

# ***Les matériaux Polymériques***

## **Plan**

### **Les polymères**

Formation des polymères

- A - Unités fondamentales
- B - Polymérisation
- C - Degré de polymérisation
- D - Structure des polymères
- E - Types de polymères

Propriétés des polymères

- A - Propriétés physiques
- B - Propriétés mécaniques

Modification des propriétés des polymères

- A - Bonification
- B - Dégradation

<p>Des Matériaux <i>ch.12 et sections</i> 3.3.4, 4.2.6, 6.2, 8.5</p>
--

# *Les polymères*

## **Introduction**

### \* *Généralités*

classe de matériaux très récente

\* *créés il y a une centaine d'années*

\* *grande expansion à partir des années 60-70*

\* *production actuelle de plus de 100 millions de tonnes par an*

\* *utilisation dans presque tous les domaines*  
→ *ère des matières plastiques*

### \* *Types de polymères*

- produits de synthèse (macromolécules)

classe de polymères

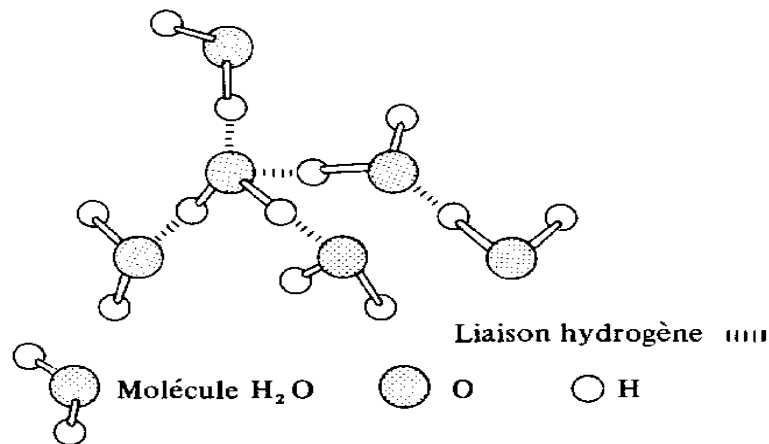
- *thermoplastiques*
- *thermodurcissables*
- *élastomères*

## \* Généralités

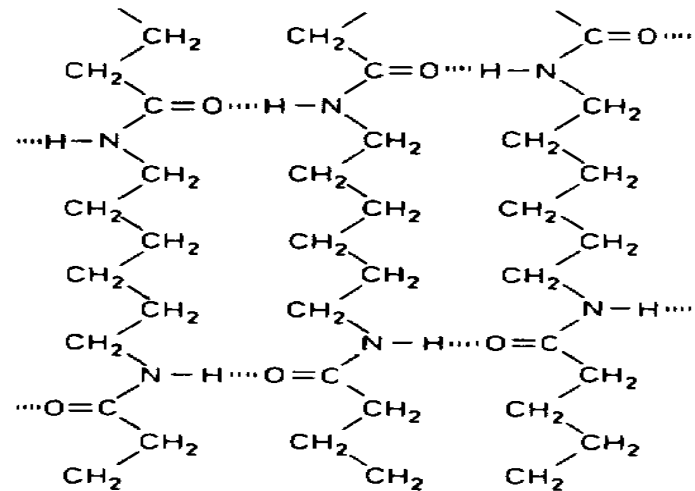
- chaînes d'atomes (liaisons covalentes) reliées entre elles par des liaisons faibles (Van der Waals → dipôle électrique)
- limite du modèle électrostatique

**\* le module d'élasticité des polymères n'est pas relié directement à l'énergie de cohésion du matériau**

**\* il résulte plutôt des interactions secondaires entre les macromolécules de chacune des chaînes → faible rigidité**



*rappel : liaisons Van der Waals*



*liaisons VdW entre des chaînes de polyamide 6-6 (nylon)*

# \* *Généralités*

## - propriétés mécaniques

\* *courbes de traction*

\* *rigidité : faible*

\* *ductilité : n'est pas causée par le déplacement des dislocations*

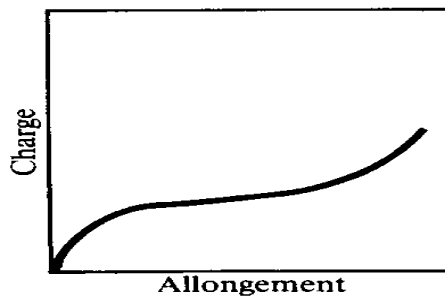
\* *transition ductile/fragile sur de faibles écarts de température*

\* *fluage et relaxation aux températures normales d'utilisation*

## - autres propriétés

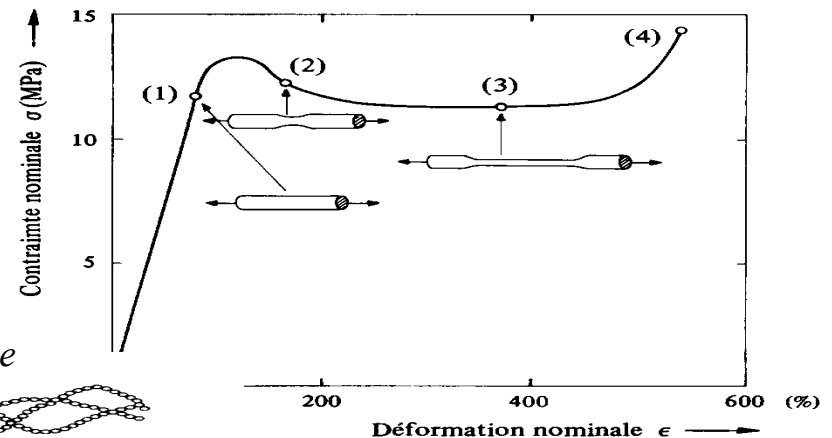
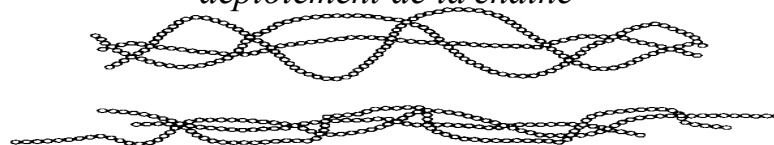
\* *isolants thermiques et électriques*

\* *non miscibles à l'état solide*



*élastomères*

*déploiement de la chaîne*



*thermoplastiques*

# Formation des polymères

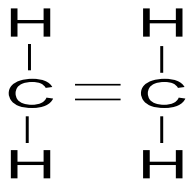
*A - Unités fondamentales*

## \* *Polymères*

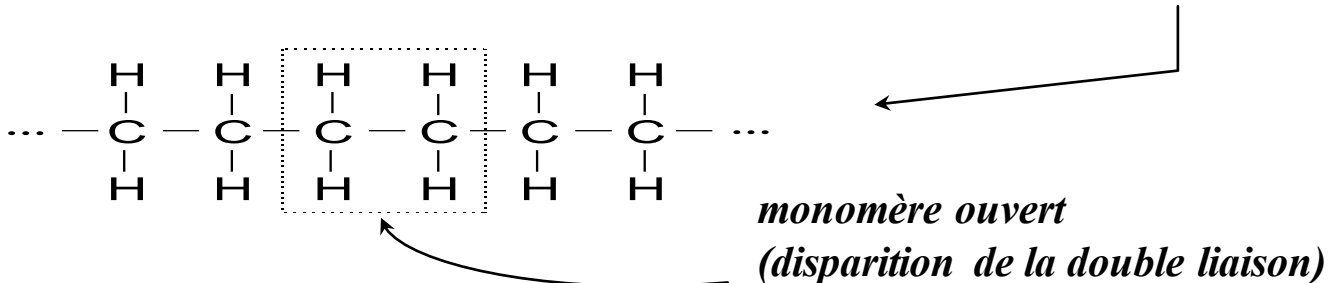
- macromolécules organiques formées par la répétition d'unités élémentaires appelés monomères

## \* *Monomères*- exemples

\* *polyéthylène : le monomère est C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> (éthylène)*



- *le carbone a 4 é- de valence*
- *à l'état monomère, les atomes de C établissent une double liaison entre eux*
- *la polymérisation consistera à ouvrir la liaison double pour former une chaîne de monomères*

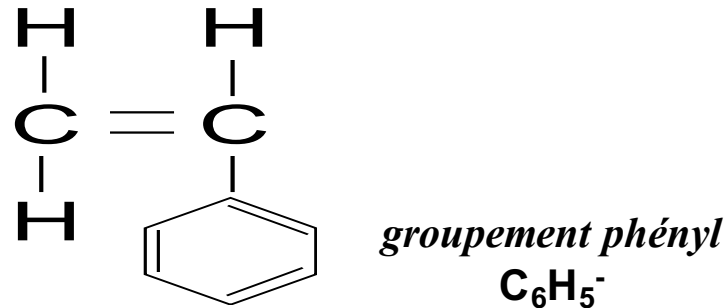


# Formation des polymères

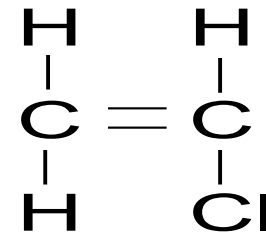
## *A - Unités fondamentales*

### **Monomères - exemples (suite)**

#### **\* polystyrène (styrène)**



#### **\* polychlorure de vinyle (chlorure de vinyle)** **PVC**



#### **quantité de monomères**

- entre  $10^3$  et  $10^6$

- la longueur de la chaîne peut atteindre 10 mm

# Composition, structure et point de fusion de quelques unités monomères

<i>Name</i>	<i>Composition</i>	<i>Structure</i>	<i>Boiling Point (°C)</i>
Methane	CH <sub>4</sub>	$\begin{array}{c} \text{H} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{H} \\   \\ \text{H} \end{array}$	-164
Ethane	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\   \quad   \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{H} \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$	-88.6
Propane	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \\   \quad   \quad   \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{H} \\   \quad   \quad   \\ \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \end{array}$	-42.1
Butane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>		-0.5
Pentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>		36.1
Hexane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>		69.0

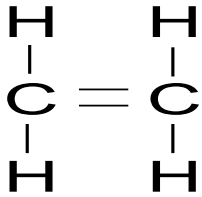
## *B - Polymérisation*

### \* *Polymérisation par addition*

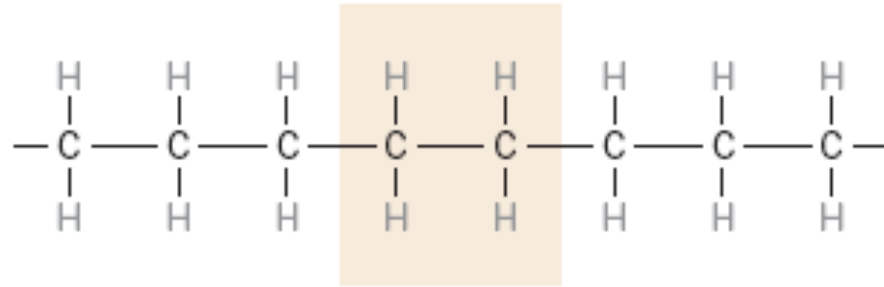
réaction de monomères entre eux pour former une chaîne de polymère

ex.: **polyéthylène**

$n$  ( $C_2H_4$ )



énergie d'activation



dan l'espace 3 dimensions

- deux conditions sont nécessaires

\* *ouvrir la double liaison C=C*

→ *fournir une énergie d'activation*

\* *démarrer et terminer la chaîne*

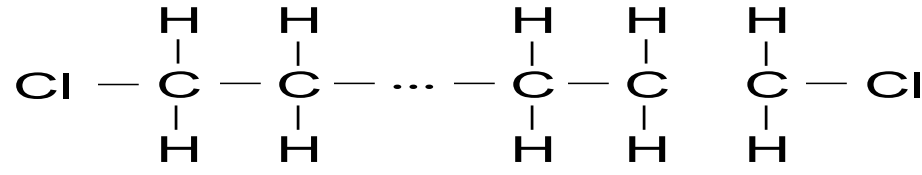
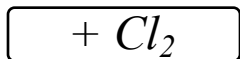
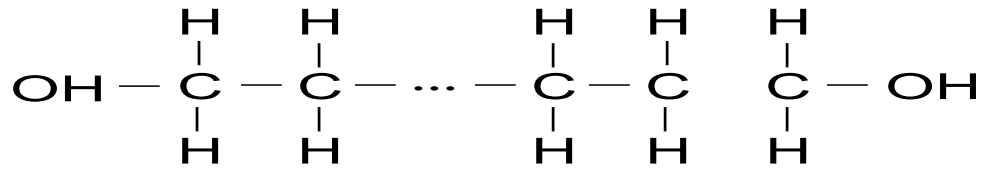
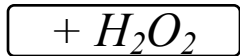
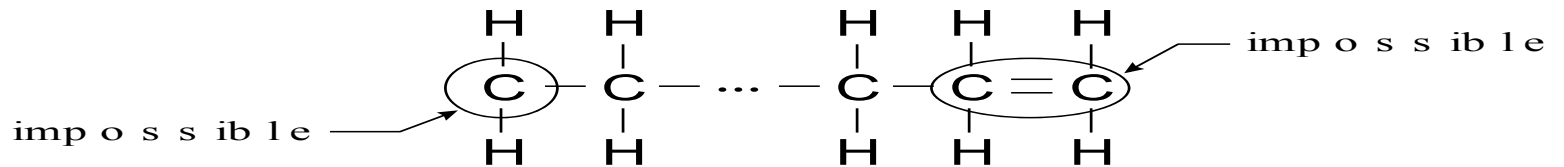


\* *Polymérisation par addition (suite)*

- rôle des initiateurs : réactifs chimiques ajoutés aux monomères

\* *permettent d'ouvrir la double liaison*

\* *radicaux qui se placent en tête ou en fin de chaîne*



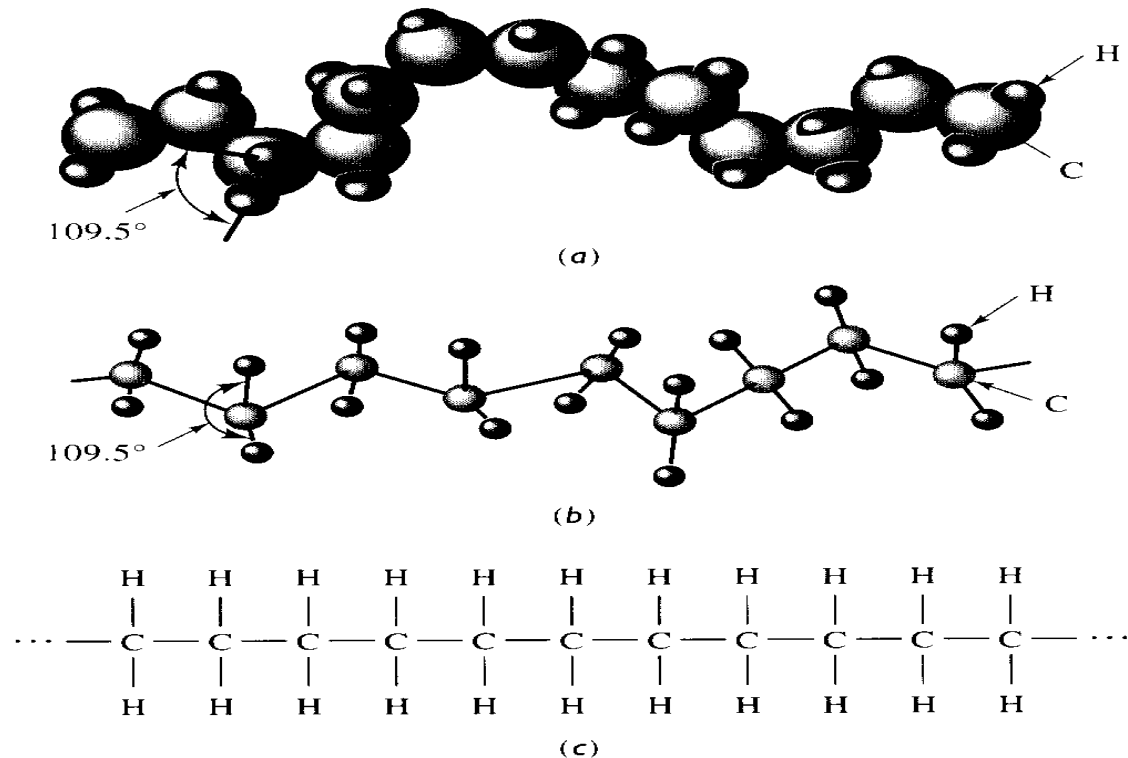
# \* Polymérisation par addition (suite)

- représentation de la structure du polyéthylène

(a) modèle solide tridimensionnel

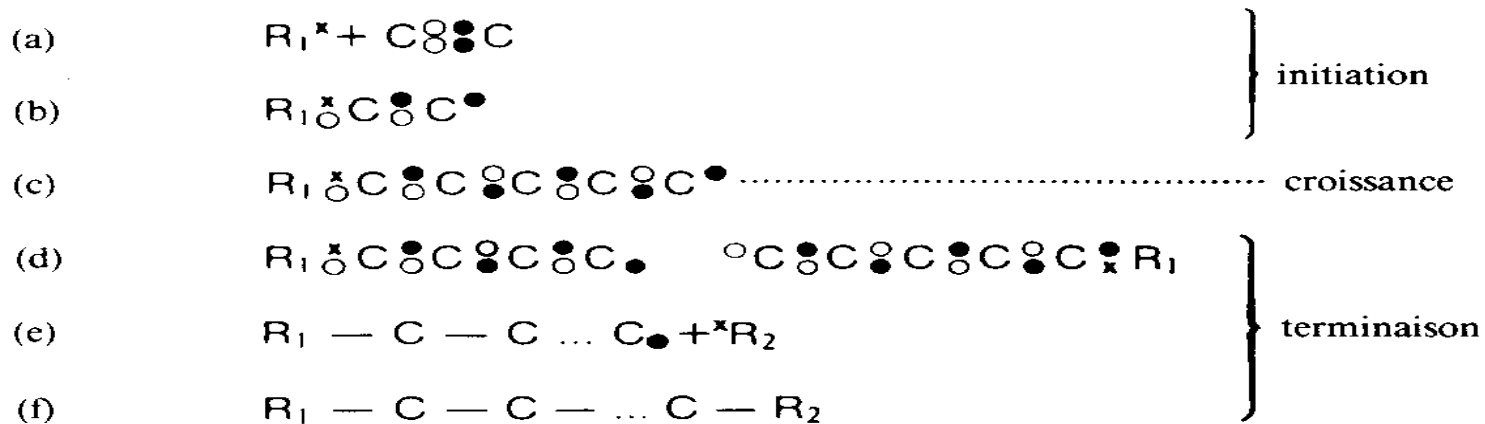
(b) modèle «espace» tridimensionnel

(c) modèle simple bidimensionnel



\* *Polymérisation par addition (suite)*

- cinétique de la polymérisation par addition



- Remarques



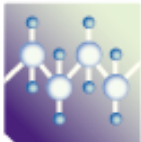

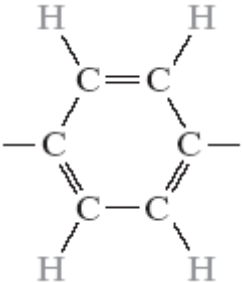
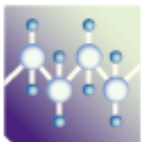
\* *la réaction n'engendre aucun sous-produit*

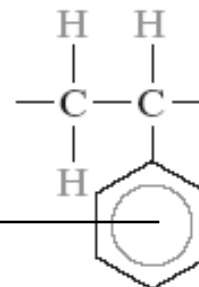
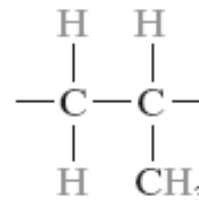
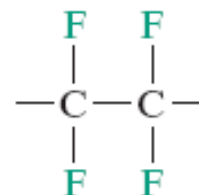
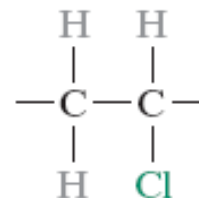
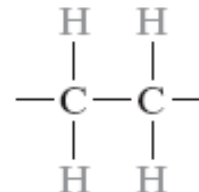
\* *les masses moléculaires des chaînes sont différentes (chaînes de différentes longueurs)*

\* *les vitesses de réaction sont rapides*

\* *copolymérisation : lorsque les monomères qui se lient entre eux ne sont pas de même nature*

# Quelques polymères et leurs unités de monomères

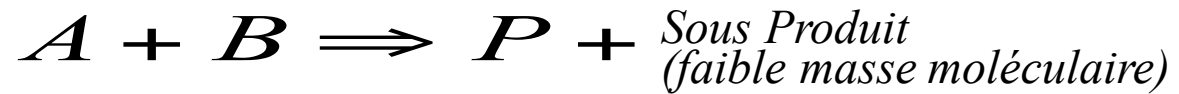
<i>Polymer</i>	<i>Repeat Unit</i>
	Polyethylene (PE)
	Poly(vinyl chloride) (PVC)
	Polytetrafluoroethylene (PTFE)
	Polypropylene (PP)
	
	Polystyrene (PS)



## \* Polymérisation par condensation

- réaction de deux produits différents pour en former un troisième, accompagnée d'un sous-produit

- exemple : formation de la bakélite



Formaldéhyde

+

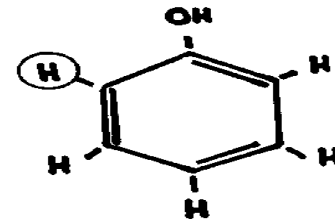
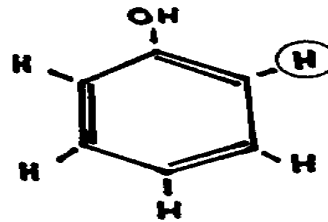
2 Phénols



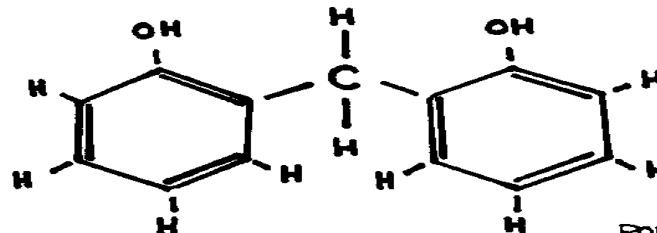
Bakélite + H<sub>2</sub>O



FORMALDÉHYDE



PHÉNOL



BAKÉLITE

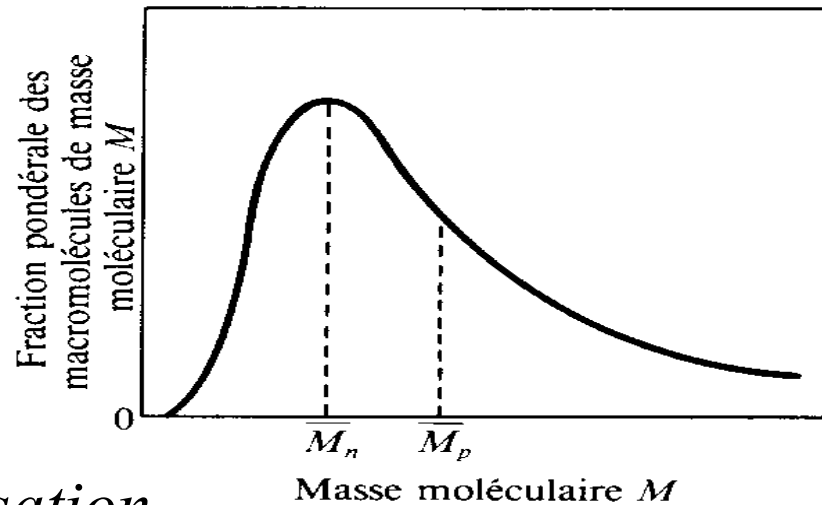


POLYFONCTIONNEL

## • *distribution de masses moléculaires*

- la polymérisation est un processus aléatoire
- *les chaînes n'ont pas la même longueur*
  - obtention de macromolécules ayant des masses moléculaires différentes

Allure générale de la distribution de masses moléculaires



## C- *Degré de polymérisation*

- Le degré moyen de polymérisation correspond au nombre moyen de monomères par macromolécules

masse moléculaire moyenne en nombre

$$\overline{M}_n = \frac{\sum n_i M_i}{\sum n_i} \quad \text{où } n_i \text{ est la fraction molaire de macromolécules (nombre de molécules) qui ont une masse molaire } M_i$$

## \* *Degré de polymérisation (suite)*

- masse moléculaire moyenne en poids

$$\overline{M}_p = \frac{\sum w_i M_i}{\sum w_i} \quad \text{où } w_i \text{ est la fraction de macromolécules (en masse) qui ont une masse molaire } M_i$$

- indice d'hétérogénéité

→ *mesure de la dispersion des masses moléculaires*

$$H = \frac{\overline{M}_p}{\overline{M}_n} \quad \begin{array}{l} H=1 \text{ si toutes les macromolécules ont la même} \\ \text{masse} \\ \text{(même nombre de monomères)} \end{array}$$

- degré moyen de polymérisation

→ *nombre moyen de monomères présents dans les macromolécules*

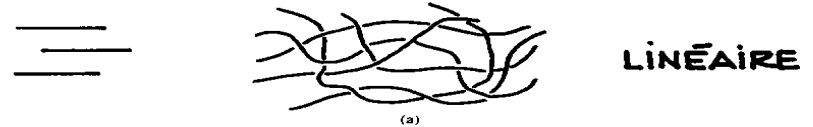
$$\bar{x} = \frac{\overline{M}_n}{M_0} \quad \text{où } M_0 \text{ est la masse moléculaire du monomère}$$

# D - Structure des polymères

## \* Les chaînes de polymères

### linéaires :

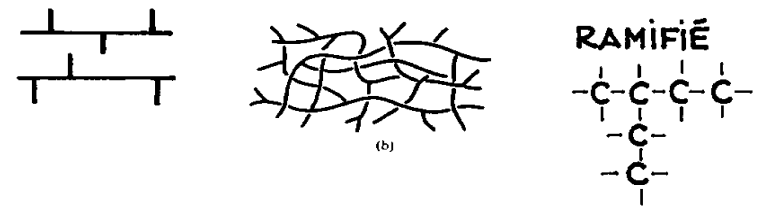
*liaisons de VdW entre les chaînes,  
les chaînes sont enchevêtrées*



Ex. polyéthylène, polystyrène, nylon

### ramifiées

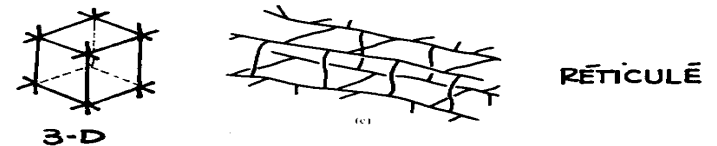
- *branchements sur une chaîne linéaire*
- *liaisons de VdW entre les chaînes*
- *augmentation de l'encombrement*



Ex. polyéthylène à faible densité (LDPE)

### • réticulées

- *réseau tridimensionnel de chaînes liées chimiquement entre elles*
- *le pontage entre les chaînes se fait avec des liaisons solides (covalentes)*



Ex. epoxydes, phenol-formaldehydes



# \* Les chaînes de polymères

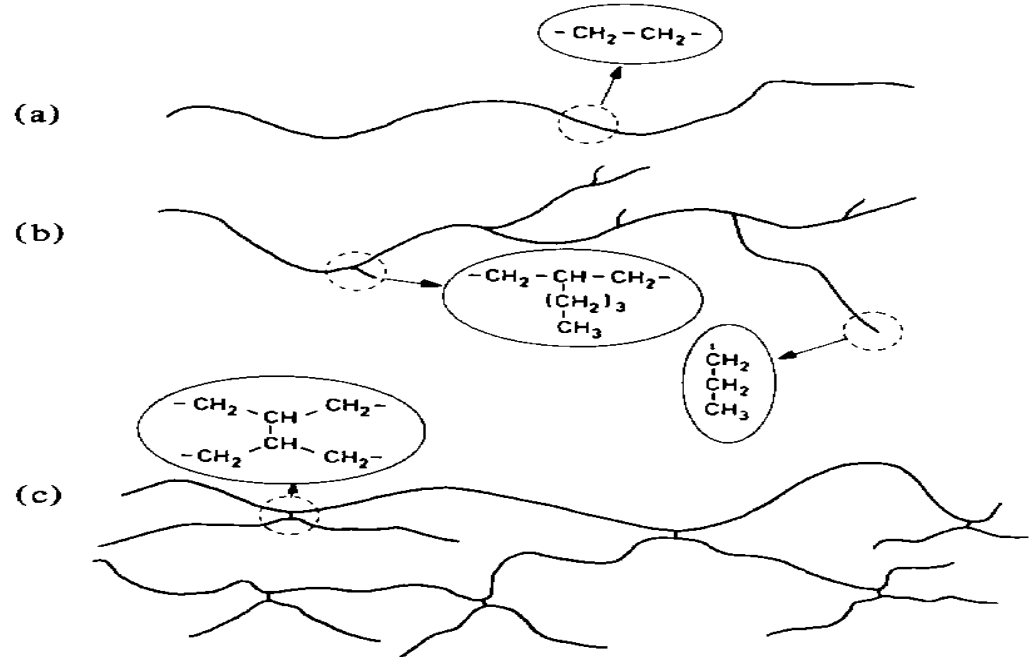
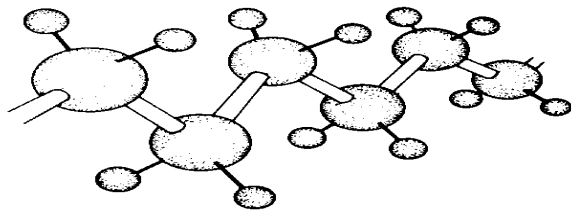
- exemple : les polyéthylènes

*chaîne linéaire*

*chaînes ramifiées*

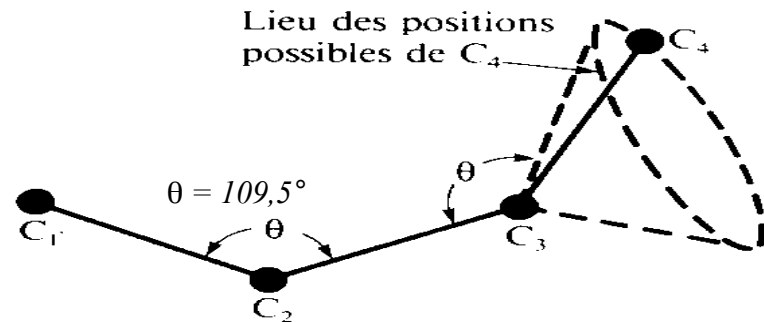
*chaînes réticulées*

*Représentation 3D de la chaîne moléculaire du polyéthylène*



*L'angle entre la liaison C-C est de  $109,5^\circ$*

*→ les chaînes ne sont donc pas rectilignes*



## *D - Structure des polymères*

### *\* Architecture atomique des polymères*

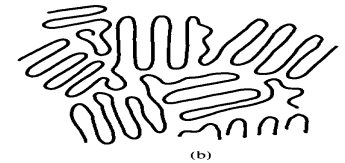
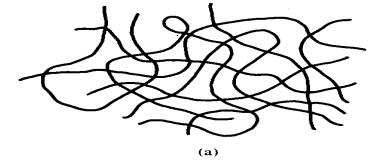
- disposition des chaînes moléculaires

*\* au hasard, sans ordre particulier*

→ *polymère amorphe*

*\* en ordre, de façon alignée*

→ *polymère ayant une certaine cristallinité*



- cristallisation

*\* rarement complète (à cause de l'encombrement)*

*\* favorisée si :*

- *symétrie, structure simple*

- *régularité des chaînes*

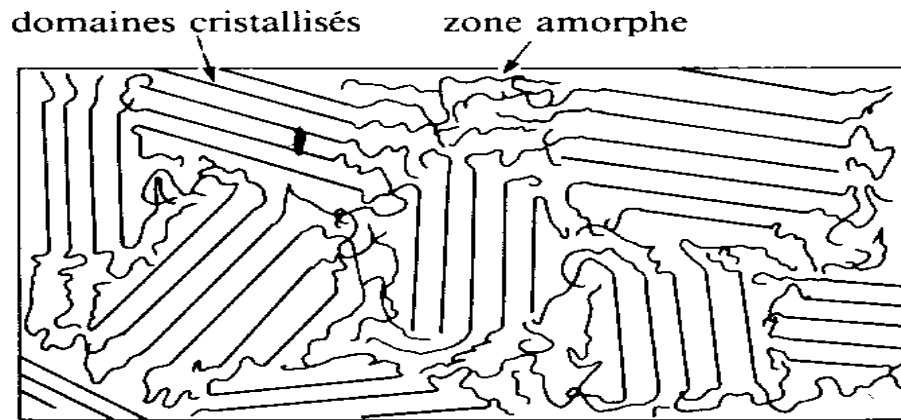
- *absence de ramifications et de réticulations*

## \* *Architecture atomique des polymères*

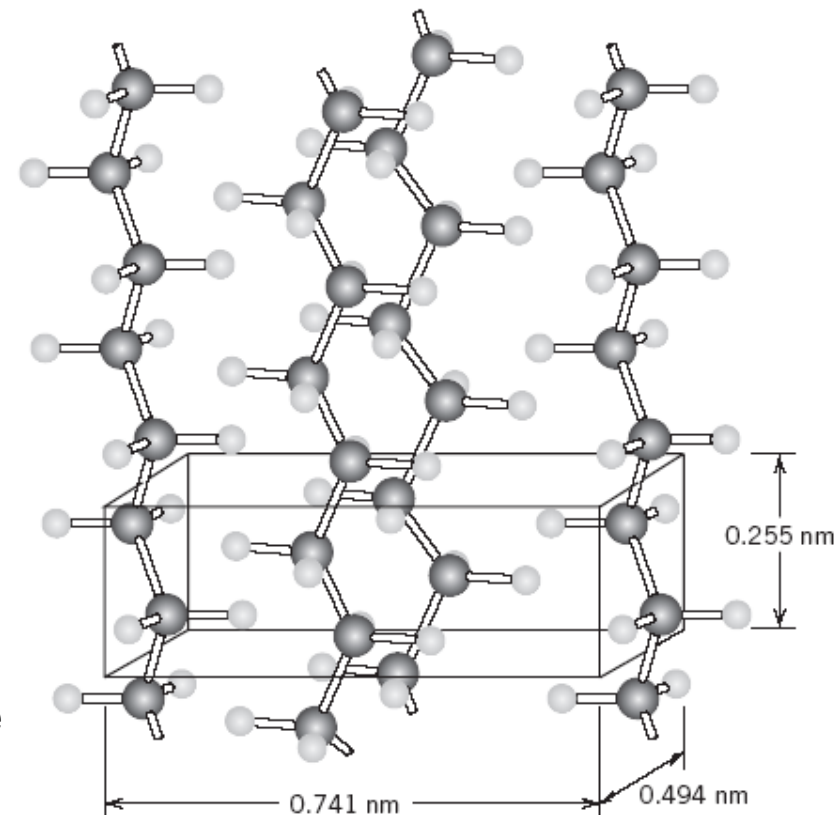
- représentation schématique de la cristallisation des polymères

\* *zones cristallisées : les chaînes se replient sur elles-mêmes*

\* *zones amorphes : au cours du refroidissement, les chaînes n'ont pas le temps de s'arranger de façon régulière*



Polyéthylène: Orthorhombique



## \* *Degré de cristallinité*

*Les petites molécules (H<sub>2</sub>O) sont cristalline à l'état solide, mais les polymères sont fréquemment partiellement cristalline en raison de leur taille et leur complexité*

*Polymères : analogues à des alliages à deux phases*

*Le Degré de cristallinité peut varier d'un état totalement l'amorphe à 95% cristallin, il est donné par:*

$$\% \text{ crystallinity} = \frac{\rho_c(\rho_s - \rho_a)}{\rho_s(\rho_c - \rho_a)} \times 100$$

$\rho_s$  : masse volumique du matériaux

$\rho_a$  : masse volumique de la phase amorphe

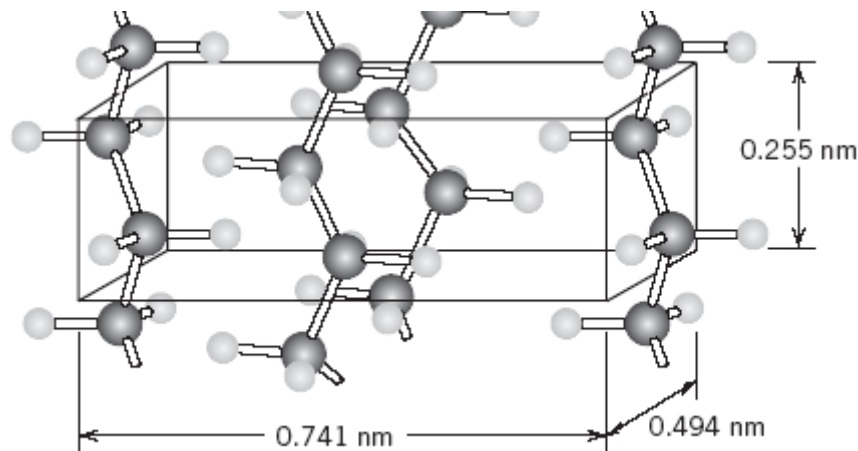
$\rho_c$  : masse volumique de la phase cristalline

Exercice :

a) Calculer la densité du polyéthylène totalement cristalline sachant qu'une maille contient deux unités d'éthylène ( $C_2H_4$ ).

B) Calculer le degré de cristallinité d'un polyéthylène réticulé qui a une densité =  $0.925 \text{ g/cm}^3$ . La densité de la phase amorphe est  $0.870 \text{ g/cm}^3$ .

$A_C = 12.01 \text{ g/mole}$ ,  $A_H = 1.0008 \text{ g/mole}$



$$\rho = \frac{nA}{V_C N_A}$$

Réponse:

a)

$A = 28.05 \text{ g/mole}$

$V_C = (0.741)(0.494)(0.255) \text{ nm}^3$   
 $= 9.33 \cdot 10^{-23} \text{ cm}^3/\text{maile}$

$\rho = 0.998 \text{ g/cm}^3$

b)

$$\begin{aligned} &= \frac{\rho_c(\rho_s - \rho_a)}{\rho_s(\rho_c - \rho_a)} \times 100 \\ &= \frac{0.998 \text{ g/cm}^3 (0.925 \text{ g/cm}^3 - 0.870 \text{ g/cm}^3)}{0.925 \text{ g/cm}^3 (0.998 \text{ g/cm}^3 - 0.870 \text{ g/cm}^3)} \times 100 \\ &= 46.4\% \end{aligned}$$

# *E - Types de polymères*

## \* *Thermoplastiques*

- particularités structurales

\* *taille des molécules limitée*

\* *structure linéaire ou ramifiée*

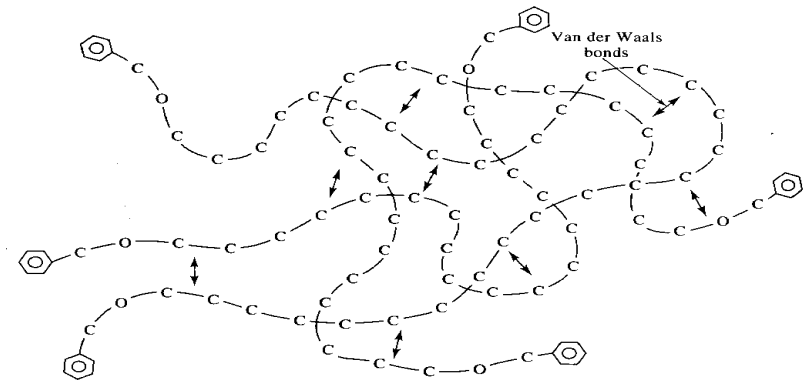
\* *amorphes ou semi-cristallins*

- principales propriétés

\* *matériaux généralement ductiles*

\* *recyclables*

\* *fusibles à haute température*



*cohésion du matériau assuré par*

- *liaisons de VdW*

- *enchevêtrement des chaînes*

*élévation de température*

- *passent à l'état fondu*

- *peuvent être mis en forme  
par coulage*

- *processus réversible qui  
peut être répété un  
grand nombre de fois*

\* *Thermodurcissables*

particularités structurales

*structures réticulées, formant un réseau 3D*

*des liaisons covalentes assurent les*

*pontages entre les chaînes*

principales propriétés

*résistances mécaniques et thermiques plus élevées*

*que celles de la classe des thermoplastiques*

*souvent fragiles*

*infusibles (donc non recyclables)*

*cause de la structure 3D*

*rigide jusqu'à la température de décomposition*

-

\*

\*

-

\*

\*

\*

- à

-

*conséquences sur la mise en œuvre*

*- lente et difficile*

## \* *Élastomères*

- particularités structurales

\* *polymères linéaires ayant de grandes masses moléculaires (100 000 à 500 000 g/mol)*

\* *structure intermédiaire entre les thermoplastiques et les thermodurcissables*

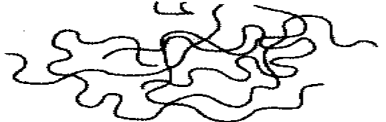


→ *introduction entre les chaînes d'une certaine quantité de liaisons pontales (covalentes)  
10 à 100 fois moins que les thermodurcissables*



## *E - Types de polymères*

### \* *Résumé*

**TABLE 15-1** Comparison of the three polymer categories

<b>Behavior</b>	<b>General Structure</b>	<b>Diagram</b>
Thermoplastic	Flexible linear chains	 A diagram showing several wavy, tangled lines representing flexible linear polymer chains.
Thermosetting	Rigid three-dimensional network	 A diagram showing a grid of interconnected lines forming a rigid three-dimensional network. A label "Cross-link" with an arrow points to one of the connections between the lines.
Elastomers	Linear cross-linked chains	 A diagram showing several wavy lines representing linear chains, with some lines connected to each other at various points. A label "Cross-link" with an arrow points to one of these connections.

# Propriétés des polymères

## *A - Propriétés physiques*

### \* *Masse volumique*

- peu élevée p/r aux autres types de matériaux

\* *la légèreté est une des qualités ayant le plus contribué à la diffusion des polymères*

\* *cause : faible poids atomique des atomes constituant les chaînes (H et C)*

→ 0,9 à 2,2 g/cm<sup>3</sup>

→ *la résistance spécifique  $R_m/\rho$*

**Tableau 12.4** Masse volumique, résistance à la traction et résistance spécifique de quelques métaux et polymères

Matériau	Masse volumique, $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Résistance à la traction, $R_m$ (MPa)	$R_m/\rho$
Acier à 0,1 % C, laminé à froid	7,8	450	58
Laiton (Cu-30 % Zn) recuit	8,3	400	48
Al-4 % Cu, trempé et vieilli	2,8	350	125
Polyéthylène de haute densité (PEhd)	0,96	30	30
Nylon 6-6 (PA 6-6)	1,12	80	71
ABS	1,1	45	41

\* *Propriétés thermiques*

- coefficient de dilatation linéique élevé
- conductivité thermique faible
- \* *utilisation comme isolants thermique*

\* *Propriétés électriques*

- faible conductivité : *isolants électriques*

\* *Propriétés optiques*

- à l'état amorphe, les polymères transmettent bien la lumière
- ex.: \* *polyacryliques*
  - *transmission lumineuse > 90%*
  - *utilisation pour les vitrages*
- \* *polycarbonates*
  - *transmission lumineuse  $\approx$  88%*
  - *utilisation pour les lentilles*

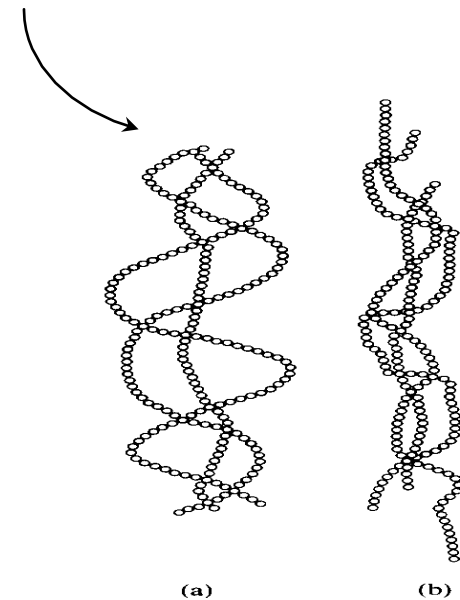
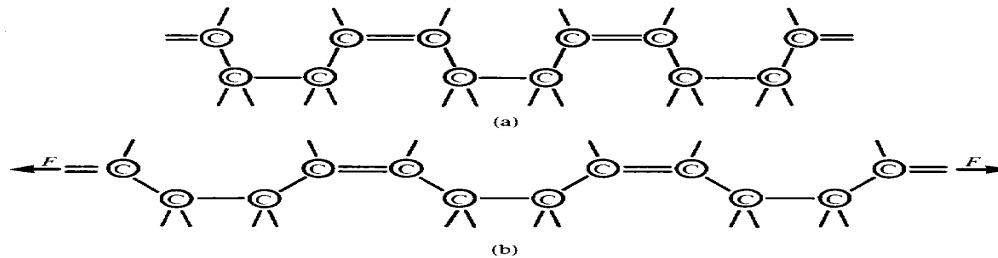
## B - Propriétés mécaniques

### \* Déformations des polymères

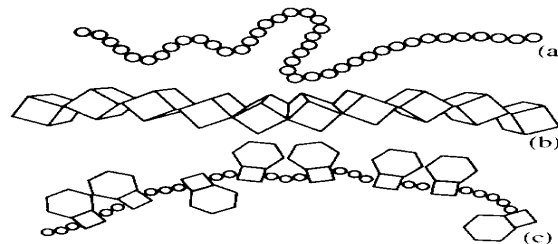
- mécanismes de déformation

\* variation des angles entre les atomes de carbone dans les liaisons covalentes C-C

\* déploiement des chaînes qui sont enchevêtrées et repliées sur elles-mêmes

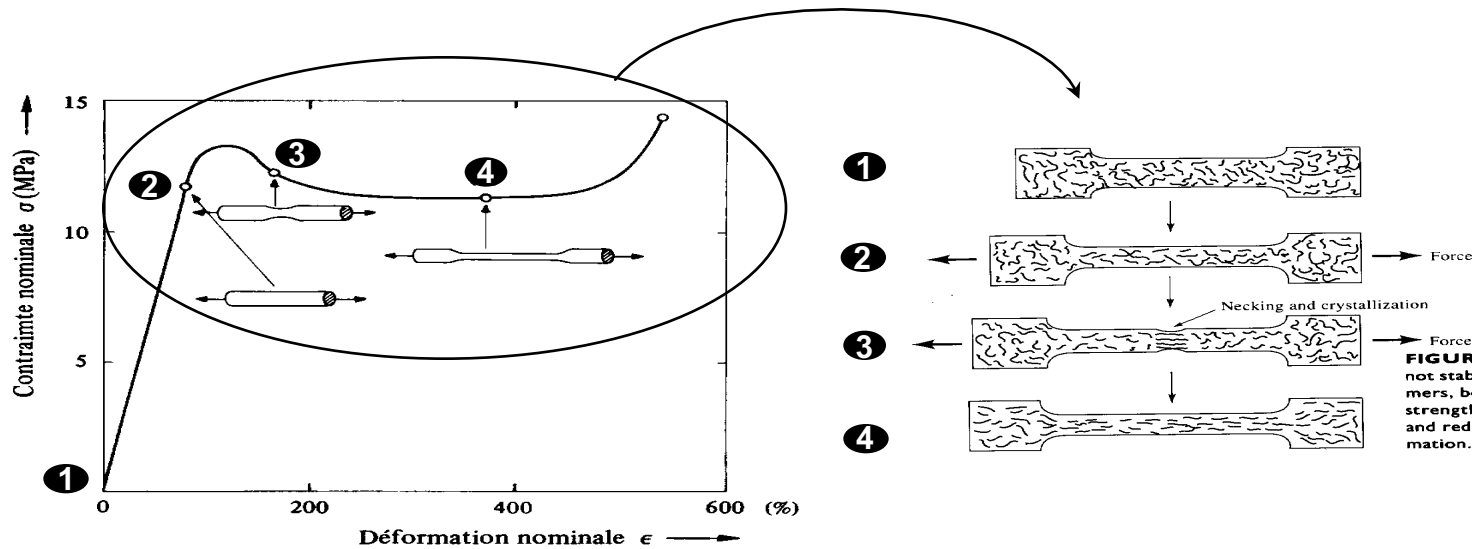


*La souplesse des chaînes est fonction de l'encombrement des groupes latéraux (donc des monomères)*



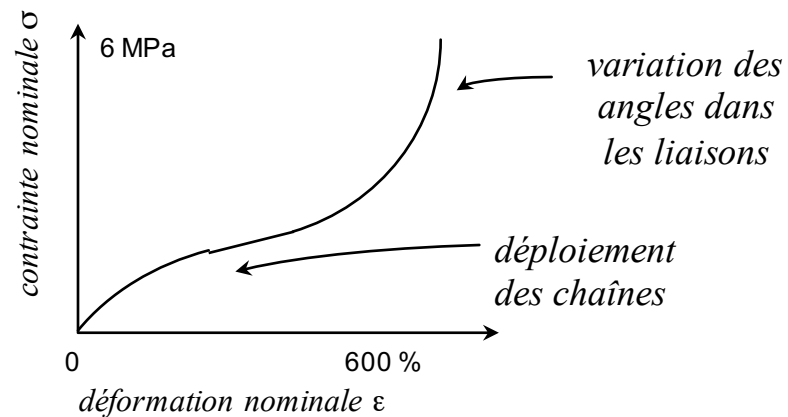
# \* Déformations des polymères

- cas des thermoplastiques (ex.: nylon)



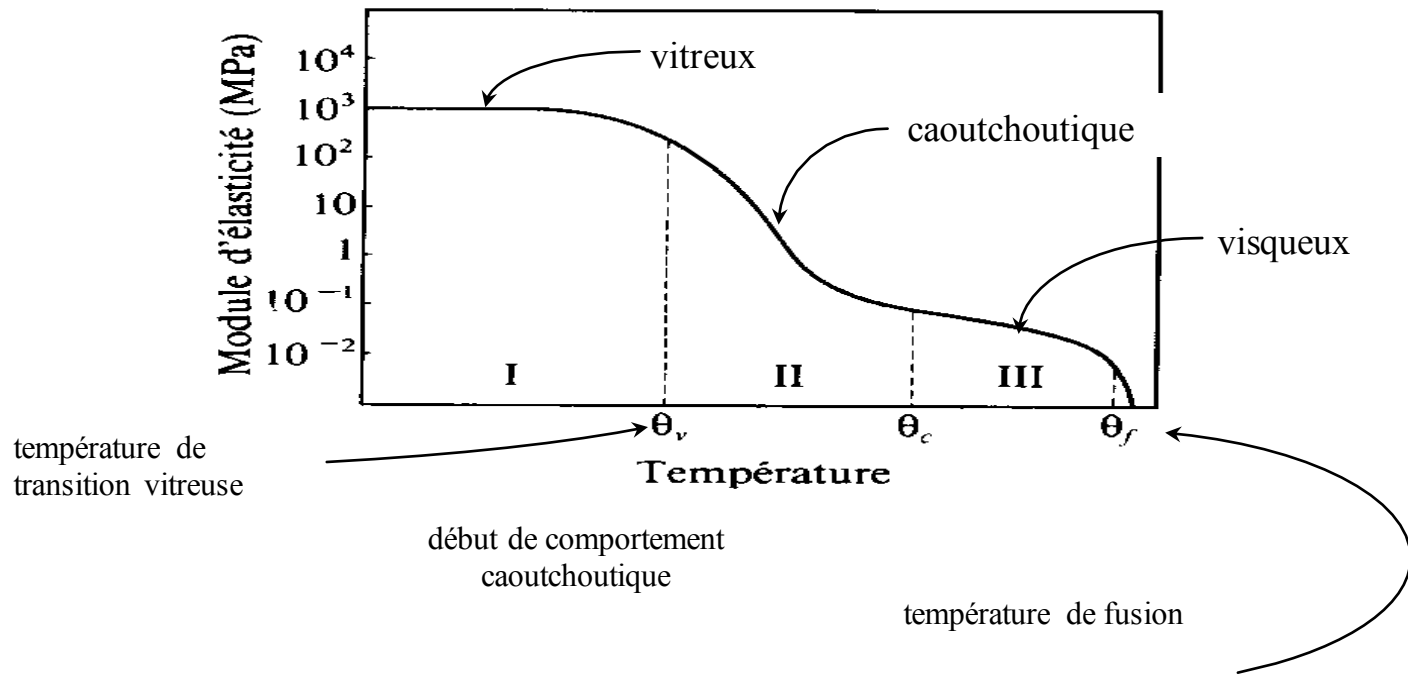
**FIGURE 15-17** Necks are not stable in amorphous polymers, because local alignment strengthens the necked region and reduces its rate of deformation.

- cas des élastomères  
\* ex.: caoutchouc



## \* *Rigidité des polymères*

- Rigidité des thermoplastiques : *varie beaucoup avec la température*



- zone 1 :** - état vitreux
- polymère dans un état dur et fragile
- zone 2 :** - augmentation de la souplesse
- comportement caoutchoutique
- zone 3 :** - effondrement de la rigidité
- comportement de liquide visqueux

## \* *Rigidité des polymères*

### - **Rigidité des thermodurcissables**

\* *rigidité importante*

\* *conservée jusqu'à leur dégradation*

### - **Rigidité des élastomères**

\* *habituellement très faible*

\* *augmente avec la déformation  
(alignement des chaînes)*

\* *augmentation avec le nombre  
de liaisons pontales*

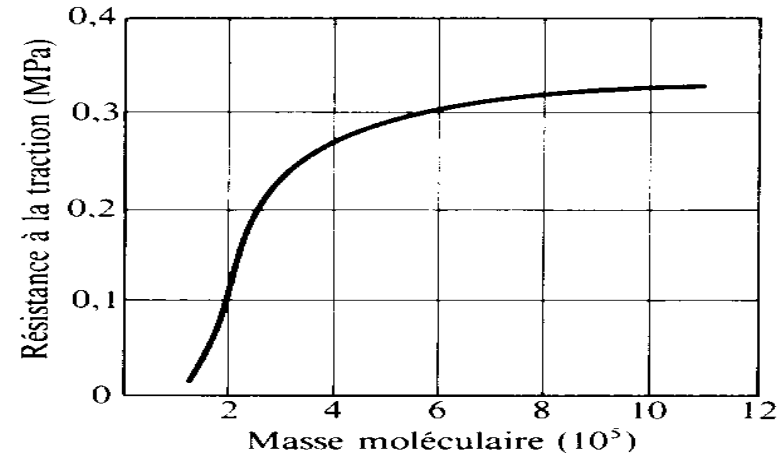
\* *existence d'une température de  
transition vitreuse  
(transition ductile-fragile)*

## Autres propriétés mécaniques

### - Résistance à la traction

\* *la résistance à la traction d'un polymère à chaînes linéaires est fonction de sa masse moléculaire moyenne (longueur des chaînes)*

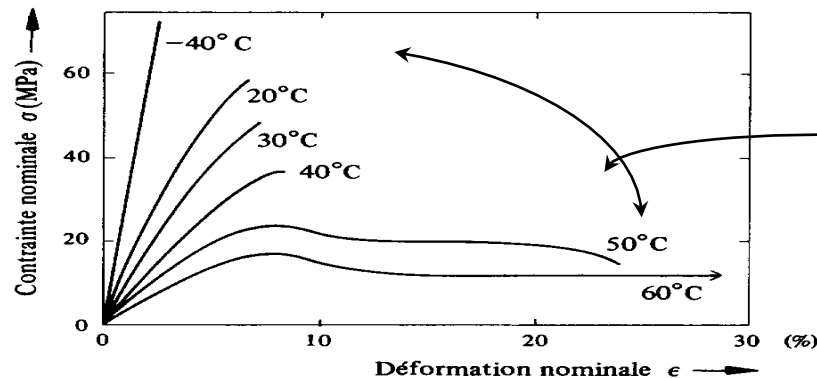
\* *ex.: caoutchouc synthétique butyle*



### - Transition ductile/fragile

\* *domaine de température d'utilisation restreint*

\* *variations importantes des comportements mécaniques avec la température*



*variations du comportement mécanique*

- *ductilité-fragilité*
- *résistance à la traction*
- *ténacité*



# Modification des propriétés

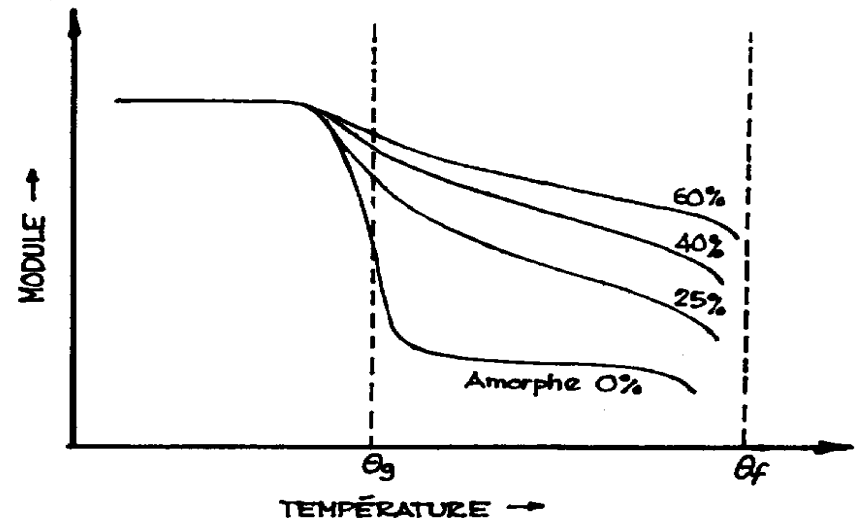
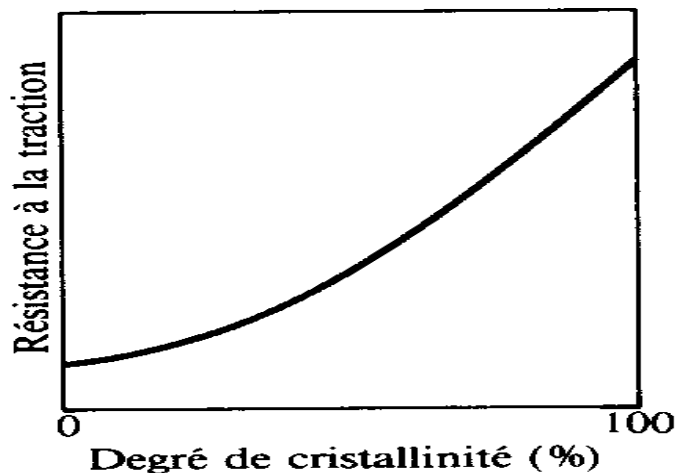
## \* *Introduction*

- la rigidité et la résistance à la traction sont les principales propriétés à modifier : *elles sont fonction de la température et de l'arrangement des chaînes*

- **Méthodes de modification**: *varier la composition et/ou de la structuration*

## \* *Modification des propriétés*

- cristallinité: *augmentation de la rigidité et de  $R_m$  en fonction du degré de cristallinité*



\* *Modification des propriétés*

- **réticulation**

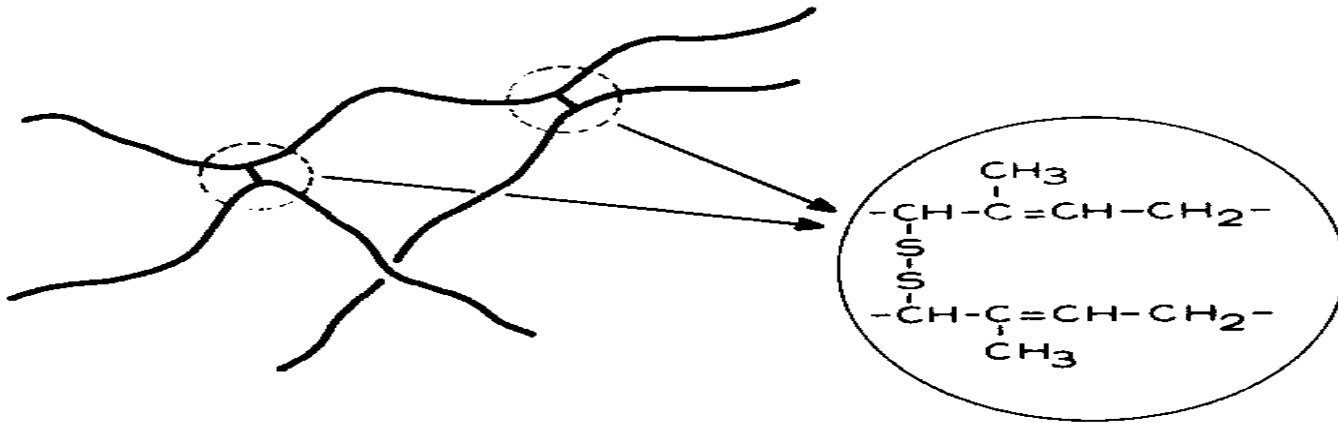
\* **formation d'un réseau 3D en pontant les chaînes**

\* **ex.: le caoutchouc**

- *à l'état naturel → liquide visqueux*

- *le pontage (liaisons fortes) permet d'augmenter*

- *la rigidité → vulcanisation (atomes de soufre)*



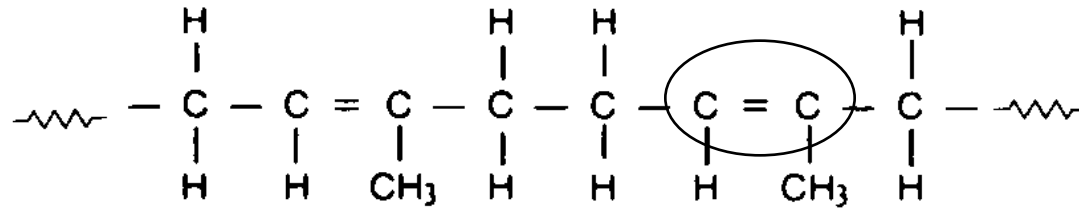
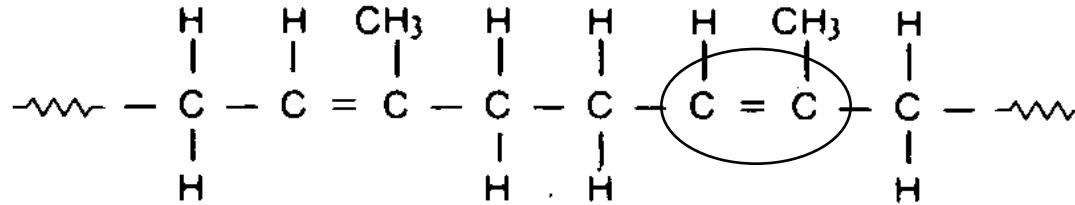
*plus de soufre → plus de liaisons pontales → plus de rigidité*

•réticulation (suite)

•vulcanisation

*processus de réticulation*

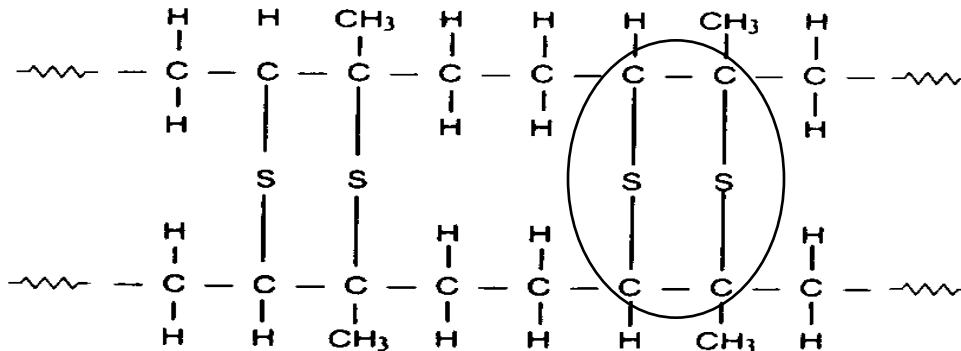
- ouverture de la double liaison C=C de la chaîne



*2 chaînes séparées*

- obtention d'une liaison covalente intense entre les deux chaînes

*linéaires, par l'intermédiaire du soufre*



*réticulation par le soufre*

## \* *Modification des propriétés*

- copolymérisation et mélanges

\* *formation «d'alliages»*

\* *ex.: dispersion fine de chacun des  
constituants*

→ *plastiques ABS utilisé dans l'industrie  
automobile (mélange de 3 polymères)*

- utilisation d'additifs

\* *colorants, pour changer la couleur du matériau*

\* *stabilisants, pour retarder la dégradation*

*(ex.: noir de carbone)*

\* *plastifiants, pour améliorer la souplesse (ex.: PVC)*

\* *Vieillissement physique*

- action des solvants

\* *ex.: l'eau qui pénètre entre les chaînes du polymère entraîne un gonflement  
→ craquelures ou fissures*

\* *Vieillissement et dégradation chimique*

- oxydation

\* *fixation de l'O<sub>2</sub> → baisse des propriétés mécaniques*

- dégradation thermique

\* *rupture des chaînes*

\* *dépolymérisation*

\* *réactions*

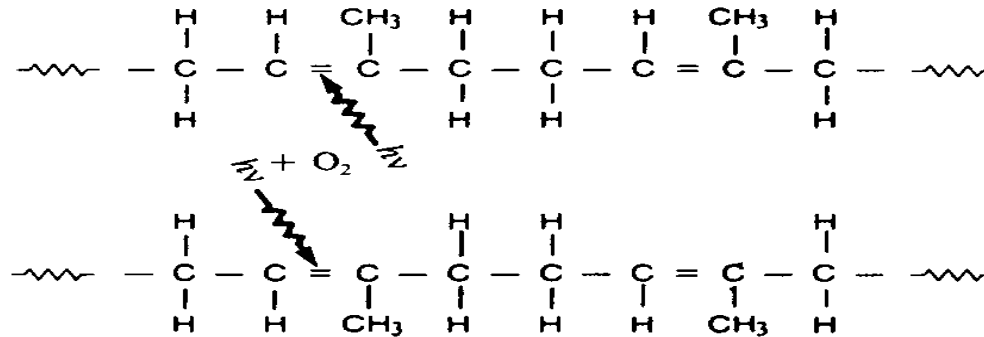
\* *combustion*

# photodégradation

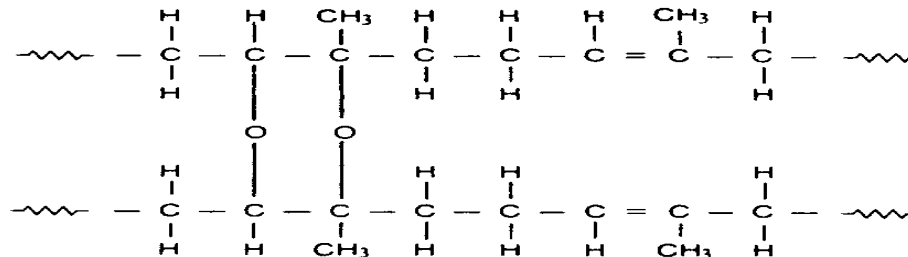
## \* *Exemple : photodégradation du caoutchouc*

- effet néfaste des rayonnements ultraviolets (UV)
- mécanisme de dégradation

\* *ouverture de la double liaison C=C de la chaîne du caoutchouc, due à l'action des photons ultraviolets (source d'énergie)*



\* *réticulation entre les chaînes par les atomes d'oxygène*



\* *Exemple : photodégradation du caoutchouc*

- conséquences de la réticulation

\* *augmentation du nombre de pontages*

→ *rigidification et fragilisation du matériau*

\* *pratiquement,*

- *les élastiques deviennent cassants lorsqu'ils sont exposés à la lumière*

- *il y a apparition de craquelures dans les pneus (automobiles, vélos) avec le temps*

- lutte contre la photodégradation

\* *ajout de stabilisants UV*

- *pigments qui forment écran à la pénétration des radiations (ex.: noir de carbone)*

- *absorbeurs d'UV*

# Exercice

- exemple numérique : calcul de masse moléculaire

Un échantillon de polychlorure de vinyle a été analysé par une méthode chromatographique.

Les résultats suivants ont été obtenus :

*Donnée utile :*

Poids moléculaire du polychlorure de vinyle

$P_m = 62,5$  g/mole

<i>Intervalle Poids moléculaire (g/mole)</i>	<i>% en poids (<math>w_i</math>)</i>
<i>5000 - 10000</i>	<i>12</i>
<i>10000 - 15000</i>	<i>18</i>
<i>15000 - 20000</i>	<i>26</i>
<i>20000 - 25000</i>	<i>21</i>
<i>25000 - 30000</i>	<i>14</i>
<i>30000 - 35000</i>	<i>9</i>
	<i>100</i>

(a) Calcul de la masse moléculaire moy. Numérique (en nombre)



<i>Intervalle Poids moléculaire (g/mole)</i>	<i>% en poids (w<sub>i</sub>)</i>
5000 - 10000	12
10000 - 15000	18
15000 - 20000	26
20000 - 25000	21
25000 - 30000	14
30000 - 35000	9
	100

Il faut calculer le nombre de molécules (n<sub>i</sub>) dans chacune des classes, soit

$$n_i = \frac{w_i}{M_i} \cdot \text{Nombred' Avogadro}(N_A)$$

Prenons comme base 1 gramme de polymère :

<i>Intervalle (1000 g/mole)</i>	<i>n<sub>i</sub></i>	<i>M<sub>i</sub></i>	<i>n<sub>i</sub> * M<sub>i</sub></i>
5 - 10	0,12/7,5 * N <sub>A</sub>	7,5	0,12 * N <sub>A</sub>
10 - 15	0,18/12,5 * N <sub>A</sub>	12,5	0,18 * N <sub>A</sub>
15 - 20	0,26/17,5 * N <sub>A</sub>	17,5	0,26 * N <sub>A</sub>
20 - 25	0,21/22,5 * N <sub>A</sub>	22,5	0,21 * N <sub>A</sub>
25 - 30	0,14/27,5 * N <sub>A</sub>	27,5	0,14 * N <sub>A</sub>
30 - 35	0,09/32,5 * N <sub>A</sub>	32,5	0,09 * N <sub>A</sub>
Somme	6,245 * 10 <sup>-2</sup> * N <sub>A</sub>		1,00 * N <sub>A</sub>

$$\bar{M}_n = \frac{\sum n_i \cdot M_i}{\sum n_i} = \frac{1,0 \cdot N_A}{6,245 \cdot 10^{-2} \cdot N_A}$$

= 16000 g / mol

## calcul de masse moléculaire

(b) Calcul de la masse moléculaire moy. pondérale

<i>Intervalle (1000 g/mole)</i>	<i>w<sub>i</sub></i>	<i>M<sub>i</sub></i>	<i>w<sub>i</sub> * M<sub>i</sub></i>
<i>5 - 10</i>	<i>0,12</i>	<i>7,5</i>	<i>0,90</i>
<i>10 - 15</i>	<i>0,18</i>	<i>12,5</i>	<i>2,25</i>
<i>15 - 20</i>	<i>0,26</i>	<i>17,5</i>	<i>4,55</i>
<i>20 - 25</i>	<i>0,21</i>	<i>22,5</i>	<i>4,73</i>
<i>25 - 30</i>	<i>0,14</i>	<i>27,5</i>	<i>3,85</i>
<i>30 - 35</i>	<i>0,09</i>	<i>32,5</i>	<i>2,93</i>
Somme	1,0		19,20

$$\bar{M}_p = \frac{\sum w_i \cdot M_i}{\sum w_i} = \frac{19200}{1,0} = 19200 \text{ g / mol}$$

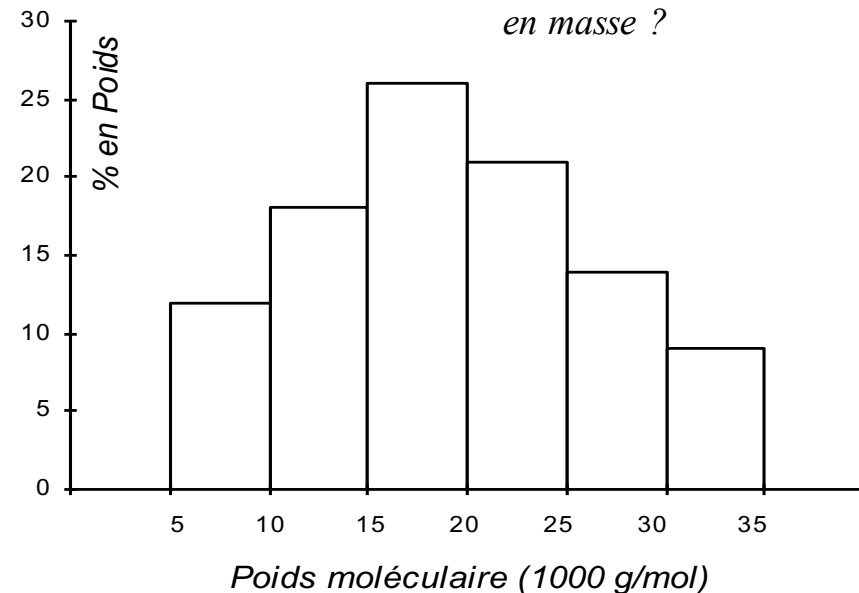
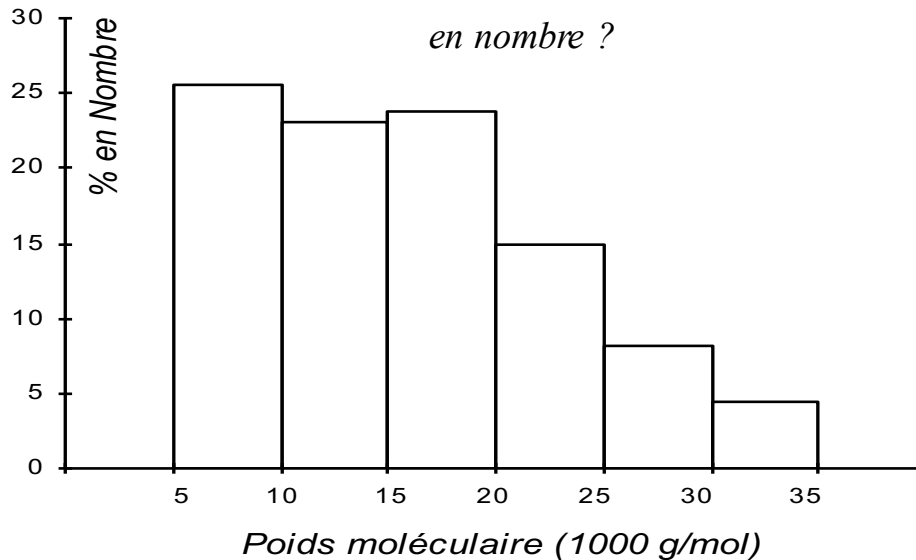
(c) indice d'hétérogénéité

$$H = \frac{\overline{M}_p}{\overline{M}_n} = \frac{19200}{16000} = 1,20$$

(d) degré de polymérisation

$$\bar{x} = \frac{\overline{M}_{np}}{M_o} = \frac{16000}{62,5} = 256$$

(e) représentation graphique



# Exercices à faire

- Prob. Type 15.1
- Exos Calister:  
15.6; 15.8; 15.9; 15.11; 15.26