

Introduction aux polymères

Adèle Gapin

Laboratoire de Chimie des Polymères Organiques (LCPO)

Université de Bordeaux

Allée Geoffroy Saint Hilaire, Bâtiment B8

adele.gapin@u-bordeaux.fr



1. Structures et propriétés des polymères
2. Classement des polymères
3. Synthèse des polymères
4. Morphologie des polymères
5. Formulation et mise en œuvre
6. Applications

Structure et propriétés des polymères

Introduction : les polymères ne sont pas uniquement des 'plastiques'



fibres textiles



vêtements de pluie



baskets



additif papier et carton



peintures et colles



additif huile moteur



produits alimentaires



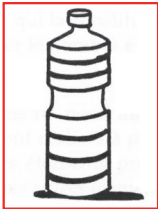
cosmétique



médicaments

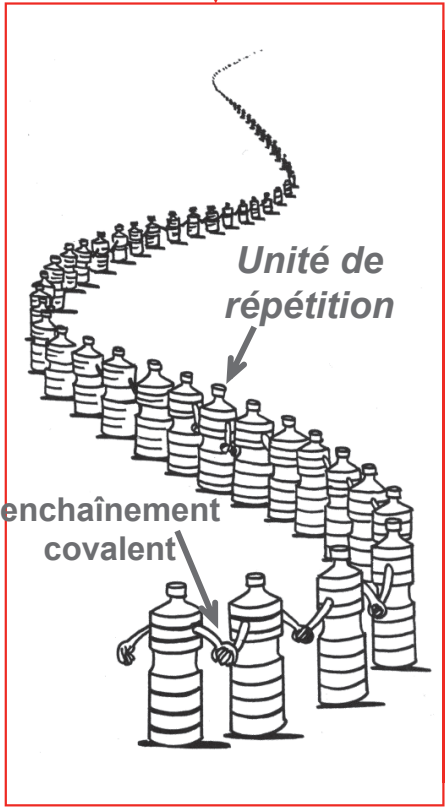
Définition des polymères

molécule monomère

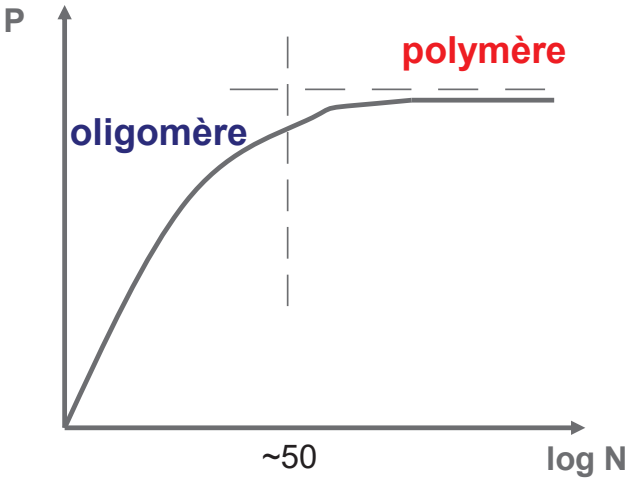


Polymères résultent de l'enchaînement covalent d'*unités répétitives* (ou unités monomères)

Réaction de polymérisation



Les propriétés évoluent de façon continue entre les petites molécules et les macromolécules jusqu'au seuil (plateau) polymère.



La chaîne polymère est figurée par l'unité monomère mise entre parenthèses et affectée de l'indice **n**, lequel correspond au degré de polymérisation **DP_n**

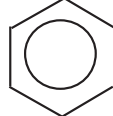
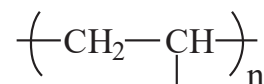
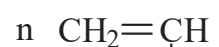
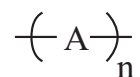


molécule monomère

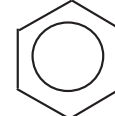
$n \text{ A}$

\neq

unité de répétition

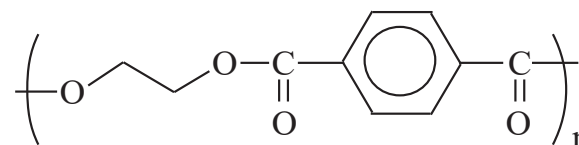
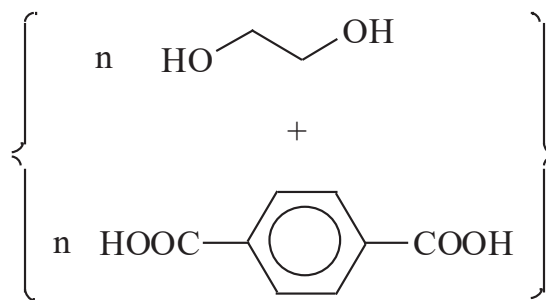


liquide



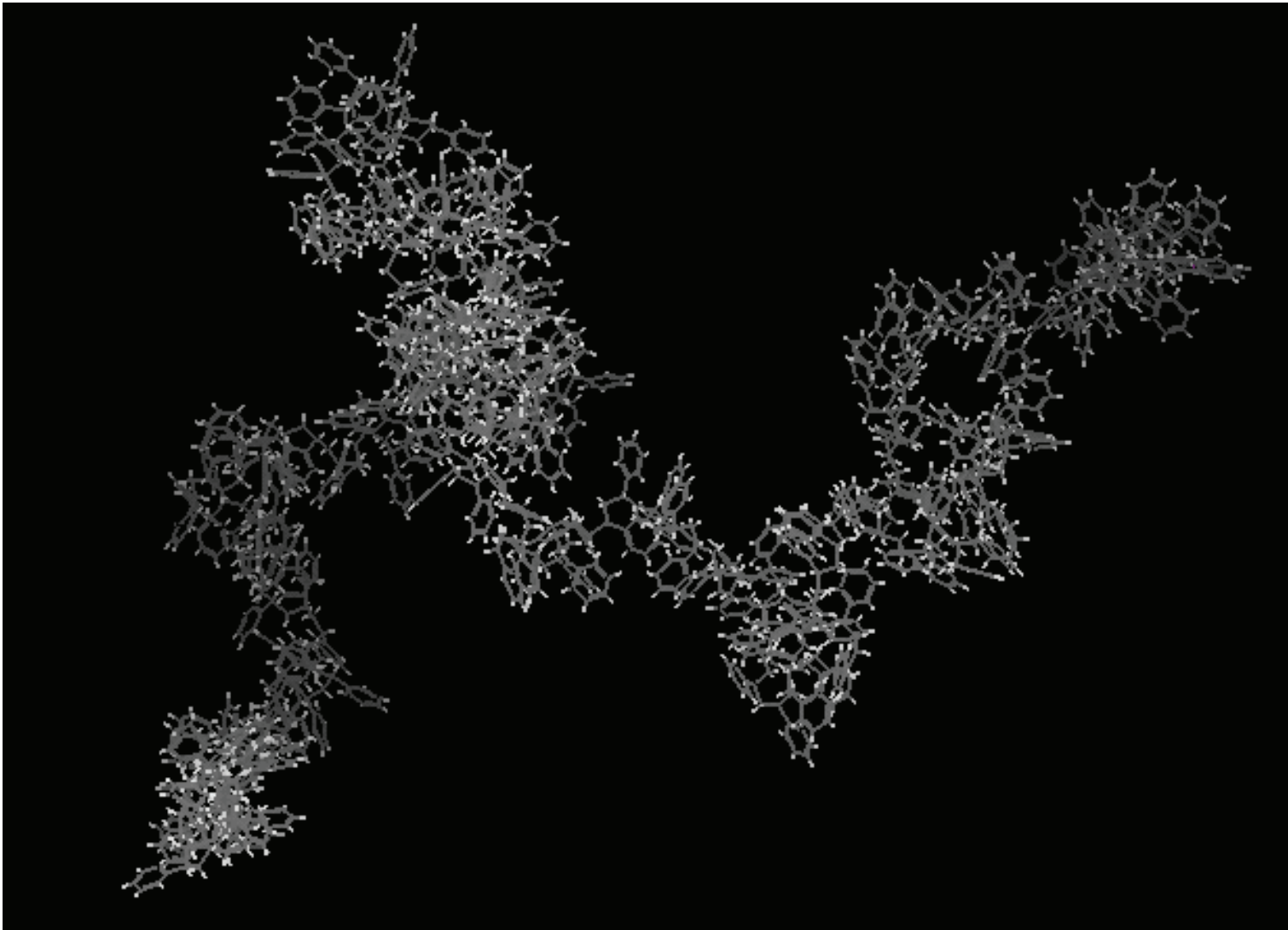
solide

poly(styrène)



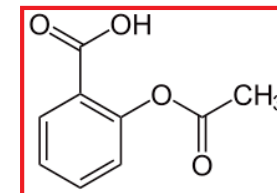
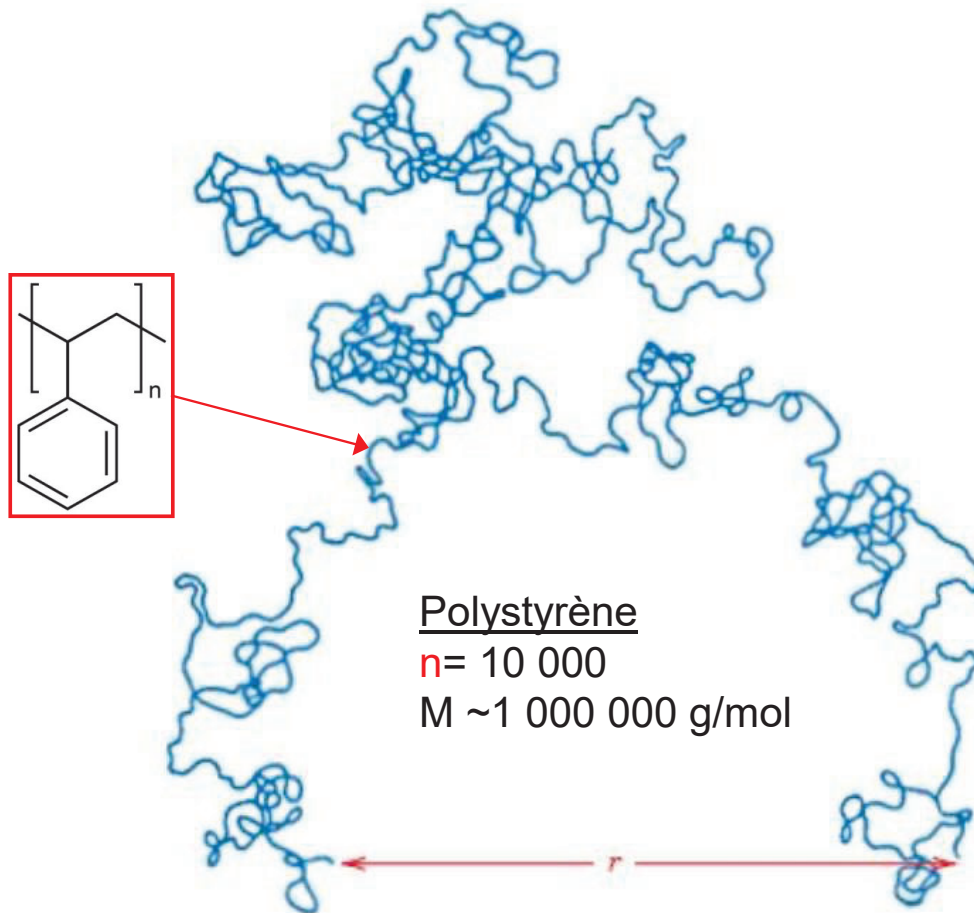
poly(éthylène téréphtalate)

A quoi ressemble un polymère ?



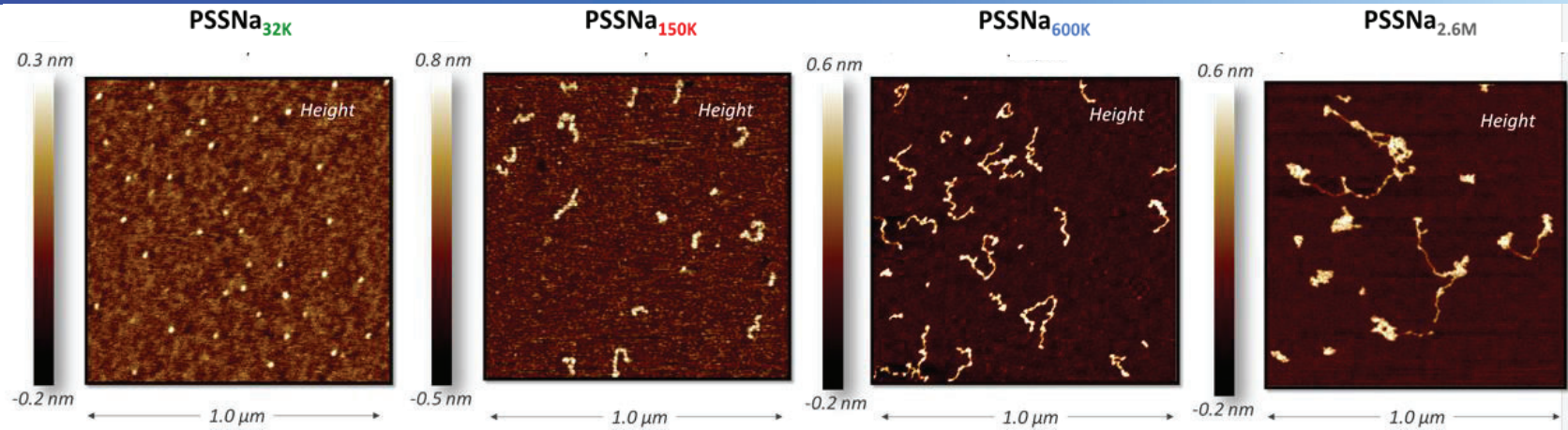
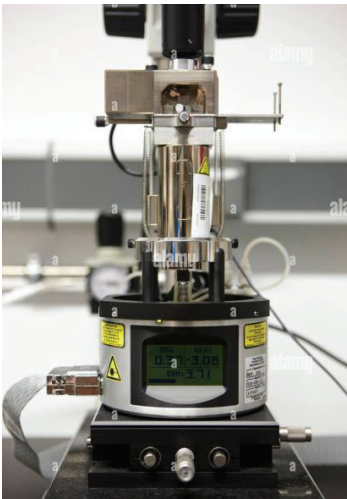
Simulation d'une (petite) chaîne de polystyrène de 240 motifs

Les polymères sont de (très) grandes molécules

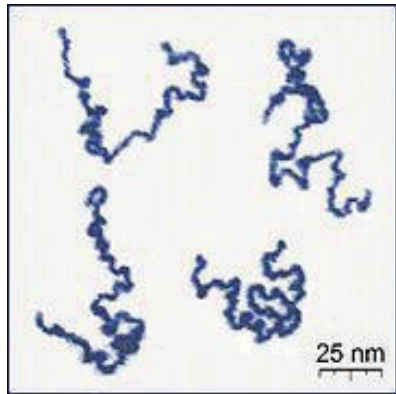
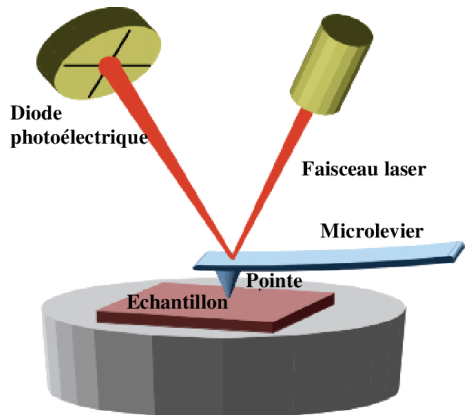


Acide acétylsalicylique
 $M = 180 \text{ g/mol}$

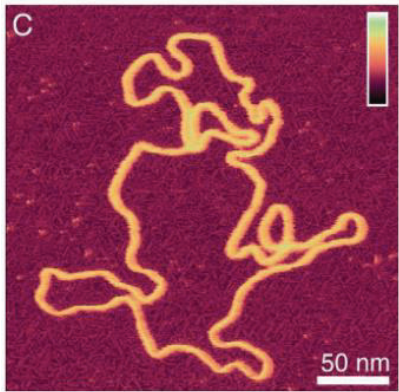
Visualisation des chaînes individuelles de polymère



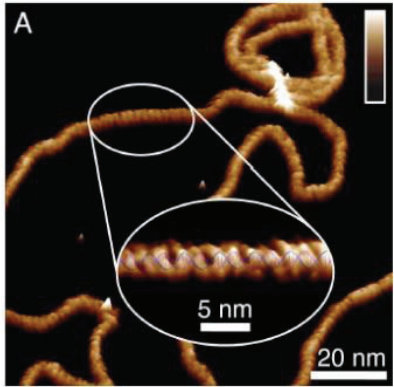
→ Analyse par Microscopie à Force Atomique (AFM)
(E.Ibarboure/M.Haddou, LCPO, BX INP)



Simulation numérique



ADN de bactérie
(plasmide)

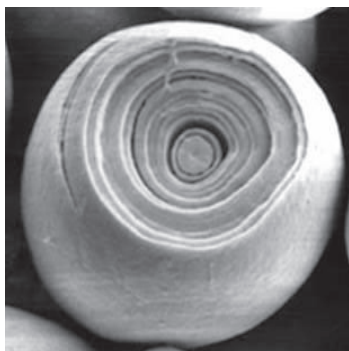
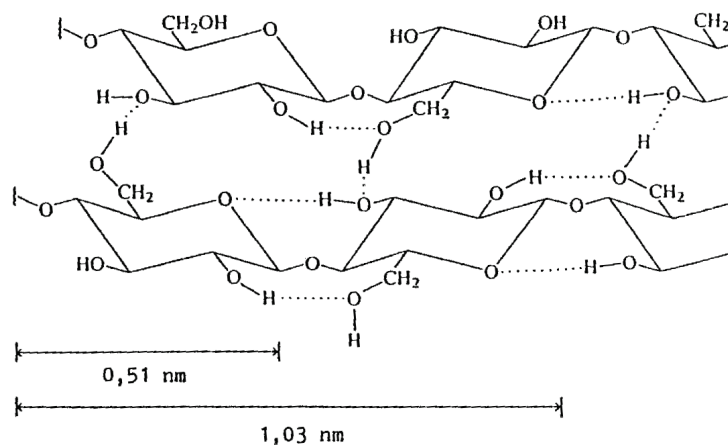


Structure double brin du plasmide

Classement des polymères

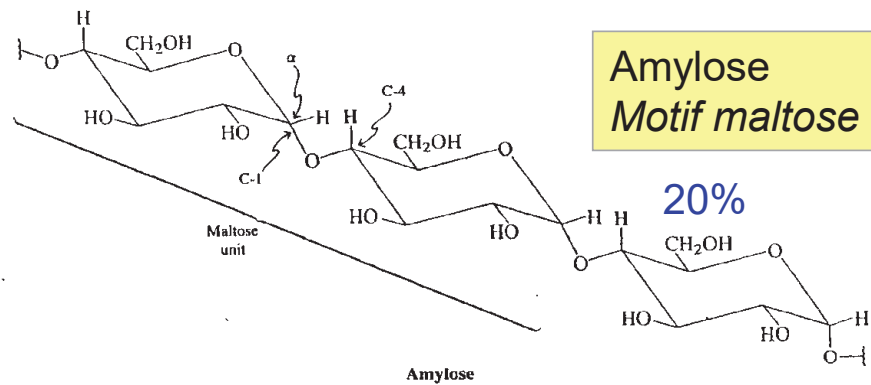
Polymères naturels : cellulose et amidon

Cellulose
Motif b-cellobiose

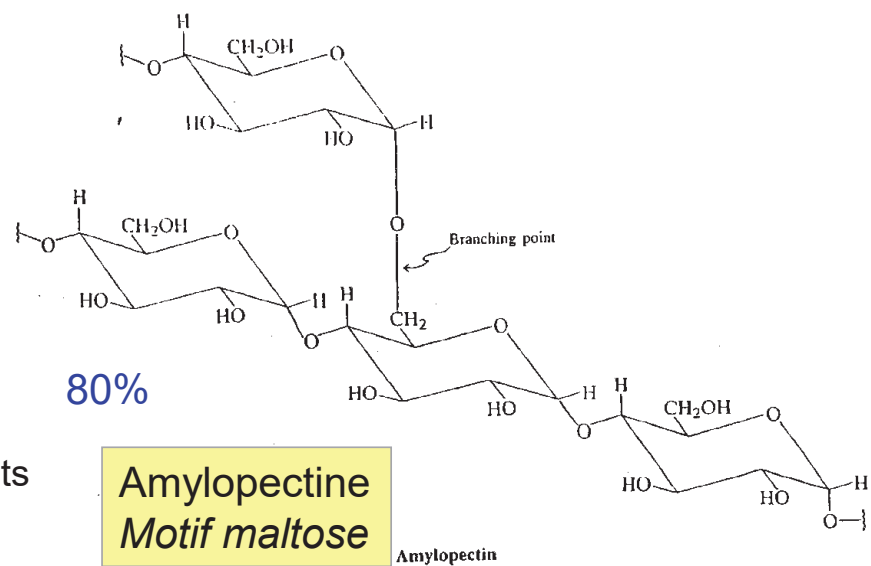


Granule d'amidon
Alternance de
domaines amorphes
et semi cristallins
→ Structure en feuillets

Amylose
Motif maltose

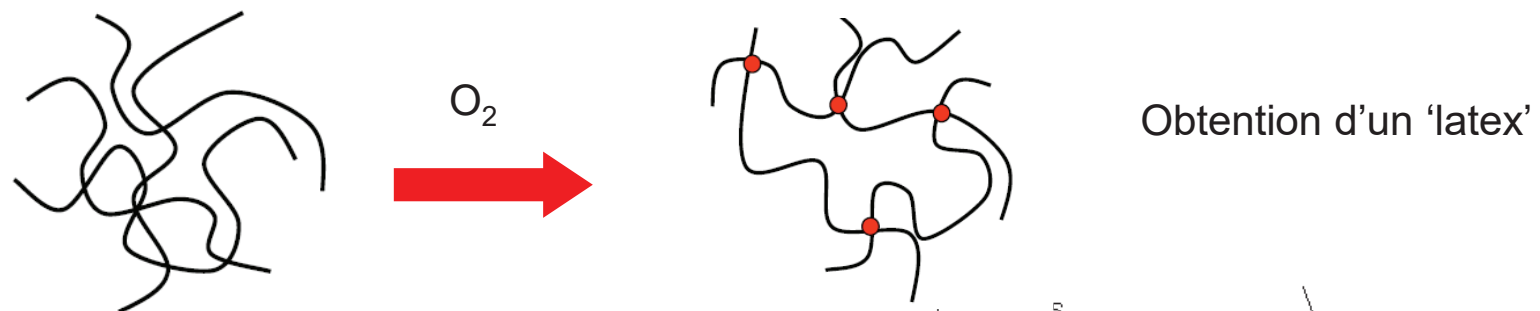
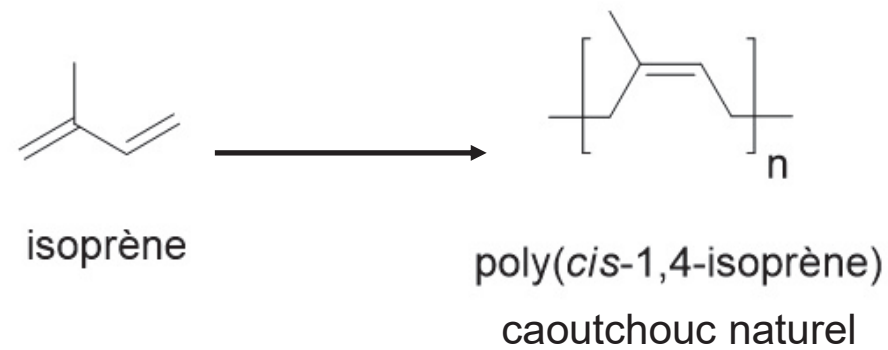


Amidon

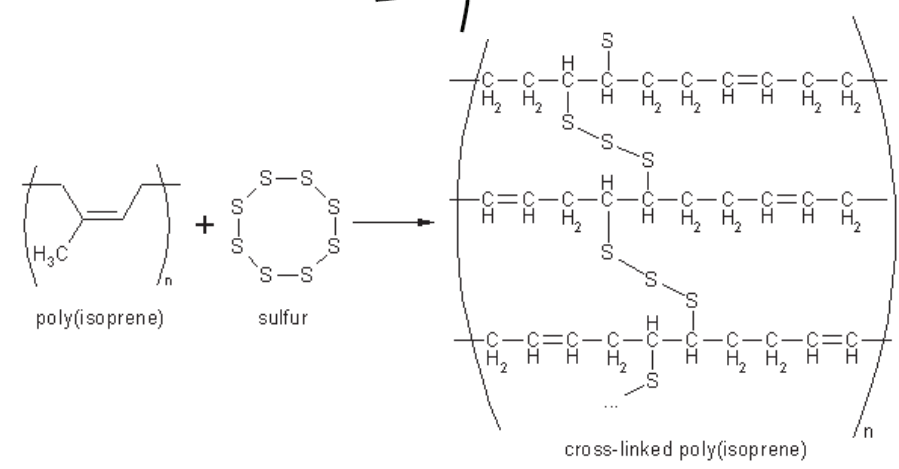


Amylopectine
Motif maltose

Polymères naturels : caoutchouc naturel



vulcanisation par le soufre
(Goodyear 1844)



Polymères naturels : les protéines

STRUCTURE PRIMAIRE

Acide aminé

STRUCTURE SECONDAIRE

Hélice alpha

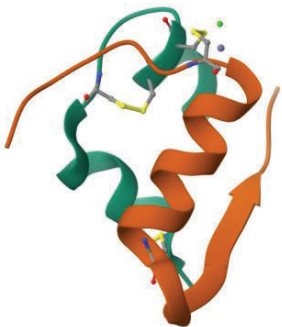
Feuillet bêta

STRUCTURE TERTIAIRE

Liaisons hydrogène

Interactions intramoléculaires

Insuline humaine
M = 5800 g/mol = 5,8 kDa

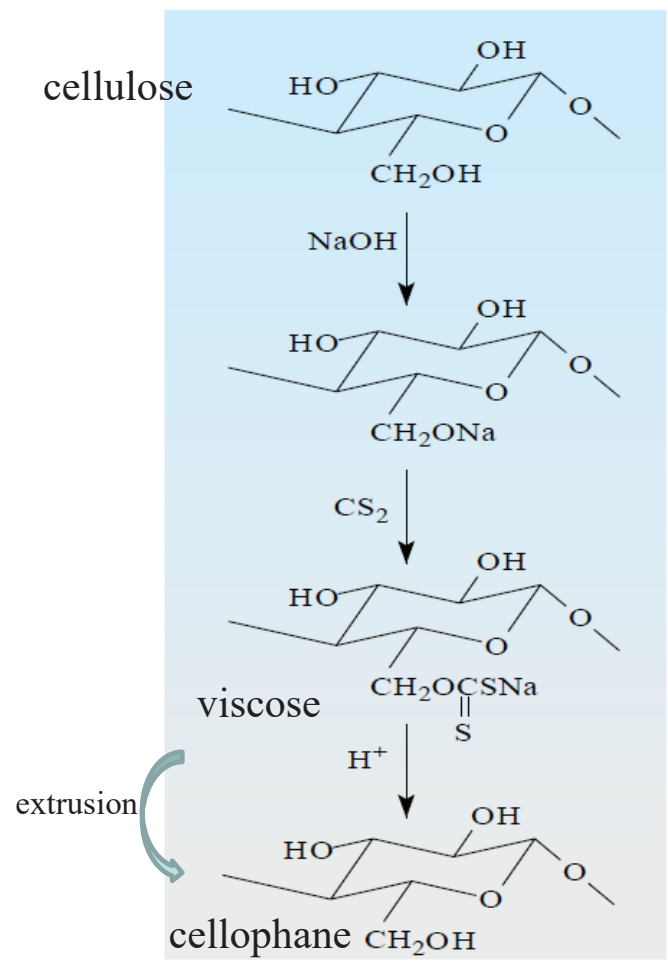


Albumine humaine
M = 66 000 g/mol = 66 kDa



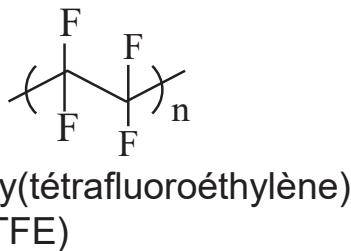
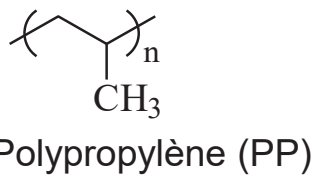
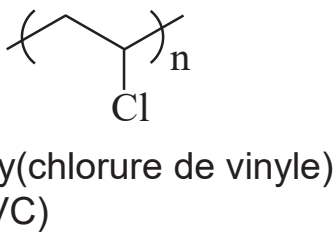
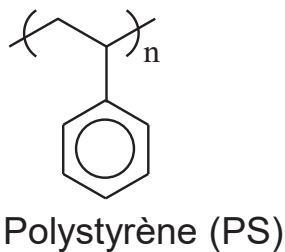
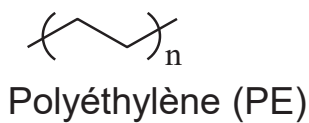
AMINO ACID STRUCTURES AND ABBREVIATIONS				
Neutral				
<chem>NC(C(=O)O)C(=O)O</chem> L-Alanine Ala A	<chem>NC(C(C(=O)O)C(=O)O)C(=O)O</chem> L-Asparagine Asn N	<chem>NC(C(S)C(=O)O)C(=O)O</chem> L-Cysteine Cys C	<chem>NC(C(C(=O)O)C(=O)O)C(=O)O</chem> L-Glutamine Gln Q	
<chem>NC(C(=O)O)C(=O)O</chem> Glycine Gly G	<chem>CC(C)C(N)C(=O)O</chem> L-Isoleucine Ile I	<chem>CC(C)C(N)C(=O)O</chem> L-Leucine Leu L	<chem>SCC(N)C(=O)O</chem> L-Methionine Met M	
<chem>NC(Cc1ccccc1)C(=O)O</chem> L-Phenylalanine Phe F	<chem>NC1CCNC1C(=O)O</chem> L-Proline Pro P	<chem>NC(CO)C(=O)O</chem> L-Serine Ser S	<chem>NC(CO)C(=O)O</chem> L-Threonine Thr T	
<chem>NC(Cc1c[nH]c2ccccc12)C(=O)O</chem> L-Tryptophan Trp W	<chem>NC(Cc1ccc(O)cc1)C(=O)O</chem> L-Tyrosine Tyr Y	<chem>CC(C)C(N)C(=O)O</chem> L-Valine Val V	<th>Acidic</th>	Acidic
			<chem>OC(=O)C(N)C(=O)O</chem> L-Aspartic acid Asp D	
<chem>NC(CCN)C(=O)O</chem> L-Arginine Arg R	<chem>NC1C=NC=C1C(=O)O</chem> L-Histidine His H	<chem>NC(CCN)C(=O)O</chem> L-Lysine Lys K	<chem>NC(C(C(=O)O)C(=O)O)C(=O)O</chem> L-Glutamic acid Glu E	

Polymères artificiels : viscose et cellophane (à partir de la cellulose)

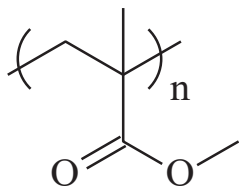


Jacques Brandenberger (1908)

Polymères synthétiques : issus d'une réaction de polymérisation



Surfaces très hydrophobes



transparent



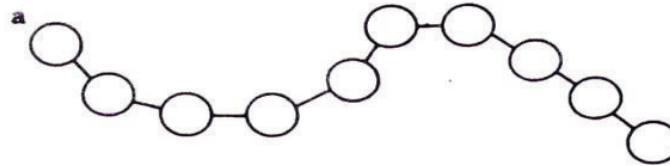
Un peu d'histoire sur les polymères

- Si nous ne considérons que les matières plastiques artificielles ou synthétiques, la date de leur apparition peut être précisée à **1885**. C'est à ce moment en effet que les frères Hyatt inventèrent le Celluloïd.
- Vint ensuite, au début du siècle, la Galalithe.
- Ces deux premiers plastiques dérivent de substances naturelles : la **cellulose** pour le **Celluloïd**, la **caséine** pour la **Galalithe**, et non de corps chimiques purs.
- En **1907**, une étape décisive fut franchie lorsque Baekeland prépara par **polycondensation** de deux molécules simples, le **phénol** et le **formol**, la **Bakélite**.
- Vinrent ensuite les études théoriques de **Staudinger**, père de la chimie des hauts polymères et créateur du mot macromolécule. A partir de **1930**, elles servirent de point de départ aux grandes découvertes faites dans le domaine des plastiques et des élastomères.
- Les travaux de **Carothers**, qui vers **1935** conduisirent aux polyamides, en sont directement issus.
- Il en est de même de l'œuvre récente de **Ziegler et Natta** (Nobel **1963**) mettant en évidence le rôle de la régularité structurale sur les propriétés des macromolécules. Elle a permis la découverte de nouvelles matières aux propriétés physiques et mécaniques remarquables.

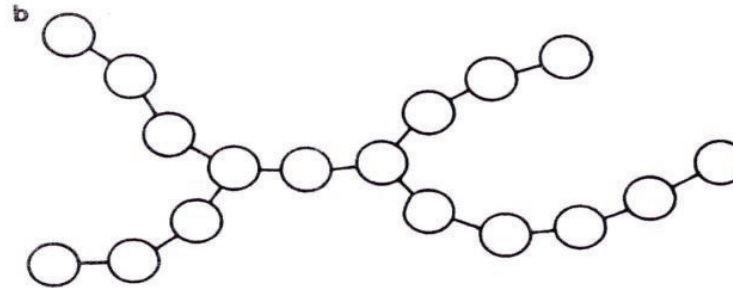
Synthèse des polymères

Les 3 principales architectures des chaînes polymères

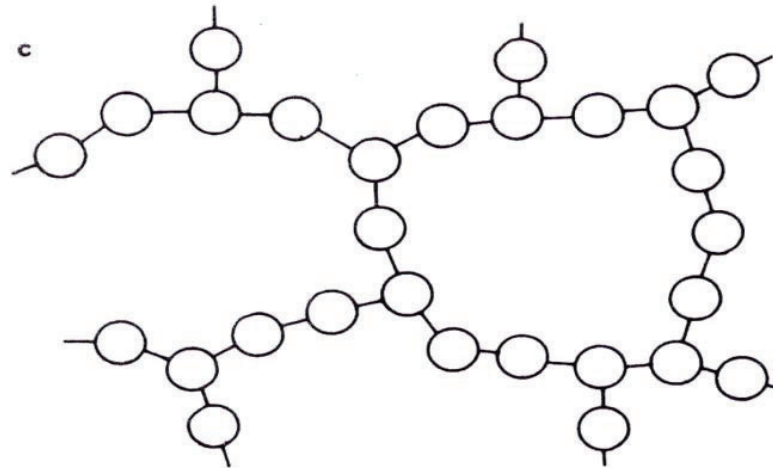
linéaire



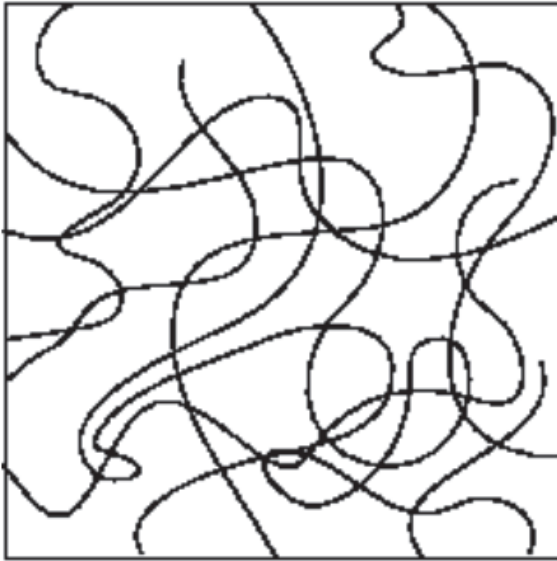
branchée



**réseau
réticulé**



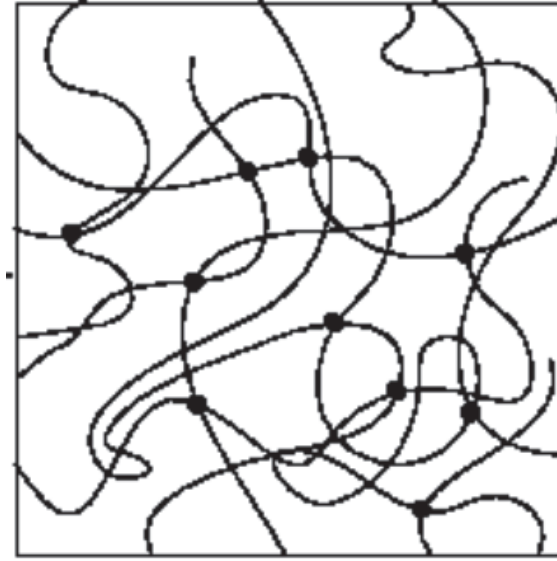
Influence de l'architecture sur les propriétés



Polymère linéaire

MATERIAUX **THERMOPLASTIQUES**
(les PLUS COURANTS)

Matière qui se ramollit (ou fond) au dessus d'une température caractéristique et redevient dure sous cette même température. Le cycle peut être répété. Un polymère linéaire est potentiellement **recyclable**.

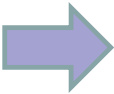
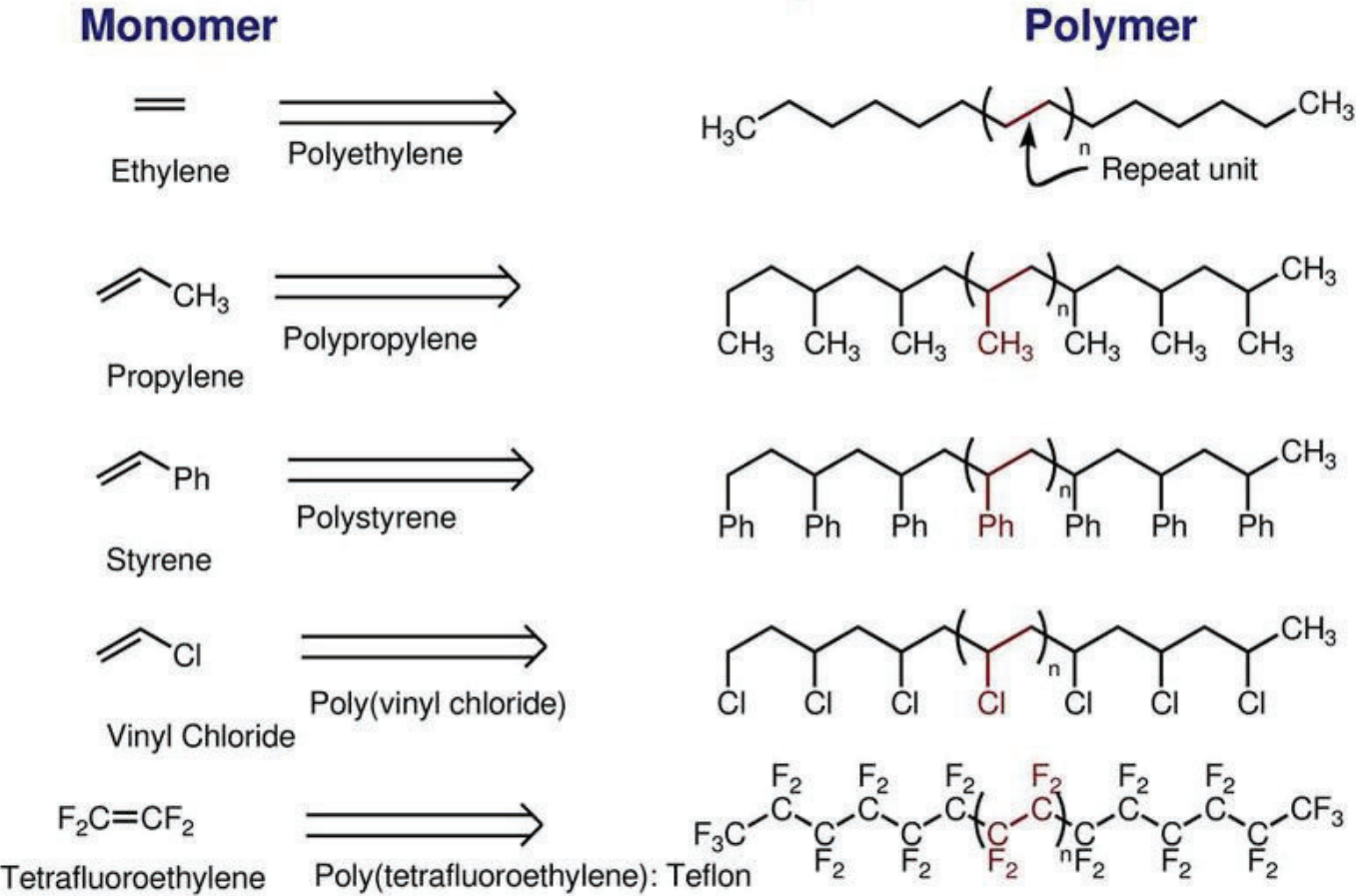


Réseau polymère (3D)

MATERIAUX **THERMODURCISSABLES**
(ou **ELASTOMERES**)

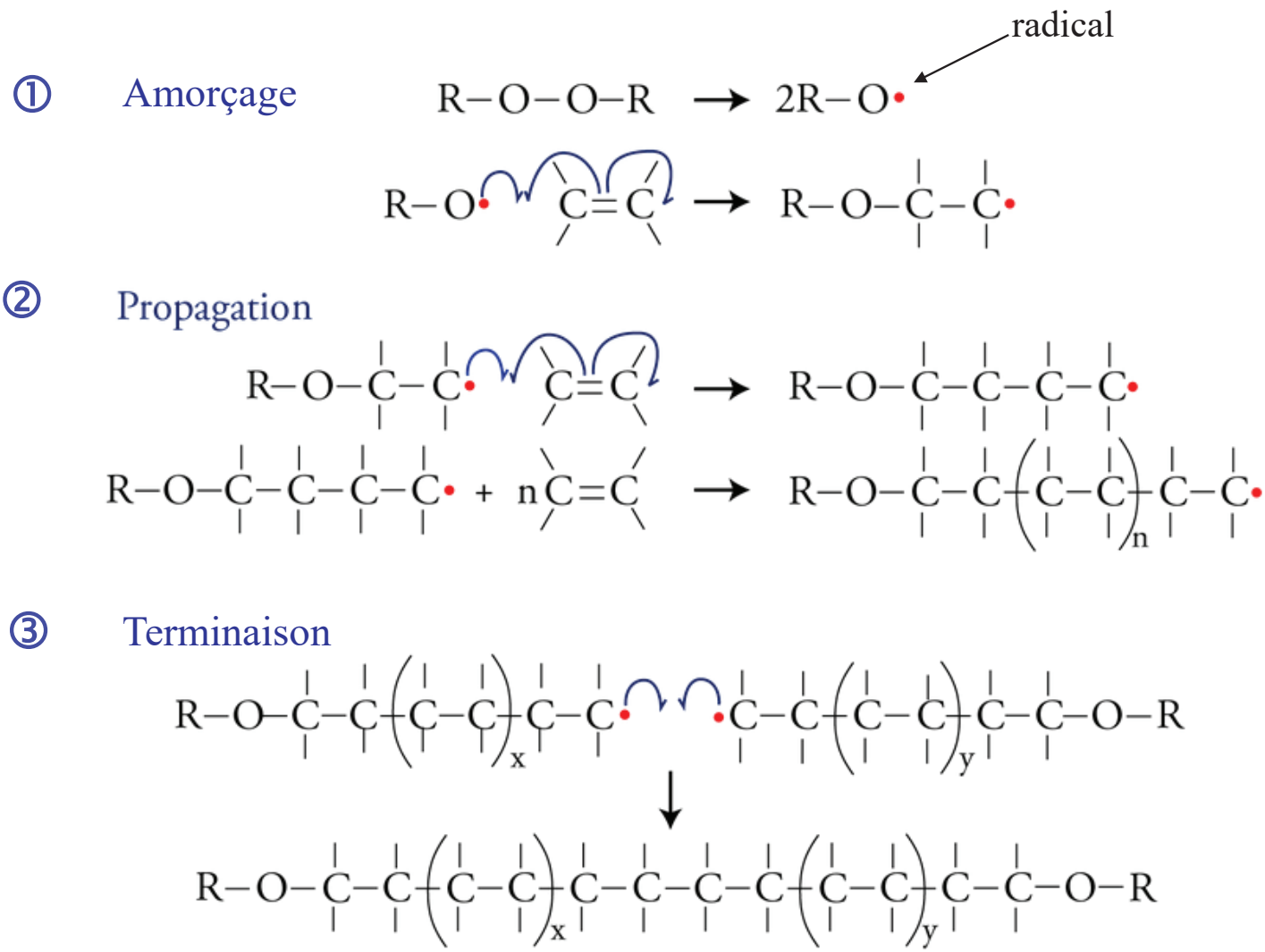
Matière plastique **INSOLUBLE** et **INFUSIBLE** à cause de leur structure tridimensionnelle. Ces matériaux ne sont **pas recyclables** !

Comment sont synthétisés les polymères LINEAIRES ?



polymérisation en '**chaîne**'

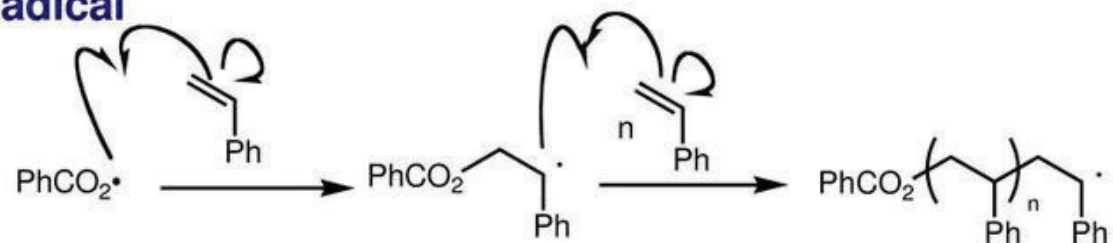
Exemple de polymérisation en chaîne : la polymérisation **RADICALAIRE**



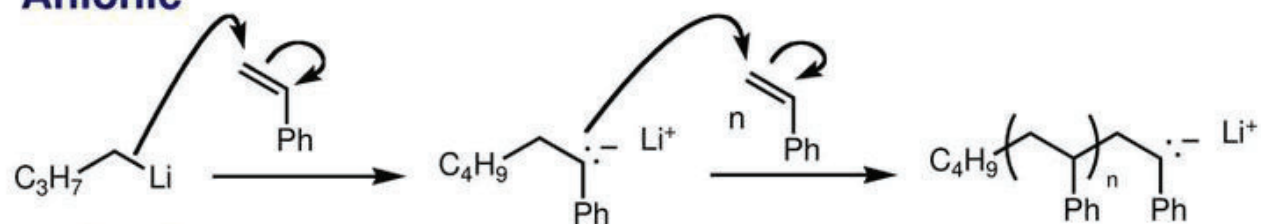
3 types de polymérisation en chaîne ('chain-growth polymerization')

Différents centres actifs

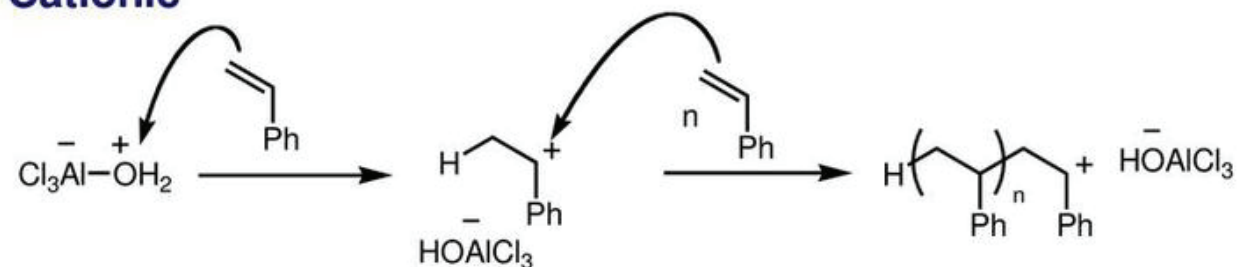
Radical



Anionic



Cationic



Masse molaire : jusqu'à plusieurs millions de g/mol ! ($N > 10000$)

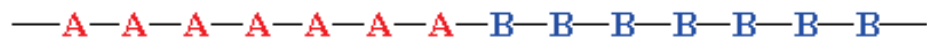
Copolymères



copolymères statistiques

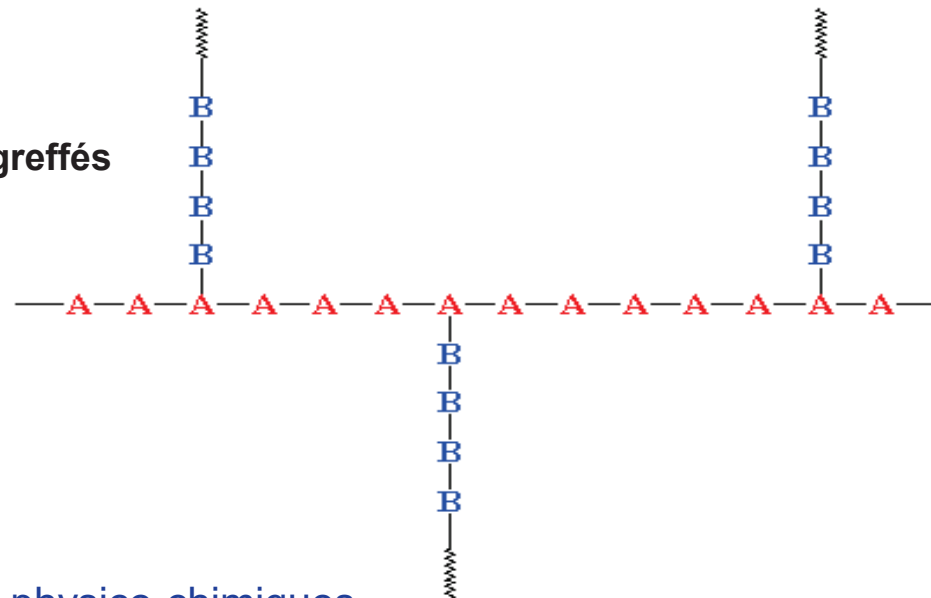


copolymères alternés



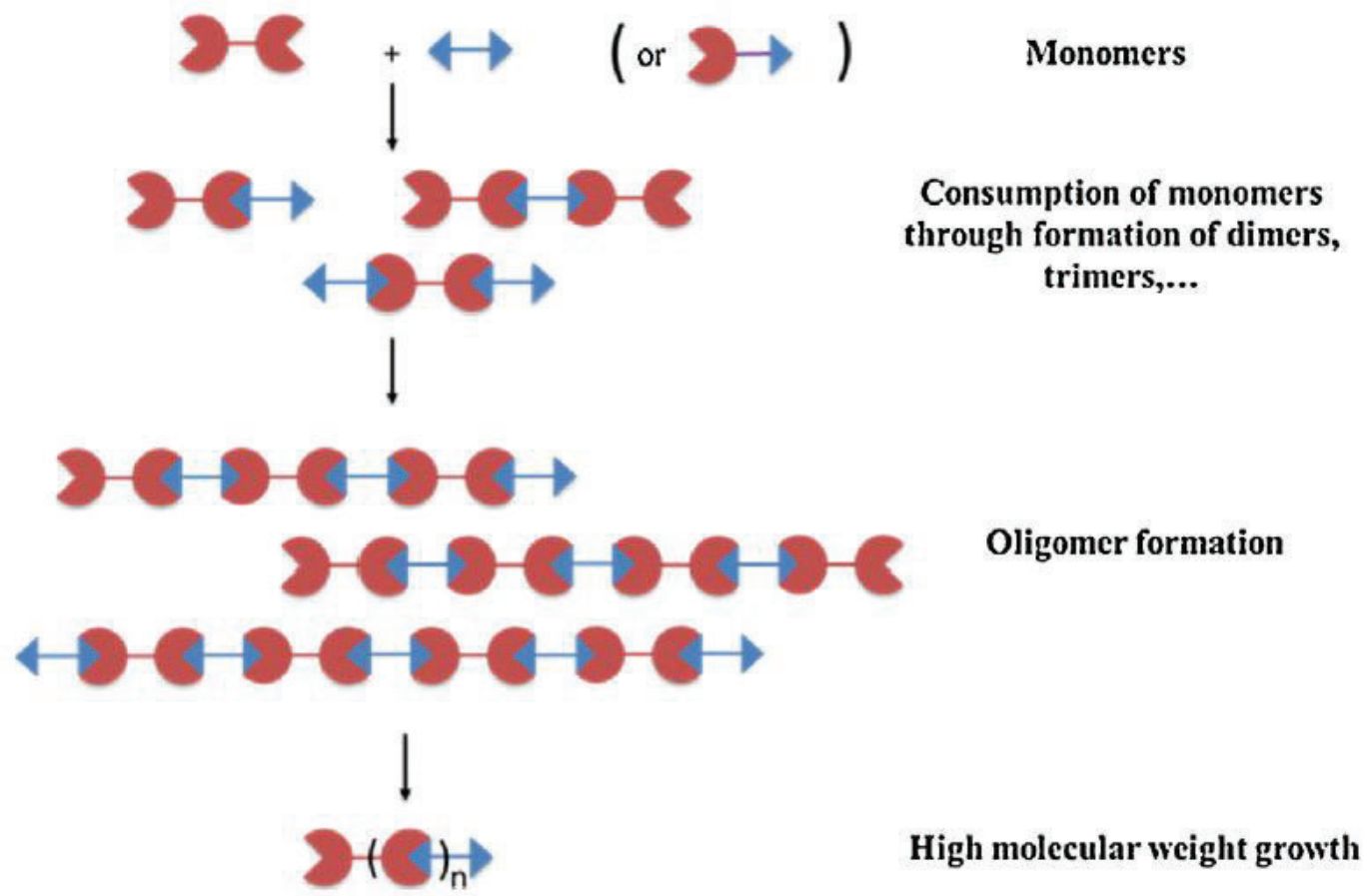
copolymères à blocs

copolymères greffés



Très grande variété des propriétés physico-chimiques

Polymères linéaires : La polymérisation par étapes ('step growth polymerization')

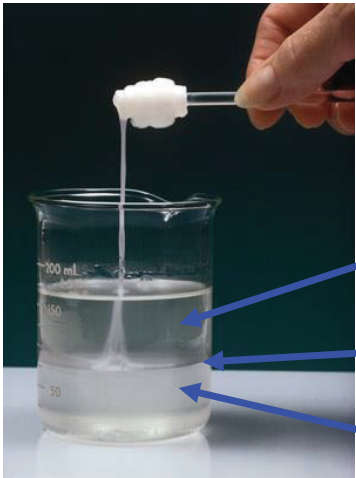
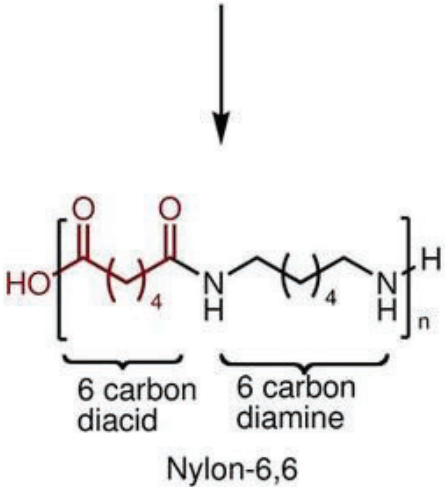
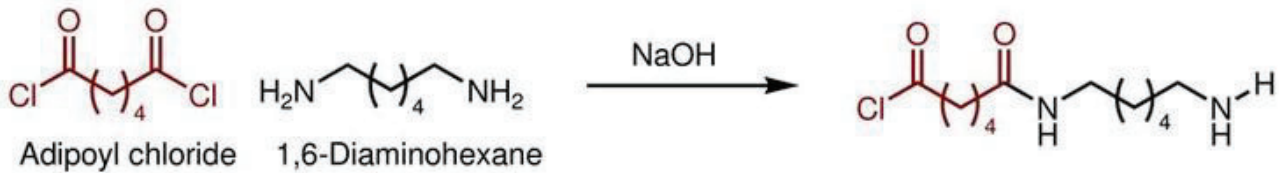


Exemple de de polymérisation par étapes



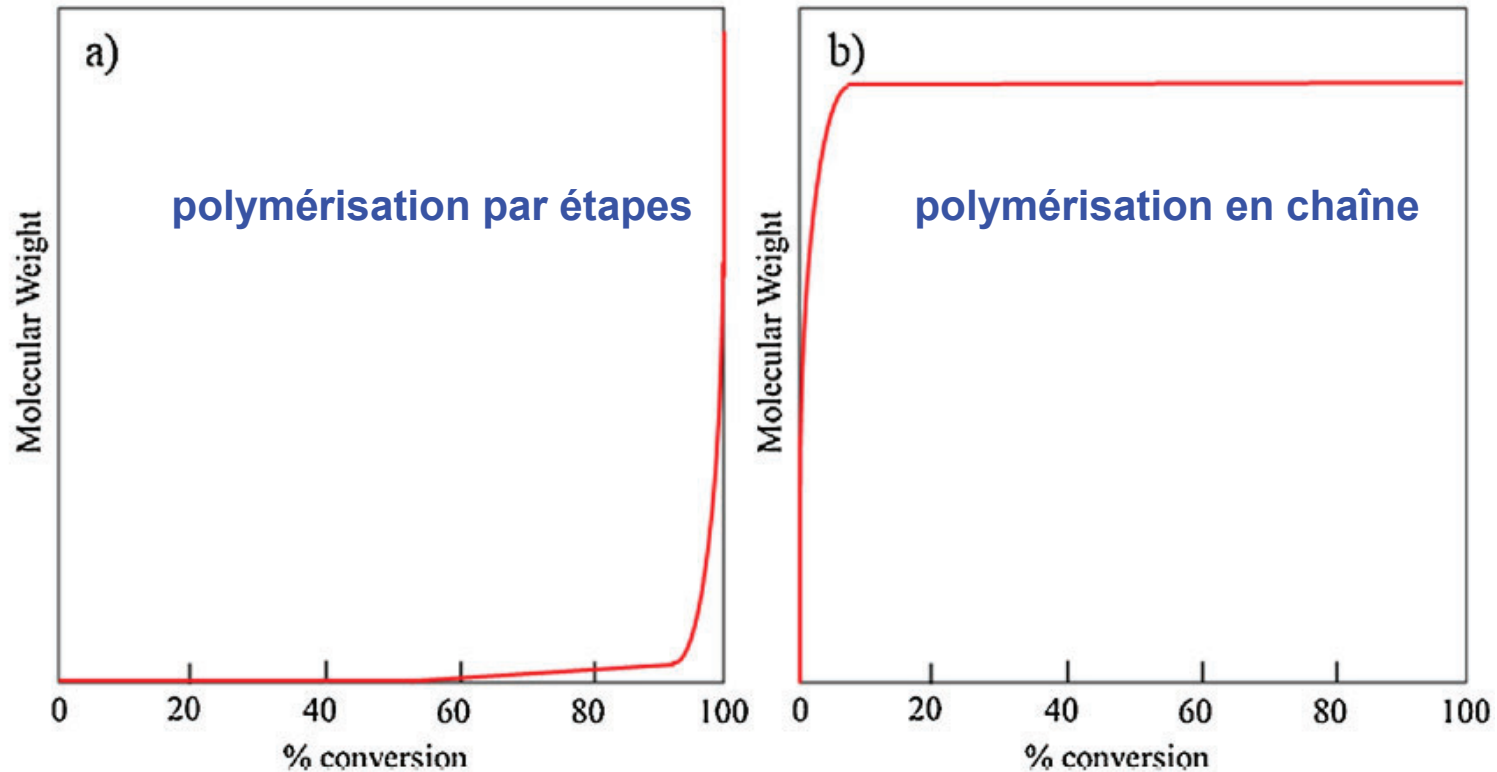
Wallace H. Carothers

Nylon-6,6



- Adipoyl chloride in hexane
- Nylon 6,6
- Diamine, NaOH, in H₂O

Masse molaire et conversion du monomère



$$\overline{DP}_n = \frac{1}{1 - p}$$

$$\overline{DP}_n = \frac{\bar{M}_n}{M_0}$$

\overline{DP}_n : degré de polymérisation
 p : taux de conversion du monomère

\bar{M}_n : masse molaire moyenne en nombre
 M_0 : masse molaire de l'unité monomère

Masse molaire moyenne des polymères et dispersité

Masse molaire moyenne en nombre

$$\bar{M}_n = \frac{\sum_i N_i M_i}{\sum_i N_i}$$

N_i : nombre de macromolécules
 M_i : masse de chaque espèce i

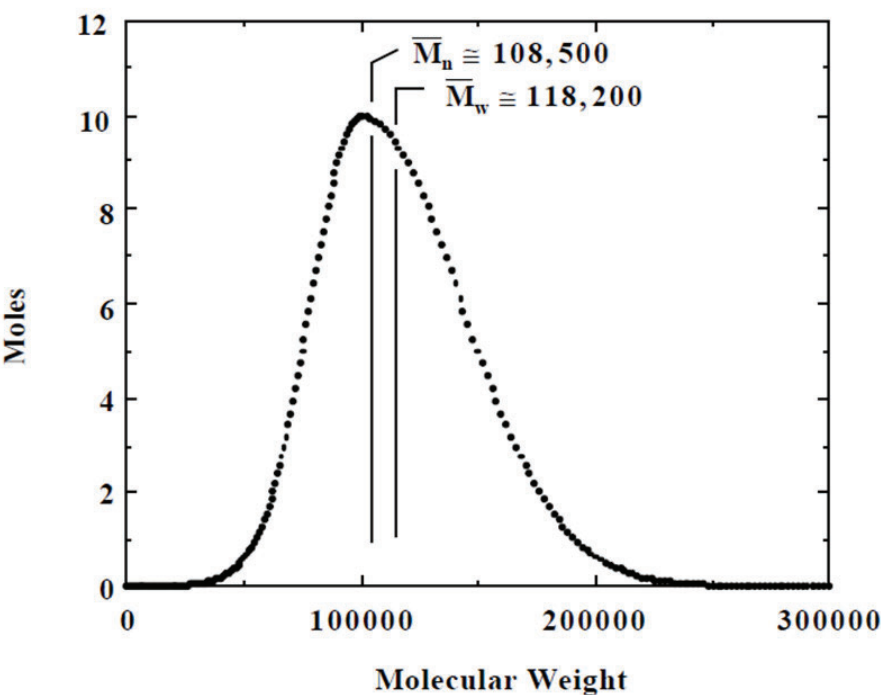
Masse molaire moyenne en masse

$$\bar{M}_w = \frac{\sum_i N_i M_i^2}{\sum_i N_i M_i} = \sum_i w_i M_i$$

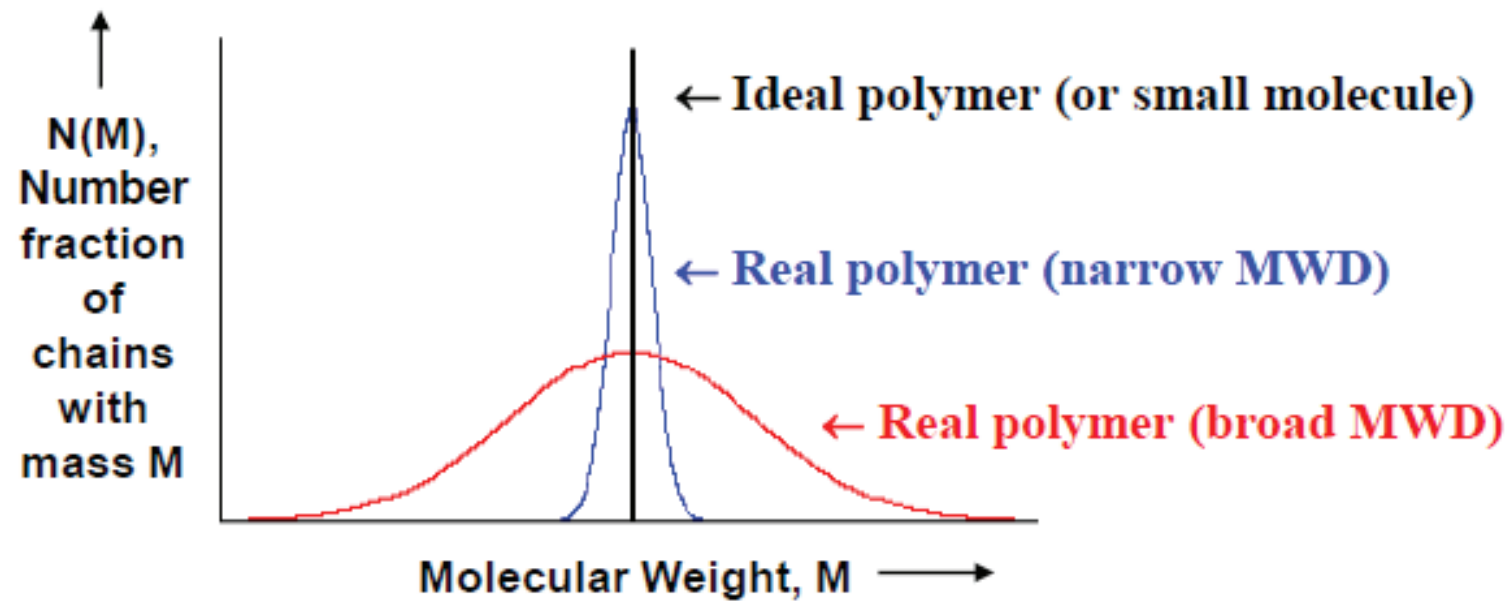
w_i : fractions massiques de chaque espèce i
 M_i : masse de chaque espèce i

Dispersité

$$\mathfrak{D} = \frac{\bar{M}_w}{\bar{M}_n}$$

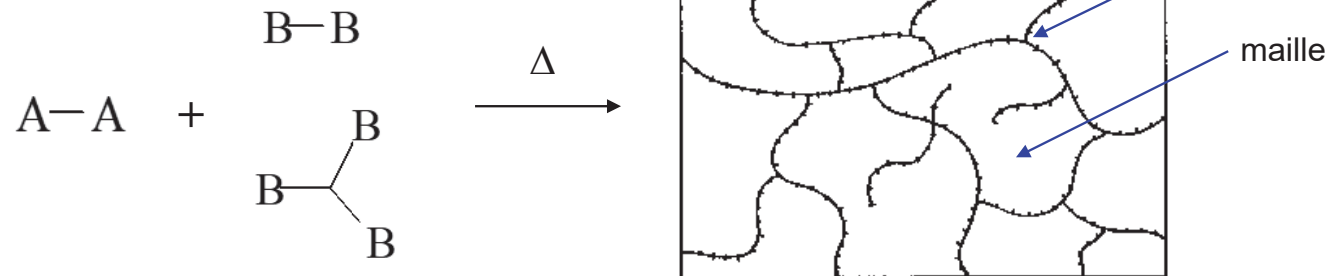


Masse molaire moyenne des polymères et dispersité



Polymère tridimensionnels (insolubles & infusibles)

① Thermodurcissables



Polymère qui durcit sous l'action d'une énergie (la chaleur par exemple) ; prend sa forme définitive ; réseau 3D

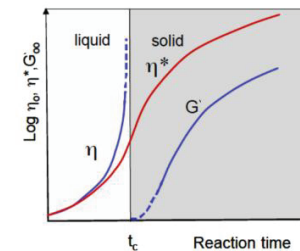
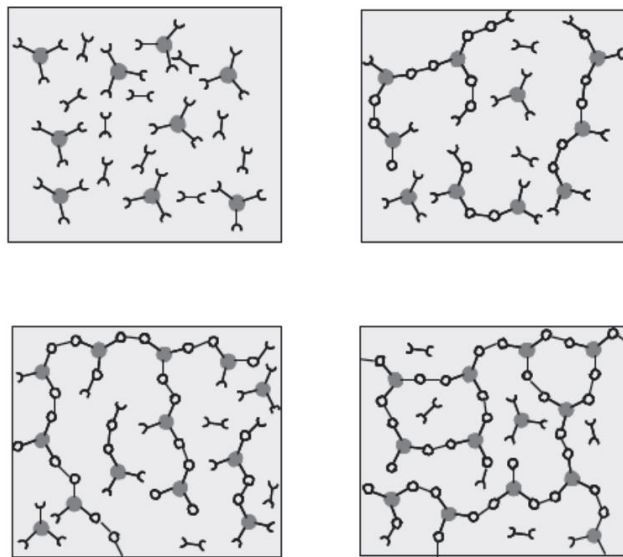
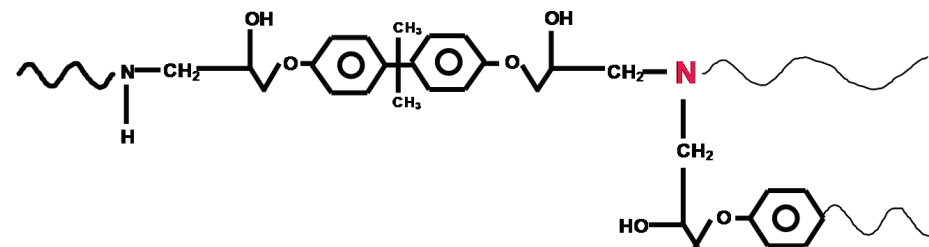
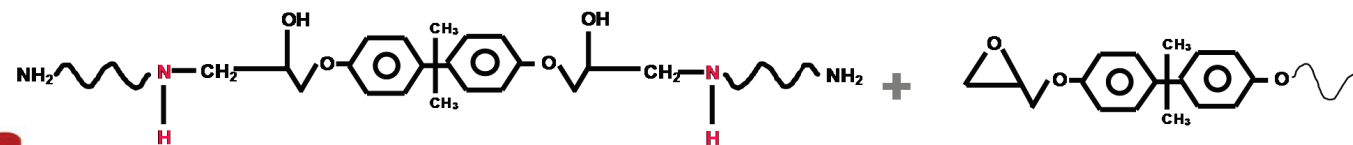
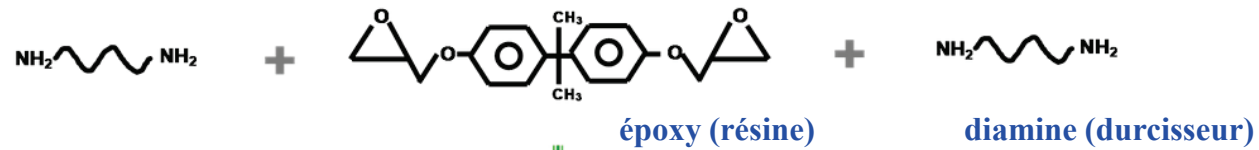


Figure 2. Measurement of the viscosity of a curing resin in a steady shear and a dynamic oscillatory test

Thermodurcissables : colle époxy

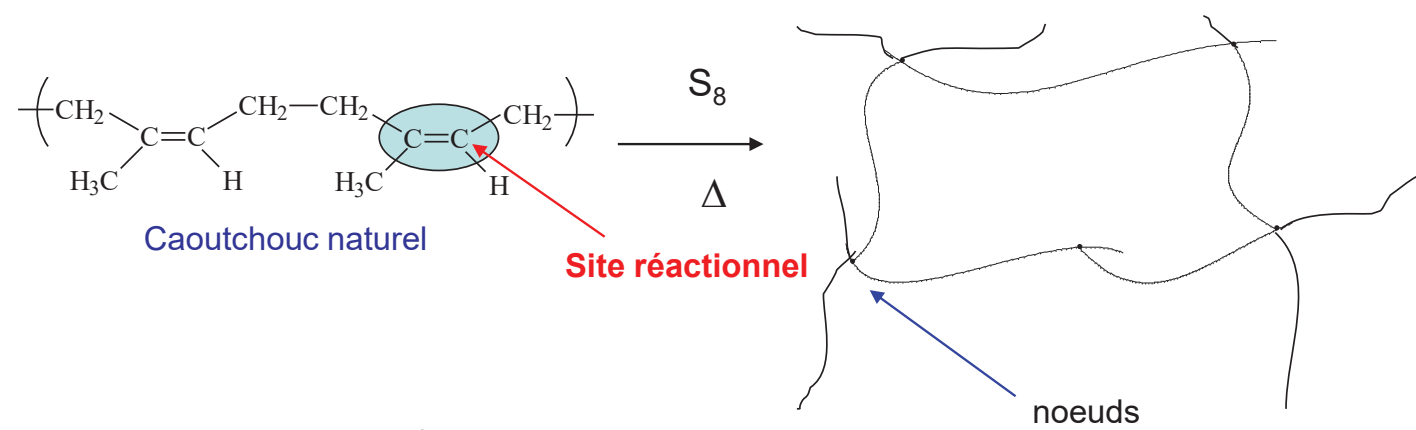


époxy-**diamine**

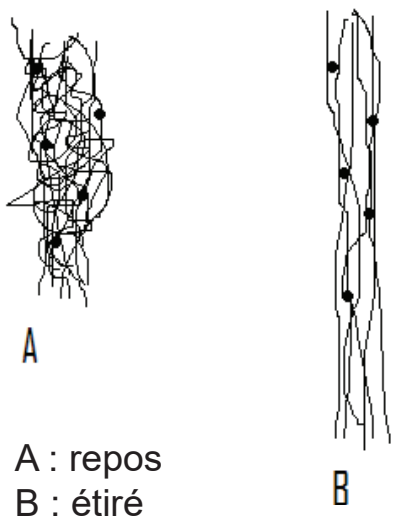
Polymère tridimensionnels (insolubles & infusibles)

② Elastomères

vulcanisation par le soufre du caoutchouc naturel



réseau lâche (faible densité réticulation)

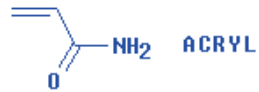


Polymère présentant des propriétés élastiques pouvant supporter de très grandes déformations avant rupture ; réseau 3D

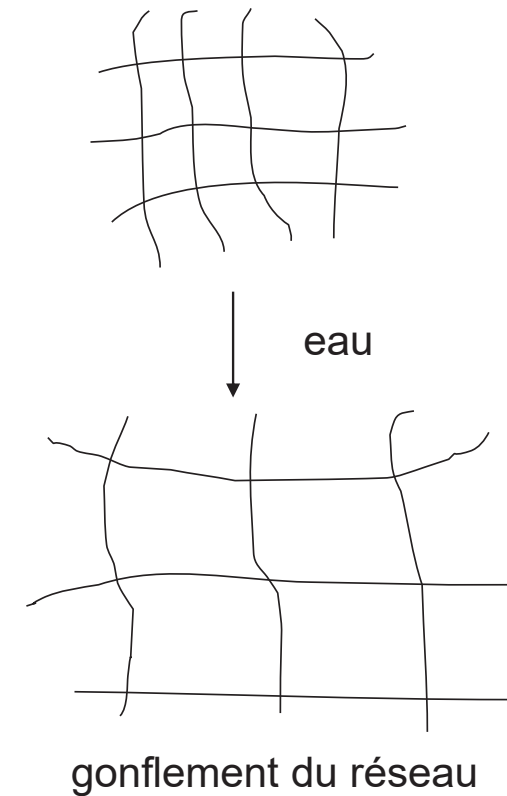
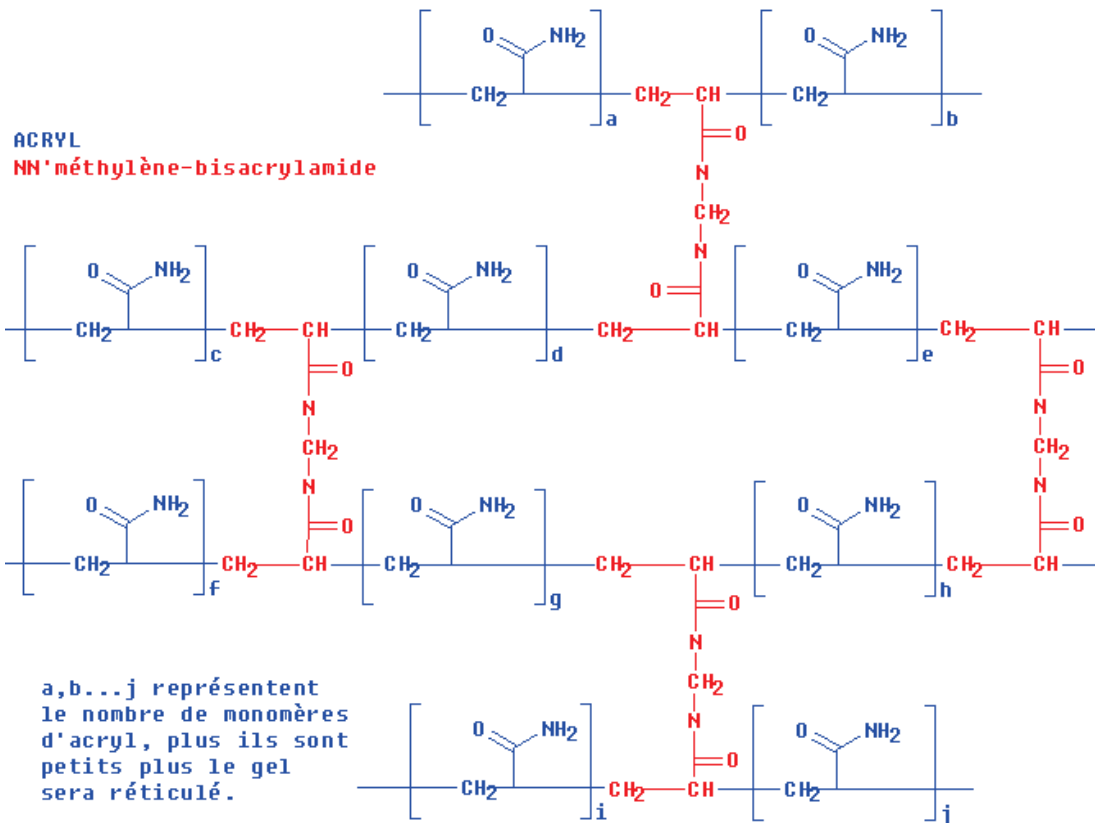
Polymère tridimensionnels (insolubles & infusibles)

③ Gels chimiques

Ex : gel de polyacrylamide (utilisation en milieu aqueux)



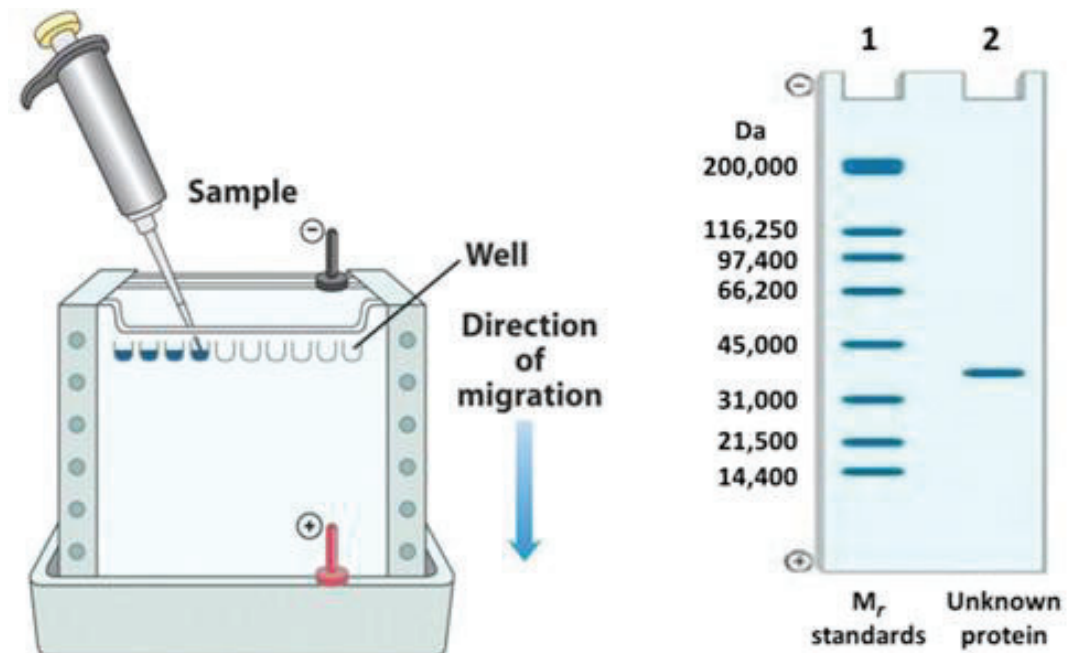
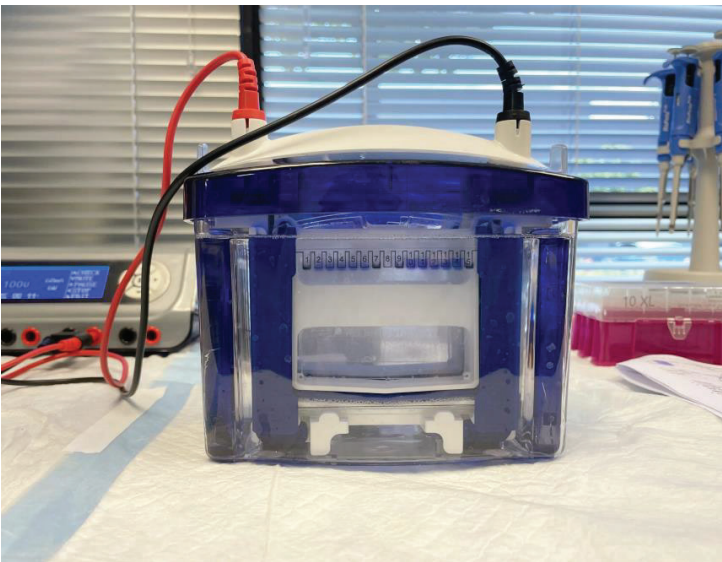
Polymérisation radicalaire



Polymère tridimensionnels (insolubles & infusibles)

Application des gels chimiques : séparation d'un mélange d'acides nucléiques

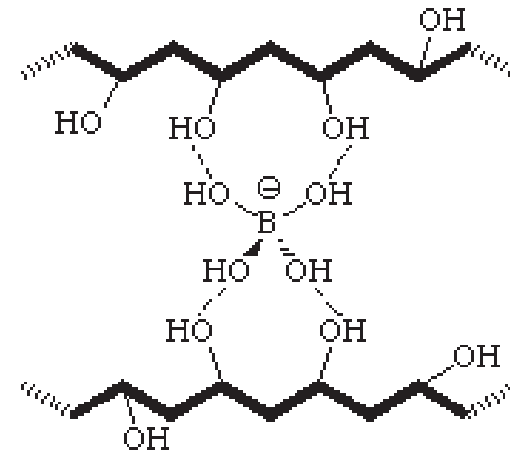
Électrophorèse sur gel de polyacrylamide en présence de dodécylsulfate de sodium = **SDS-PAGE**



Polymère tridimensionnels (insolubles & infusibles)

④ Gels physiques

Ex : le 'slime' : alcool polyvinylique + tétraborate de sodium (borax)



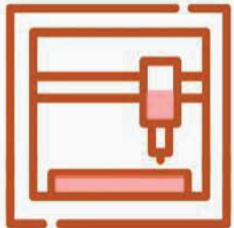
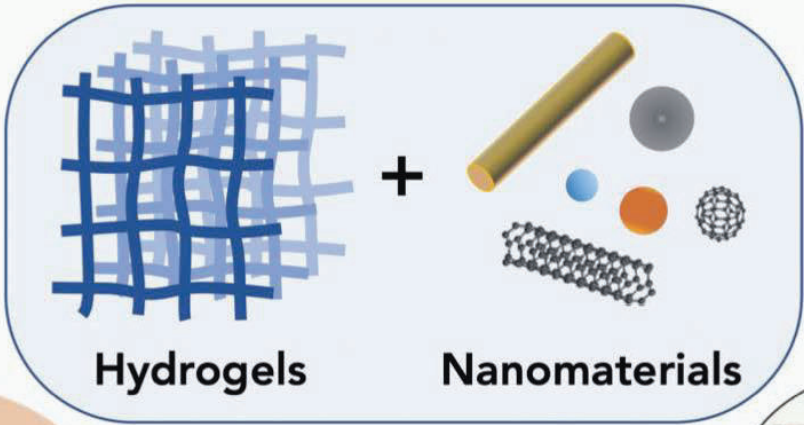
- Il casse net lorsqu'on le brusque, mais coule très lentement lorsqu'on le suspend.
- Il peut s'étirer sur plusieurs mètres sous son propre poids.
- Deux morceaux de Slime® peuvent fusionner lorsqu'on les mélange.
- Posé sur une surface lisse, le Slime® s'étale en forme de flaque circulaire.
- Déposé dans un récipient, il en prend lentement la forme.

Application des hydrogels en médecine

Multifunctional Hydrogel Nanocomposites



Drug delivery



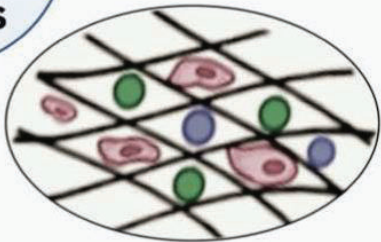
Bioprinting



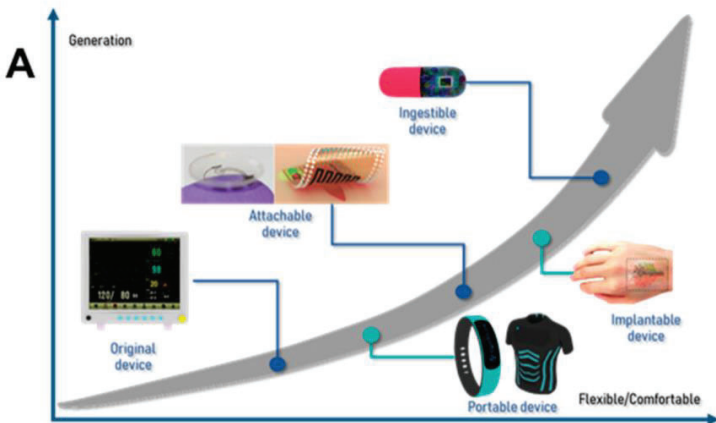
Wound healing



Biowearable devices

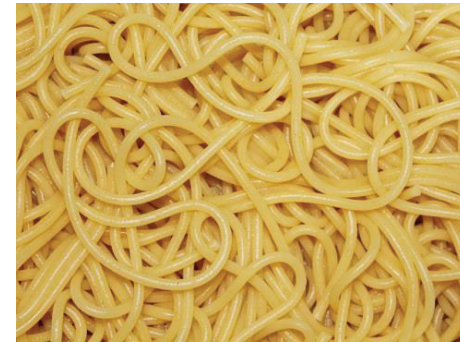


Tissue Engineering

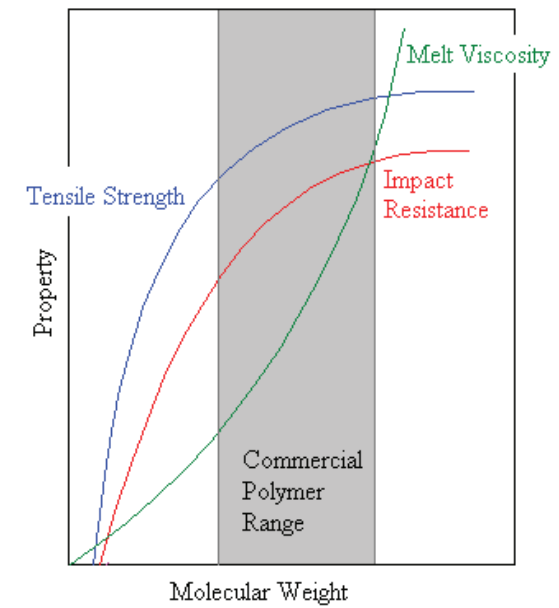


Morphologie des polymères

LA propriété essentielle des matériaux polymères ...



...est l'enchevêtrement des chaînes.



Masse (molaire) critique d'enchevêtrement

L'enchevêtrement régit les propriétés d'écoulement du polymère

Etat enchevêtré quand **M polymère** > **Mc** (masse critique)



La masse critique est liée à la **rigidité** de la chaîne de polymère



Viscosité intrinsèque $[\eta]$

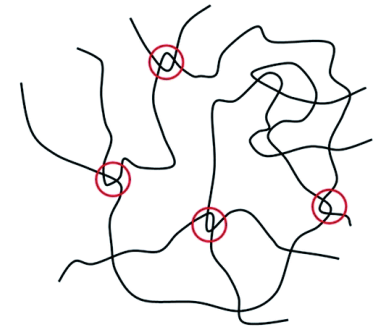
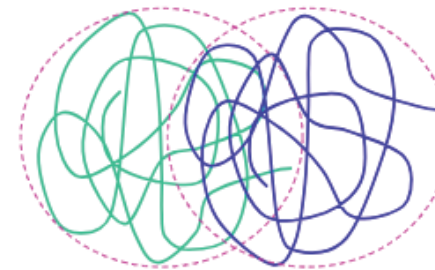
$$[\eta] = KM_v^\alpha$$

Relation de Mark-Houwink-Sakurada

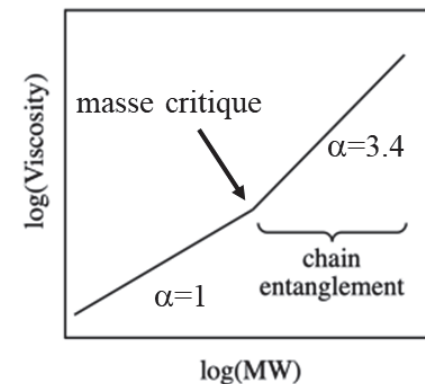
K : constante numérique

M_v : masse molaire

α : constante numérique



Topological entanglement



Exemples de valeurs de M_c

Polyéthylène 3500 g/mol

Polymétacrylate de méthyle 29500 g/mol

Polydiméthylsiloxane 24500 g/mol

Polyacétate de vinyle 24500 g/mol

Polystyrène 31200 g/mol

K et α varient en fonction du couple solvant/polymère :

$\alpha = 0,5 \rightarrow$ solvant idéal (conditions théta)

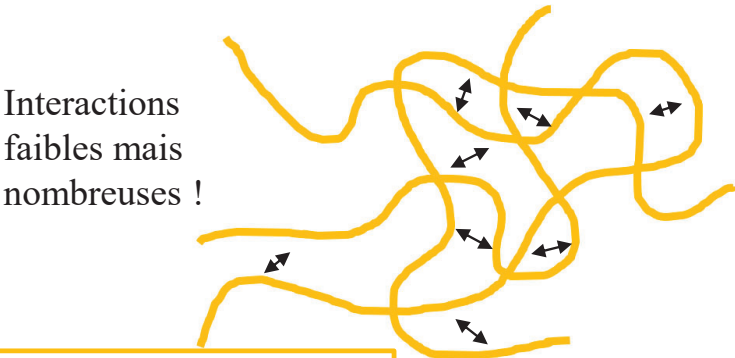
$\alpha = 1 \rightarrow$ bon solvant mais non idéal

$\alpha > 1 \rightarrow$ particule semi-rigide ou rigide

Cohésion dans les matériaux polymères

La **cohésion** dépend de l'intensité des **interactions moléculaires** qui se développent entre groupements moléculaires

- Cohésion '**physique**' : enchevêtrements (*entanglements*)
- Cohésion '**chimique**' : forces de van der Waals, liaison H, ...



Interactions faibles mais nombreuses !

Interactions intermoléculaires				
Force	Model	Basis of Attraction	Energy (kJ/mol)	Example
Bonding				
Covalent		Nuclei-shared e ⁻ pair	150–1100	H—H
Nonbonding (Intermolecular)				
Ion-dipole		Ion charge–dipole charge	40–600	Na ⁺ ·····O—H
H bond		Polar bond to H–dipole charge (high EN of N, O, F)	10–40	:Ö—H·····tÖ—H
Dipole-dipole		Dipole charges	5–25	I—Cl·····I—Cl
Ion-induced dipole		Ion charge–polarizable e ⁻ cloud	3–15	Fe ²⁺ ·····O ₂
Dipole-induced dipole		Dipole charge–polarizable e ⁻ cloud	2–10	H—Cl·····Cl—Cl
Dispersion (London)		Polarizable e ⁻ clouds	0.05–40	F—F·····F—F

La liaison hydrogène

(A et B sont des éléments fortement électronégatifs)

Protéines, polyamide

Les forces de Keesom

Polymères avec des groupements polaires
ex : polyester

Les forces de London

Dépend de la dyssimétrie de la configuration électronique

Tous les polymères et surtout ceux sans groupement polaire

Les forces de Debye

Groupement moléculaire polarisable voisin
ex : polyester insaturé

Conformation des chaînes et morphologie

conformation statistique



Amorphe

pelote statistique



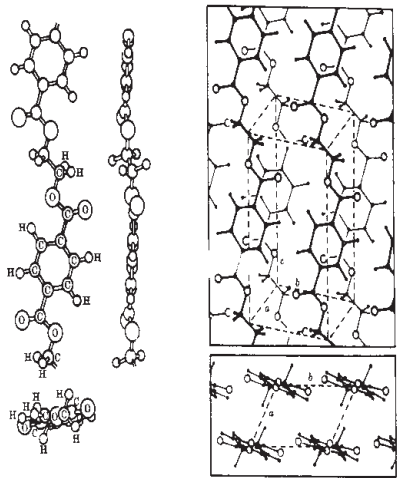
Absence de régularité des enchaînements ou de la configuration
=
Désordre maximal

conformation régulière



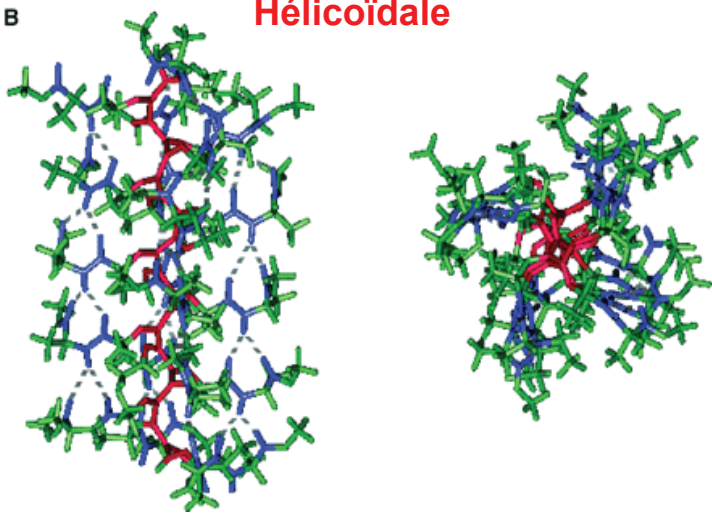
Cristallin

planaire

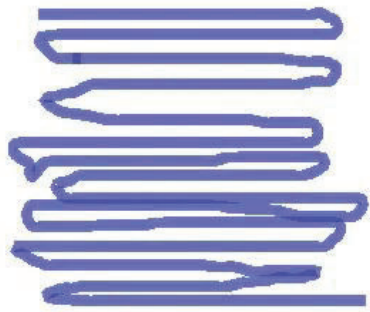


Configuration et disposition des chaînes dans la maille du polyéthylène glycol.²⁴

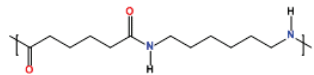
Hélicoïdale



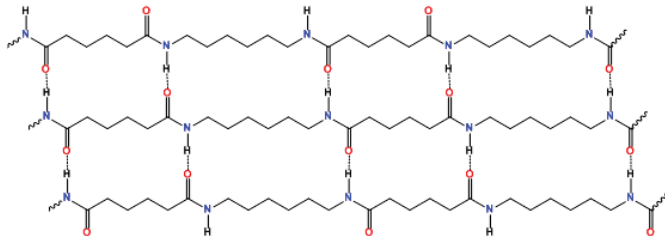
Morphologie des polymères *thermoplastiques* (linéaires)



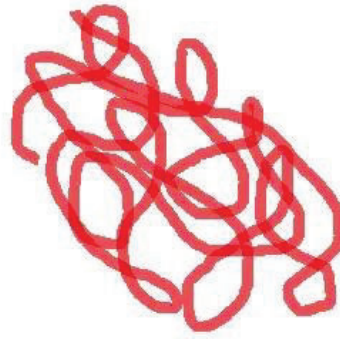
polymère cristallin



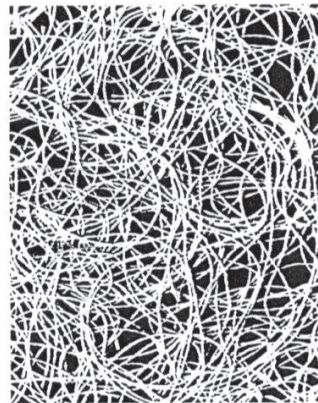
Repeating Unit
Nylon 6,6



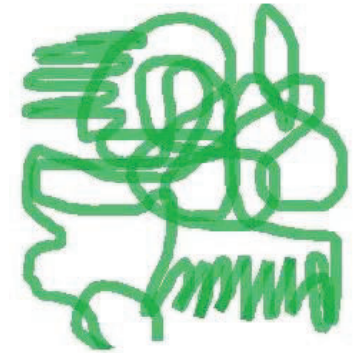
Structure ordonnée
Hautes propriétés mécaniques



polymère amorphe



Structure aléatoire

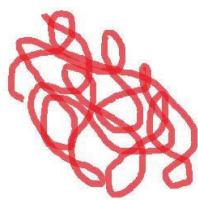


polymère semi-cristallin

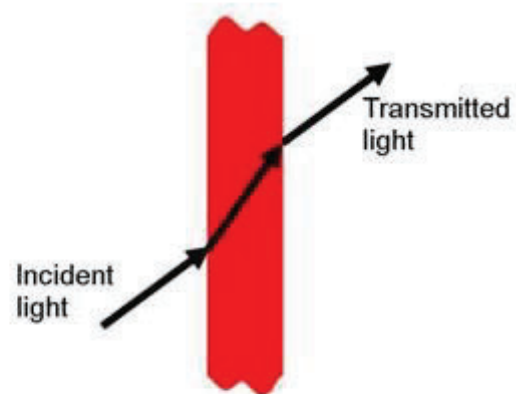


Mélange de parties amorphes
et de parties cristallines

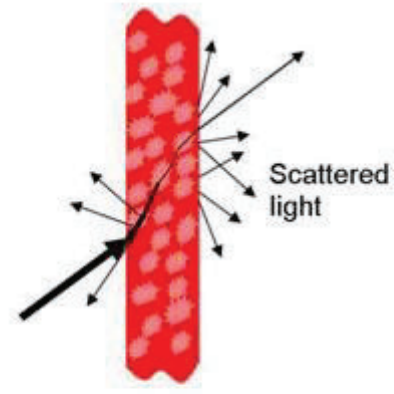
Morphologie des polymères *thermoplastiques*



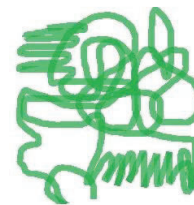
polymère amorphe



Amorphous

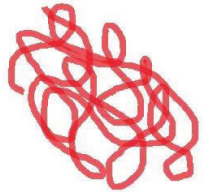


Semi-crystalline

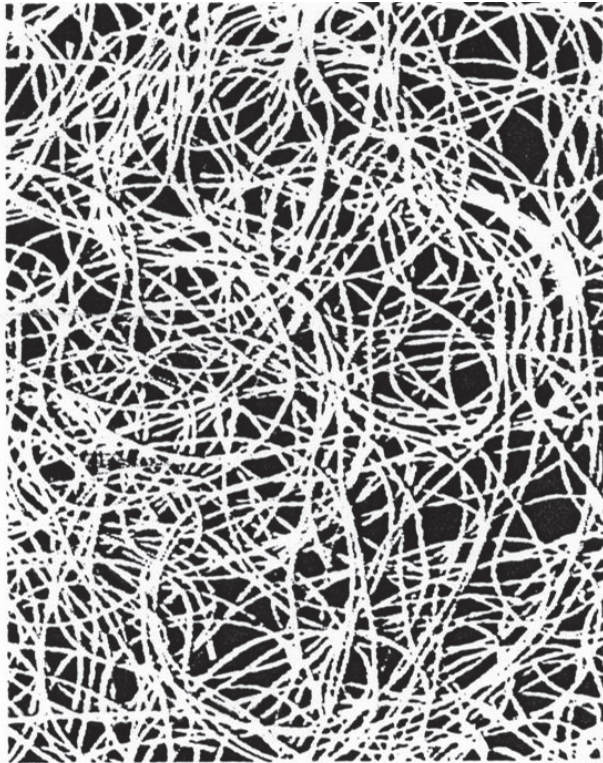


polymère semi-cristallin

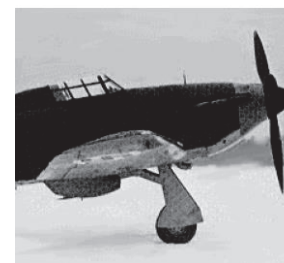
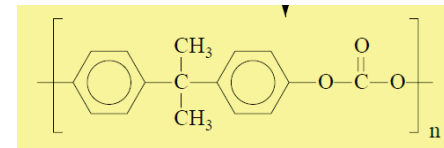
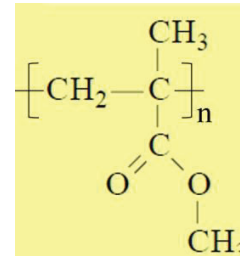
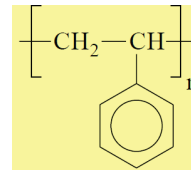
Polymères amorphes



polymère amorphe

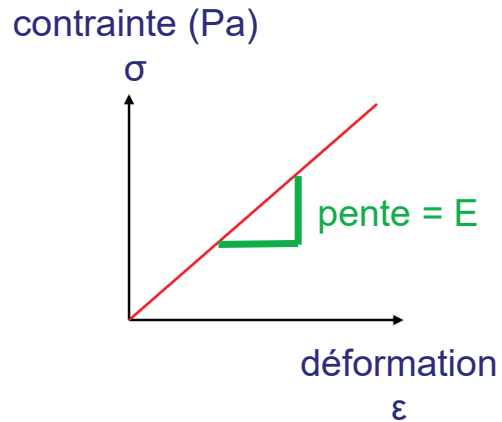
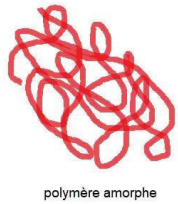


- Polystyrène
- Polyméthacrylate de méthyle
- Polycarbonate
- ...



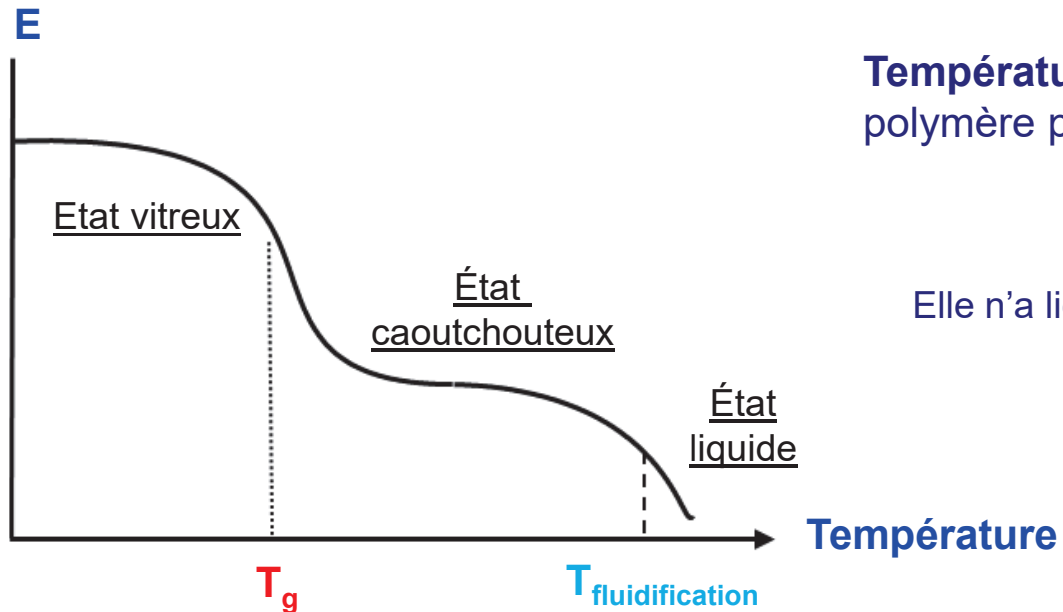
Plexiglas

Polymères amorphes : la température de transition vitreuse (T_g)



Module d'Young (E) - relation qui lie la déformation du matériau et la force qu'il faut fournir pour le déformer.

Plus la pente est élevée, plus le polymère est rigide.



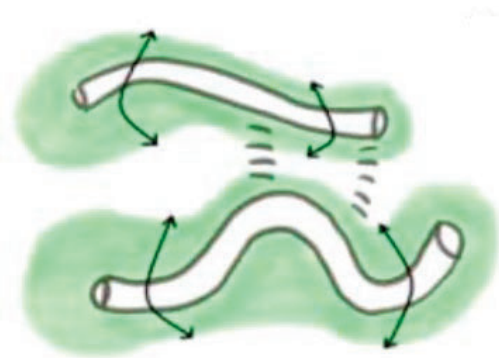
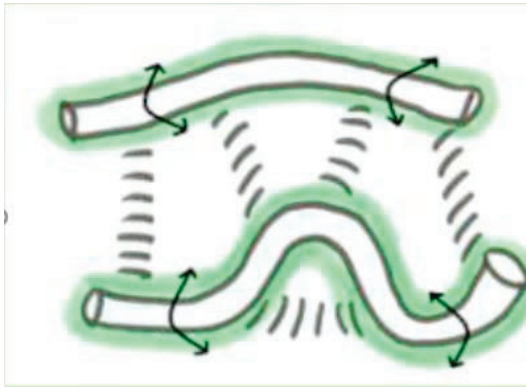
Température de transition vitreuse - température à laquelle un polymère passe d'un état dur et fragile à un état mou et souple.

Elle n'a lieu que pour les polymères amorphes ou les polymères semi-cristallins.

Polymères amorphes : la température de transition vitreuse (T_g)



Concept du volume libre



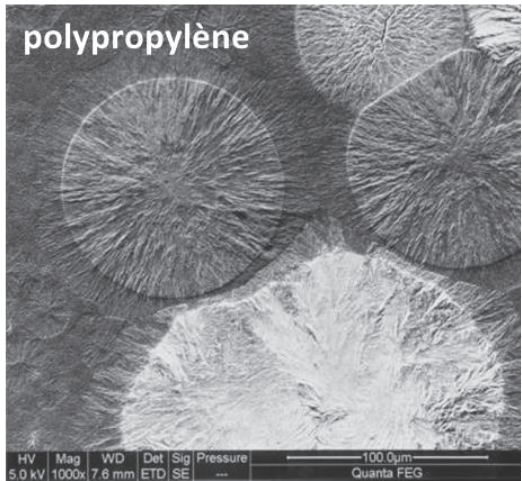
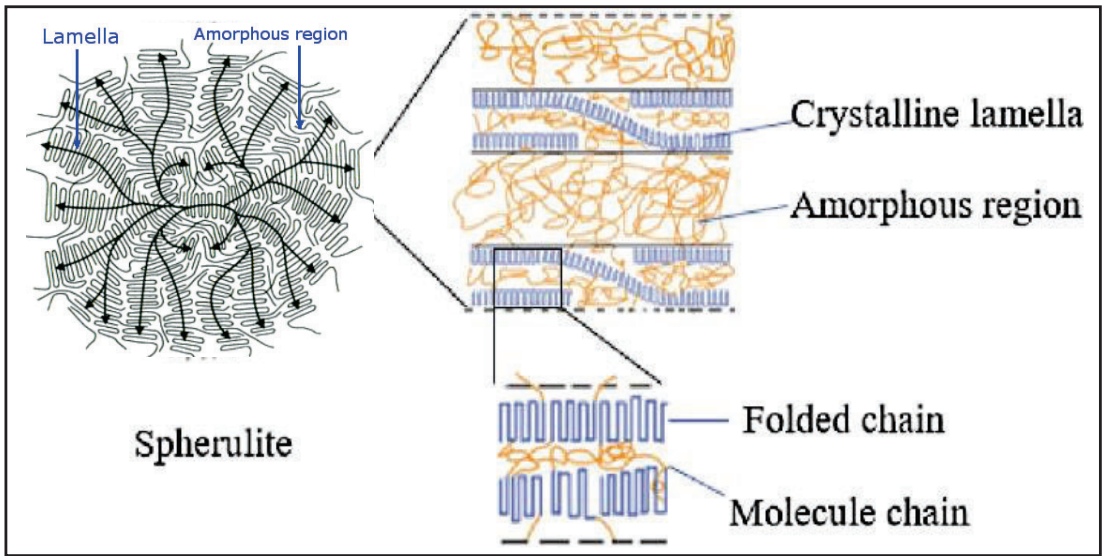
La **T_g** reflète la **mobilité** de la chaîne principale et des chaînes en dérivation. Elle est liée :

- à la **flexibilité** des liaisons des chaînes.
- au **volume libre** qui reflète la place entre les chaînes.

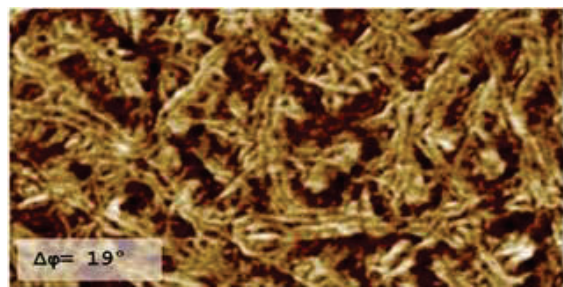
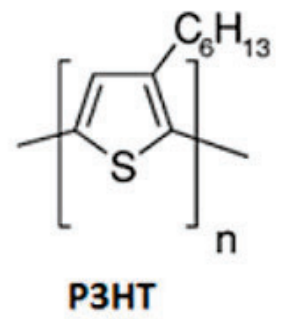
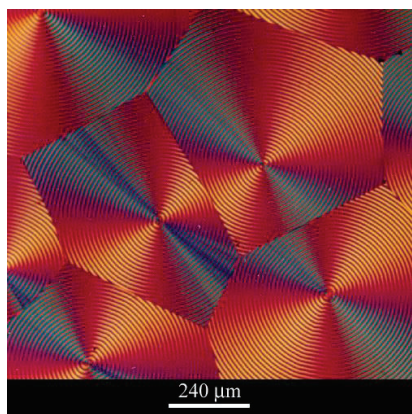
Le volume libre **augmente avec la température** : l'amplitude des oscillations augmente.

Plus il y a de volume libre et plus la T_g est basse.

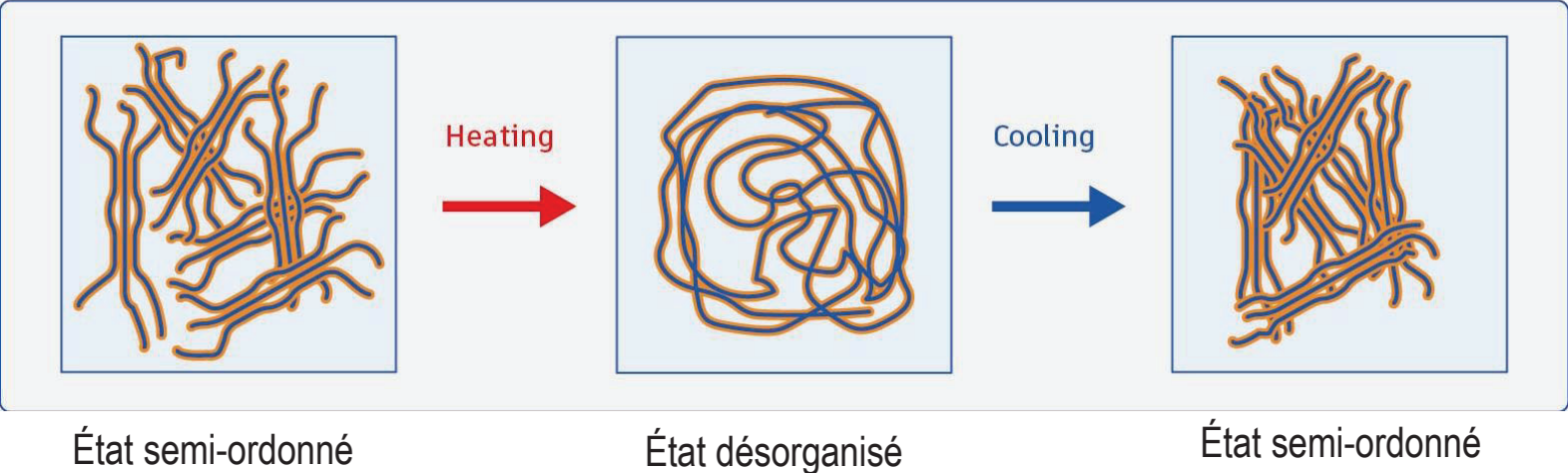
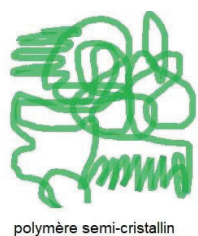
Morphologie des polymères semi-cristallins



Sphérolites de polyhydroxybutyrate observés en microscopie à lumière polarisée



Polymères semi-cristallins : La température de fusion (T_m)

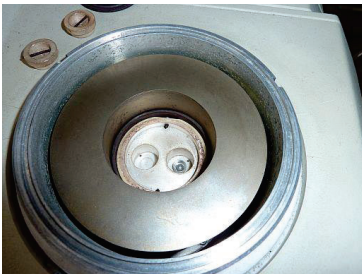
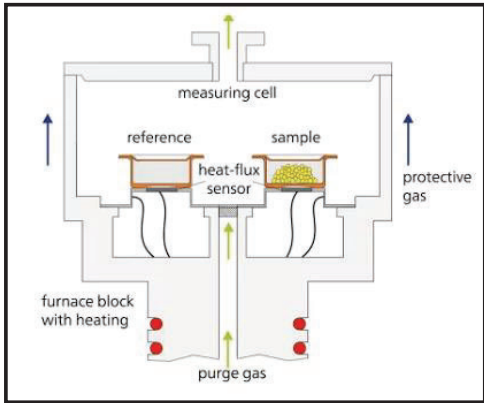


T_G faible pour des polymères 'simples'

T_G et T_M augmentent avec la complexité des polymères

<i>Material</i>	<i>Glass Transition Temperature [°C (°F)]</i>	<i>Melting Temperature [°C (°F)]</i>
Polyethylene (low density)	-110 (-165)	115 (240)
Polytetrafluoroethylene	-97 (-140)	327 (620)
Polyethylene (high density)	-90 (-130)	137 (279)
Polypropylene	-18 (0)	175 (347)
Nylon 6,6	57 (135)	265 (510)
Poly(ethylene terephthalate) (PET)	69 (155)	265 (510)
Poly(vinyl chloride)	87 (190)	212 (415)
Polystyrene	100 (212)	240 (465)
Polycarbonate	150 (300)	265 (510)

Caractérisation thermique des polymères



Calorimétrie différentielle à balayage (DSC)

Polyéthylène téréphtalate

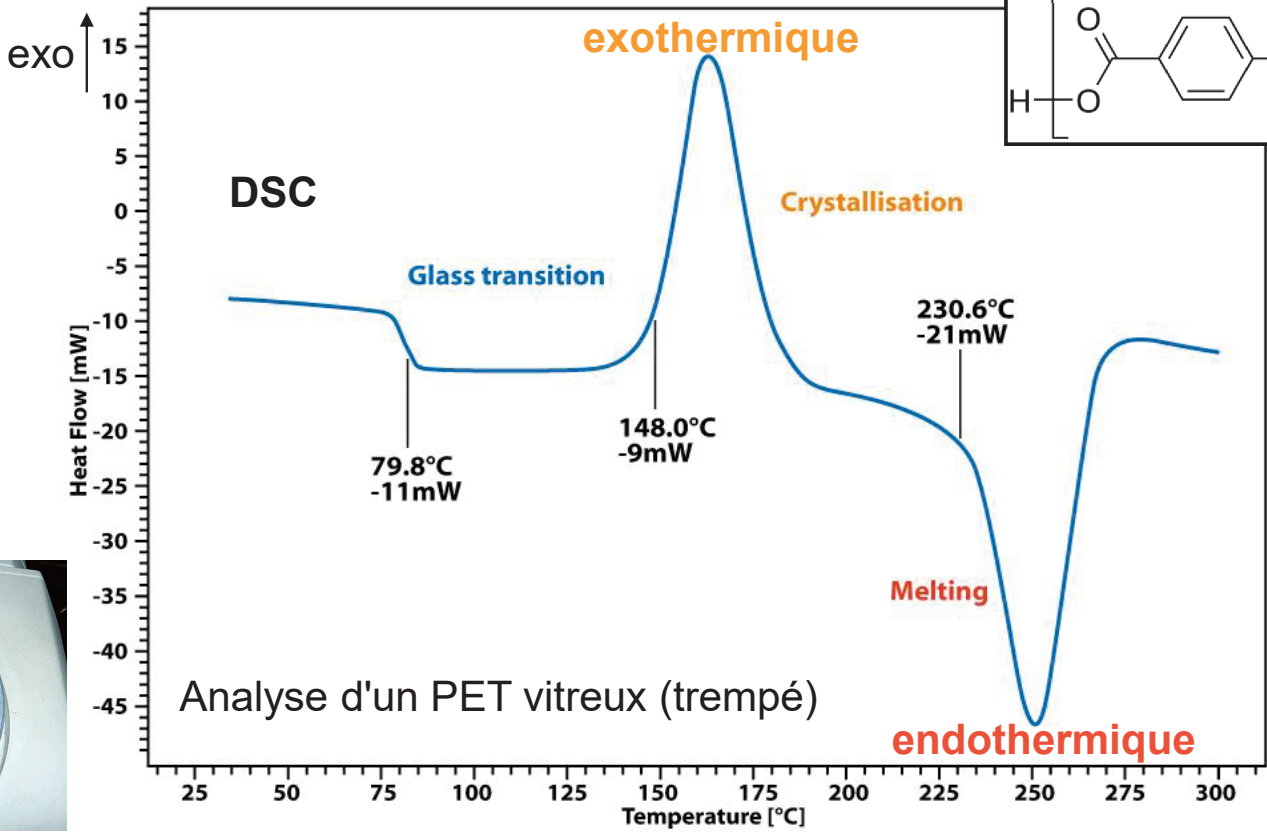
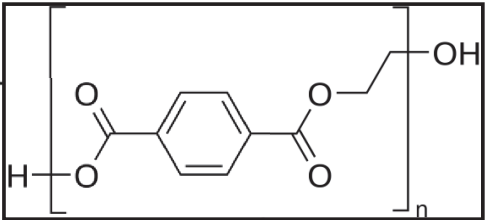
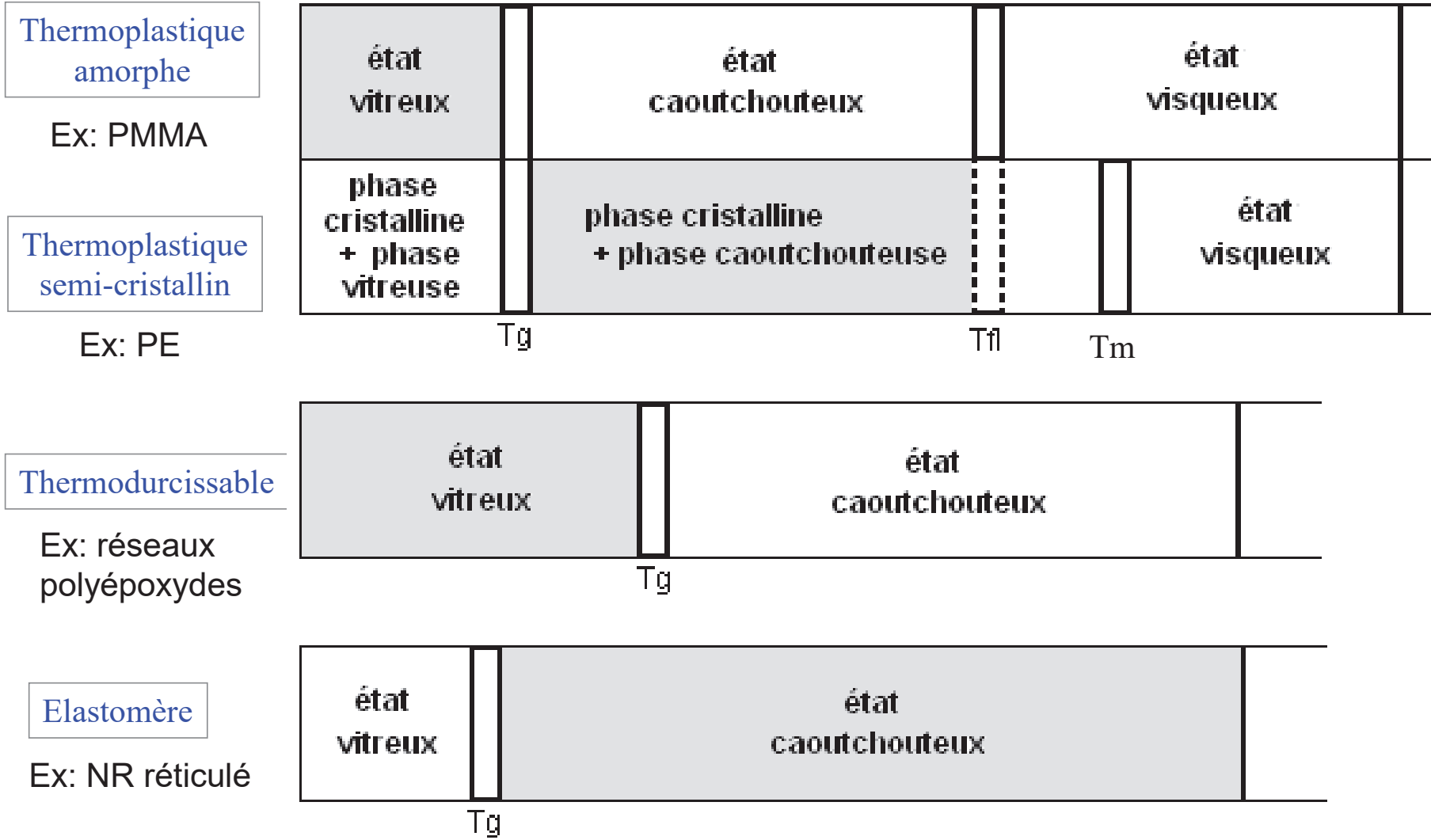
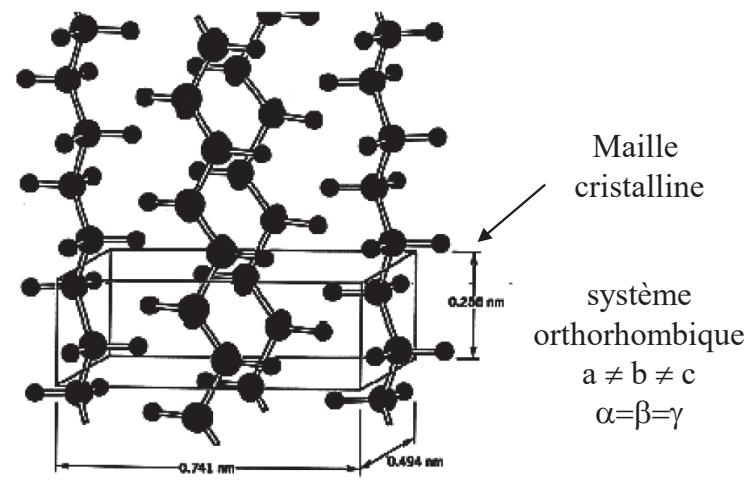
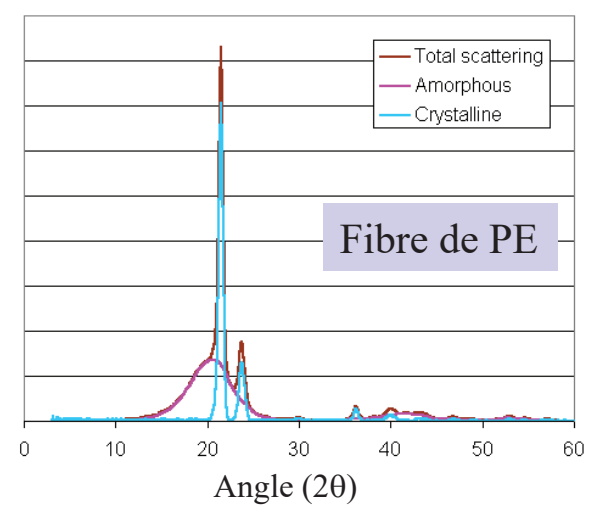
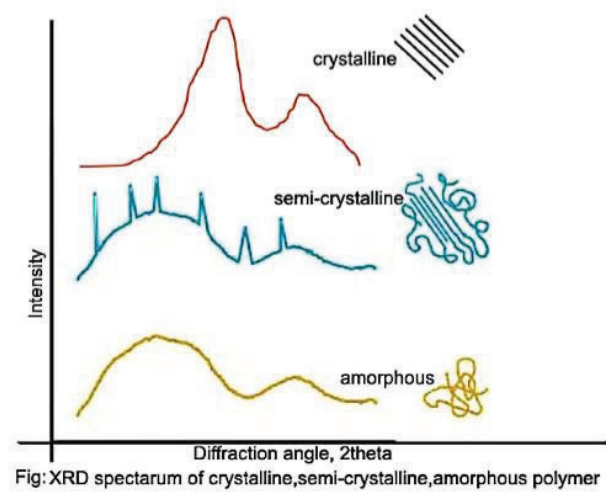
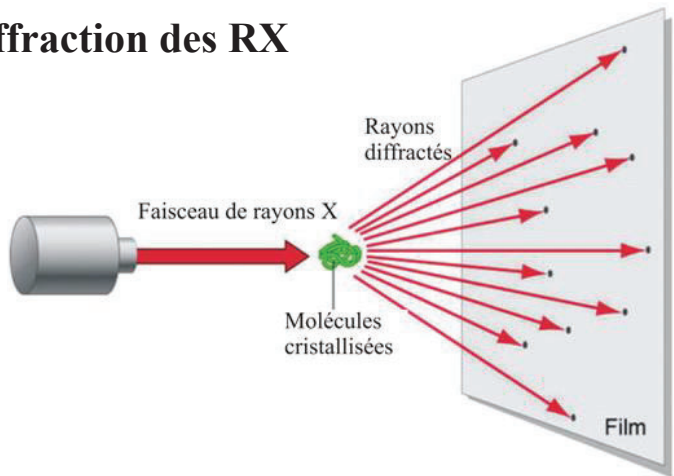


Diagramme d'état des polymères

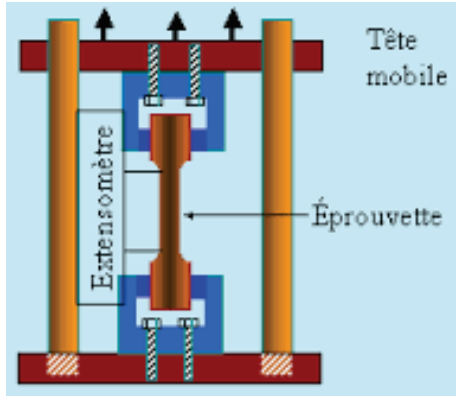


Caractérisation structurale des polymères

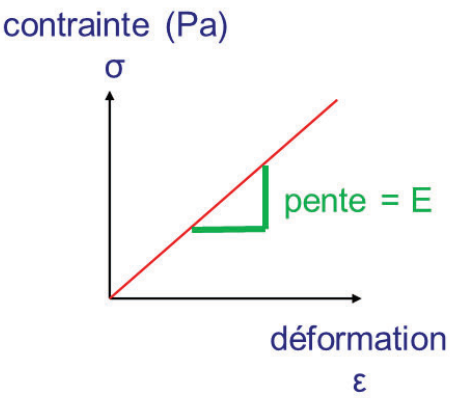
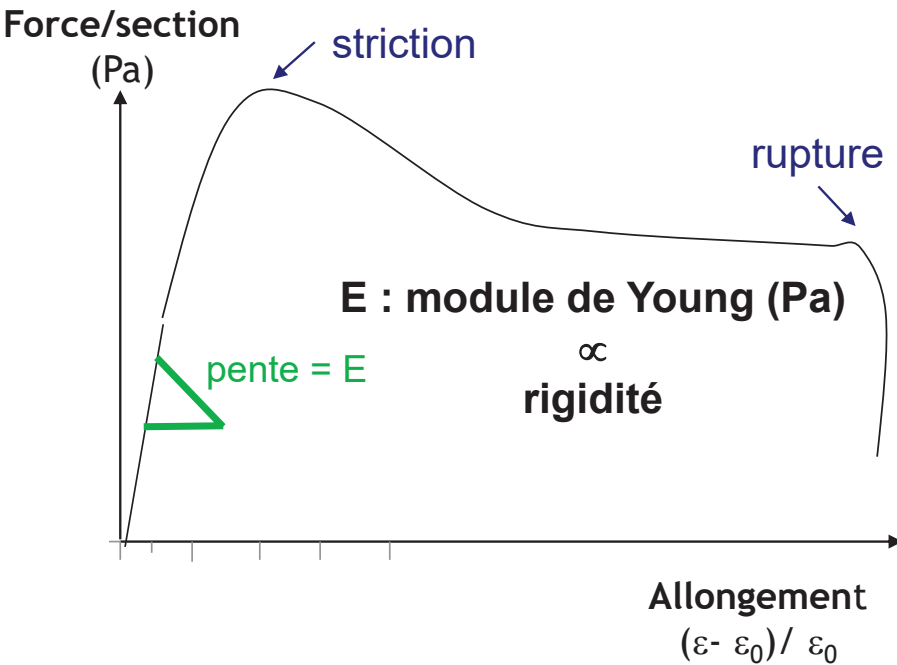
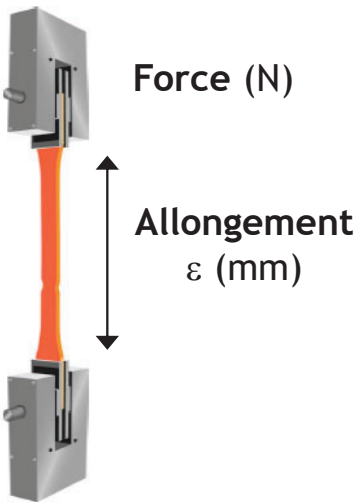
Diffraction des RX



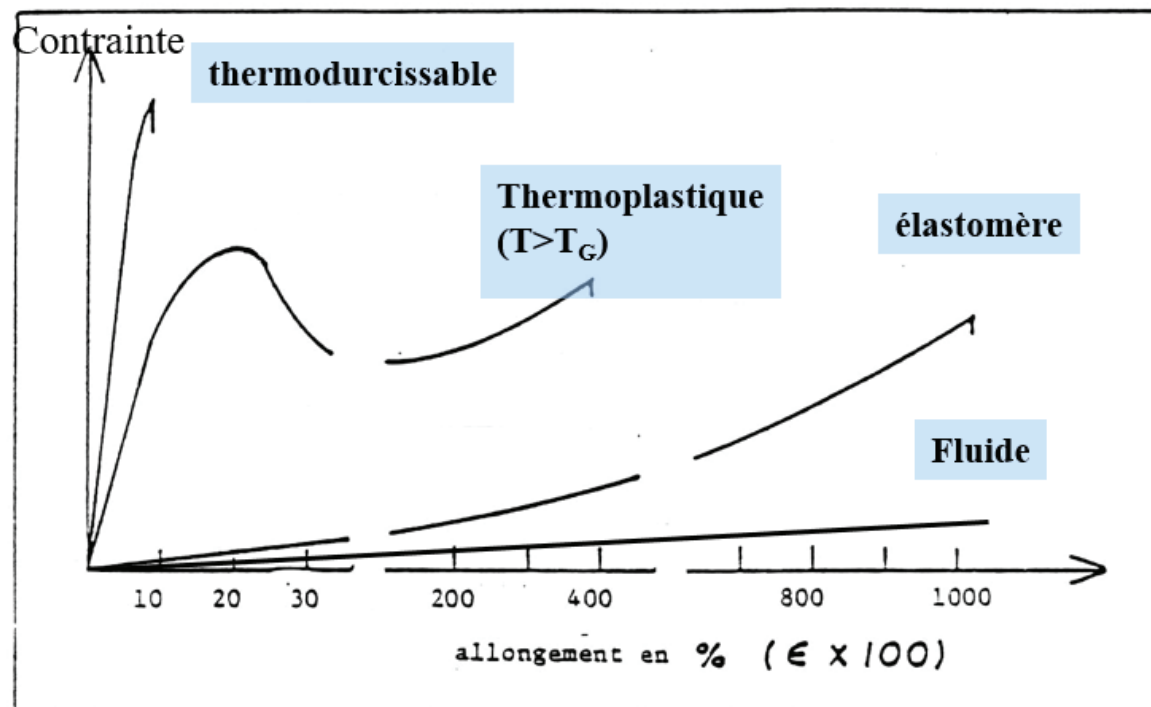
Caractérisation mécanique des polymères



Test de traction



Caractérisation mécanique des polymères



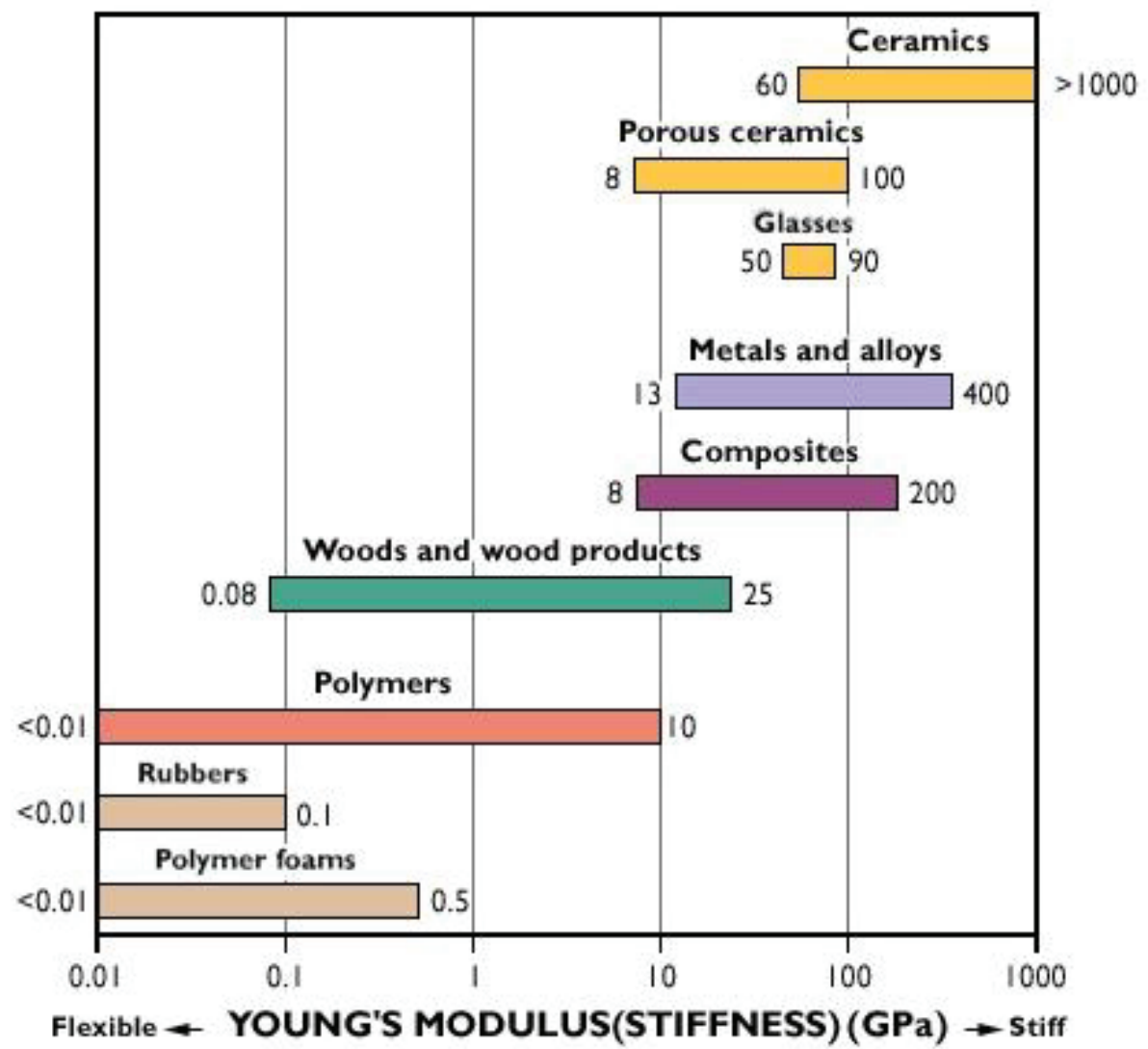
$$\text{Contrainte } \sigma = \frac{F}{S}$$

F : force (N)
 S : surface de la section (m²)
 σ : N/m² = Pa

$$\text{Module d'Young } E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

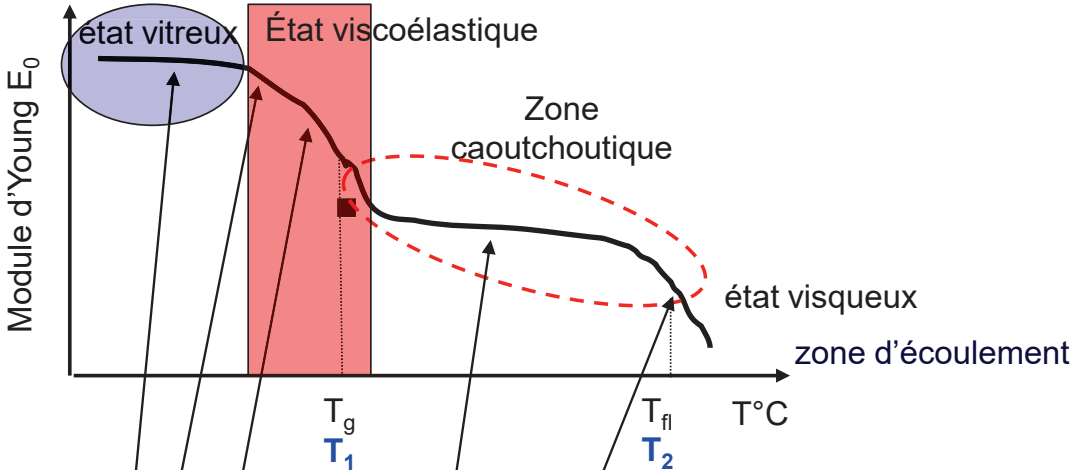
E : Pa

Module de Young des principaux matériaux



Comportements Mécaniques d'un Polymère en fonction de T

Un même matériau → différents types de comportements mécaniques à **différentes T**

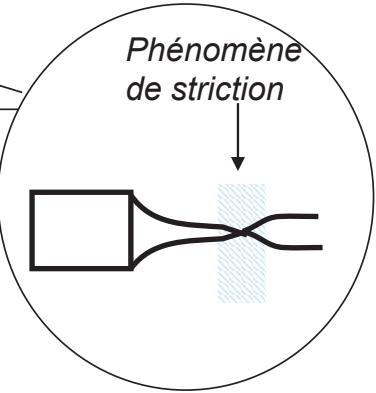
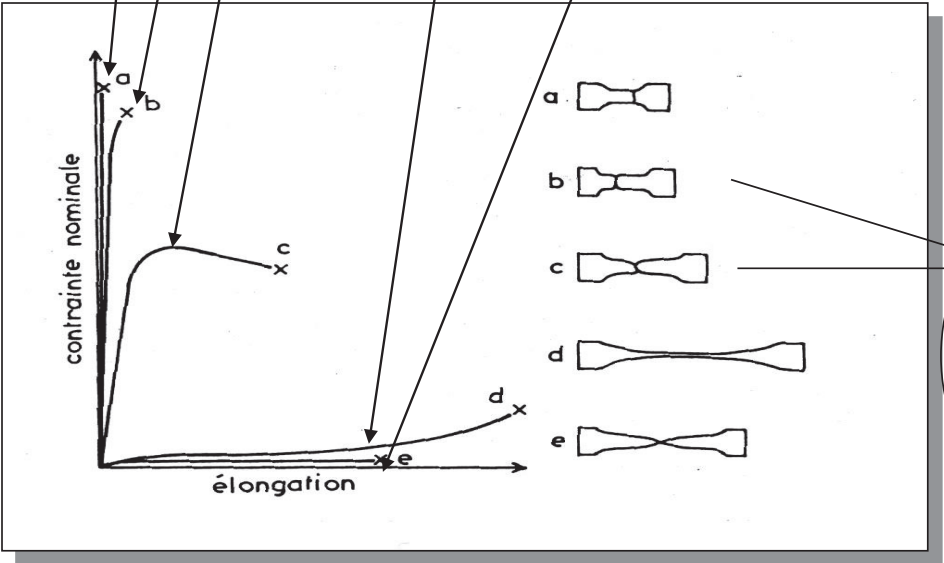


- Trois domaines :
- Solide rigide (a,b)
 - Solide plastique ou caoutchouteux (c,d)
 - Fluide (e)



T de changement de comportement

Transitions de phase
 $T_1 ; T_2$

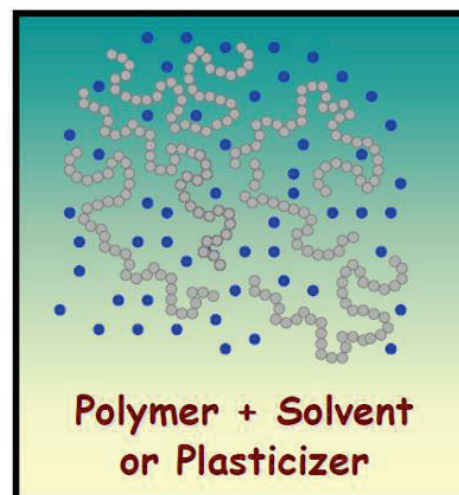


Formulation et mise en œuvre

Principaux Additifs et Charges pour Polymères

- dépasser certaines limitations des polymères (Ex: rendre PVC flexible, obtenir des matériaux résistants au feu...)
- améliorer les conditions de transformation (Ex: lubrifiants...)
- modifier la forme, la fonction et les propriétés mécaniques (Ex : agent gonflant pour mousses, agent de couplage pour adhésion interfaciale entre polymère et charges, ...)

- Antioxydants
- Désactivateurs de métaux
- Stabilisants anti-UV, absorbeurs d'UV
- Lubrifiants
- **Plastifiants**
- « Aides aux procédés »
- Charges et Renforts minéraux
- Renforts fibreux
- Colorants et Pigments
- Agents ignifugeants
- Agents antistatiques
- promoteurs d'adhésion
- Biostabilisants
- Agents gonflants
- Agents de nucléation



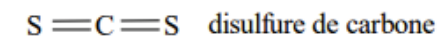
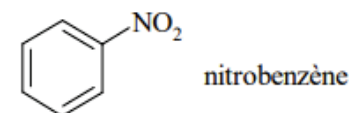
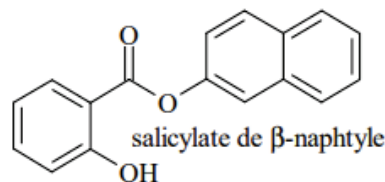
Augmentation
du volume libre



PVC +
un peu de plastifiant



PVC +
beaucoup de plastifiants !

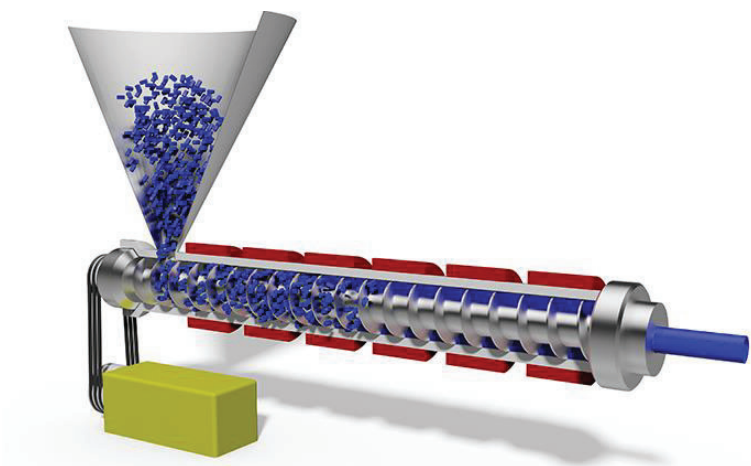
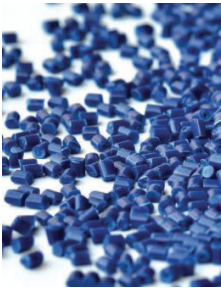


Mise en œuvre des thermoplastiques

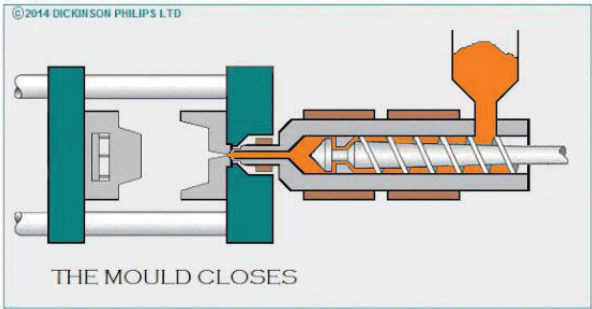
Les thermoplastiques sont sous forme de poudre ou de granule

Ils fondent sous l'effet de la chaleur → mise en forme (moule, filière)

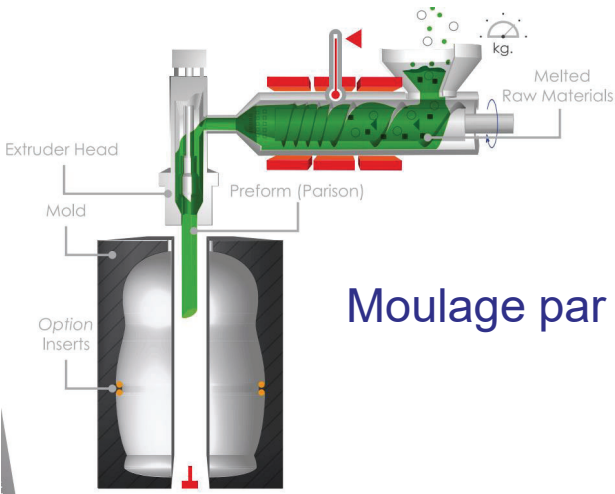
Ils peuvent être recyclés !



Extrudeuse



Moulage par injection



Moulage par soufflage



Les polymères...plus que des matériaux!

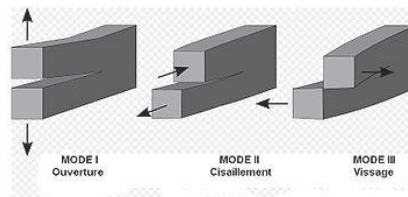
‘Versatilité’ des matériaux polymères

Propriétés mécaniques modulables

- **dureté** (densité du réseau, interactions,...),
- **ténacité** (interactions moléculaires, rigidité et orientation des chaînes...),
- **élasticité** (caoutchoutique, mobilité des liaisons, faiblesse des interactions, T_g ...),
- **résilience** (mélanges hétérogènes...),
- etc.

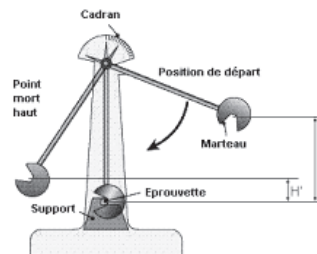
Ténacité :

résistance aux fissures



Résilience :

Capacité à absorber de l'énergie d'un choc en se déformant



Propriétés inhérentes à la nature polymère :

- transparence,
- isolation thermique,
- plasticité,
- isolation électrique,
- mémoire de forme,
- isolation phonique,
- amphiphilie (amphipathie),
- conductivité électrique,
- biodégradabilité contrôlée,
- absence de tension de vapeur
- adhésion contrôlée,
- viscosité des solutions,
- solvation préférentielle,
- pouvoir gélifiant,
- porosité membranaire,
- mésomorphisme,
- processabilité,
- filmabilité,
- etc.

Applications

Les hydrogels en médecine



Tissue engineering



Transdermal drug delivery



Wound dressing



Drug delivery system

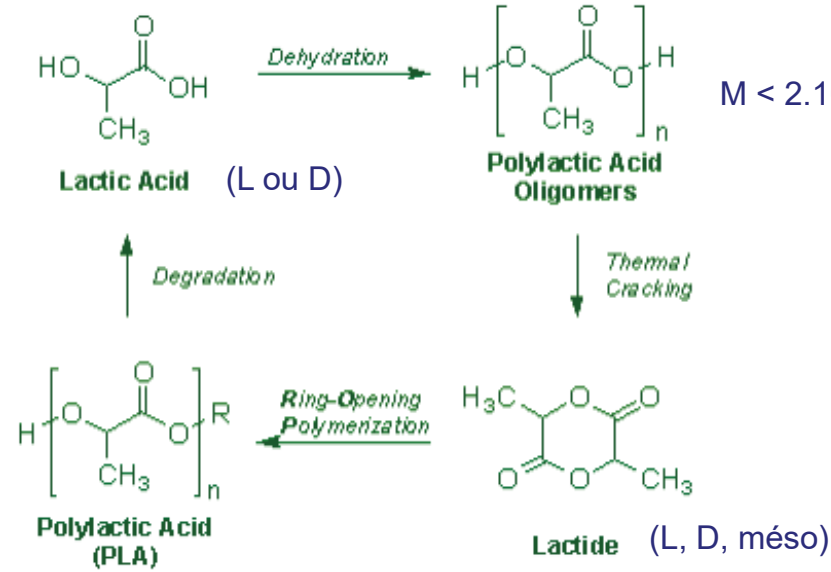


Contact lens



Les polymères synthétiques et biodégradables

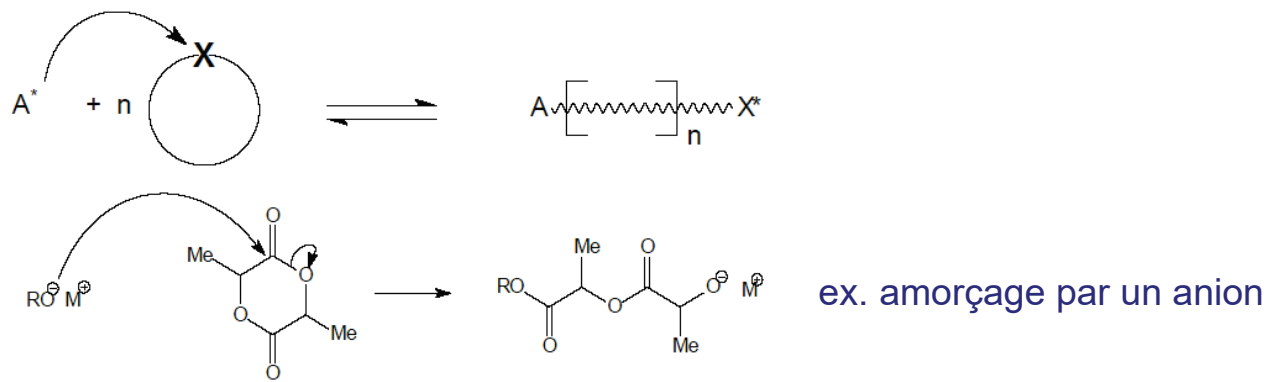
Le poly(acide lactique)
ou polylactide (PLA)



Polycondensation

Polymérisation par
ouverture de cycle

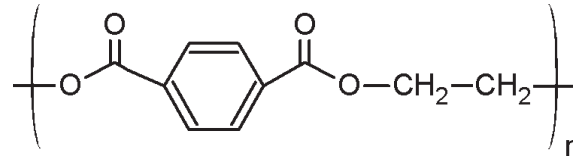
Polymérisation par ouverture de cycle amorcée par une espèce cationique ou anionique



Matériaux polymères pour les prothèses vasculaires

DACRON (1950)

Polytéréphtalate d'éthylène (PET)



famille des
polyesters

Structure rigide

$M \sim 20\,000 \text{ g/mol}$

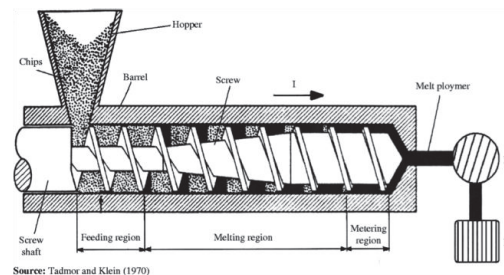
Semi-cristallin (30-40%)

$T_G = 67-127^\circ\text{C}$

$T_M = 245-255^\circ\text{C}$

Module de Young: 2.2 – 3.5 GPa

Extrusion de fibres



uniquement pour des remplacements d'artères de gros diamètre

Matériaux polymères pour les prothèses vasculaires

PTFE

Polytétrafluorure d'éthylène



Structure rigide

Chimiquement inerte

Semi-cristallin (30-40%)

$M > 10^5$ g/mol

$T_G = 20-22^\circ\text{C}$

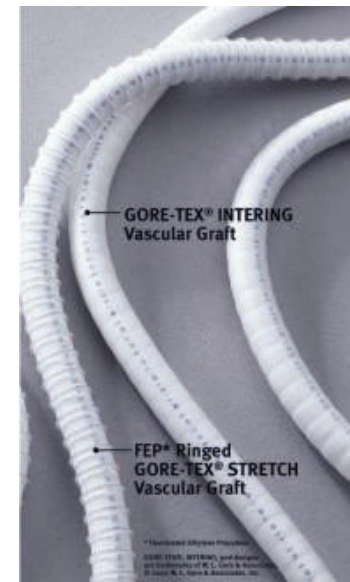
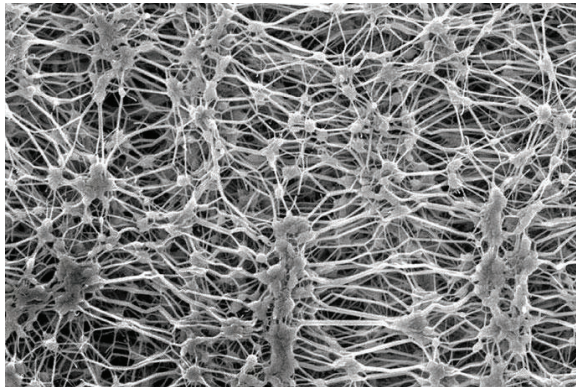
$T_M = 322-327^\circ\text{C}$

Module de Young: 0.3-0.7 GPa

ePTFE (GORE-TEX)

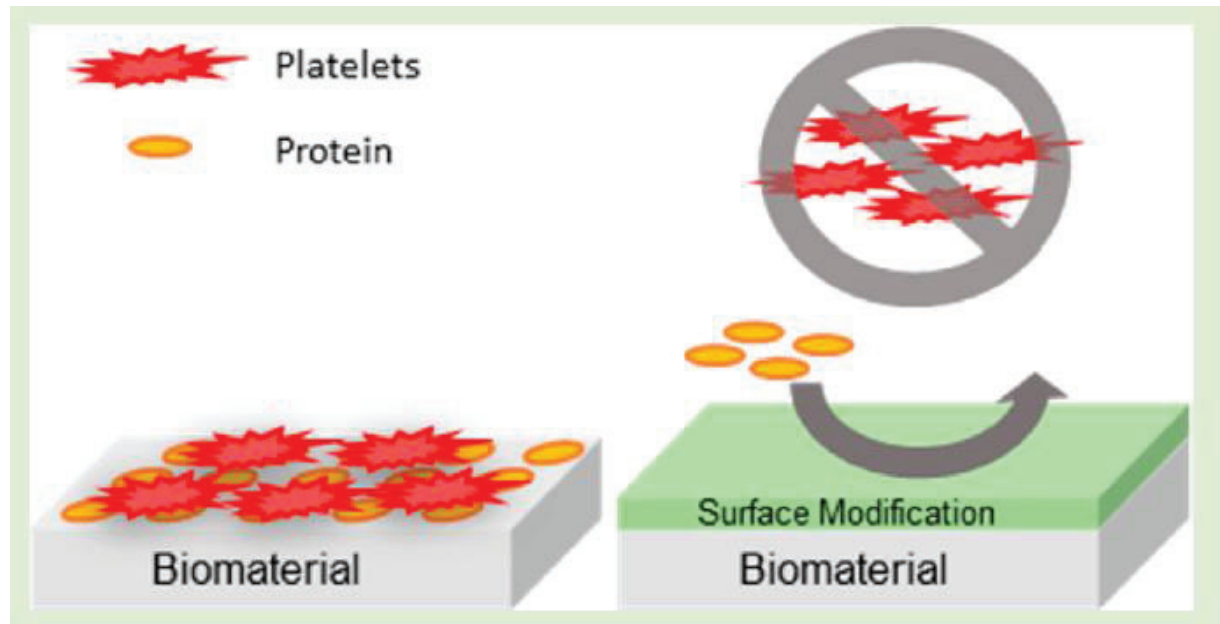
Polytétrafluorure d'éthylène expansé

Matériau microporeux obtenu sous étirement



Traitements de surface

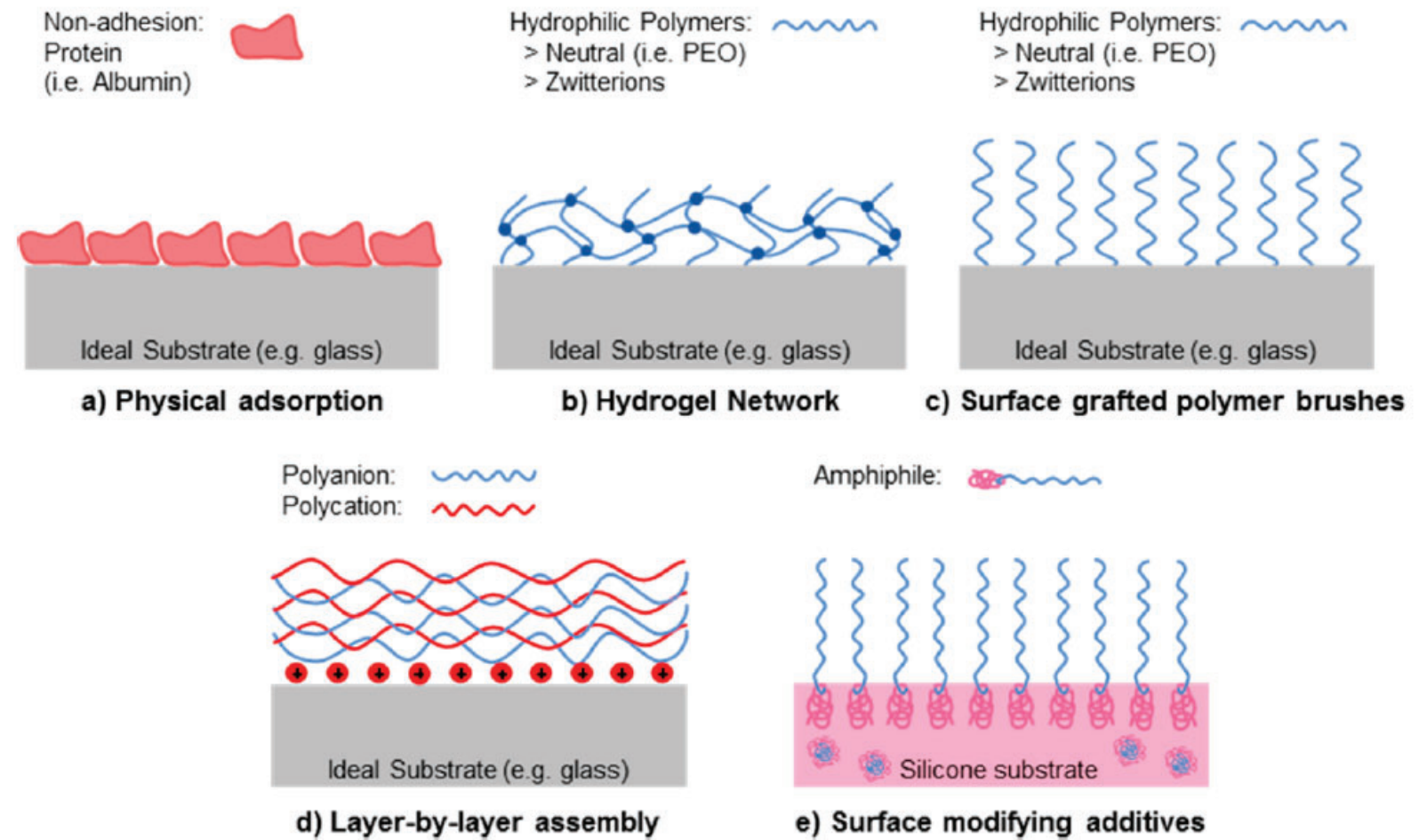
Adsorption de protéines et formation d'un thrombus



Adsorption protéines dépend

- Hydrophilie/hydrophobie de la surface
- Charges + ou –
- Rugosité
- Porosité
- ...

Modification de surface des matériaux polymères



PEGylation des surfaces

