

CHAPITRE I : NOTIONS FONDAMENTALES SUR LES POLYMÈRES

I.1. Historique

Les débuts de la production industrielle de pièces en matière plastique remontent au milieu du XIX^e siècle avec la fabrication d'articles de mode à base de cellulose et de caséine. Jusqu'au milieu des années 1920, d'importantes découvertes ont contribué au développement des matières plastiques. Avec l'invention de la première résine synthétique, la bakélite, Baekeland posa la première pierre dans le domaine de la production en grande série de pièces en matière thermodurcissable.

A cette époque, ces matières étaient essentiellement connues pour leur intérêt en électrotechnique. Un développement remarquable, surtout pour les thermoplastiques, a été observé à partir de 1926 avec les travaux du chimiste Allemand Staudinger.

Celui-ci mit en évidence, lors de ses investigations, que les matières plastiques sont effectivement formées de longues chaînes moléculaires, appelées macromolécules. Ce concept constitue encore aujourd'hui la base scientifique de l'étude systématique des matières plastiques. Une nouvelle impulsion importante pour le développement des matières plastiques survient à partir du milieu des années 1950 avec la conversion d'une matière première, le charbon, en dérivés pétrochimiques. On obtient, à partir des sous produits, des fractions légères, dont l'éthylène. Les principaux thermoplastiques dérivés sont le polypropylène (PP), le polyéthylène (PE), le polystyrène (PS) et le poly chlorure de vinyle (PVC). Ces matières ont pu être produites plus économiquement à partir de cette découverte [1]. Dans le tableau 1 sont sélectionnées quelques dates importantes qui ont jalonné la progression d'un domaine en pleine expansion beaucoup parmi elles correspondant à la découverte de nouveaux matériaux suivie de leur développement [2].

Tableau 1: Grandes dates de l'histoire de polymères

- 1838:** *A.PAYEN réussit à extraire du bois un composé de formule (C₆H₁₀O₅) auquel il donne le nom de cellulose.*
- 1844:** *C.GOODYEAR met au point la vulcanisation du caoutchouc naturel.*
- 1846:** *C.SCHONBEIN obtient la nitrocellulose, premier polymère « artificiel » par action d'un mélange sulfo-nitrique sur la cellulose.*
- 1866:** *M.BERTHLOT découvre que le « styrolène », chauffé à 200°C pendant quelques heures, se transforme en un polymère résineux.*
- 1883:** *H. de CHARDONNET obtient « une soie artificielle » par felling d'un collodion à base de nitrocellulose.*
- 1907:** *A.HAFMANN réalise les premiers caoutchoucs synthétiques par polymérisation de diènes conjugués.*
- 1910:** *L.BAEKELAND met au point le premier procédé industriel de production d'un polymère synthétique, les polymères formo- phénoliques sont produits sous le nom de "Bakélite".*
- 1919:** *H.Staudurger introduit la notion de macromolécule puis réalise la polymérisation de nombreux monomères éthyléniques. Il peut être considéré comme le père de la science macromoléculaire.*
- 1925:** *T.SVEDBERG apporte la preuve de l'existence des macromolécules en mesurant leur masse molaire par ultracentrifugation.*
- 1928:** *K.MEYER et H.MARK relie la structure chimique à la structure cristallographique des polymères.*
- 1933:** *E.FAWCETT et R.GIBSON ingénieurs de ICI (Royaume-Uni) réalisent la polymérisation radicalaire de l'éthylène sous haute pression.*
- 1938:** *W.CAROTHERS (du pont de Nemours) et son équipe préparent les premiers polyamides synthétiques (connus sous le nom de « nylon »).*
- 1942:** *P.FLORY et M.HUGGINS proposent une théorie des solutions macromoléculaires.*
- 1943:** *O.BAYER synthétise les premiers polyuréthanes.*
- 1947:** *T.ALFREY et C.PRICE proposent la théorie de la copolymérisation en chaîne.*

- 1953:** *K.ZEIGLER découvre la polymérisation de l'éthylène sous basse pression.*
- 1954:** *G.NATTA obtient et identifie le polypropène isotactique.*
- 1955:** *M.WILLIAMS, R.LANDEL et J.FERRY proposent une relation entre le temps relaxations des chaînes et la températures de transition vitreuse.*
- 1956:** *M.SZWARC établit les principes des polymérisations « vivantes » à partir de travaux sur la polymérisation anionique du styrène.*
- 1957:** *A.KELLER obtient et caractérise les premiers monocristaux macromoléculaires.*
- 1959:** *J.MOORE met au point la chromatographie d'exclusion stérique.*
- 1960:** *Découverte des élastomères thermoplastiques et mises en évidence des morphologies correspondantes.*
- 1974:** *Développement des polyamides aromatiques par la ferme du pont de Nemours.*
- 1980:** *W.KAMINSKY et H.SINN découvrent l'effet des aluminoxanes, la polymérisation des oléfines amorcée par les métallocènes.*
- 1982:** *Une équipe de Du pont de Nemours dirigée par O.WEBSTER découvre la polymérisation par transfert de groupe des monomères acrylique et donne le temps à une multitude de travaux de recherche sur le contrôle de la polymérisation de ces monomères.*
- 1982:** *T.OTSU introduit la notion de contrôle des polymérisations radicalaires, cette notion sera appliquée par ERJZZARDO et D.SOLOMON (1985) puis par M.GEORGE (1992) à la polymérisation contrôlée du styrène.*
- 1986:** *D.TOMALLIA réalise la synthèse des premiers dendrimères.*
- 1992:** *D.TIRREL synthétise le premier polymère parfaitement iso moléculaire par ingénierie génétique.*
- 1994:** *M.SAWAMOTO et K.MATYJA SZEWESKJ mettent au pont la polymérisation radicalaire contrôlée par transfert d'atome.*
- 2000:** *Après plus de vingt années de travaux sur les polymères conducteurs intrinsèques, H.SHIRASKAWA . AJ. HEEGER A.G.MCDIARMID sont récompensés par prix Nobel de chimie.*

I.2. Définition du polymère

Les polymères sont des macromolécules constituées par l'enchaînement d'un grand nombre de molécules de taille beaucoup plus petite. Les petites molécules qui se combinent les unes aux autres pour former les molécules de polymères sont appelées monomères et les réactions par lesquelles elles se combinent sont appelées polymérisations [3].

Ce processus peut être schématisé comme suit:



Où M est la molécule de monomère, M_n est la molécule de polymère, n le nombre de motifs monomères de la macromolécule (le degré de polymérisation) [4].

Le terme polymère est plutôt réservé pour définir le matériau obtenu de manière naturelle ou par synthèse organique.

Le terme plastique souligne plus fortement le caractère de matériau de synthèse fini (à partir duquel des pièces sont produites selon des technologies spécifiques), il définit moins la structure du matériau et les réactions requises pour son élaboration.

L'appellation matériau polymère est une combinaison des définitions d'un plastique et d'un polymère [1].

I.3. Classification des polymères

Il existe plusieurs manières de classer les polymères selon les propriétés retenues pour les caractériser, nous indiquons ci-après les classifications les plus courantes.

I.3.1. Selon la nature chimique [5] :

I.3.1.1. Polymères minéraux : sont constitués par des chaînes renfermant un seul corps simple comme le diamant, le graphite, le phosphore et le soufre ou par des chaînes renfermant plusieurs hétéronomes comme les silicates, les acides poly phosphoriques et les chlorures de poly phosphonitriles.

I.3.1.2. Polymères organiques: c'est la classe la plus riche, ils constituent presque la totalité des polymères d'utilisation courante. Les principaux polymères organiques de synthèses sont: polyoléfines, les polyvinyles, les polydiènes, les polyamides, les polyesters et les polyacryliques.

I.3.1.3. Polymères mixtes: sont doués de propriétés intéressantes dont une bonne résistance thermique (300-350 C°). L'hétéroatome peut être soit dans la chaîne principale soit dans les motifs latéraux.

I.3.2. Selon la structure de chaînes [6] :

I.3.2.1. Polymères linéaires et monodimensionnels: enchaînement dans une seule direction de l'espace.

I.3.2.2. Polymères bidimensionnels: enchaînement s'étendant dans deux directions de l'espace **Ex.:** *Le Graphite*.

I.3.2.3. Polymères tridimensionnels: il est possible de transformer des molécules linéaires en molécules 3D par pontage. Se sont des réseaux à trois dimensions, ils représentent environ 30% des polymères industriels, il est possible de transformer des molécules linéaires en molécules 3D par pontage.

I.3.3. Selon leur origine [6] :

I.3.3.1. Polymères naturels: existent en l'état dans la nature comme ils sont très nombreux, il est courant de les subdiviser suivant leur provenance végétale, animale ou minérale.

I.3.3.2. Polymères artificiels (ou régénérés): bien que le constituant de base soit d'origine naturelle, ils résultent d'une transformation chimique des fonctions portées par les unités monomères, **par exemple:** les dérivés cellulosiques dont la molécule de base est la cellulose.

I.3.3.3. Polymères synthétiques: les molécules monomères qui permettent de les obtenir n'existent pas dans la nature, cependant on peut remarquer que les structures réalisées par synthèse sont souvent proche de celles des polymères naturels.

I.3.4. Selon le comportement thermique [7] :

I.3.4.1. Thermoplastique: soumis à une élévation de température modérée, les polymères deviennent mous mais sans modification des liaisons chimiques.

I.3.4.2 Thermodurcissable: les températures élevées provoquent des réactions de pontage et réticulation irréversibles qui conduisent à des réseaux rigides tridimensionnels.

I.3.4.3 Thermoélastiques: l'objectif recherché actuellement est la mise au point de polymères capable de conserver l'élasticité à des températures modérément élevées afin de palier à la limitation thermique qui est le point faible des élastiques actuels.

I.3.5. Selon les usages technologiques [8] :

I.3.5.1. Fibres synthétiques: on peut citer le nylon, le tergal, le coton et la soie.

I.3.5.2. Plastomères: ce sont les plastiques au sens large regroupant les thermodurcissables et les thermoplastiques.

I.3.5.3. Elastomères: sont par définition des polymères ayant des propriétés élastiques réversibles (allongement réversible important).

Exemple: *caoutchouc naturel, polybutadiène et polyisoprène.*

I.3.6. Selon l'importance économique:

Pour les polymères comme tout produit industriel, il existe une corrélation entre le tonnage et le prix. Ceci permet de distinguer trois grandes catégories de polymères commerciaux.

- **Les polymères de grande diffusion:** dont le volume des ventes et de productions est élevé et dont le prix est faible **Exemple:** *le Polyéthylène (PE), Polypropylène (PP), Polystyrène (PS), Polychlorure de vinyle (PVC).*
- **Les polymères à haute performance:** dont le volume des ventes est le plus faible et les prix les plus élevés.
- **Les polymères techniques:** dont le volume et le prix sont intermédiaires entre les deux catégories précédentes **Exemple:** *polyamide.*

I.3.7. Selon l'utilisation:

Colles et adhésifs, peintures, vernis, mastics, matière plastique, caoutchoucs fibre textiles et mousses etc.

I.3.8. Selon le cycle de vie: matériaux jetables (durée de vie inférieure à un an) durable (1 à 20 ans) pour infrastructure (durée de vie supérieure à 20 ans).

I.4. Architecture atomique des polymères

Les polymères qui sont constitués de macromolécules de masse moléculaire très élevée présentent un agencement plus au moins régulier de ces molécules plus difficile à décrire que celui des atomes d'un métal donc nous nous attacherons surtout à décrire l'influence de l'architecture atomique des polymères sur les propriétés des matériaux [10].

I.4.1. Polymères Amorphes:

Les polymères linéaires sont constitués de longues chaînes dont la cohésion est assurée par des liaisons faibles à chaud, ces chaînes peuvent glisser assez facilement les unes par rapport aux autres, les polymères prennent alors la forme d'un liquide plus ou moins visqueux. Au cours du refroidissement l'agitation thermique décroît, les chaînes ne peuvent pas glisser facilement, les unes par rapport aux autres, le polymère passe alors par une transition (liquide - solide - amorphe) [9].

Dans le cas du polyéthylène, on remarque que la liaison simple C-C qui existe dans le squelette de la chaîne permet à celle-ci d'effectuer assez facilement une rotation sur elle-même par contre en ce qui concerne le polychlorure de vinyle la présence d'un atome de chlore lié au squelette C-C (atome qui présente une plus grande taille que les atomes d'hydrogène) rend la chaîne moins flexible que celle du PE [9].

Il existe trois configurations stéréochimiques [9] :

La disposition atactique: où les groupes latéraux apparaissent au hasard le long de la chaîne.

La disposition isotactique: où les groupes latéraux sont situés du même côté de la chaîne.

La disposition syndiotactique: où les groupes apparaissent en alternance régulière le long de la chaîne **Figure.1.**

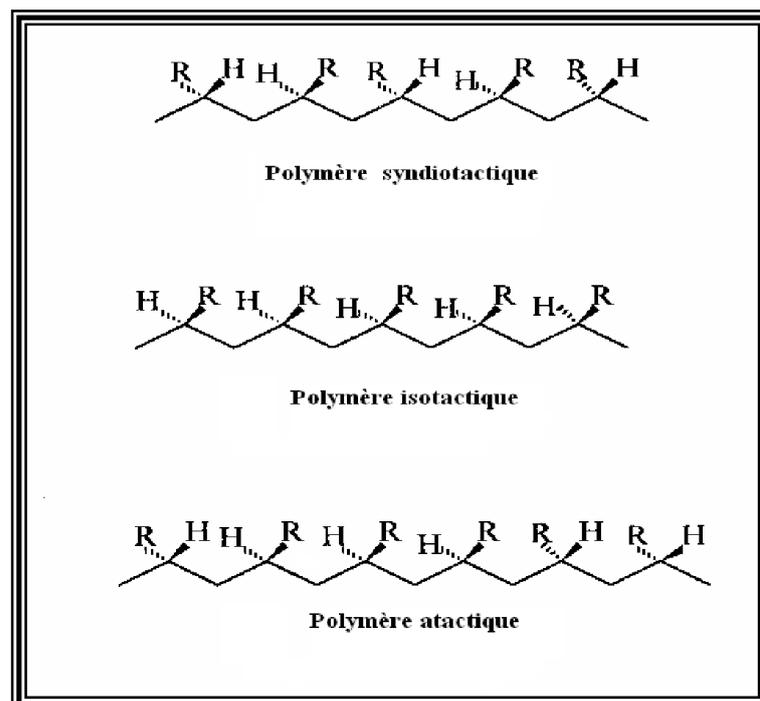


Figure.1 : La stéréochimie des polymères.

I.4.2. Polymères ramifiés:

Les copolymères peuvent être greffés autrement dit que des greffons (ou brins de chaînes) peuvent être reliés à la chaîne principale (des chaînes secondaires). Une telle ramification de la chaîne principale ne se produit pas uniquement pour les copolymères mais également pour plusieurs homopolymères **Figure. 2**.

I.4.3. Polymères réticulés:

A partir de monomères trifonctionnels ou multifonctionnels, on peut obtenir des polymères dont les chaînes forment un réseau tridimensionnel, de tels polymères sont dits réticulés. On peut également obtenir cette réticulation dans les polymères à chaînes linéaires, si on y arrive à créer des liens transversaux entre les chaînes linéaires principales, par liens transversaux, on sous entend des liaisons de forte intensité (liaisons covalentes) et non des liaisons de faible intensité (liaisons de Van-Der-Waals ou ponts d'hydrogène), le caoutchouc vulcanisé est un polymère réticulé typique, ce caoutchouc fut découvert en 1839 par *Charles Goodyear* [Figure 2].

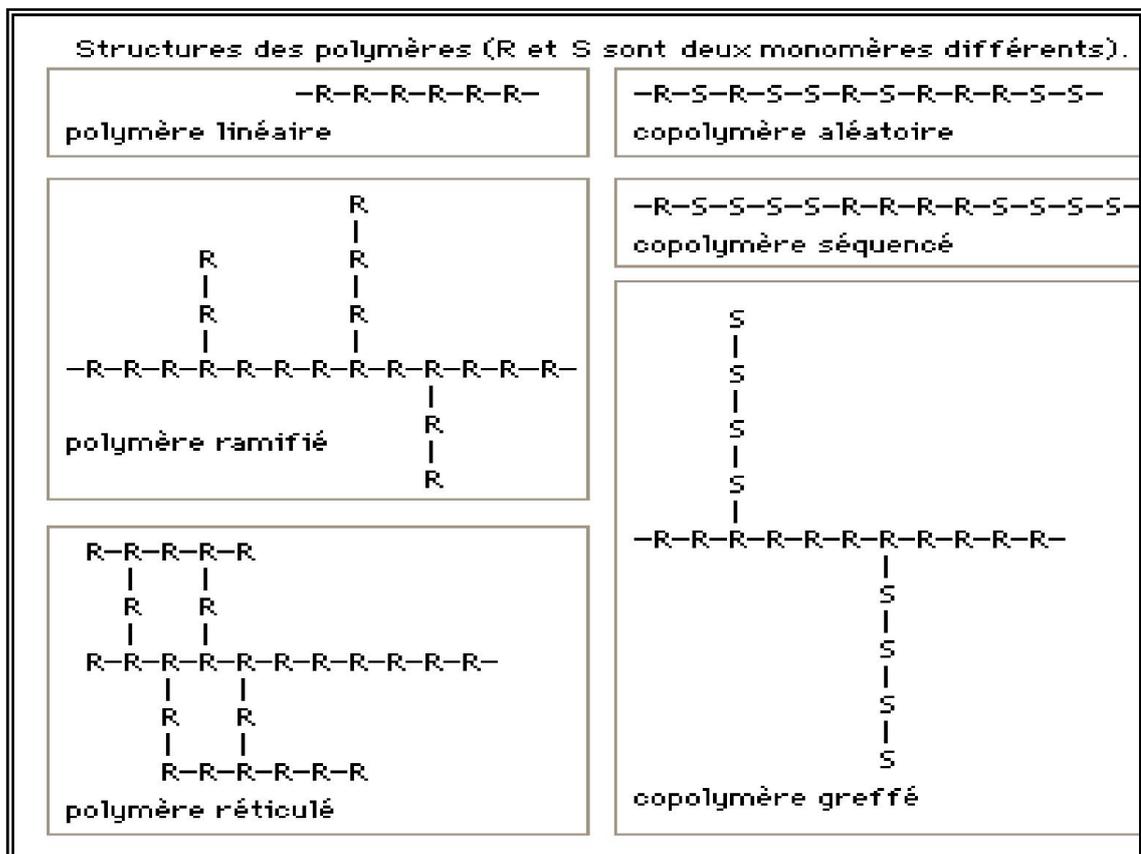


Figure.2 : Structure des polymères

I.5. Techniques de polymérisations

Les réactions de synthèses industrielles des polymères sont effectuées selon cinq techniques principales: polymérisation en masse, en solution, en suspension, en émulsion et enfin en phase gazeuse.

I.5.1. Polymérisation en masse:

C'est le plus simple des cinq procédés car il utilise uniquement du monomère pur, sauf si l'addition d'un catalyseur s'avère nécessaire (l'amorceur choisi doit être soluble dans le monomère). La réaction peut être conduite avec ou sans agitation du milieu, en phase homogène ou hétérogène suivant la solubilité ou l'insolubilité du polymère dans son propre monomère. Pour les polymérisations en chaîne, la méthode permet d'obtenir les masses molaires élevées indispensables aux bonnes propriétés mécaniques, avec une pureté appropriée du produit final, mais cet avantage est quelque fois neutralisé par les difficultés de fabrication. Celles-ci sont dues au fait que les réactions de polymérisation d'addition sont normalement de nature exothermique et, avec de grandes quantités d'agents de réaction non dilués, il se pose ainsi un grave problème de dispersion de la chaleur. Pour la maîtrise du dégagement thermique et du degré de polymérisation, on effectue la réaction en deux étapes: Prépolymerisation jusqu'à 30 à 40 % de conversion, suivie d'une polymérisation finale du sirop dans un autre réacteur adapté au contrôle thermique de la réaction. A titre d'exemple, la méthode est employée pour la synthèse radicalaire du polystyrène (le milieu demeure homogène) [10] et, la polymérisation du chlorure de vinyle, par contre, en milieu hétérogène. Le système prépolymérisé sous pression (température d'ébullition du monomère est égale à 14 °C à la pression atmosphérique) jusqu'à 10 à 12 % de conversion, est une suspension de polymère insoluble dans le monomère. Les particules ont une granulométrie déterminée par la vitesse d'agitation dans le prépolymériseur et servent de semences pour la deuxième étape de la polymérisation effectuée en autoclave, sous agitation lente, jusqu'à 75 % de conversion. Le PVC pulvérulent est ensuite séparé de son monomère par simple dégazage [11].

I.5.2. Polymérisation en solution:

La polymérisation en solution est effectuée en présence d'un solvant du polymère, dont le rôle essentiel est de permettre un contrôle de dégagement thermique lors de la réaction. Plusieurs cas devront être distingués suivant que le polymère et l'amorceur sont, simultanément ou non, solubles ou insolubles dans le milieu réactionnel. Le polymère obtenu est moins pur que celui obtenu par polymérisation en masse, mais souvent on a recours au procédé en solution pour les applications dans lesquelles le polymère doit être obtenu sous forme de solution, car l'élimination des dernières traces de solvants est plutôt difficile et coûteuse.

I.5.3. Polymérisation en suspension:

Dans ce type de polymérisation, le monomère est insoluble dans un milieu dispersant, l'eau en général. L'amorceur n'est soluble que dans le monomère et chaque gouttelette de la suspension peut être considérée comme un système isolé de polymérisation en masse. On évite la coalescence des gouttelettes ($10\text{-}10^3 \mu\text{m}$ de diamètre) en cours de polymérisation en utilisant un agent de suspension, et en maintenant une agitation appropriée. Enfin de réaction, (à taux de conversion élevé) la suspension est levée et les particules de polymères (0,1 à 1 mm de diamètre) sont séparées et séchées à titre d'exemple, ce procédé est industriellement le plus répandu dans la polymérisation radicalaire du PVC.

I.5.4. Polymérisation en émulsion :

Comme la polymérisation en suspension, elle se fait en milieu aqueux - mais selon un mécanisme différent – dans un réacteur vertical à forte agitation. Le catalyseur, soluble dans l'eau, se concentre dans les micelles d'un tensioactif. Le monomère est ajouté progressivement et forme des goulettes. Grâce à sa faible solubilité, ce monomère migre vers les «micelles» renfermant le catalyseur et y polymérise. On obtient ainsi une émulsion de particules extrêmement fines (de l'ordre du micromètre) qu'il est impossible de filtrer, cette émulsion est pulvérisée et séchée par un courant d'air chaud. Le polymère garde le tensioactif, qui sert ensuite de stabilisant au polymère.

Ce procédé permet d'avoir une vitesse et un degré de polymérisation élevés, ce qui n'est pas possible avec les autres procédés. En fin de réaction, le polymère se présente sous forme d'une émulsion stable de fines particules qui peut être utilisée telle quelle [12,13].

I.5.5. Polymérisation en phase gazeuse [14] :

Ce type de réaction peut être rattaché au procédé de polymérisation en masse, en milieu hétérogène. Le monomère est introduit en phase gazeuse sur un catalyseur solide finement divisé, suffisamment efficace et donc en concentration suffisamment faible pour qu'il ne soit pas nécessaire de l'extraire ultérieurement du polymère. La régulation de dégagement thermique dû à la polymérisation et le contact étroit entre le gaz et la particule solide de polymère en croissance. Le catalyseur solide est introduit en continu et le monomère résiduel est recyclé, tandis que le polymère soutiré sous forme de poudre, est utilisé directement, après dégazage. Ce type de polymérisation, mis en œuvre pour les oléfines légères (éthylène, propylène) ne nécessite que des températures modérées (80 à 100 °C), de faible pression, et de faibles quantités de catalyseur. Pour le polypropylène, développé par BASF [15], et pour le polyéthylène haute densité, développé par Union Carbide [16].

I.6 Réaction de polymérisation

Les réactions de polymérisation se classent suivant les propriétés des polymères obtenus en matières thermoplastiques et en matières thermodurcissables. Cependant, il y a une classification supplémentaire d'après le type de réaction chimique qui se produit, à savoir l'addition ou la condensation [17].

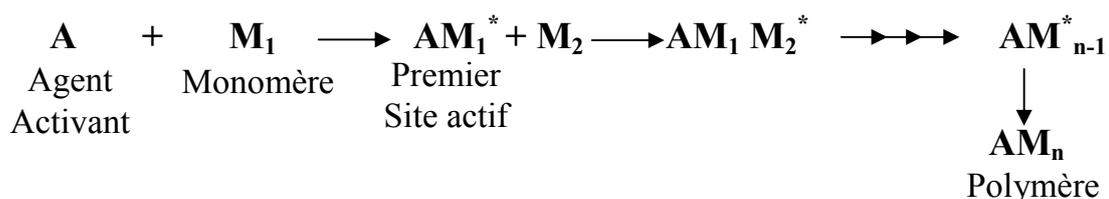
I.6.1. Polymérisation de condensation : [17]

La polycondensation se produit par interaction d'un ou de plusieurs composés avec élimination d'un corps simple tel que l'eau, l'ammoniaque ... etc.

Les exemples importants de ce type de polymérisation, comprennent les nylons (polyamides), polyesters ...

I.6.2. Polymérisation d'addition (en chaîne) :

Dans la polymérisation par croissance en chaîne, le catalyseur qui amorce la réaction provoque la formation d'un site actif, sur lequel se fixe rapidement une molécule de monomère et ainsi de suite. Le monomère réagit rapidement, toujours par la même addition à la chaîne qui s'allonge. Le processus est interrompu par une réaction de terminaison [18].



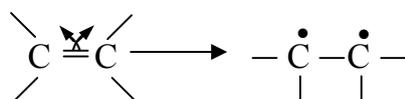
Selon la nature du centre actif qui provoque l'addition successive des motifs, on peut classer toute réaction de polymérisation en chaîne dans l'un des groupes suivants :

- *Polymérisation radicalaire.*
- *Ionique (anionique, cationique).*
- *Polymérisation par des catalyseurs métalliques.*

Les étapes de la polyaddition sont différentes d'un mécanisme à un autre.

I.6.2.1 Polymérisation radicalaire :

Le centre actif est une espèce de grande réactivité que l'on obtient généralement par rupture homolytique de la liaison π C – C d'un monomère vinylique (éthylénique).



L'ouverture de liaison doit être activée soit par un rayonnement UV, soit le plus souvent par action d'un agent activateur appelé initiateur de radicaux libres.

Comme toute réaction en chaîne la polymérisation radicalaire se déroule en trois étapes distinctes :

1.6.2.1.a/ L'initiation (l'amorçage):

La formation d'un radical libre primaire A^\bullet nécessite un apport énergétique destiné à rompre une liaison covalente de l'amorceur.

L'addition du radical libre sur le monomère donnant naissance au premier site actif (AM_1^\bullet) qui correspond au point de départ du processus de polymérisation.



1.6.2.1.b/ La propagation:

Le radical alkyle obtenu réagit avec une autre molécule de monomère donnant ainsi un nouveau radical alkyle. Il y a donc formation d'un nouveau site actif (AM_2^\bullet), la propagation de la réaction conduit à un radical polymère (AM_n^\bullet).



1.6.2.1.c/ La terminaison:

La réaction de terminaison en polymérisation radicalaire est en générale bimoléculaire, il s'agit des cas où il y a disparition des radicaux libres par paires, avec formation de liaisons covalentes [19]. La combinaison de différents radicaux s'effectue soit par couplage, soit par dismutation.

L'arrêt du processus de polymérisation peut être aussi provoqué par l'emploi d'agents inhibiteurs.

I.7 Propriétés des polymères

Les propriétés des matériaux polymères sont beaucoup plus sensibles que celles des métaux aux influences extérieures telles que la température, la dureté, l'intensité de la contrainte appliquée, les radiations UV et les agents chimiques. Leur module d'élasticité est en général inférieur de deux ordres de grandeur à celui des métaux.

Les caractéristiques de résistance peuvent différer seulement d'un ordre de grandeur. Hormis les paramètres spécifiques ou matériaux (masse molaire, taux de ramification, mobilité des chaînes, taux de réticulation,.....), et les conditions extérieures (humidité, agents chimiques, température, vitesse de sollicitation, type et intensité des contraintes appliquées) [9].

I.7.1. Propriétés physiques des polymères

Avant tout, rappelons qu'il existe une grande variété de matières plastiques, tout comme il existe un grand nombre d'alliages métalliques, une des caractéristiques physiques générales des polymères est :

La masse volumique : *La masse volumique des matières plastiques est peu élevée. La légèreté des polymères est sans aucun doute une des qualités qui a le plus largement contribué à leur diffusion. En ce qui concerne le rapport (résistance à la traction / masse volumique), certains polymères sont en fait supérieurs bien à des matériaux métalliques.*

La faible masse volumique des plastiques est due au faible poids atomique des principaux atomes de leurs chaînes (principalement l'hydrogène et le carbone) [9].

I.7.2. Propriétés mécaniques

I.7.2.1. La résistance et la contrainte :

Les grandeurs caractéristiques permettant de comparer le comportement mécanique des différents matériaux sont définies ci-dessous et illustrées sur **Figure.3** [20].

Contrainte au seuil d'écoulement " σ_y " : définie comme la contrainte en traction pour laquelle la pente de la courbe (σ - ε) s'annule pour la première fois.

Résistance en traction σ_M (ou contrainte maximale en traction) :

Elle caractérise, comme son nom l'indique la contrainte maximale supportée par l'éprouvette pendant l'essai de traction [21].

Contrainte à x% d'allongement σ_x :

Définie comme la contrainte en traction pour laquelle la courbe (σ - ε) est décalée, par rapport à la courbe initialement linéaire, d'une distance correspondante à un allongement de x % [20].

Contrainte à la rupture σ_B :

Elle est déterminée à la rupture de l'éprouvette (quand il n'y a pas de seuil d'écoulement et donc de contrainte correspondante ou qu'il n'est pas possible de déterminer la contrainte à x % d'allongement) [20].

La résistance en flexion

Elle est calculée selon des normes et pour les thermoplastiques ductiles [20].

La résistance en compression σ_{cm}

Elle est mesurée sur des petites éprouvettes d'essai, pour limiter le risque de flambage, il est important de noter que la présence d'entailles et de petites fissures est moins importante dans ce type d'essai que dans l'essai de traction, puisque ces défauts morphologiques peuvent se fermer sous l'effet de pression. Pour cette raison, la résistance en compression des matériaux polymères est généralement plus élevée que la résistance en traction.

La résistance en cisaillement τ_m

Elle peut être déterminée à partir des éprouvettes cylindriques, soumis à une sollicitation de torsion. Les déformations non homogènes des éprouvettes sont à éviter pendant l'essai.

La résistance en cisaillement " τ_m " est généralement mieux définie à partir de la résistance en traction, en utilisant le critère de déformation de " **Haber Von Mises Henky** ".

$$\tau_m = 0.58 \sigma_M$$

On peut en général appliquer le classement suivant [20] :

Résistance en cisaillement < Résistance en traction < Résistance en compression < Résistance en flexion.

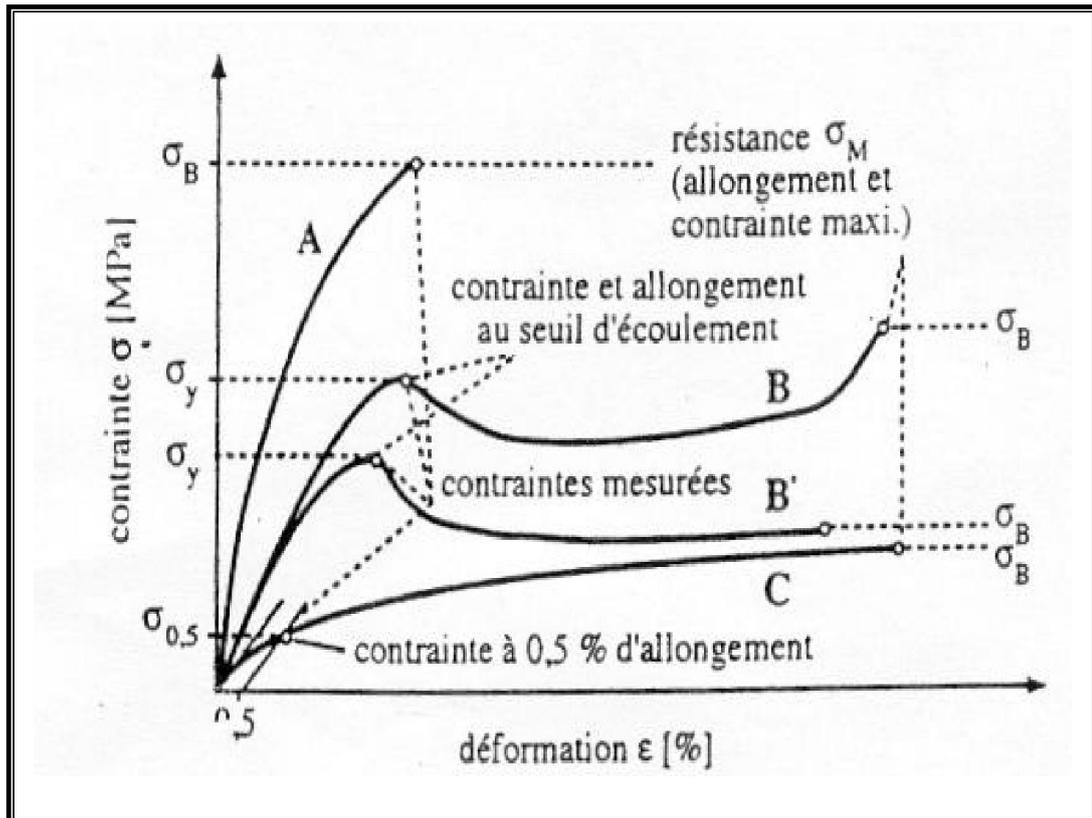


Figure 3 : *Grandeurs caractéristiques déterminées à partir des courbes Contrainte – déformation (essai de traction) pour différents types de matériaux*

A: fragiles, **B,B'**: ductiles avec seuil d'écoulement, **C:** ductile sans seuil d'écoulement

I.7.3. Propriétés thermiques

I.7.3.1. La température :

La température de transition vitreuse "**T_g**" et la température de fusion "**T_f**" sont les deux températures fondamentales nécessaires dans l'étude des matériaux polymères. La température de transition vitreuse est partiellement importante pour les polymères amorphes, notamment les thermoplastiques amorphes, pour lesquels, il n'existe aucune force de cohésion importante autre que l'enchevêtrement.

Les zones cristallines ne fondent que bien au delà de la température de transition vitreuse.

Les températures caractéristiques d'un seul et même matériau peuvent alors être classées de la façon suivante [20] :

Température de transition vitreuse < Température de cristallisation < Température de fusion < Température de décomposition thermique.

Selon la température à laquelle il est soumis, un matériau polymère peut présenter des comportements mécaniques différents. Ceci peut se produire pour les thermoplastiques semi cristallins dans un domaine même étroit de la température [20].