on l'utilise comme isolant électrique. C'est aussi un bon isolant acoustique suivant l'épaisseur de la feuille.

Ceci n'est pas le cas à chaud car il devient conducteur à partir de 250°C.

7.2.6- Utilisations :

Dans la construction, le verre est utilisé sous diverses formes :

- briques de verre pour cloisons translucides (le verre adhère bien au ciment),
- tuiles de verre pour halls industriels,
- laine de verre offrant une bonne isolation thermique et phonique (calorifugeage des chaudières)
- vitres pour vitrage.¹²

¹² Dr. Fouad GHOMARI . cours SCIENCE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION ; UNIVERSITE ABOUBEKR BELKAID

7.3- Les renforts :

Un matériau composite peut être défini d'une manière générale comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux, l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs. On appelle maintenant de façon courante "matériaux composites" des arrangements de fibres, les **renforts** qui sont noyés dans une **matrice** dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible. La matrice assure la cohésion et l'orientation des fibres, elle permet également de transmettre les sollicitations auxquelles sont soumises les pièces.

Les matériaux ainsi obtenus sont très *hétérogènes* et *anisotropes*.

Il faut différencier *charges* et *renforts*. Les charges, sous forme d'éléments fragmentaires, de poudres ou liquide, modifient une propriété de la matière à laquelle on l'ajoute (par exemple la tenue aux chocs, la résistance aux UV, le comportement au feu...). Les renforts, sous forme de fibres, contribuent uniquement à améliorer la résistance mécanique et la rigidité de la pièce dans laquelle ils sont incorporés.

7.3.1- Fibre de verre :

Elles constituent le renfort essentiel des composites de grande diffusion. Elle est obtenue à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore). On distingue trois types de fibres :

E : pour les composites de grande diffusion et les applications courantes ;

R : pour les composites hautes performances ;

D : pour la fabrication de circuits imprimés (propriétés diélectriques).



Figure13 :Fibre de verre

7.3.2- Fibre de carbone

C'est la fibre la plus utilisée dans les applications hautes performances. Elle est obtenue par carbonisation de la fibre de PAN (Polyacrylonitrile). Selon la température de combustion, on distingue deux types de fibres :

-fibres haute résistance (HR) : pour une combustion de 1000 à 1500 °C ;

-fibres haut module (HM) : pour une température de combustion de 1800 à 2000 °C.



Figure14 : Fibre de carbone

7.3.3- Fibre d'aramide

Souvent appelée KEVLAR, la fibre d'aramide est issue de la chimie des polyamides aromatiques. Il est possible de trouver deux types de fibres d'aramide de rigidités différentes

-les fibres bas module : utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles ;

-les fibres haut module : employées dans le renforcement pour les composites hautes performances.



Figure15 : fibre d'aramide

7.3.4- Fibre de bore

Fibres de haut module et insensibles à l'oxydation à hautes températures, elles sont obtenues par dépôt en phase gazeuse sur un substrat en tungstène.

7.3.5- Fibre de silice (ou de quartz)

Elles sont produites comme le verre, par fusion, et sont essentiellement utilisées pour leur haute tenue chimique et thermique dans les tuyères pour moteur de fusée.

7.3.6- Fibres de polyéthylène de haut module

Elles présentent une très bonne résistance à la traction mais une mauvaise mouillabilité. Pour des structures peu sollicités, on peut encore utiliser des fibres synthétiques courantes de polyamide ou polyester.¹³

Le tableau7 résume les caractéristiques des fibres et renforts.

Tableau7 : Caractéristiques moyennes des fibres et renforts

Renforts	Diamètre du filament (µm)	Masse volumique (kg.m⁻³)	Module d'élasticité longitudinal (MPa)	Module de cisaillement (MPa)	Coefficient de Poisson	Contrainte de rupture (traction) MPa	Allongement à rupture %	Coefficient de dilatation thermique °C⁻¹
	d	Mv	E	G	k	Cr	A	A
Verre E	16	2 600	74 000	30 000	0,25	2 500	3,5	0,5.10 ⁻⁵
Verre R	10	2 500	86 000		0,2	3 200	4	0,3.10 ⁻⁵
Carbone HM	6.5	1 800	390 000	20 000	0,35	2 500	0,6	0,08.10 ⁻⁵
Carbone HR	7	1 750	230 000	50 000	0,3	3 200	1,3	0,02.10 ⁻⁵
Kevlar 49	12	1 450	130 000	12 000	0,4	2 900	2,3	-0,2.10 ⁻⁵
Bore	100	2 600	400 000			3 400	0,8	0,4.10 ⁻⁵
Silicate d'alumine	10	2 600	200 000			3 000	1,5	
Polyéthylène		960	100 000			3 000		

¹³ GLOSSAIRE DES MATERIAUX COMPOSITES – CARMA –Actualisation octobre 2006

CHAPITRE III : les nanomatériaux

1- Introduction

Les nanomatériaux et les nanotechnologies représentent un domaine de la recherche scientifique et de l'industrie en pleine expansion. Ce développement extrêmement rapide implique cependant l'exposition potentielle aux nanomatériaux manufacturés d'une population plus importante, pour les travailleurs en milieu industriel, dans les laboratoires de recherche, ou pour les populations riveraines de ces installations. Or, si les avancées scientifiques et technologiques, ainsi que les propriétés biologiques et physico-chimiques dans ce domaine sont largement traitées lors de publications scientifiques toujours plus abondantes, bon nombre d'interrogations subsistent autour des risques pour la santé des personnes et de l'environnement. En effet, l'insuffisance de données épidémiologiques et toxicologiques, ainsi que les moyens métrologiques encore limités ne permettent pas de mener actuellement une évaluation exhaustive des risques potentiels liés aux nanomatériaux manufacturés. La figure 15 représente l'échelle nanométrique

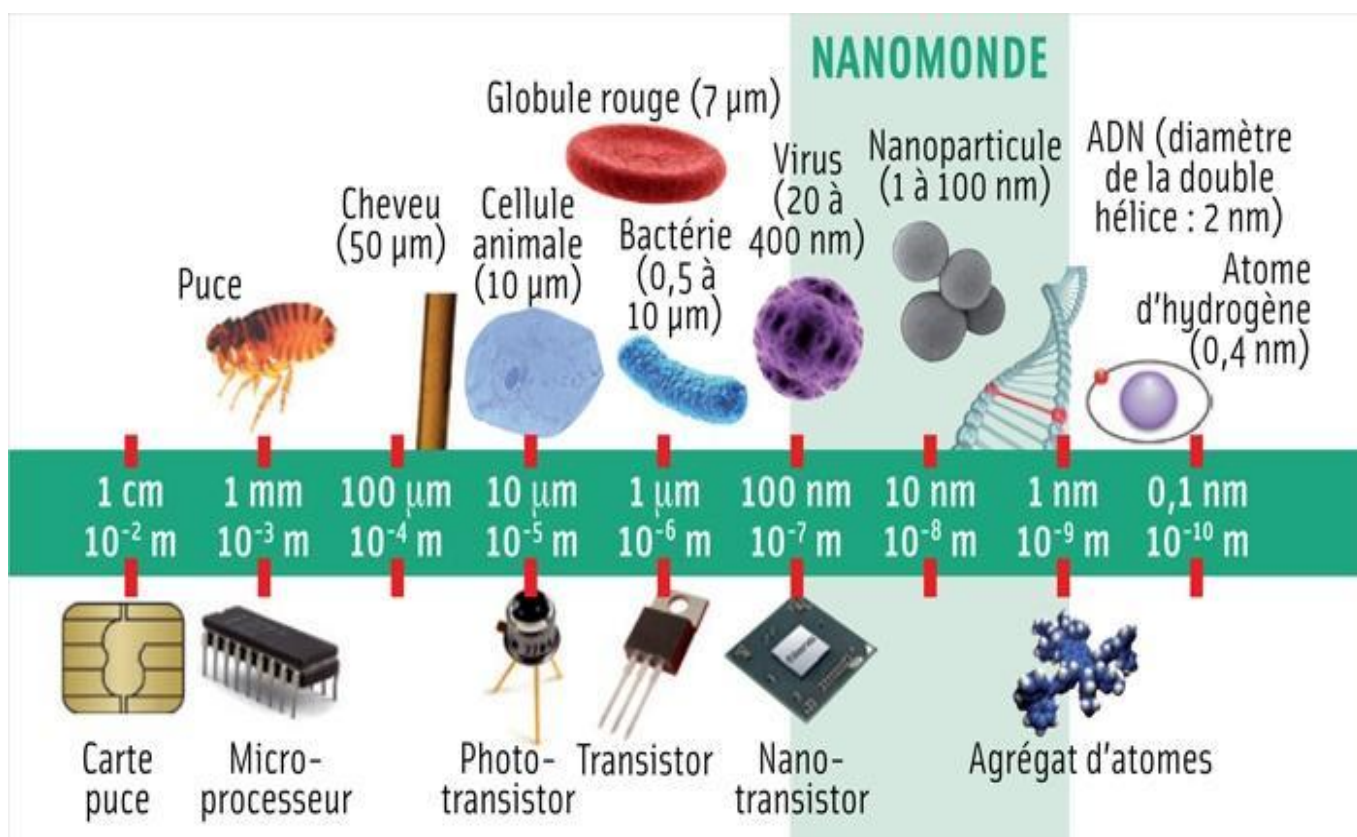


Figure16 : l'échelle nanométrique

2- Définition.

Nous avons retenu la définition suivante : « Les nanomatériaux : sont des matériaux composés de nano-objet (dont la taille est comprise entre 1 et 100 nanomètres) et qui, de par leur taille, présentent des propriétés spécifiques. »

Plus généralement, les nanotechnologies nécessitent la maîtrise de l'infiniment petit. Leur fabrication nécessite des outils et techniques permettant de structurer la matière au niveau atomique, moléculaire, voire supramoléculaire.

En effet, on parle donc ici de matériaux extrêmement petits de l'ordre du nanomètre, c'est-à-dire du milliardième de mètre ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$). Cela est équivalent à 1/100 de la largeur d'une molécule d'ADN ou bien encore 1/50000 de l'épaisseur d'un cheveu humain. La figure 1 ci-dessous permet d'illustrer la taille extrêmement fine d'un nanomatériau.

3- Fabrication.

La base de fabrication des nanomatériaux sont les « nano-objets » dont on peut distinguer trois grandes familles :

3.1. Les nanoparticules ou particules ultrafines (PUF) dont aucune dimension n'est supérieure à 100 nanomètres.

3.2. Les nanofibres, nanotubes, nano-filaments, et les nano-bâtonnets qui présentent une section de quelques dizaines de nanomètres et une longueur qui varie de 500 à 10 000 nanomètres.

3.3. Les nanofilms, les nano-couches et les nano-revêtements, dont au moins deux de leurs dimensions sont supérieures à 100 nanomètres.

Pour fabriquer ces nano-objets deux méthodes existent :

1. Une méthode dite « ascendante » (ou bottom up) :

Cette méthode permet l'assemblage ou le positionnement d'atome ou de molécules de façon précise permettant ainsi la fabrication de matériaux dont la structure est parfaitement maîtrisée. Cette méthode fait appel à des procédés d'élaboration principalement physiques et chimiques.

2. Une méthode dite « descendante » (ou top down) :

Cette méthode consiste à miniaturiser les systèmes actuels. Les structures sont ainsi graduellement sous dimensionnées jusqu'à atteindre des proportions nanométriques. Cette méthode fait appel à des procédés principalement mécaniques.

Ces nano-objets sont ensuite utilisés comme tels ou servent à la fabrication de nanomatériaux qui peuvent être classés en trois catégories :

1. Les matériaux nano-chargés ou nano-renforcés. Ils sont élaborés par incorporation de nano-objets dans une matrice organique ou minérale afin d'apporter une nouvelle fonctionnalité ou de modifier des propriétés mécaniques, optiques, magnétiques ou thermiques.

2. Les matériaux nanostructurés en surface. Ils sont recouverts d'une ou plusieurs couches de nanoparticules qui forment un revêtement bien défini, permettant de doter la surface de propriétés (résistances à l'érosion, hydrophile, etc.) ou de fonctionnalités nouvelles (adhérence, dureté, aspect, etc.)

3. Les matériaux nanostructurés en volume. Ils possèdent une structure intrinsèque nanométrique (microstructure, porosité, etc.) leur conférant ainsi des propriétés physiques particulières.

4- Exemples d'applications

Les nanomatériaux sont présents dans de multiples produits qui ne sont pas forcément les plus « high tech », nous les côtoyons donc déjà dans la vie quotidienne. L'effet de la diminution de taille pour accéder à des propriétés nouvelles ou améliorées est souvent l'atout principal qui motive leur emploi. Quelques exemples d'applications fonctionnelles des nanomatériaux sont mentionnés ci-dessous, en partant d'une application « basique » et en terminant par une utilisation de pointe.

En cosmétique, les nanoparticules de dioxyde titane (TiO_2) sont utilisées pour améliorer la filtration des UV des crèmes solaires dites à filtration minérale. En effet mises sous forme de grains de diamètre de l'ordre de 50-100 nm, elles présentent une bonne absorption des UV tout en diffusant également cette gamme de rayonnement afin d'éviter que les UV atteignent la peau. Le contrôle de la taille et de la forme des particules permet de contrôler la gamme de rayonnement de diffusion afin qu'elle ne s'étende pas jusqu'au domaine de la lumière visible. La crème est ainsi transparente à la lumière visible et ne laissent donc pas de traces blanches sur la peau, défaut « esthétique » des filtres solaires minéraux de premières générations.

Le dioxyde de titane constitue également un photocatalyseur efficace. Il est utilisé pour apporter des fonctionnalités autonettoyantes aux surfaces (verres, céramiques, polymères). Sous illumination, le dioxyde de titane se divise en espèces ioniques qui peuvent ensuite réagir avec l'eau adsorbée et avec les substances organiques, d'où le pouvoir autonettoyant des dépôts de nanoparticules de TiO_2 . Le secteur du BTP (Bâtiment Travaux Publics) utilise ce phénomène pour fabriquer des mortiers utilisés en revêtements de façade, ainsi la Cité de la Musique à Chambéry et l'église Dives in Misericordia à Rome ont été construites à l'aide de ciment autonettoyant. Outre les propriétés d'autonettoyage des surfaces, il a été remarqué que ces bétons et mortiers chargés en nanoparticules de TiO_2 permettaient l'élimination des oxydes d'azote (NO_x) et donc jouaient aussi le rôle de dépolluant de l'air.

Autres nanoparticules largement employées aujourd'hui : les nanoparticules de silice, qui entrent dans la composition des pneumatiques (nanosilice précipitée amorphe). Elles substituent une partie du noir de carbone classiquement utilisé. L'ajout de ces nanosilices permet d'améliorer l'adhérence, en particulier sur route mouillée et de diminuer la résistance au roulement, impactant donc directement sur la consommation d'essence. Ces nanosilices précipitées ont notamment été développées par l'entreprise Rhodia sous la dénomination HDS : High Dispersion Silica. L'emploi de ces nanoparticules a permis à l'entreprise Michelin de fabriquer une nouvelle génération de pneus dans les années 1990-2000 (« pneu vert »). Au-delà de la filière pneumatique, les nanosilices sont utilisées pour renforcer les élastomères pour améliorer leur dureté, leur résistance à la déchirure ainsi que leur durabilité.

Dans les années 80, les systèmes catalytiques de dépollution des moteurs à essence ont contribué à diminuer les émissions de monoxyde de carbone, d'oxyde d'azote et autres hydrocarbures non brûlés. Le développement de ces systèmes s'est accompagné de la mise au point des particules catalytiques à l'échelle nanométrique (particules de métaux précieux sur un support mixte d'alumine, d'oxyde de cérium et de zirconium), bénéficiant donc de surfaces spécifiques élevées, c'est-à-dire présentant une réactivité surfacique accrue. Plus récemment (années 2000), l'élaboration de nanoparticules d'oxyde de cérium et leur usage sous forme d'additif pour moteurs diesel a permis une avancée majeure dans la réduction de leurs émissions polluantes. Le rôle des nanoparticules d'oxyde de cérium est de capter les suies issues de la combustion incomplète du carburant et de les oxyder dans le filtre à particules. L'effet de la dimension nanométrique et par conséquent de l'augmentation de la réactivité de surface abaisse significativement le point de combustion des suies. Cet additif à base d'oxyde de cérium (développé notamment par Rhodia sous le nom commercial Eolys) permet une dépollution des moteurs diesel et limite l'encrassement des filtres à particules. Le dispositif additif

« Eolys » couplé au filtre à particules assurent l'élimination de plus de 99 % des particules émises par les moteurs diesel.

Le développement de vecteurs nanométriques de médicaments a pris un essor considérable ces dernières années. Les objectifs sont de protéger le principe actif de la dégradation jusqu'au site d'action et de contrôler la libération du principe actif dans le temps. Ces vecteurs doivent assurer le franchissement des différentes barrières biologiques rencontrées entre le site d'administration et le site d'action. Plusieurs types de vecteurs ont été développés et sont encore en développement, nous citeront les liposomes, les nanosphères ou les nanocapsules. Ces nanomatériaux sont préparés à partir de polymères biodégradables et biocompatibles. Deux approches coexistent pour assurer l'adressage du médicament. La technique « réservoir » où le principe actif est logé dans le coeur de la nanocapsule ou dans des compartiments du liposome (vésicule à une ou plusieurs bicouches de phospholipides). La seconde approche est qualifiée de système « matriciel », le principe actif est dispersé dans un enchevêtrement de chaînes polymères. En se dégradant, ces chaînes polymères libèrent le médicament. Des marqueurs spécifiques sont liés à ces nanovecteurs afin d'adresser le médicament vers l'organe visé.

Toujours dans le secteur médical, les nanoparticules magnétiques (oxydes de fer) sont utilisées comme agents de contraste en imagerie par résonance nucléaire (IRM) lorsque le contraste de l'image obtenue est insuffisant. Par exemple pour la détection d'une tumeur au niveau du foie, les régions saines vont absorber les nanoparticules et apparaîtront donc sombres à l'image, contrairement aux zones malades qui seront claires. Leur nature magnétique est aussi utile dans le traitement tumoral, les nanoparticules servent à échauffer localement la tumeur afin de la rendre plus sensible à la radiothérapie ou la chimiothérapie. L'échauffement est provoqué par l'application d'un champ magnétique alternatif et donc par le renversement de l'aimantation de la nanoparticule.

5- Utilisation.

Aujourd'hui, les nanomatériaux sont présents en masse dans des domaines divers et variés. Le tableau suivant présente les principaux secteurs d'activités dans lesquels on retrouve les nanomatériaux ainsi que quelques exemples d'utilisation actuelle.

Tableau 8 : les principaux secteurs utilisant les nanomatériaux et exemple.

Secteur d'activité.	Exemples d'utilisation.
Automobile et aéronautique.	Matériaux renforcés et plus légers. Peintures anti rayures/salissures/corrosion Aditifs pour diesel permettant une meilleure combustion. Pneumatique plus durable et recyclable.
Électronique et communication	Mémoires hautes densités Processeurs miniaturisés. Ordinateurs rapides. Technologies sans fil. Écrans plats
Chimie et matériaux	Vitres autonettoyantes Textiles antibactériens et ultra-résistants Isolation thermique
Pharmacie, biomédicales et biotechnologie	Médicaments sur mesures délivrés uniquement à des organes précis Régénération des os et tissus
Cosmétiques	Crèmes solaires transparentes Rouge à lèvres meilleure tenue
Santé	Destruction de tumeurs par chauffages Thérapie génique : nano vecteurs pour transfert de gènes Microchirurgie : nano-implants et prothèses
Énergie	Nouveaux types de batterie Photosynthèse artificielle
Environnement et écologie	Diminution des émissions de dioxyde de carbone Production d'eau ultra-pure à partir d'eau de mer Pesticides plus efficaces et moins dommageables
Défense	Systèmes de surveillance miniaturisés Système de guidage plus précis

6- Quelques exemples de nanomatériaux et l'application associée

6.1- Dioxyde de silice, SiO₂

Les nanomatériaux comme le dioxyde de silicium ou "silice" sont produits en grande quantité et sont très largement utilisés dans un grand nombre d'applications et de produits. La silice en vrac a été largement utilisée comme additif alimentaire depuis de nombreuses années pour clarifier des boissons, contrôler la viscosité, comme agent anti-moussant ou modificateur de la pâte utilisée pour la fabrication du pain ou de pâtisserie.

La silice peut également se retrouver sous une forme nano dans certains produits alimentaires comme agent anti agglomérant (pour empêcher la formation de morceaux), dans l'industrie de la construction pour augmenter la cohésion des bétons à haute performance et réduire la tendance à la ségrégation des particules, ainsi que dans des peintures et revêtements. La nano-silice est développée pour des applications biomédicales : thérapie du cancer, administration de médicaments ainsi que dans les produits de soins de santé.

Les surfaces hydrophobes intègrent des nano-silices. Dans la nature, l'eau est repoussée par la surface brute des feuilles de lotus. L'effet Lotus a été breveté par le scientifique allemand Wilhelm Barthlott et renvoie à l'idée de construire des surfaces présentant des reliefs microscopiques afin de les rendre autonettoyantes. Dès lors, la saleté et les liquides ne peuvent accrocher la surface et sont repoussés. Peintures et revêtements peuvent incorporer des particules de silice qui font que les salissures, les graffiti ou les empreintes de doigts ne se marquent pas sur les surfaces, rendant les surfaces auto nettoyantes, antisalissure, antigraffiti ou antiempreintes dans une perspective de durabilité. La même propriété hydrophobe et autonettoyante peut s'observer dans des textiles, où des fibres sont traitées par un travail d'enrobage, également dans le but de repousser l'humidité et la saleté du tissu.

6.2- Nanoargent

Différents composés d'argent sont connus pour avoir été utilisés depuis de nombreuses années : l'argent colloïdal, par exemple, a été largement utilisé à des fins médicales et hygiéniques pour traiter les infections bactériennes (Nowack 2011).

L'argent sous sa forme nano est fabriqué et utilisé dans différents produits et applications pour en améliorer l'efficacité. Le nanoargent empêche la multiplication et la croissance des bactéries et des champignons responsables d'infections, d'odeurs, de démangeaisons et de douleurs, et par conséquent a été utilisé comme antibactérien, agent fongicide, antiviral et anti-inflammatoire. Mais il présente une toxicité différente par rapport à son homologue à l'échelle macroscopique. On trouve actuellement le nanoargent dans différents produits : comme revêtement dans les conteneurs alimentaires en plastique, dans des sous-vêtements, des vêtements de sport ou des chaussettes, pour tuer les bactéries, dans des brosses à dents, des nettoyeurs de surfaces, des lotions, des jouets, des appareils électroménagers comme les lave-vaisselles, aspirateurs et réfrigérateurs. En électronique, le nanoargent est principalement utilisé comme soudure dans les connexions de circuit, alors que des nanofils en argent sont utilisés comme nanoconnecteurs et nanoélectrodes pour des appareils nanoélectroniques. On relève également des utilisations médicales dans les pansements, les textiles médicaux et les matériaux de stérilisation. Ajoutons qu'à l'échelle nanométrique, l'argent possède des propriétés optiques et physiques uniques pouvant s'avérer précieuses pour les diagnostics médicaux, l'administration des médicaments et l'imagerie.

Des représentants du secteur aux États-Unis indiquent que l'argent à l'échelle nanométrique a été largement utilisé sur le marché depuis plus d'un siècle comme algicide (nanoargent colloïdal) et dans des matériaux composites. Toutefois, les formules peuvent varier en taille, en solubilité et en agrégation des nanoparticules, ce qui signifie qu'il n'y a pas une seule forme de nanoargent (Wijnhoven 2009).

En matière d'exposition humaine, un rapport danois (Hagen Mikkelsen 2011) n'a relevé aucune donnée quantitative sur l'exposition cutanée des travailleurs et des consommateurs. Le rapport estime que les consommateurs peuvent être particulièrement exposés au nanoargent en raison de son emploi relativement répandu dans le secteur du vêtement, mais on soupçonne également que l'exposition est encore plus importante dans l'environnement de travail. Les principaux modes d'exposition dans le contexte professionnel sont l'inhalation et le contact avec la peau, mais des données complémentaires sur l'exposition et la toxicité humaine sont nécessaires. En matière d'environnement, il existe des preuves scientifiques que le nanoargent est toxique pour les organismes aquatiques et terrestres (Wijnhoven 2009, EPA 2010). Des recherches complémentaires s'avèrent nécessaires sur les

interactions entre le nanoargent et le produit dans lequel il est incorporé, et si cela occasionne des modifications des propriétés chimiques.

Le nanoargent a récemment retenu l'attention des régulateurs : l'agence américaine pour la protection de l'environnement, l'EPA, a décidé de les examiner de près. En octobre 2011, l'EPA a publié un avis suivant lequel elle enregistre à titre conditionnel un pesticide contenant du nanoargent, comme nouvel ingrédient actif. Le produit est utilisé comme agent conservateur pour les textiles. Comme condition de l'enregistrement, l'EPA exige des données complémentaires sur le produit confirmant qu'il ne causera pas d'effet négatif déraisonnable pour la santé humaine ou pour l'environnement (EPA 2011).

En décembre 2011, la Commission européenne a demandé au CSRS^{EN3} de préparer pour 2013 un avis scientifique évaluant si l'utilisation de nanoargent, en particulier dans les soins médicaux et les produits de consommation, pourrait entraîner des risques supplémentaires par rapport aux utilisations plus traditionnelles de l'argent, et si l'utilisation de nanoargent pour contrôler la croissance bactérienne pourrait entraîner une résistance des micro-organismes.¹⁵

6.3- Le dioxyde de titane :

Le dioxyde de titane est l'un de pigments minéraux synthétique les plus utilisés à travers le monde depuis les années vingt (notamment dans les peintures, les encres, les plastiques, les bitumes, etc.). Avec les dioxydes de fer et noir de carbone ce pigment blanc est aujourd'hui incorporé dans les ciments et également les verres, en raison de ses propriétés photocatalytiques qui permettent de décomposer une large variété de matières organiques, inorganiques et de micro-organismes (NOX, CO, O₃, etc.) les ciments acquiert ainsi des caractéristiques autonettoyantes (intéressantes pour la maintenance et la durabilité des bâtiments) antipollution. Le dioxyde de titane nanométrique est également utilisé actuellement dans les produits de protection solaire tout comme l'oxyde de zinc, en tant que ultraviolets.

¹⁵ Aída Maria Ponce Del Castillo Les nanomatériaux sur le lieu de travail Quels enjeux pour la santé des travailleurs, Institut syndical européen .European Trade Union Institute, 2013 ISBN 978-2-87452-287-1

6.4- Les nanotubes de carbone

Les nanotubes de carbone constituent avec d'autres molécules nommées fullerènes, la troisième forme cristalline de carbone. Leur structure peut être représentée par un ou plusieurs feuillets ou parois de graphène enroulés sur eux-mêmes ou les uns autour des autres : on distingue ainsi les nanotubes de carbone mono parois (ou monofeuillets), ces cylindres creux démontrent des propriétés mécaniques et électriques remarquables (un nanotube de carbone est 100 fois plus résistant et 6 fois plus léger que l'acier à section équivalente) qui induisent de nombreuses applications : élaboration de matériaux composites haute performance, de polymères conducteurs ou encore de textiles techniques. Ils sont ainsi utilisés dans l'aéronautique (aile d'avion), les équipements sportifs (raquette, vélo), l'électronique (diode, transistor, etc.)

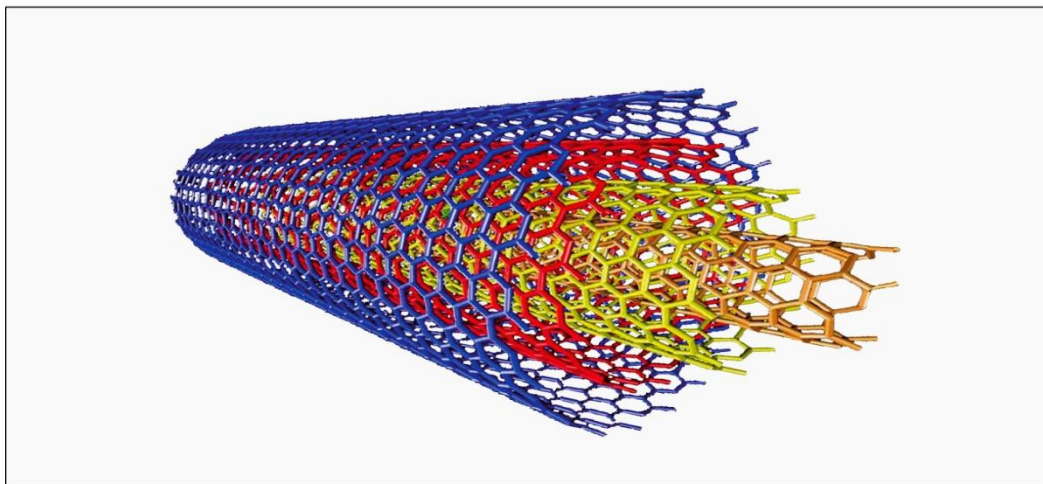


Figure 17 : Les nanotubes de carbone

6.5- Les points quantiques :

Les points quantiques sont des nanocristaux semi-conducteurs tels que le séléniure de cadmium qui possèdent des propriétés de fluorescence ajustables par le contrôle de leur taille. Éclairés en lumière blanche ou ultraviolette, ces cristaux inorganiques émettent une fluorescence dont la couleur varie en fonction de leur composition et de leur diamètre (cette couleur peut varier du bleu au rouge). Ces matériaux peuvent notamment être utilisés en imagerie biologique : marquage et suivi de cellules vivantes, imagerie sur animal vivant, microscopie fluorescence, etc.

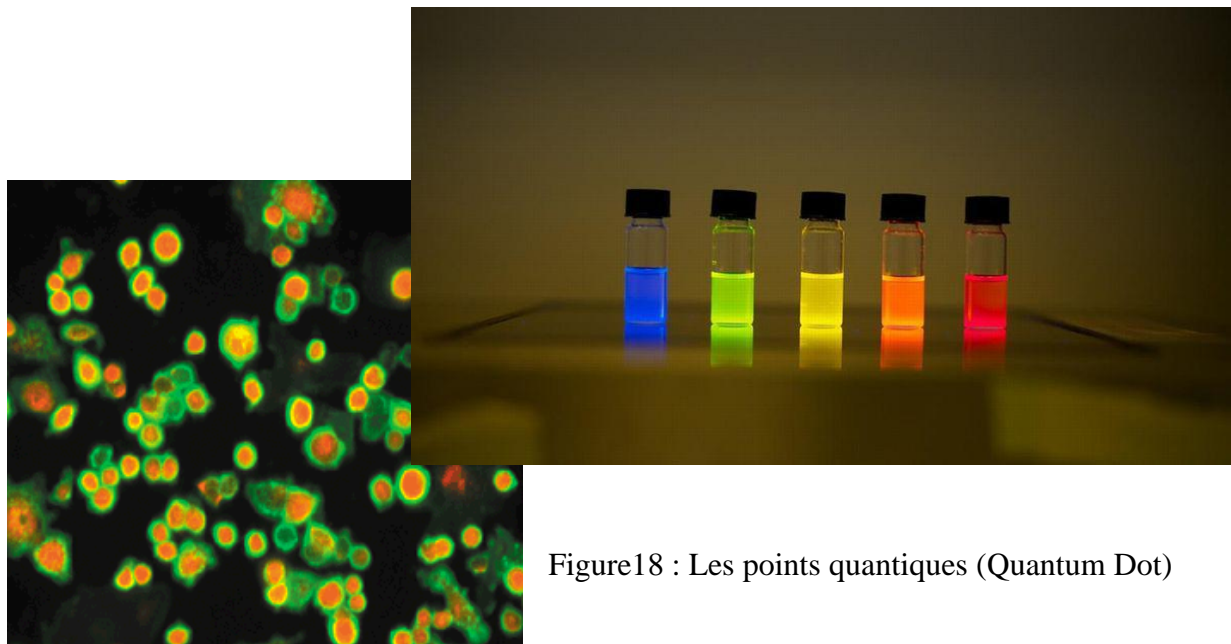


Figure18 : Les points quantiques (Quantum Dot)

6.6- Les dendrimères :

Les dendrimères sont des macromolécules de taille nanométrique caractérisées par une structure ramifiée tridimensionnelle. Ils sont apparentés à des polymères plurifonctionnels et possèdent des propriétés particuliers de solubilité ; viscosité, stabilité thermique, etc. ils adoptent en générale, une forme globulaire. Les possibilités d'utilisation offertes par les dendimères sont nombreuses et sont liées à leur topologie originale composée de trois régions bien spécifiques : le cœur, les branches formant la matrice dendritique et la périphérie constitué d'une multitude de groupes fonctionnels les applications touchent aussi bien la vectorisation et la libération contrôlée de principe actifs que la thérapies génique la catalyse les capteurs biologiques ¹⁶

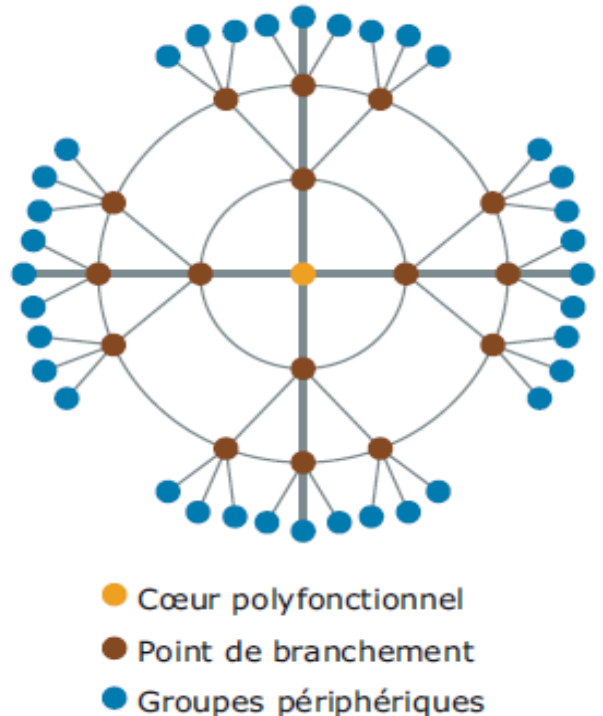


Figure19 : structure d'un dendrimère

¹⁶ Myriam Ricaud et Olivier Witchger Les nanomatériaux, institut national de recherche et de sécurité (inrs), ED6050 septembre 2012

7- Les risques liés à l'utilisation des nanomatériaux

7.1- Polémiques autour des nanomatériaux.

Aujourd'hui dans l'actualité les nanomatériaux sont de plus en plus décriés, alors qu'ils sont en train de devenir incontournables dans notre quotidien grâce à leurs propriétés intrinsèques, de nombreux scientifiques et associations s'élèvent pour mettre en garde les utilisateurs et les consommateurs sur les risques potentiels engendrés par les nanomatériaux. Et se heurtent aux lobbies des industries utilisatrices de ceux-ci.

À l'heure actuelle aucune étude sérieuse n'a été menée sur l'impact des nanomatériaux sur l'homme et sur l'environnement. Malgré tout, un certain nombre d'entre eux sont accusés d'être à l'origine de maladies, c'est le cas des nanotubes de carbone qui de par leur forme (allongée et cylindrique) sont comparées aux fibres d'amiante, dont il a été prouvé que leur petite taille et leur forme leur permettaient de pénétrer profondément dans les poumons et de développer des tumeurs cancéreuses.

7.2- Les nanomatériaux dans notre environnement et exposition.

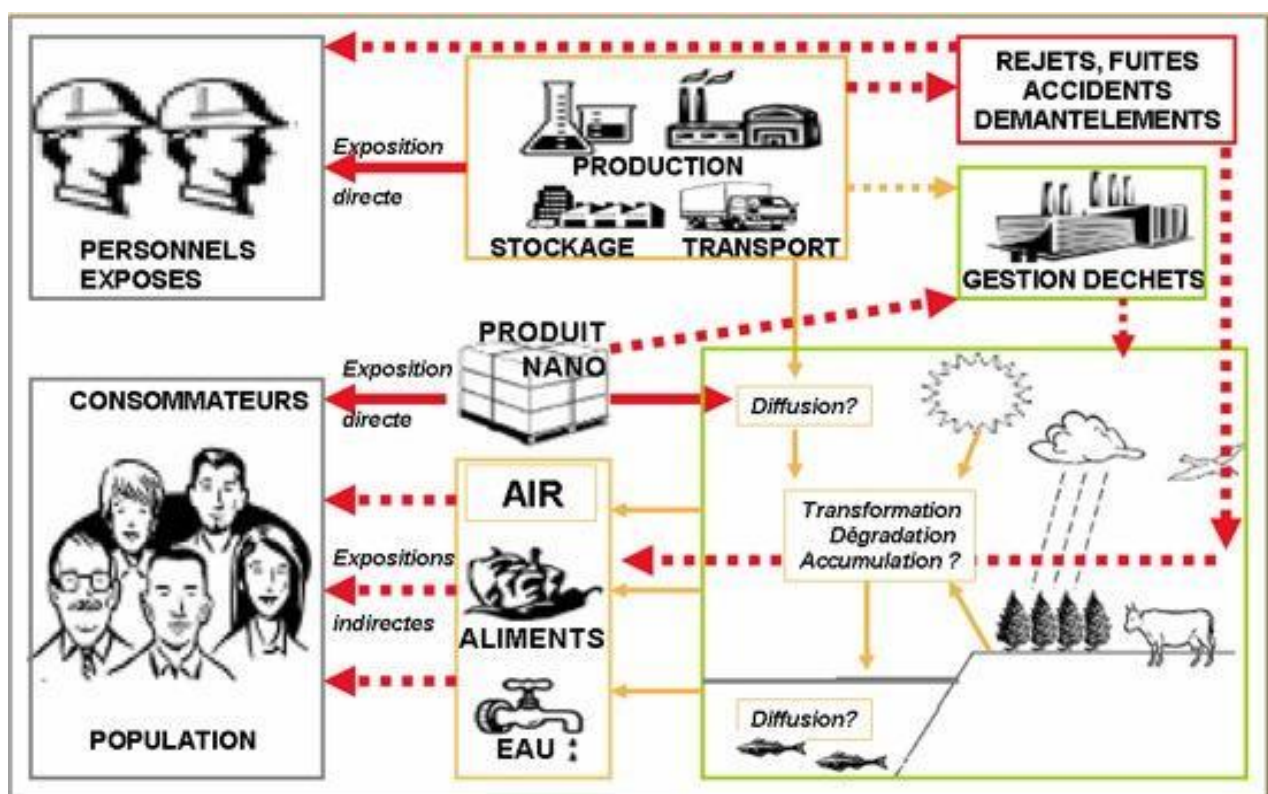


Figure20 : cycle des nanomatériaux de la production à l'exposition des personnes.

La figure précédente présente le cycle des nanomatériaux, de leur production à l'exposition des personnes, en passant par leur diffusion dans l'environnement.

En ce qui concerne l'exposition des personnes aux nanomatériaux, les opérateurs des industries qui utilisent les nanomatériaux ne sont pas les seuls à être susceptibles d'être exposés aux nanomatériaux. Les consommateurs de produits à base de nanomatériaux peuvent aussi être confrontés aux nanomatériaux, mais aussi plus indirectement l'ensemble de la population.

Les nanomatériaux peuvent aussi avoir un impact plus global sur l'environnement, on distingue alors :

1. Exposition directe, cela concerne les opérateurs des entreprises qui utilisent des nanomatériaux (lors des phases de production, de stockage, ou de transport) ainsi que les consommateurs de ces produits.

2. Exposition indirecte, cela concerne l'ensemble de la population. En effet, la phase de production des nanomatériaux peut être à l'origine de rejet dans l'environnement. Qui par infiltration dans les sols, dans l'eau et par la diffusion dans l'air vont pouvoir pénétrer dans l'organisme humain.

7.3- Les impacts sur l'Homme.

7.3.1. Danger pour la santé.

7.3.1.a- Les voies d'entrées des nanomatériaux dans l'organisme.

De par leurs propriétés physiques, on peut rapprocher le comportement des nanomatériaux sur l'organisme à celui des molécules chimiques.

Il existe trois voies de pénétration des nanomatériaux dans l'organisme humain (figure18) :

- 1) La voie cutanée : certains nanomatériaux peuvent franchir des barrières cellulaires telles que la peau, c'est le cas de ceux que l'on peut trouver dans les crèmes solaires. Les barrières cellulaires seront plus ou moins faciles à franchir en fonction de l'environnement dans lequel la personne se trouve (taux d'humidité, température, pression, etc.) ainsi que l'état dans lequel se trouve sa peau.

- 2) La voie respiratoire : voie privilégiée en exposition directe, certains nanomatériaux par leurs propriétés physiques (nanotubes de carbone) peuvent, s'ils sont inhalés, pénétrer en profondeur dans les poumons.

3) La voie digestive : voie de pénétration en exposition indirecte aux nanomatériaux. Il est possible d'être confronté aux nanomatériaux lorsque l'on mange ou l'on boit des aliments contaminés.

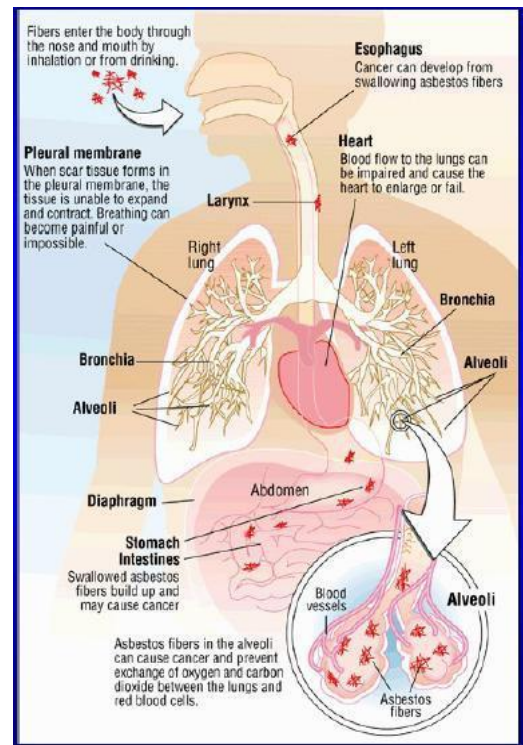


Figure21 : voies de pénétration des nanomatériaux

7.3.1.b. Études menées sur les impacts des nanomatériaux pour l'homme.

Aujourd'hui, aucune étude sérieuse n'a été menée concernant l'impact des nanomatériaux pour l'Homme. Les seules études qui ont été menées à ce jour, concernent des tests réalisés sur des souris (il s'agit de souris exposées en laboratoire à de fortes doses de nanomatériaux, équivalent à plus d'une demi-année d'exposition pour une personne travaillant dans une entreprise utilisant du dioxyde de titane). Ces tests montrent une corrélation entre l'exposition aux nanomatériaux et le développement de certaines maladies (en effet, au bout de 5 jours d'exposition les souris présentaient des ruptures au niveau de leurs brins d'ADN significatives du développement de cancer). Cela reste malgré tout difficile à extrapoler vers l'Homme, en effet :

- On ne retrouve jamais de tels niveaux d'exposition dans les entreprises
- Ce n'est pas parce que les souris vont développer certaines maladies que l'Homme développera les mêmes symptômes
- Il existe plus de mille nanomatériaux différents qui n'agissent pas forcément de la même manière les uns et autres sur le corps humain.

7.3.2. Danger pour la sécurité.

A l'image des poussières, dans certaines conditions (figure 7), les nanomatériaux peuvent provoquer un risque d'incendie ou d'explosion pouvant altérer la sécurité des personnes, mais aussi détériorer les biens

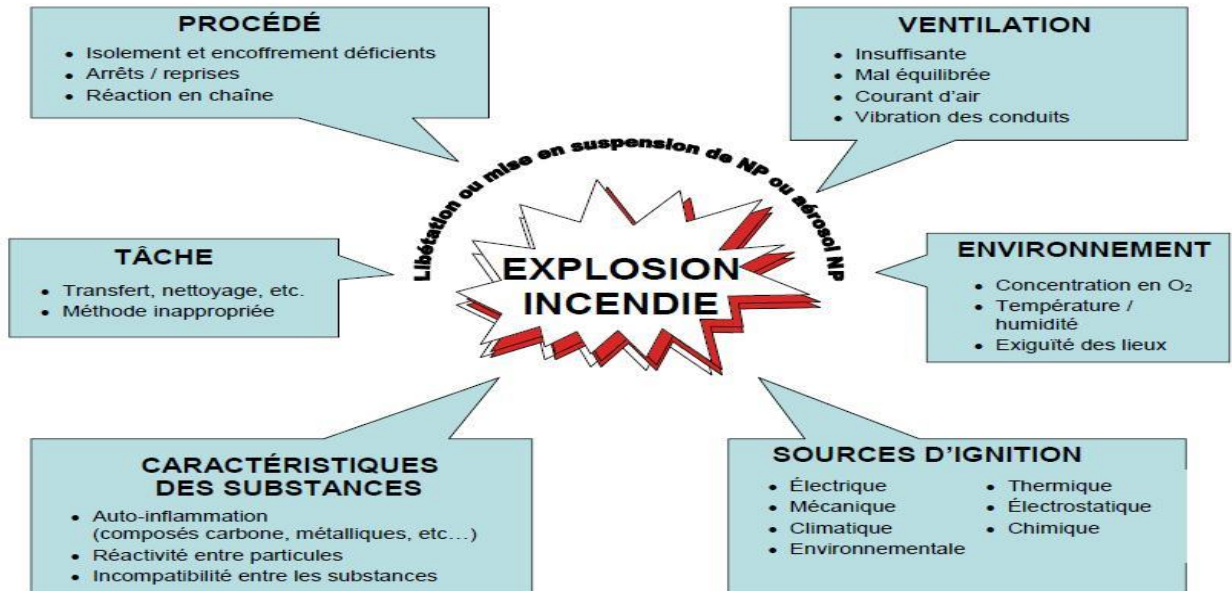


Figure22: principaux facteurs favorisant une explosion ou un incendie.

7.4- Les impacts sur l'environnement.

De même que concernant l'impact des nanomatériaux sur l'Homme, aucune étude sérieuse n'a été menée à l'heure actuelle sur les impacts potentiels des nanomatériaux sur l'environnement.

En ce qui concerne le risque toxicologique des nanomatériaux, pour le connaître, il faudrait s'intéresser à leur évolution dans l'environnement (migration dans les airs, dans les sols, dans l'eau, changement d'état, etc.). Le seul effet significatif pour l'environnement aujourd'hui intervient lors de leur fabrication puisqu'elle nécessite de grosses demandes en énergies.

7.5- Autres risques.

Les risques présentés ci-dessus sont les risques auxquels l'homme et l'environnement sont confrontés principalement dans les conditions d'utilisation des nanomatériaux. Il ne faut pas oublier non plus les risques engendrés par les nanomatériaux lors du transport, du stockage et de la gestion des déchets.

Pour les questions de transport et de stockage aucune condition n'est requise actuellement. Il est nécessaire de transporter et de stocker les nanomatériaux dans des enceintes hermétiquement closes. Les associations réclament la mise en place d'une signalétique (sous forme de pictogramme comme pour les produits chimiques).

En ce qui concerne la gestion des déchets rien n'est fait pour les nanomatériaux qui se trouvent incorporés dans des matrices macroscopiques, ils se retrouvent donc comme les autres déchets dans des centres d'enfouissement technique. La meilleure solution pour se débarrasser des nanomatériaux, est alors de les incinérer.¹⁷

¹⁷ LE MOROUX Gwenaëlle et MOY Romain Rapport- les nanomatériaux .institut universitaire de technologie LORIENT . Département Hygiène Sécurité Environnement Année 2009/2010

Conclusion générale

Les matériaux ont toujours fait partie du quotidien de la vie de l'être humain. Ce pendant ils ont subi des modifications au cours du temps grâce au développement de la technologie.

Dans le chapitre I, nous avons développé l'histoire des matériaux depuis la préhistoire c'est-à-dire durent les différentes périodes allant du Paléolithique, Mésolithique, Néolithique et nous avons terminé ce chapitre par l'âge des métaux .

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté les classes des matériaux on commençant par la définition d'un matériau, ses propriétés. Nous avons aussi traité les grandes classe des matériaux en présentant des exemples tels que le bois, le verre et quelques renforts. Nous avons développé chacun séparément.

Enfin le troisième chapitre est consacré aux nanomatériaux. nous avons donné des exemples en définissent, en développent les méthodes de fabrication et par des exemples. En dernier, nous avons présenté les avantages et les inconvénients des nanomatériaux.

Comme perspective, nous pensons à développer des cas concrets on faisant l'étude par des manipulations expérimentales.

Bibliographie

- [1] Miche Wautelet et coll. Les Nanotechnologies, 3^e édition, préface de Jean-Marie Lehn, Dunod, Paris, 2006,2014
- [2] Jean-Luc Piel-Desruisseaux Encyclopédie pratique des outils préhistoriques 150 outils et gestes techniques Dunod ISBN 978-2-10-055632-8 . 2011
- [3] Préhistoire et premiers âges des métaux L'homme transforme la nature, Dossier pédagogique ARCHÉA (Archéologie en Pays de France) 2012
- [7] Michel Dupeux. AIDE-MÉMOIRE SCIENCE DES MATÉRIAUX , Nouveau tirage corrigé 2005, Dunod, Paris, 2004
- [9] P.TRIBOULOT - B. REITZ. LE BOIS DANS LE CONTEXTE DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION l'École nationale du Génie rural, des Eaux et des Forêts (ENGREF) de Nancy octobre 1999
- [10] Dr. Fouad GHOMARI . cours SCIENCE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION . UNIVERSITE ABOUBEKR BELKAID 2009-2010
- [11] Etienne VERNAZ, Le Verre de l'antiquité à nos jours – Marcoule. centre culturel. 2011
- [13] GLOSSAIRE DES MATERIAUX COMPOSITES – CARMA –Actualisation octobre 2006
- [14] LE MOROUX Gwenaëlle et MOY Romain Rapport- les nanomatériaux .institut universitaire de technologie LORIENT . Département Hygiène Sécurité Environnement Année 2009/2010
- [15] Aída Maria Ponce Del Castillo Les nanomatériaux sur le lieu de travail Quels enjeux pour la santé des travailleurs , Institut syndical européen . 2013 ISBN 978-2-87452-287-1
- [16] Myriam Ricaud et Olivier Witchger Les nanomatériaux, institut national de recherche et de sécurité (INRS) France,. ED6050 septembre 2012

Lise des figures

Figure1 : Biface en silex. Paléolithique moyen.	4
Figure2 : Outils dits prismatiques en silex ou en grès, Mésolithique moyen	7
Figure3 : Polissoir de la Remise	7
figure4 : Meule du Néolithique.	8
Figure5 : Racloir à encoches en silex. Néolithique final	8
Figure6 : Haches polies en silex, Néolithique moyen et récent	9
Figure7 : Pointe de flèche tranchante et pointes de flèches perçantes à pédoncules et ailerons en silex. Néolithique final.	9
Figure8 : l'échelle historique de l'âge des métaux -1-	11
Figure9 : l'échelle historique de l'âge des métaux -2-	11
Figure10 : interaction présidant à la réalisation d'un objet fini.	12
Figure11 : changement d'état de la matière en fonction de température	14
Figure12 : variation des états physiques en fonction de la pression et de la température	14
Figure13 : Fibre de verre	31
Figure14 : Fibre de carbone	32
Figure15 : fibre d'aramide	32
Figure16 : l'échelle nanométrique	34
Figure 17 : Les nanotubes de carbone	43
Figure18 : Les points quantiques (Quantum Dot)	44

Figure19 : structure d'un dendrimère	44
Figure20 : cycle des nanomatériaux de la production à l'exposition des personnes.	45
Figure21 : voies de pénétration des nanomatériaux	47
Figure22: principaux facteurs favorisant une explosion ou un incendie.	48

Liste des tableaux

Tableau1 : les outils des différentes périodes de la préhistoire.	3
Tableau2 : quelques armes et outils du paléolithique	5
Tableau3 : méthode de fabrication des outils	6
Tableau4 : les armes et les outils néolithique	10
Tableau5 : Comparaison des caractéristiques admissibles (états limites)	22
Tableau6 : Composition des verres	26
Tableau7 : Caractéristiques moyennes des fibres et renforts	38
Tableau 8 : les principaux secteurs utilisant les nanomatériaux et exemple.	39

Sommaire

Introduction générale	1
CHAPITRE I : Historique	2
1- un peu d'histoire	2
2- Qu'est-ce la préhistoire	3
3- Périodes de la préhistoire	4
3-a - Le Paléolithique	4
3-a-1- Les armes et outils de paléolithiques	5
3-a-2 – Méthode de fabrication	6
3-b- Le mésolithique	7
3-c- Le néolithique	7
3-c-1- Les armes et les outils	8
3-d- L'âge des métaux	11
CHAPITRE II Les classes des matériaux	
1- Qu'est-ce qu'un matériau ?	12
2- Définition	12
3- Propriété	12
4- Les grandes classes des matériaux	15
4-1- Matériaux métalliques	15
4-2- Matériaux organiques	15
4-3- Matériaux minéraux	15
4-4- Matériaux composites	15

5- Les propriétés d'usage	15
6- Les principes des propriétés des grandes classes des matériaux	16
7- Exemples de matériaux	18
7-1- Le bois	18
7-1-1 – Le bois matériaux de toujours	18
7-1-2– Le bois matériaux composite naturel	19
7-1-3 – Le bois matériaux pérenne	20
7-1-4 – Le bois matériaux sur	21
7-1-5– Le bois matériaux performant	21
7-1-6- Le bois matériaux écologique	22
7-2- Le verre	24
7-2-1- Définition	24
7-2-2- Le verre et l'état vitreux	24
7-2-3- Elaboration du verre	25
7-2-4- Procédé de fabrication	26
7-2-5- Propriétés	28
7-2-6- Utilisations	30
7-3- Les renforts	31
7-3-1- Fibre de verre	31
7-3-1- Fibre de carbone	32
7-3-1- Fibre d'aramide	32
7-3-1- Fibre de bore	32
7-3-1- Fibre de silice	32
7-3-1- Fibre de polyéthylène de haut module	33
CHAPITRE III Les nanomatériaux	34
1- Introduction	34
2- Définition	35
3- Fabrication	35
4- Exemples d'applications	36
5- Utilisations	38
6- Quelques exemples de nanomatériaux et l'application associées	40
6-1- Dioxyde de silice SiO ₂	40
6-2- Nanoargent	41
6-3- Dioxyde de titan	42

6-4- Les nanotubes de carbone	43
6-5- Les points quantiques	43
6-6- Les dendrimères	44
7- Les risques liés à l'utilisation de nanomatériaux	45
7-1- Polémiques autour des nanomatériaux	45
7-2- Les nanomatériaux dans notre environnement	45
7-3- Les impacts sur l'homme	46
7-3-1- Danger pour la santé	46
7-3-2- Danger pour la sécurité	48
7-4- Les impacts sur l'environnement	49
7-5- Autre risques	49
Conclusion générale	50
Bibliographie	51
Liste des figures	52
Liste des tableaux	54