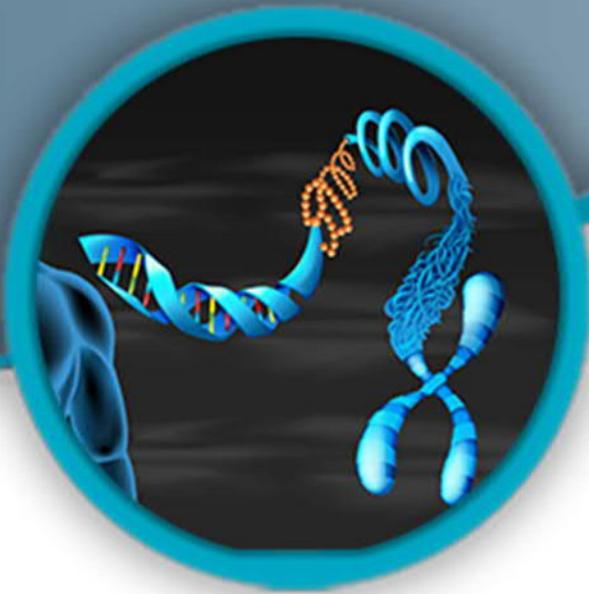




*Sciences de la vie et de la terre*

*2<sup>ème</sup> bac sciences physiques*

*Résumés  
Cours  
SVT*



*2<sup>ème</sup> Bac SP*

*Réalisation : Prof. Youssef ALANDALOUSSI  
2021 - 2022*



## TABLE DES MATIERES

N°	UNITES	CHAPITRES	PAGES
1	<i>CONSOMMATION DE LA MATIERE ORGANIQUE ET FLUX D'ENERGIE</i>	<i>Libération de l'énergie emmagasinée dans la matière organique</i>	<b>2 - 7</b>
		<i>Rôle du muscle squelettique strié dans la conversion de l'énergie</i>	<b>8 - 13</b>
2	<i>NATURE ET MECANISME DE L'EXPRESSION DU MATERIEL GENETIQUE</i>	<i>Nature de l'information génétique</i>	<b>14 - 18</b>
		<i>Expression de l'information génétique</i>	<b>19 - 21</b>
3	<i>TRANSMISSION DES CARACTERES HEREDITAIRES CHEZ LES DIPLOÏDES</i>		<b>22 - 27</b>
4	<i>UTILISATION DES MATIERES ORGANIQUES ET INORGANIQUES</i>	<i>Les déchets ménagers issus de l'utilisation des matières organiques et inorganiques</i>	<b>28 - 30</b>
		<i>Les pollutions issues de la consommation des produits énergétiques, de l'utilisation de la matière organique et inorganique dans les industries chimiques, alimentaires et minérales</i>	<b>31 - 34</b>
		<i>Les matières radioactives et l'énergie nucléaire</i>	<b>35 - 38</b>
		<i>Contrôle de la qualité et de la salubrité des milieux naturels</i>	<b>39 - 40</b>
5	<i>LES PHENOMENES GEOLOGIQUES ACCOMPAGNANT LA FORMATION DES CHAINES DE MONTAGNES ET LEUR RELATION AVEC LA TECTONIQUE DES PLAQUES</i>	<i>Les chaînes de montagnes récentes et leurs relations avec la tectonique des plaques</i>	<b>41 - 47</b>
		<i>Le métamorphisme et sa relation avec la tectonique des plaques</i>	<b>48 - 51</b>
		<i>La granitisation et sa relation avec le métamorphisme</i>	<b>52 - 54</b>



**RESUME.1 – CONSOMMATION DE LA MATIERE ORGANIQUE ET FLUX D'ENERGIE**

**Chapitre 1 : Libération de l'énergie emmagasinée dans la matière organique**

**I. Notions élémentaires**

**1. La matière organique :**

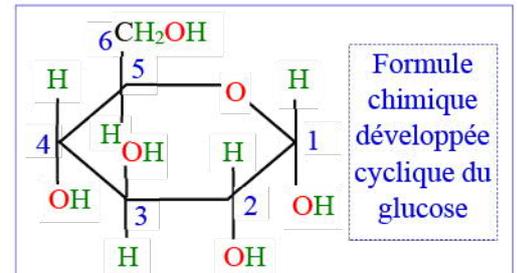
Ensemble de substances chimiques complexes et variées fabriquées par les êtres vivants végétaux ou animaux ou les micro-organismes. C'est une matière carbonée composée principalement de 4 éléments : le carbone (C), l'hydrogène (H), l'oxygène (O) et l'azote (N).

La matière organique est découpée en 4 grandes familles :

**a) Les glucides : (les sucres)**

Ce sont des corps ternaires, composés essentiellement de trois éléments : le carbone (C) l'hydrogène (H), et l'oxygène (O).

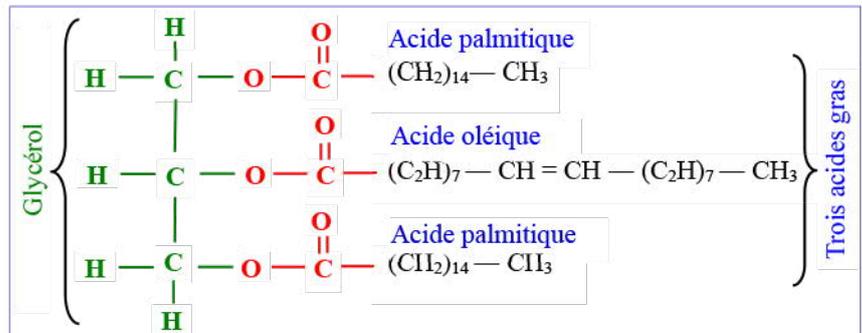
- ★ **Exemple de sucre simple : le glucose (Figure ci-contre) :** C'est un monosaccharide composé de 6 atomes de carbones, 12 atomes d'hydrogène et 6 atomes d'oxygène (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>).



**b) Les lipides : (les corps gras ou graisses)**

Ce sont des corps ternaires, composés de carbone (C), l'hydrogène (H), et l'oxygène (O). Mais certains contiennent également du phosphore (P) et l'azote (N).

- ★ **Exemple d'un lipide (Figure ci-contre) :**  
*Un triglycéride = l'huile d'olive*

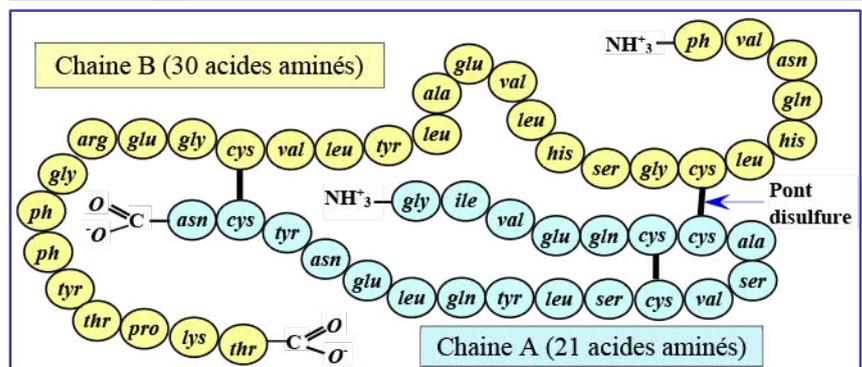


**c) Les protides :**

Ce sont des corps quaternaires, composés de quatre éléments chimiques : le carbone (C), l'hydrogène (H), l'oxygène (O) et l'azote (N). Mais certains protides contiennent également du soufre (S) et du phosphore (P).

Généralement on parle de polypeptide lorsque le nombre d'acides aminés ne dépasse pas 100. Au-delà de 100 acides aminés, on parle de protéine.

- ★ **Exemple de protide : l'insuline humaine (Figure ci-contre)**



**d) Les acides nucléiques :**

Ce sont de très longues chaînes d'atomes constituées de C, H, O, N, et P.

- ★ **Exemple d'acide nucléique c'est l'ADN (Acide désoxyribonucléique).**

**e) Remarque :** il y'a aussi le groupe des vitamines qui sont aussi de petites molécules organiques.

**2. Notion de métabolisme :**

Le métabolisme est l'ensemble des réactions chimiques qui se passent dans l'organisme et plus précisément dans la cellule. Le métabolisme est constitué de deux mécanismes opposés :

- ★ **L'anabolisme :** Ensemble des réactions chimiques aboutissant à la formation des constituants de l'organisme à partir des éléments simples de la digestion.
- ★ **Le catabolisme :** Ensemble des réactions de dégradation biochimique de substances organiques. (Le catabolisme permet d'éliminer des substances ou de produire de l'énergie)



### 3. Notion de flux de l'énergie :

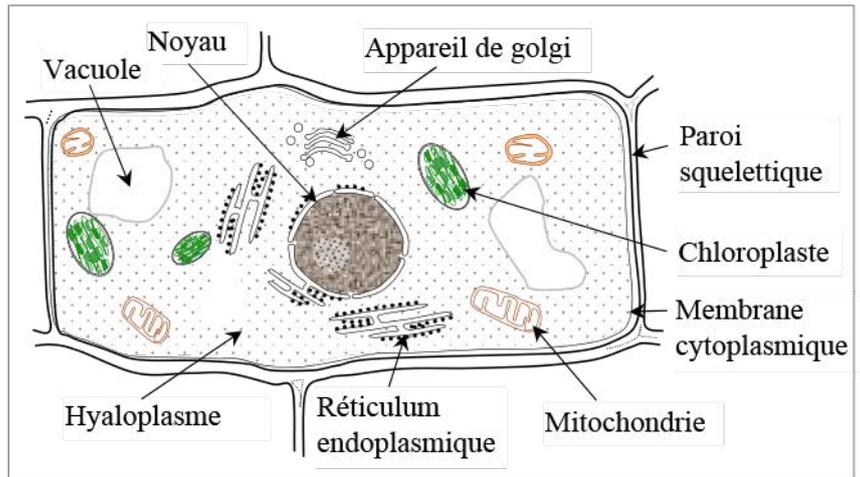
#### a) Structure de la cellule :

La cellule est une unité fondamentale, structurale et fonctionnelle des organismes vivants. Elle peut remplir toutes les fonctions de l'organisme, à savoir le métabolisme, le mouvement, la croissance, la reproduction.

L'ensemble des êtres vivants se répartit en deux grands groupes :

★ **Les procaryotes** : des organismes primitifs, unicellulaires, ne contiennent que peu ou pas d'organites cellulaires et ne possèdent pas d'enveloppe autour du noyau qui n'est qu'un filament d'ADN, replié sur lui-même et qui est en contact direct avec le cytosol.

★ **Les eucaryotes** : des organismes qui ont un degré d'organisation plus élevé. Ils présentent des organites cellulaires dont un vrai noyau limité par une enveloppe nucléaire et contient le nucléole.

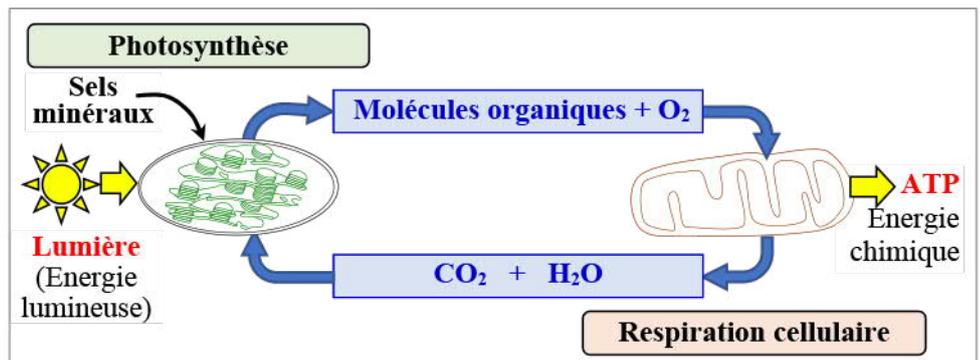


Organite ou élément	Fonctions dans la cellule
<b>Noyau</b>	Le centre de contrôle de la cellule. Il est responsable de la transmission de caractères héréditaires.
<b>Ribosomes</b>	Synthèse des protéines (traduction).
<b>Réticulum endoplasmique</b>	Transporte des produits (surtout protéines) faits dans la cellule à d'autres endroits dans la cellule.
<b>Appareil de golgi</b>	Modifications post-traductionnelles des protéines ; distribution dans la cellule et à l'extérieur de la cellule, grâce à des vésicules.
<b>Mitochondries</b>	Libère l'énergie contenue dans la matière organique (Respiration cellulaire).
<b>Lysosomes</b>	Réserve d'enzymes qui digèrent la nourriture et les cellules mortes ou bactéries.
<b>Vacuole</b>	Généralement chez la cellule végétale : Stockage et dégradation des déchets. Réserve de sucres, minéraux, protéines, d'eau et autre.
<b>Chloroplastes</b>	La photosynthèse dans les cellules végétales : transformation de l'énergie lumineuse en matière organique (énergie chimique).
<b>Membrane cytoplasmique</b>	Protège la cellule et contrôle ce qui entre et sort de la cellule.
<b>Paroi squelettique</b>	Permet chez la cellule végétale la rigidification et la forme.
<b>Hyaloplasme (Cytosol)</b>	C'est le milieu où baignent les organites et les structures cellulaires.
<b>Cytoplasme</b>	C'est l'hyaloplasme avec les organites cellulaires, il est compris entre la membrane cytoplasmique et le noyau.
<b>Centrioles</b>	La formation d'aster pendant la mitose chez la cellule animale.

#### b) Flux de l'énergie :

Les végétaux chlorophylliens sont des producteurs, capables d'effectuer la photosynthèse. Ils synthétisent la matière organique à la base de toute la chaîne alimentaire : sont **autotrophes**.

Consommateur : sont incapables de synthétiser de la matière organique. Ce sont des **hétérotrophes** qui vont consommer la matière organique synthétisée par les autres organismes.



L'énergie rayonnante du soleil, capté par les producteurs, est transformé en matière organique et ensuite transférée aux consommateurs et aux décomposeurs. C'est le flux de matière et d'énergie.



## II. Voies de libération de l'énergie chimique emmagasinée dans la matière organique :

Deux voies métaboliques permettent d'extraire l'énergie emmagasinée dans la matière organique :

1. **La voie de la respiration cellulaire :** C'est une oxydation complète de la matière organique qui nécessite l'intervention des mitochondries. Le métabolite (glucose) est dégradé complètement en  $\text{CO}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}$ , avec production d'une quantité importante d'énergie sous forme d'ATP.  
Le bilan des transformations chimiques au cours de la respiration s'écrit :



2. **La voie de la fermentation :** C'est une oxydation incomplète (partielle) de matière organique en milieu anaérobie, elle se déroule dans l'hyaloplasme. Le métabolite (glucose) est dégradé partiellement, donnant des molécules organiques contenant encore une énergie potentielle, avec production d'une faible quantité d'énergie.

On détermine deux types de fermentation :

- ★ La fermentation alcoolique dont la réaction chimique globale est la suivante :



- ★ La fermentation lactique : Transformation du lactose en acide lactique selon les réactions suivantes :



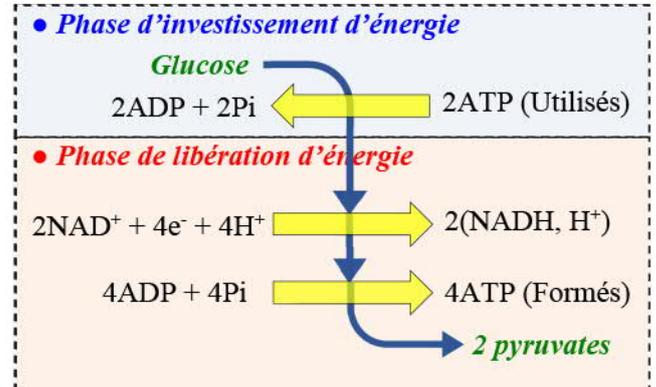
Qu'il s'agisse de la respiration ou de la fermentation, la dégradation des métabolites débute dans l'hyaloplasme de la cellule par la glycolyse, qui est un processus qui ne consomme pas de dioxygène.

## III. La glycolyse, étape commune entre respiration et fermentation :

### 1. Les étapes de la glycolyse :

Après sa pénétration dans l'hyaloplasme, le glucose peut être dégradé au cours d'une série de réactions, aboutissant à la synthèse de deux molécules d'acide pyruvique. C'est la glycolyse qui se déroule selon les étapes essentielles :

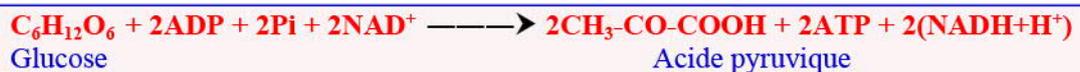
- ⇒ Le glucose fixe deux groupements phosphate issus de deux molécules d'ATP.
- ⇒ Réduction des transporteurs d'hydrogène :  $\text{NAD}^+$  (Nicotinamide Adénine Dinucléotide) qui passe de la forme oxydée ( $\text{NAD}^+$ ) à la forme réduite ( $\text{NADH}+\text{H}^+$ ) :  
 $2\text{NAD}^+ + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2(\text{NADH}+\text{H}^+)$
- ⇒ Formation de 4 ATP et deux molécules de pyruvate.



### 2. Bilan de la glycolyse :

A la fin de la glycolyse, une molécule de glucose est dégradée en deux molécules d'acide pyruvique. La réaction fondamentale de la glycolyse est une déshydrogénation liée à la présence d'un transporteur d'hydrogène ( $\text{NAD}^+$ ).

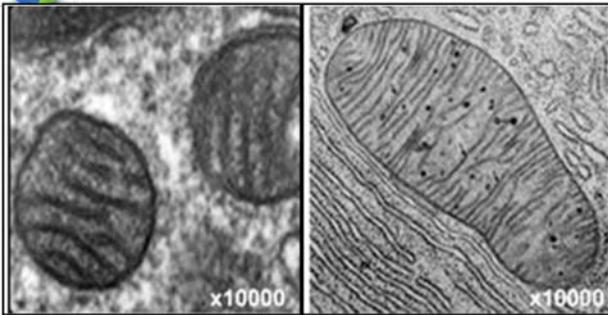
L'équation globale :



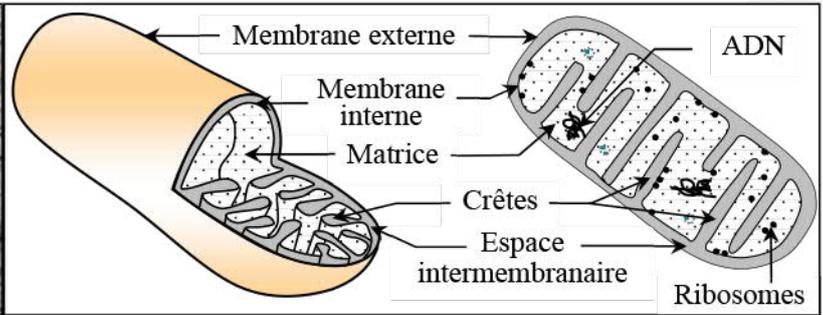
## IV. La respiration cellulaire et le rôle des mitochondries

### 1. Ultrastructure et composition chimique de la mitochondrie :

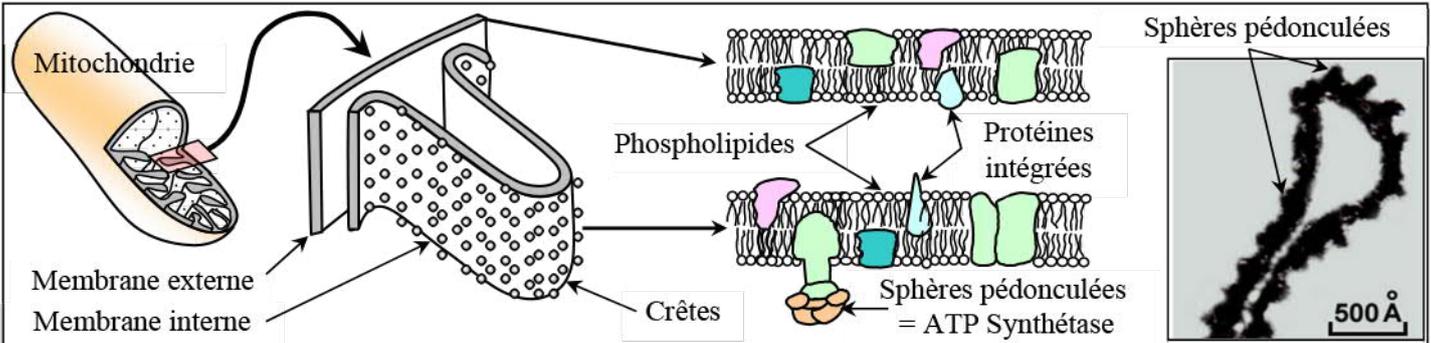
Organite (Sphère de 0,5 à 1  $\mu\text{m}$  de diamètre) présent dans toutes les cellules ayant un métabolisme aérobie. Elle possède son propre ADN et sa propre machinerie de traduction. Elle possède une membrane externe et interne séparées par un espace intermembranaire. La membrane interne fait des replis formant les crêtes mitochondriales, cette membrane délimite la matrice mitochondriale.



Ultrastructure de la mitochondrie



Représentation tridimensionnelle de la mitochondrie



L'électronographie de la membrane interne de la mitochondrie, ainsi qu'un schéma explicatif de la structure moléculaire des membranes mitochondriales interne et externe.

La mitochondrie est un organe semi-autonome. Elle a son propre génome (ADN, gènes), ribosomes 70S, ARN, et une trentaine de protéines y sont synthétisées.

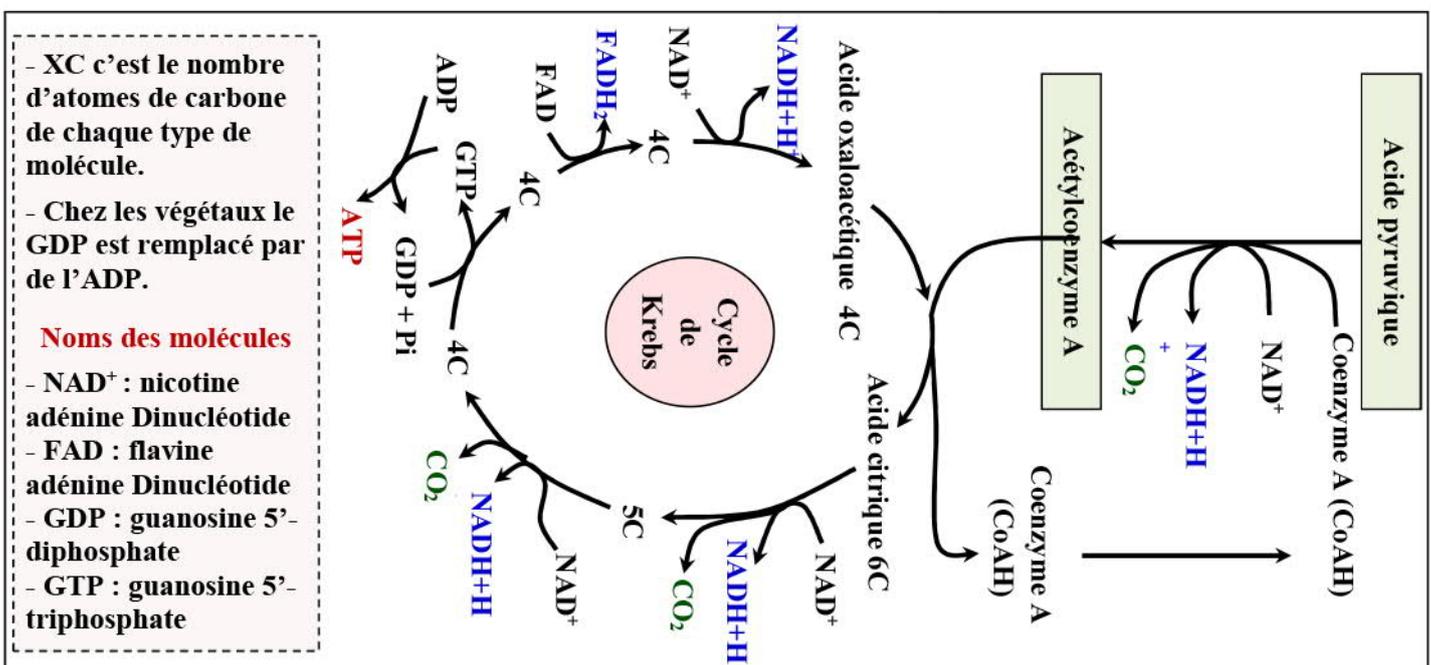
- ✓ La membrane externe contient une protéine transmembranaire qui permet le passage des ions et des métabolites.
- ✓ La membrane interne contient des protéines de transport de molécules et d'électrons, et des complexes enzymatiques (en particulier l'ATP Synthase).
- ✓ La matrice contient plusieurs enzymes, principalement des déshydrogénases et des carboxylases.

### 2. Rôle des mitochondries dans la respiration cellulaire :

La respiration, amorcée par la glycolyse dans l'hyaloplasme, se poursuit dans les mitochondries par la dégradation de l'acide pyruvique qui subit une série de réactions biochimiques aérobie, appelés oxydations respiratoires.

### 3. Etapes de la respiration cellulaire au niveau des mitochondries :

#### a) Oxydation du pyruvate dans la matrice :





Dans la matrice, le pyruvate va subir un ensemble de réactions chimiques qu'on peut résumer en deux étapes :

★ **La première étape** : la conversion du pyruvate en acétyl-CoA

L'acide pyruvique subit une décarboxylation au cours de laquelle il perd une molécule de CO<sub>2</sub>, et une déshydrogénation au cours de laquelle il perd de l'hydrogène (H<sup>+</sup>) à l'origine de la réduction de NAD<sup>+</sup> en NADH, H<sup>+</sup>.



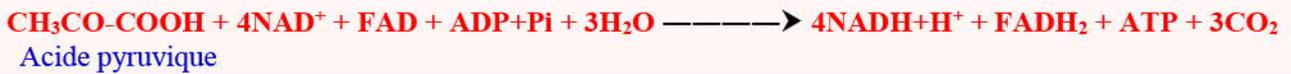
★ **La deuxième étape** : les réactions du cycle de Krebs

C'est une succession de réactions cycliques catalysées par des enzymes spécifiques (décarboxylases, déshydrogénases...). Ce cycle démarre par la fixation du radical Acétyle sur un composé à 4 carbones appelé Oxaloacétate pour former un composé à 6C (Citrate). Il produit du CO<sub>2</sub>, de l'ATP et des transporteurs d'hydrogène réduits (NADH, H<sup>+</sup> et FADH<sub>2</sub>).

L'équation bilan du cycle de Krebs est :



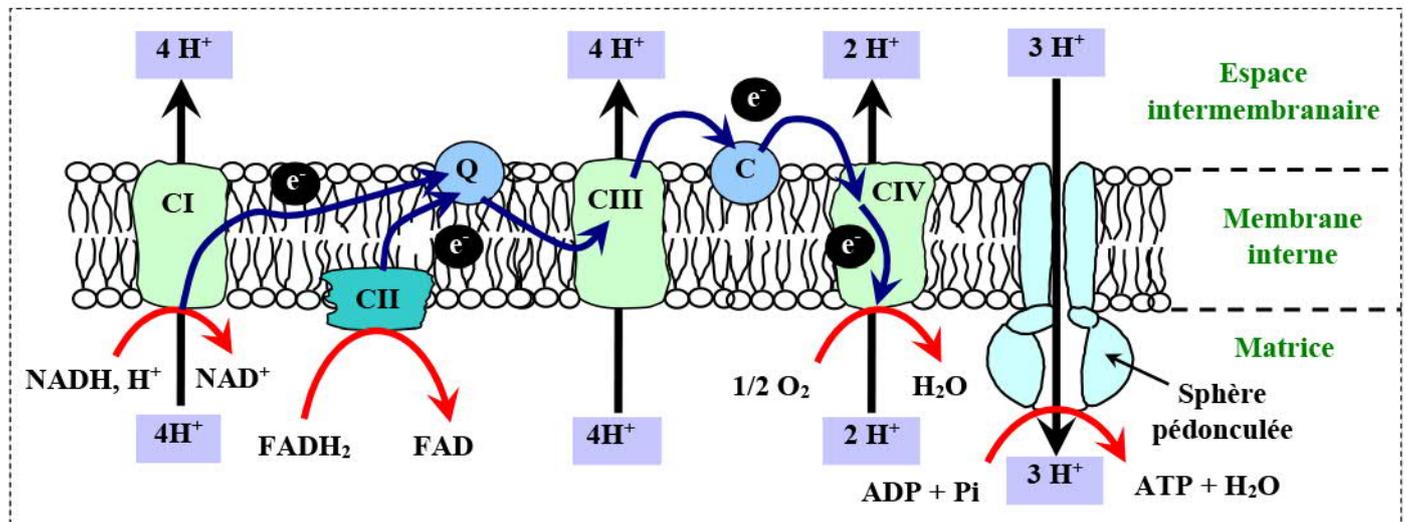
**La réaction globale de l'oxydation totale d'une molécule d'acide pyruvique dans la matrice est :**



Le bilan chimique de l'oxydation des 2 molécules de pyruvate est donc : 8(NADH, H<sup>+</sup>) + 2FADH<sub>2</sub> + 2ATP + 6CO<sub>2</sub>  
Ainsi l'équation bilan est :



**b) Phosphorylation oxydative au niveau de la membrane interne (Réactions de la chaîne respiratoire) :**



La chaîne respiratoire est une chaîne de transporteurs d'électrons, au niveau de la membrane interne de la mitochondrie, réalisant l'oxydation des coenzymes réduites : NADH<sub>2</sub> en NAD et FADH<sub>2</sub> en FAD selon les réactions suivantes :



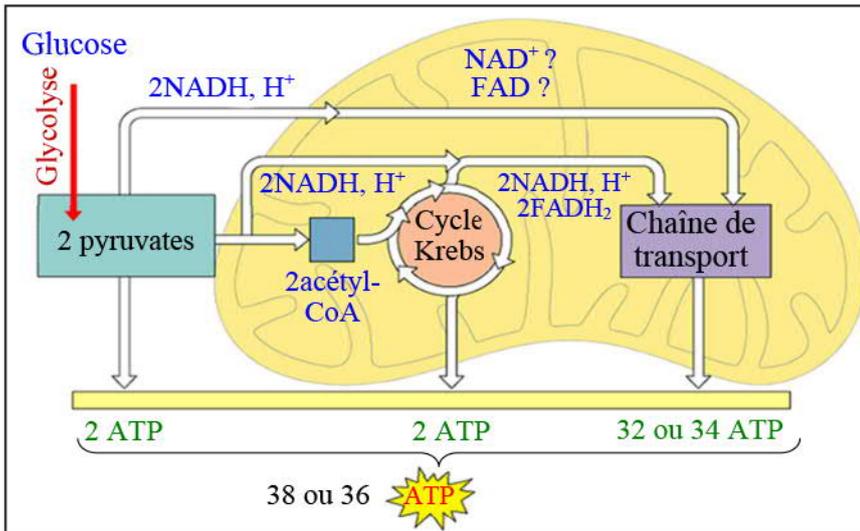
Les coenzymes réduits (NADH, H<sup>+</sup> et FADH<sub>2</sub>) cèdent leurs deux électrons à un système de transporteurs qui, par une cascade de réactions d'oxydoréduction, amène ces électrons jusqu'à l'accepteur final, l'oxygène moléculaire, qui subit une réduction selon la réaction :  $\frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{H}_2\text{O}$

L'énergie libérée au cours du transfert d'électrons sera utilisée pour le pompage des H<sup>+</sup> de la matrice vers l'espace intermembranaire ce qui conduit à la formation d'un gradient de protons H<sup>+</sup> de part et d'autre de la membrane interne.

Le retour des protons H<sup>+</sup> vers la matrice via les sphères pédonculées (ATP synthétase) fournit l'énergie nécessaire à la phosphorylation de l'ADP en ATP selon la réaction suivante :  $\text{ADP} + \text{Pi} + \text{E} \longrightarrow \text{ATP} + \text{H}_2\text{O}$



### 4. Le bilan énergétique de la respiration cellulaire :



Lors de la respiration cellulaire :

- ✓ La glycolyse produit : **2ATP + 2(NADH, H<sup>+</sup>)**
  - ✓ Dans la mitochondrie chaque molécule d'acide pyruvique produit : **1ATP + 4NADH, H<sup>+</sup> + 1FADH<sub>2</sub>**.
- Donc le bilan chimique de l'oxydation totale d'une molécule de glucose c'est : **4ATP + 10(NADH, H<sup>+</sup>) + 2FADH<sub>2</sub>**.
- ✓ L'oxydation de 1NADH, H<sup>+</sup> produit **3ATP**.
  - ✓ L'oxydation de 1FADH<sub>2</sub> produit **2ATP**.

Bilan énergétique de l'oxydation totale d'un glucose est : **4ATP + (10 x 3) ATP + (2x2) ATP = 38 ATP**.

**Remarque :** Lors de la glycolyse, 2(NADH, H<sup>+</sup>) sont produits dans l'hyaloplasme et doivent passer dans la matrice mitochondriale. Ceci se fait grâce à des navettes moléculaires :

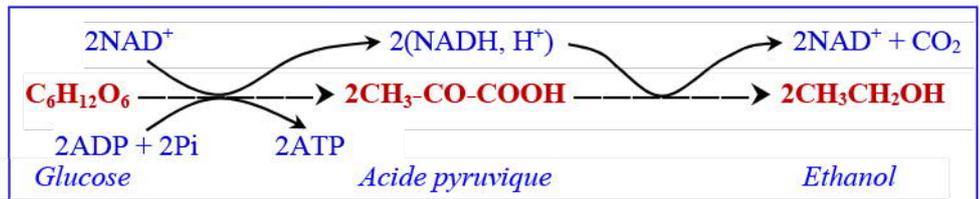
- Navette malate-aspartate : abouti à la fabrication de (NADH, H<sup>+</sup>) et dans ce cas le bilan énergétique sera 38ATP. C'est le cas du cœur et du foie.
- Navette glycérol-phosphate : abouti à la fabrication de (FADH<sub>2</sub>) et dans ce cas le bilan énergétique sera 36ATP. C'est le cas du muscle squelettique et du cerveau.

### V. La fermentation cellulaire et la formation de l'ATP

#### 1. Le devenir de l'acide pyruvique en milieu anaérobiose :

En cas d'absence ou de pénurie de dioxygène, la fermentation s'effectue dans l'hyaloplasme, et débute par la glycolyse.

★ Dans le cas de la fermentation alcoolique, l'acide pyruvique est décarboxylé puis réduit en éthanol avec régénération du transporteur (NAD<sup>+</sup>). L'équation bilan de la fermentation alcoolique est :



★ Certaines cellules, tel que les cellules musculaires, sont capables de réaliser la fermentation lactique. Dans ce cas, la dégradation du glucose produit de l'acide lactique (CH<sub>3</sub>-CHOH-COOH) avec régénération du transporteur (NAD<sup>+</sup>). L'équation bilan de la fermentation lactique est :



#### 2. Le bilan énergétique de la fermentation cellulaire :

Seule la glycolyse produit de l'ATP lors de la fermentation. Le bilan en ATP de la fermentation alcoolique est donc de **2ATP** par mole de glucose oxydé.

### VI. Le rendement énergétique (R) de la fermentation et de la respiration :

$$R = \frac{E'}{E} \times 100$$

R = Rendement énergétique en %.  
 E = Energie potentielle totale d'une mole de glucose en KJ (3860 KJ).  
 E' = Energie potentielle des molécules d'ATP produites en KJ (30.5KJ).

<b>Respiration</b>	$R = 38 \times 30,5 / 2860 \times 100 = 40,52 \%$
<b>Fermentation</b>	$R = 2 \times 30,5 / 2860 \times 100 = 2,14 \%$



## Chapitre 2 : Rôle du muscle squelettique strié dans la conversion de l'énergie

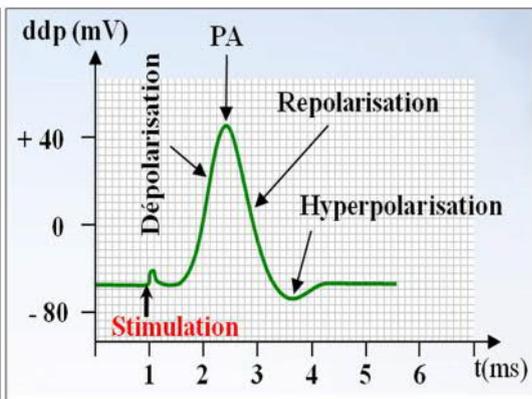
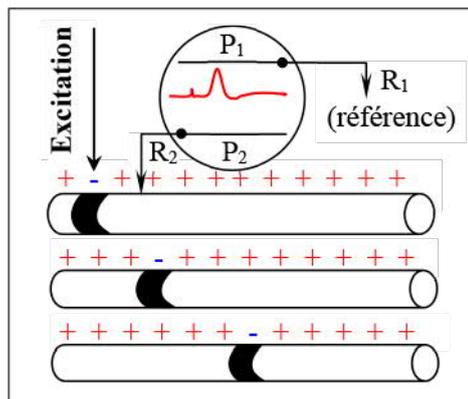
### I. Enregistrement de la contraction musculaire

#### 1. Notion de potentiel de repos et potentiel d'action :

Le potentiel de repos ou potentiel membranaire est la différence de tension mesurée entre la face externe et la face interne de la cellule.

C'est la différence de concentration ionique de part et d'autre de la membrane qui détermine la valeur du potentiel transmembranaire. Il est de  $-70$  mV.

La stimulation électrique de la cellule provoque une brusque modification du potentiel de repos. C'est un phénomène électrique qui naît suite à l'excitation et qu'on appelle potentiel d'action. Il est composé de :



- L'artefact de stimulation : phénomène électrique enregistré par les électrodes réceptrices, indiquant le moment de stimulation ;
- La dépolarisation : le potentiel augmente très rapidement (phase ascendante) pour atteindre un pic.
- La repolarisation : Après le pic, le potentiel diminue pour se rapprocher du potentiel de repos.
- L'hyperpolarisation : Le potentiel devient inférieur au potentiel de repos.

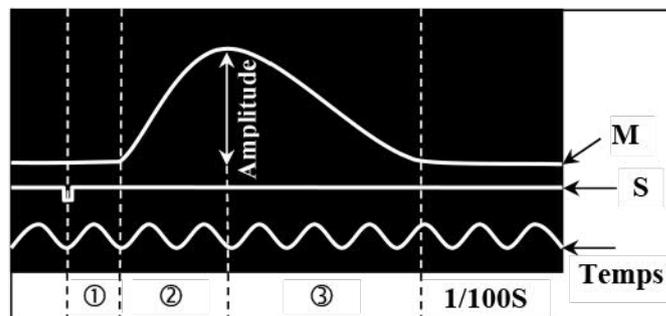
#### 2. Réponse du muscle aux excitations électriques :

##### a) Cas d'une excitation unique :

Lorsqu'on applique sur le muscle une excitation électrique unique et efficace, on obtient une contraction brève et isolée à laquelle on donne le nom de **secousse musculaire**.

Le myogramme (M) obtenu est composé de trois phases :

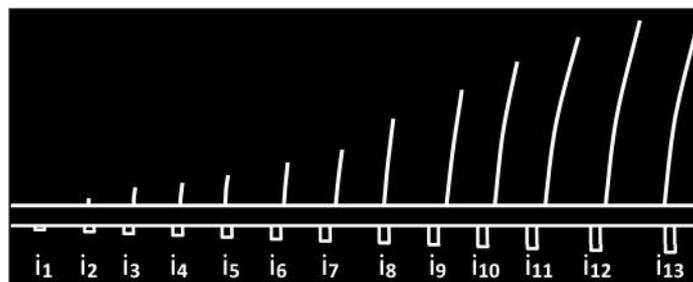
- ✓ **La phase de latence** ① : durée entre le moment de l'excitation et le début de la réponse du muscle.
- ✓ **La phase de contraction** ② : au cours de laquelle la longueur du muscle décroît (muscle se raccourcit).
- ✓ **La phase de relâchement** ③ : au cours de laquelle le muscle reprend ses dimensions initiales (sa durée est légèrement supérieure à celle de la phase de contraction).



##### b) Cas de plusieurs excitations à intensité croissante :

On soumet le muscle à une série d'excitations isolées ( $i_1, i_2, i_3, \dots, i_{13}$ ), d'intensité croissante. Le cylindre enregistreur est immobile, et on le tourne à la main après chaque excitation.

- ✓ L'excitation ( $i_1$ ) : pas de réponse,  $i_1$  est donc inefficace (excitation infraliminaire).
- ✓ A partir de ( $i_2$ ) (**Seuil d'excitation = rhéobase**), on enregistre une réponse dont l'amplitude augmente avec l'augmentation de l'intensité, c'est **la loi de recrutement** (augmentation du nombre d'unités musculaires recrutées).
- ✓ A partir de ( $i_{12}$ ), l'amplitude de la réponse reste constante même si l'intensité de l'excitation continue d'augmenter, car toutes les unités constituant le muscle se contractent.

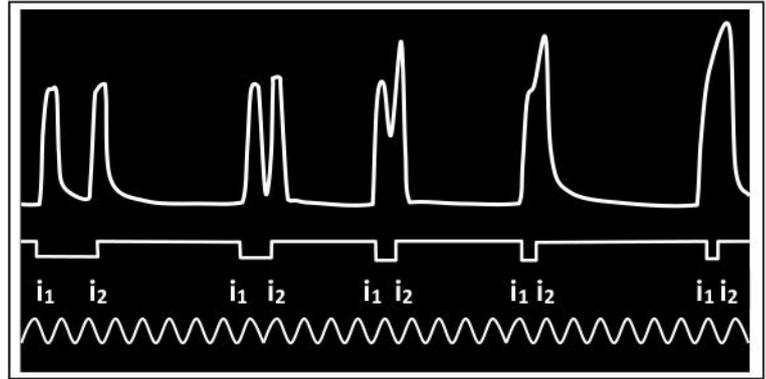




**c) Cas de deux excitations rapprochées :**

On soumet plusieurs fois, un muscle à deux excitations efficaces successives de même intensité ( $i_1, i_2$ ). A chaque fois, on diminue l'intervalle de temps entre les deux excitations.

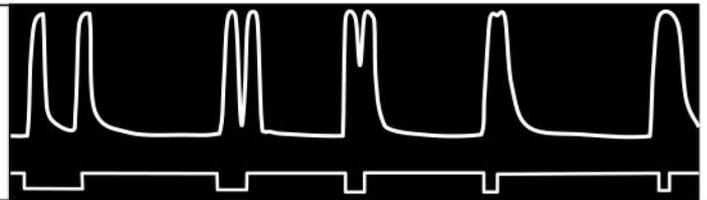
La réponse diffère selon l'instant où on applique la deuxième excitation :



- ✓ Si les deux excitations sont suffisamment éloignées on enregistre deux secousses musculaires isolées et de même amplitude.
- ✓ Si les deux excitations sont rapprochées et que la 2<sup>ème</sup> excitation atteint le muscle pendant la phase de relâchement de la réponse précédente, il se produit **une fusion incomplète (partielle)** des deux secousses musculaires avec une augmentation de l'amplitude de la 2<sup>ème</sup> secousse.
- ✓ Si les deux excitations sont très rapprochées et que la 2<sup>ème</sup> excitation atteint le muscle pendant la phase de contraction de la réponse précédente, on observe **une fusion complète (totale)** des deux secousses qui apparaissent comme s'il n'y a qu'une seule secousse musculaire d'une amplitude plus grande.

**Remarque :**

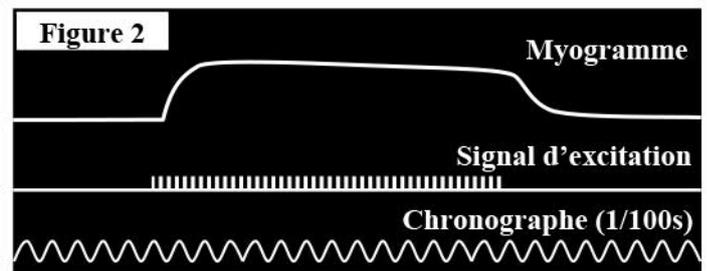
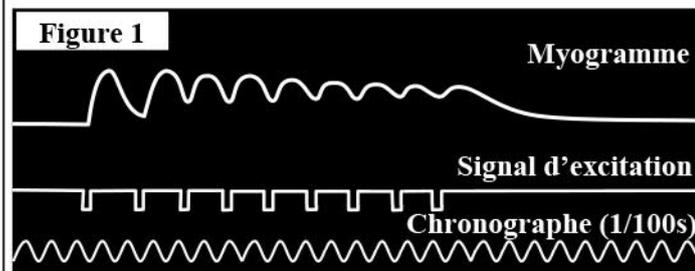
Si on répète l'expérience précédente, mais en utilisant des excitations d'intensité provoquant la réponse maximale du muscle, les deux secousses musculaires auront la même amplitude dans tous les cas.



**d) Cas d'une série d'excitations successives :**

On soumet le muscle à une série d'excitations efficaces de même intensité et en variant la fréquence des excitations :

- Avec une faible fréquence, on obtient le myogramme de la figure 1.
- Avec une grande fréquence, on obtient le myogramme de la figure 2.

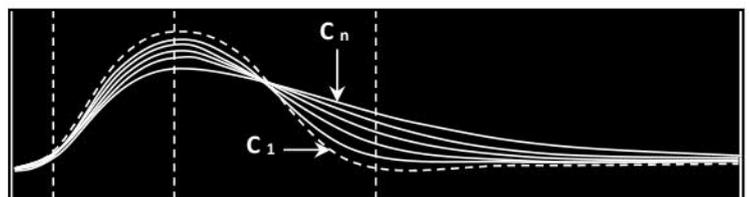


- ✓ **Figure 1 :** quand la fréquence des excitations est faible, le myogramme obtenu prend l'allure d'un palier sinueux. La réponse du muscle est dite, alors, **tétanos imparfait**. Ce phénomène peut être expliqué par la fusion incomplète des secousses musculaires, car chaque excitation atteint le muscle pendant la phase de relâchement de la réponse précédente.
- ✓ **Figure 2 :** quand la fréquence des excitations est forte, le myogramme obtenu prend l'allure d'un palier droit. La réponse du muscle est dite, alors, **tétanos parfait**. Ce phénomène peut être expliqué par la fusion complète des secousses musculaires, car chaque excitation atteint le muscle pendant la phase de contraction de la réponse précédente.

**e) Effet de la fatigue sur la contraction musculaire :**

On applique une série d'excitations de même intensité pendant une durée très longue.  $C_1$  = la secousse obtenue à la suite de la première excitation et  $C_n$  = la secousse obtenue à la suite de la dernière excitation.

La fatigue musculaire se manifeste donc par la diminution de l'amplitude de la réponse musculaire et par une augmentation du temps de relâchement.

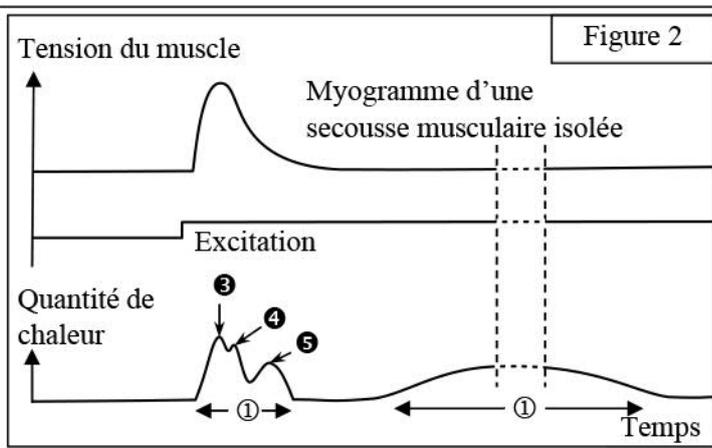
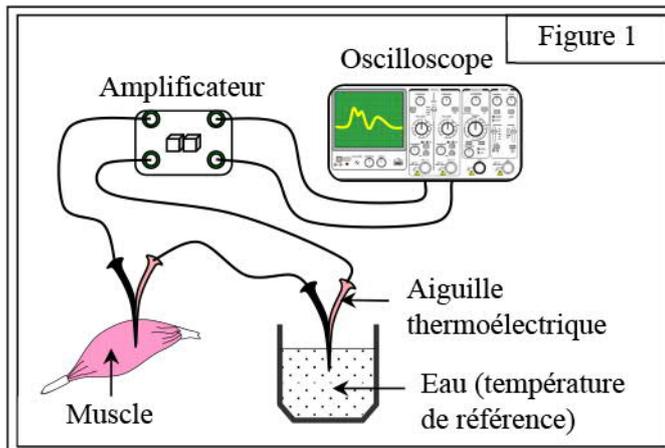




## II. Les phénomènes accompagnant la contraction musculaire

### 1. Les phénomènes thermiques :

Pour mesurer la chaleur dégagée lors de la contraction musculaire, on utilise une thermopile (Figure 1).



Au cours d'une activité musculaire, le muscle dégage de la chaleur en deux temps :

- ✓ La chaleur initiale (①), qui se dégage rapidement au cours de la secousse musculaire et dont une partie est libérée au cours de la phase de contraction (Chaleur de contraction (③) et chaleur de soutien (④)), et l'autre partie au cours de la phase de relâchement (Chaleur de relâchement (⑤)).
- ✓ La chaleur retardée (②) se dégage lentement après la secousse musculaire.

### 2. Les phénomènes chimiques et énergétiques :

Lors de l'activité musculaire, le muscle :

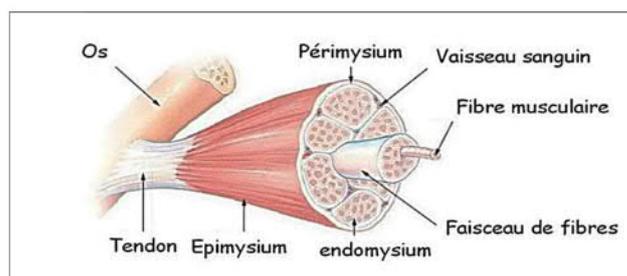
- ✓ Bénéficie d'une augmentation du débit sanguin qui permet l'intensification des échanges ;
- ✓ Utilise beaucoup plus de glucose et du dioxygène, et produit d'avantage de CO<sub>2</sub> ;
- ✓ Ne consomme pas les protides et les lipides mais utilise uniquement le glucose que ce soit en activité ou au repos.

Ces phénomènes traduisent l'oxydation du glucose qui produit l'énergie nécessaire à la contraction musculaire.

## III. Structure et ultrastructure du muscle squelettique strié.

### 1. Structure du muscle squelettique strié :

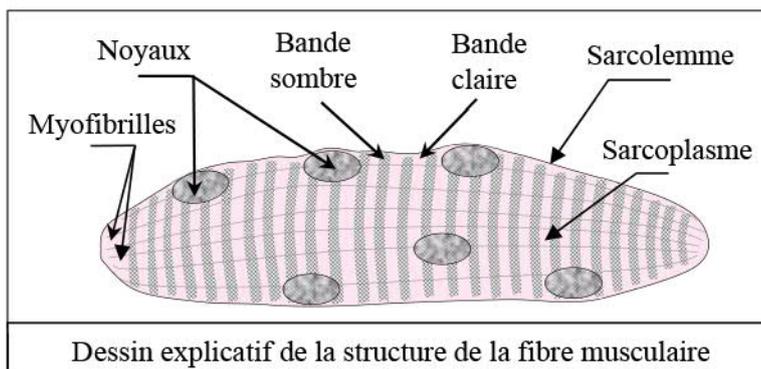
Le muscle squelettique est enveloppé par diverses membranes. Une qui entoure le muscle c'est l'épimysium. Ensuite, le muscle est divisé en faisceaux de fibres qui sont séparés les uns des autres par le péri-mysium. Enfin les faisceaux sont composés de fibres musculaires entourées par l'endomysium. Aux extrémités du muscle, les différentes membranes conjonctives s'unissent pour former les tendons qui attachent les muscles aux os.



### 2. L'ultrastructure de la fibre musculaire :

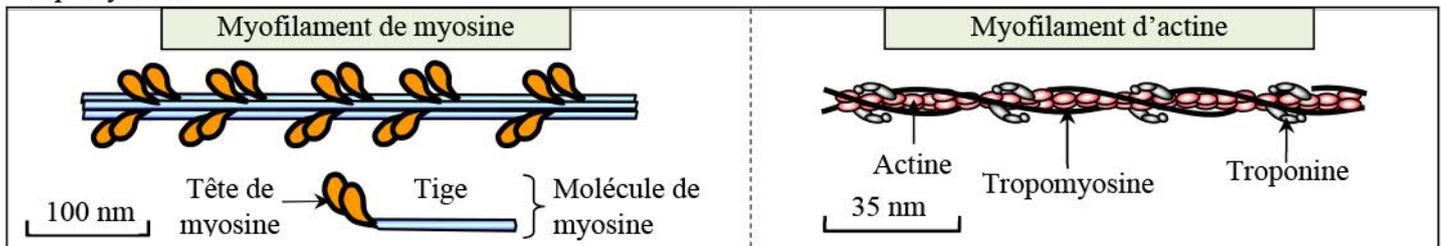
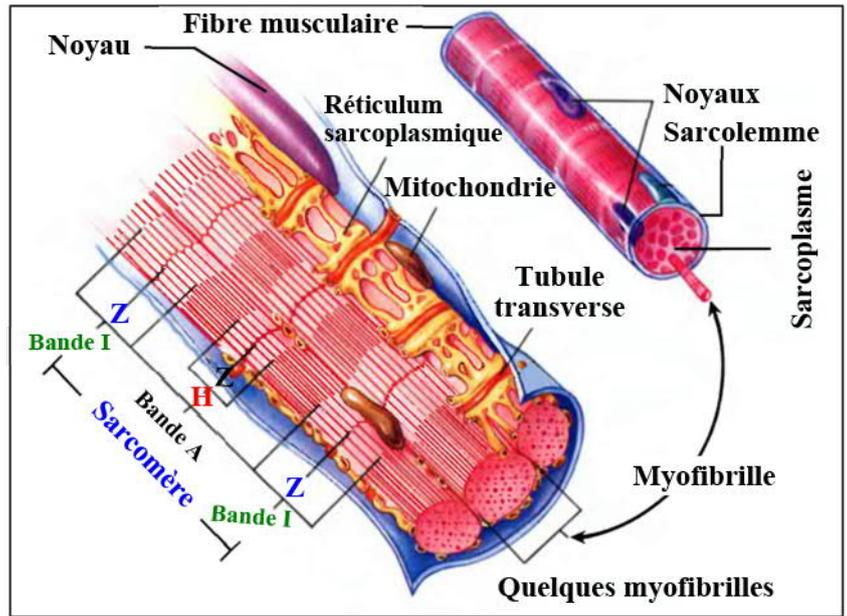
La fibre musculaire est une cellule qui possède plusieurs noyaux (cellule plurinucléée = syncytium), limités par une membrane (sarcolemme). Chaque fibre présente une striation transversale (alternance de bandes sombres et de bandes claires), d'où le nom de muscle squelettique strié.

Le cytoplasme de la fibre musculaire (ou sarcoplasme) contient des structures longitudinales parallèles : les myofibrilles.



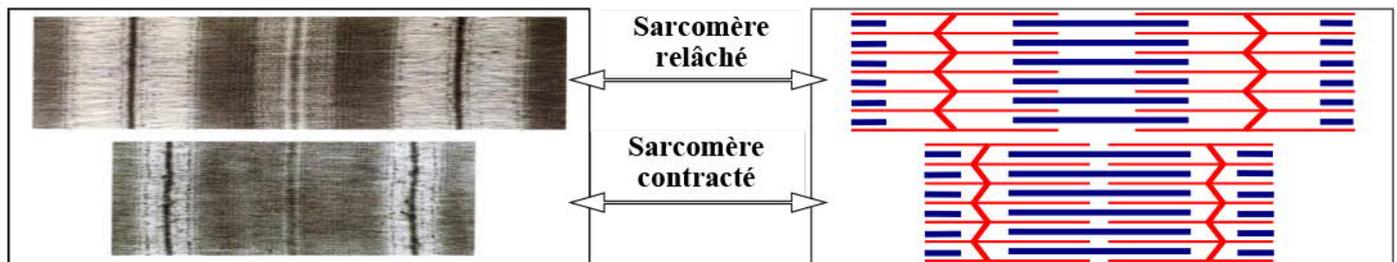


- Chaque myofibrille est constituée de myofilaments. On distingue deux types de myofilaments :
  - ✓ Des myofilaments fins d'actine, qui sont disposés de part et d'autre des stries Z.
  - ✓ Des myofilaments épais de myosine, se situent entre les myofilaments fins.
- L'espace entre deux stries Z est le sarcomère.
- L'endroit où il n'y a que les myofilaments épais de myosine est appelé zone H.
- La zone où il n'y a que les myofilaments fins est appelée la bande I.
- La zone où il y a les myofilaments fins et les myofilaments épais est appelée la bande A.
- Le myofilament épais est composé de protéine myosine (2 têtes), alors que le myofilament fin est composé des protéines actine + troponine + tropomyosine.



#### IV. Mécanisme de la contraction musculaire.

##### 1. En quoi consiste la contraction musculaire ?



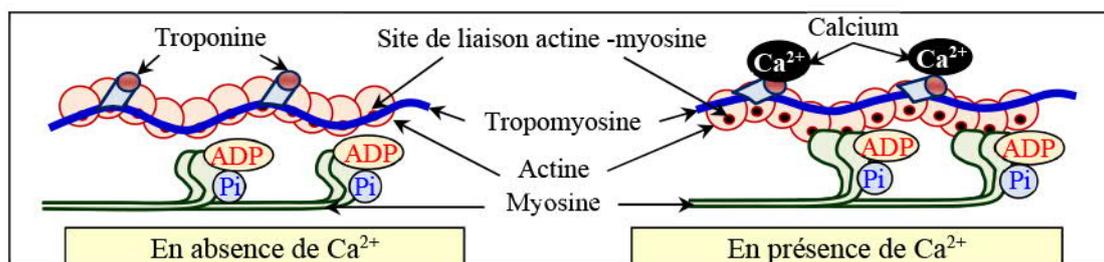
Lors de la contraction musculaire on observe :

- ✓ Un raccourcissement des sarcomères (rapprochement des stries Z).
- ✓ Une réduction de la longueur des bandes claires et de la bande H.
- ✓ Une constance des bandes sombres.
- ✓ La longueur des myofilaments reste constante.

Ceci prouve qu'il y a, au cours de la contraction, un glissement des myofilaments d'actine par rapport aux myofilaments de myosine. Le sarcomère est donc l'unité fonctionnelle de la fibre musculaire.

##### 2. Mécanisme du glissement des myofilaments.

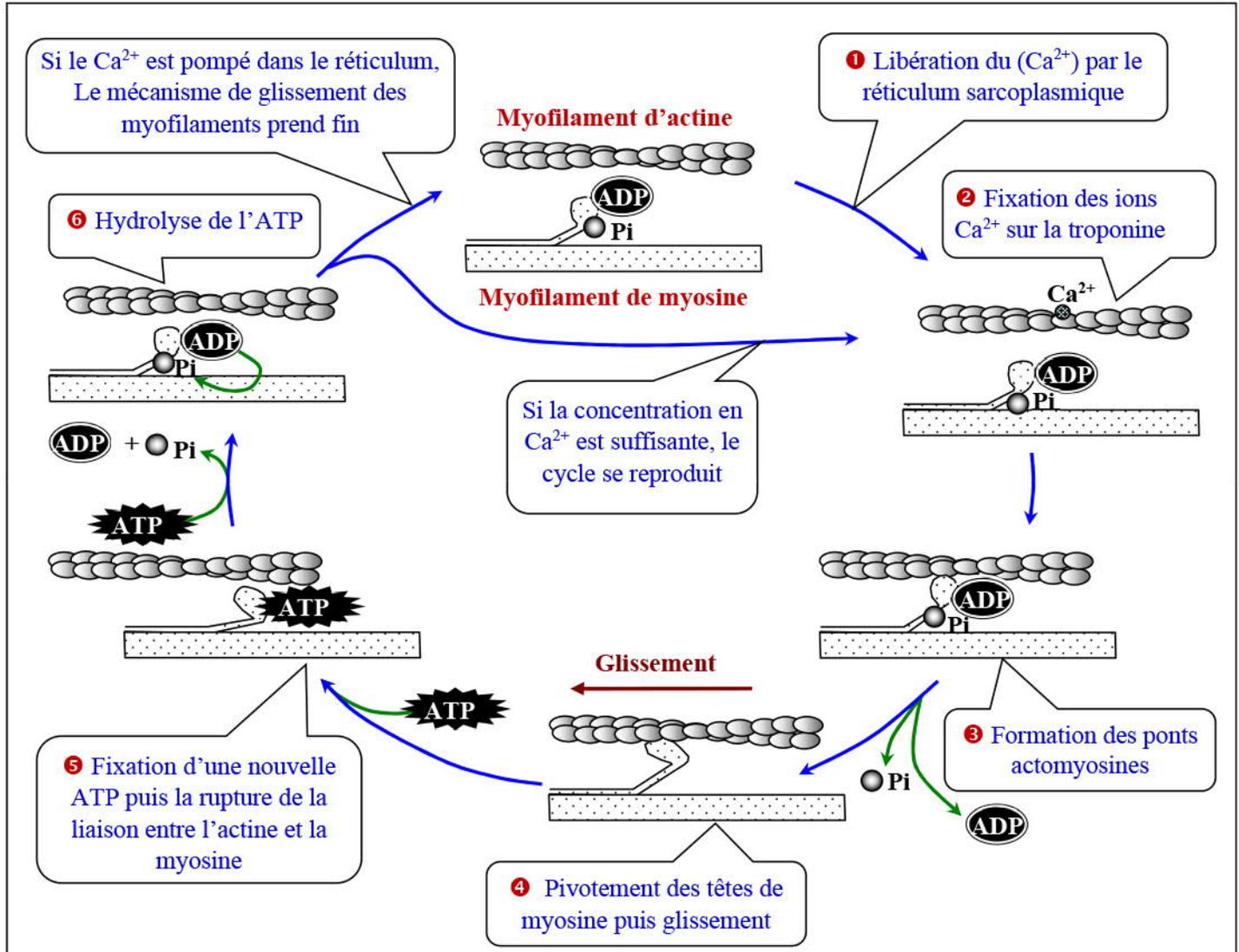
###### a) Rôle du calcium dans la contraction musculaire :





En absence des ions  $Ca^{2+}$  (au repos), la tropomyosine cache le site de fixation de la tête de myosine sur l'actine. La fixation des ions  $Ca^{2+}$  sur la troponine entraîne le déplacement de la tropomyosine ce qui permet de démasquer le site de fixation de la tête de myosine sur l'actine, et par suite, la fixation de myosine sur l'actine et la formation des complexes actomyosines.

**b) Mécanisme du glissement des myofilaments.**



**V. Les voies de régénération de l'ATP au cours de la contraction musculaire :**

**a) Voies anaérobies immédiates :**

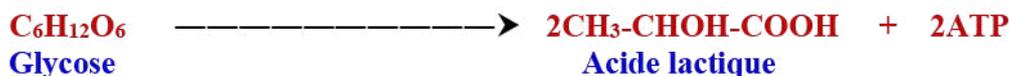
⇒ **La voie de la phosphocréatine** : La production d'ATP par hydrolyse de la phosphocréatine.



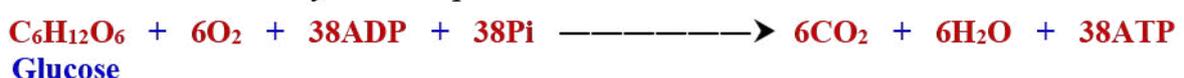
⇒ **La voie de l'ADP** : La production d'ATP par phosphorylation d'ADP.



**b) Voies anaérobies de moyenne vitesse** : La fermentation lactique.



**c) Voies aérobies lentes** : l'oxydation respiratoire.



**Les différents types de fibres musculaires**• **Caractéristiques des différents types de cellules musculaires.**

<b>Propriétés</b>	<b>Muscle squelettique</b>	<b>Muscle cardiaque</b>	<b>Muscle lisse</b>
<b>Caractéristiques cellulaires</b>	Cellules très allongées et cylindriques avec de nombreux noyaux	Cellules irrégulières en forme de bâtonnet habituellement avec un seul noyau	Cellules fusiformes avec un seul noyau
<b>Taille maximale des cellules (lg x d)</b>	30 cm x 100 µm	100 µm x 15 mm	500 µm x 5 mm
<b>Noyaux</b>	Multinucléée (périphériques)	Un seul au centre	Un seul au centre
<b>Striations visibles</b>	Oui	Oui	Non
<b>Contraction</b>	Volontaire	Involontaire	Involontaire
<b>Innervation</b>	Somatique	Autonome (sympathique et parasympathique)	Autonome (sympathique et parasympathique)
<b>Localisation</b>	Se fixe au squelette	Myocarde	Parois des viscères ; vaisseaux sanguins

• **Les fibres lentes ou fibres rouges ou de type I :**

- ✓ Sont rouges car elles sont gorgées de sang. (Avoir un maximum d'O<sub>2</sub>).
- ✓ Sont très fournies en mitochondries (Fabrication d'énergie par le biais d'O<sub>2</sub>).
- ✓ Peu de nerfs les entourent car elles n'ont pas besoin de se contracter rapidement.
- ✓ Par contre, elles ont une forte capacité de résistance à l'effort.
- ✓ Sont fines et interviennent dans des exercices longs ;

• **Les fibres rapides ou fibres blanches ou de type II :**

- ✓ Sont pâles (Moins de sangs = moins d'O<sub>2</sub>) ;
- ✓ Sont riches en réserves énergétiques (glycogène) et moins riches en mitochondries ;
- ✓ Ont un diamètre important ;
- ✓ Ont des capacités de contractions rapides et interviennent dans des mouvements brusques ;
- ✓ Leur innervation est importante pour que le signal arrive vite ;
- ✓ Ont une résistance faible à l'effort et ne sont pas capables de se contracter longtemps.

• **Effets de l'entraînement :**

- ✓ Généralement, chaque individu a une répartition égale de la part de chaque type de fibres mais certains ont des prédispositions.
- ✓ L'entraînement peut modifier cette répartition de manière à avoir plus de fibres lentes ou plus de fibres rapides. Ainsi, si vous vous entraînez pour un marathon, une partie de vos fibres rapides vont se transformer en fibres lentes pour permettre un effort long. A l'inverse, si vous faites un entraînement de sprinter ou d'haltérophile, une partie des fibres lentes va devenir rapide pour permettre d'aller plus vite et d'être plus fort. Quelqu'un qui ne fait pas de sport aura tendance à avoir plus de fibres rapides.



RESUME.2 – NATURE ET MECANISME DE L'EXPRESSION DU MATERIEL GENETIQUE

Chapitre 1 : Nature de l'information génétique

I. Localisation de l'information génétique

L'information génétique qui détermine les caractères héréditaires est localisée dans le noyau chez les organismes unicellulaires et les organismes pluricellulaires.

II. Transmission de l'information génétique d'une cellule à une autre.

1. Ultrastructure du noyau pendant le cycle cellulaire :

La transformation de la chromatine en chromosomes signifie l'entrée de la cellule en mitose.

L'aspect du noyau au cours de la mitose :

Noyau au « repos » : l'ADN est déroulé	L'ADN commence à se compacter	Les chromosomes sont visibles	Les chromosomes s'alignent au milieu de la cellule	Les chromosomes se divisent en 2 groupes et se séparent	Deux cellules filles se forment identiques à la première

L'aspect du noyau à deux périodes du cycle cellulaire :

Le noyau interphasique		Le noyau prophasique	

En dehors de la division cellulaire (pendant l'interphase), la chromatine se présente sous forme de filaments très fins appelés nucléofilaments, uniquement visibles en microscopie électronique à très fort grossissement.

Lors des divisions cellulaires, le noyau présente des structures filamenteuses appelées chromosomes. Le chromosome est de la chromatine soigneusement enroulée.

Chaque chromosome visible est constitué de deux chromatides unis entre-elles au niveau du centromère.

2. Les étapes de la mitose :

La mitose : Phénomène biologique permettant la division d'une cellule mère en deux cellules filles identiques et ressemblent à la cellule mère. Elle correspondant à une reproduction conforme car elle conserve toutes les caractéristiques de la cellule mère

La mitose est un phénomène continu qui se déroule en 4 étapes :

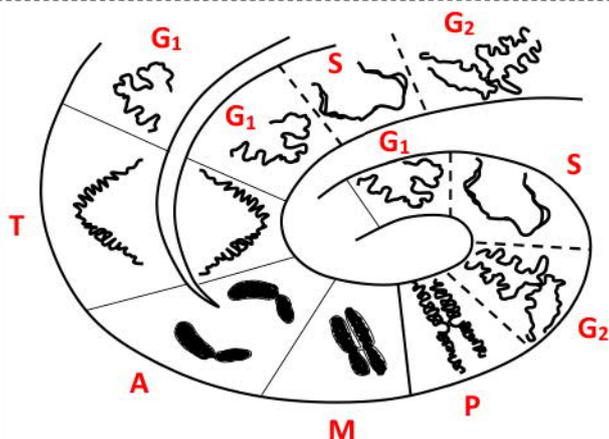
- **Prophase** : Apparition des chromosomes par condensation des fibres de chromatine ; Chaque chromosome se compose de deux chromatides ; la disparition de l'enveloppe nucléaire et début de formation du fuseau mitotique.

- **Métaphase** : alignement des chromosomes sur la plaque équatoriale formant ainsi la plaque métaphasique.
- **Anaphase** : clivage des centromères et séparation des chromatides de chaque chromosome et leur migration vers les pôles cellulaires.
- **Télophase** : Les chromosomes perdent leur condensation et redeviennent des fibres de chromatine ; la réapparition de l'enveloppe nucléaire et disparition du fuseau de division ; la cellule mère se divise en deux cellules filles identiques.

Cellule animale		cellule végétale	
Nombre de chromosome 4	<p>1 : Paroi cellulosique 2 : membrane cytoplasmique 3 : Cytoplasme 4 : Nucléole 5 : Enveloppe nucléaire 6 : Chromosome</p>	<p>1 : Calotte polaire 2 : Membrane cytoplasmique 3 : Cytoplasme 4 : Chromosome 5 : Fibre polaire 6 : Fibre chromosomique 7 : Aster</p>	<p>Nombre de chromosome 6</p> <p>La phase : <b>La prophase</b></p>
Nombre de chromosome 4	<p>1 : Calotte polaire 2 : Membrane cytoplasmique 3 : Cytoplasme 4 : Chromosome 5 : Fibre polaire 6 : Fibre chromosomique 7 : Aster</p>	<p>1 : Calotte polaire 2 : Chromosomes 3 : Etranglement équatoriale 4 : Aster</p>	<p>Nombre de chromosome 6</p> <p>La phase : <b>La métaphase</b></p>
Nombre de chromosome 4+4	<p>1 : Calotte polaire 2 : Chromosomes 3 : Etranglement équatoriale 4 : Aster</p>	<p>1 : cellules filles 2 : Construction d'une paroi 3 : Noyaux filles</p>	<p>Nombre de chromosome 6+6</p> <p>La phase : <b>L' anaphase</b></p>
Nombre de chromosome 4	<p>1 : cellules filles 2 : Construction d'une paroi 3 : Noyaux filles</p>		<p>Nombre de chromosome 6</p> <p>La phase : <b>La télophase</b></p>

### 3. Notion de cycle cellulaire :

#### L'aspect des chromosomes au cours d'un cycle cellulaire



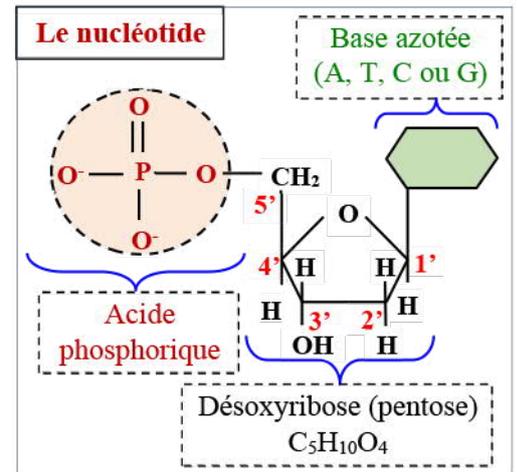
- G<sub>1</sub> = Première phase de croissance
- S = La phase de synthèse
- G<sub>2</sub> = Deuxième phase de croissance
- P = La prophase
- M = La métaphase
- A = L'anaphase
- T = La télophase

On appelle cycle cellulaire les différentes étapes par lesquelles passe la cellule, du début d'une interphase au début de l'interphase suivante. (Autrement dit cycle cellulaire = interphase + mitose).



### III. La nature chimique du matériel héréditaire.

- L'ADN constitue le support de l'information génétique. Cette molécule d'ADN est le constituant fondamental des chromosomes.
- La nature chimique du matériel héréditaire est l'ADN chez la majorité des êtres vivants sauf les rétrovirus qui ont de l'ARN.
- La molécule d'ADN (Acide désoxyribonucléique) est un polymère de nucléotides, chaque nucléotide est constitué par l'association de 3 molécules : un pentose, le désoxyribose  $C_5H_{10}O_4$ , un acide phosphorique  $H_3PO_4$  et Une base azotée, qui peut être soit l'adénine (A), la thymine (T), la guanine, ou bien la cytosine (Figure ci-contre).
- Un nucléoside est l'union d'une base purique (adénine, guanine) ou pyrimidique (cytosine, thymine ou uracile) et d'un pentose (ribose ou désoxyribose).



### IV. La structure de la molécule d'ADN (Modèle de Watson et Crick)

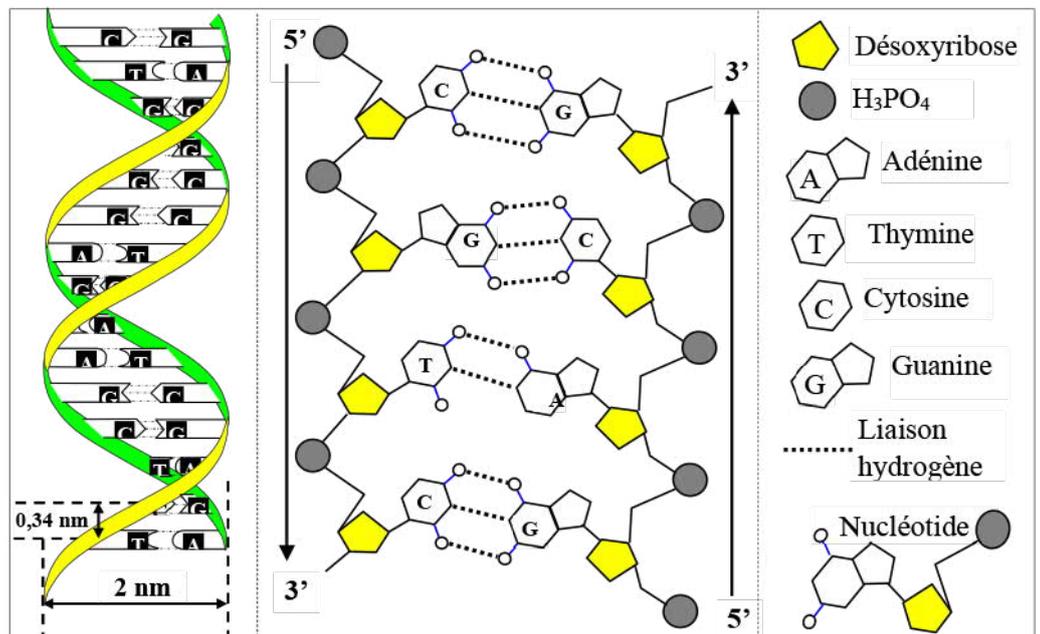
L'ADN, selon le modèle de Watson & Crick (Modèle de la double hélice), est constitué de deux Brins enroulés en spirale.

(L'ADN est bicaténaire = 2 chaînes = 2 séquences de nucléotides).

Les deux brins s'associent au niveau des bases azotées de façon complémentaire grâce aux liaisons hydrogènes : 2 liaisons entre A=T et 3 liaisons entre C≡G.

Les atomes de carbone du désoxyribose sont par convention, notés  $C_1'$ ,  $C_2'$ , ...,  $C_5'$ . Or, sur chaque brin d'ADN, il y a une extrémité libre :  $C_5'$ , alors qu'à l'autre extrémité, c'est

le  $C_3'$  qui est libre. Ainsi le brin a une polarité suivant la direction  $5' \rightarrow 3'$ . D'autre part les deux brins qui s'assemblent sont de polarités opposées, les deux brins sont antiparallèles, l'un des brins est orienté droit  $5' \rightarrow 3'$  l'autre est inversé.

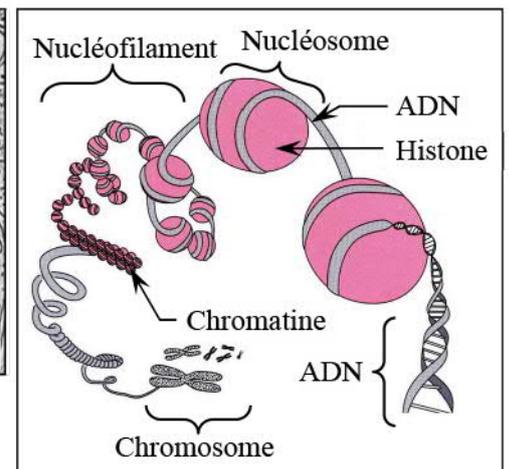
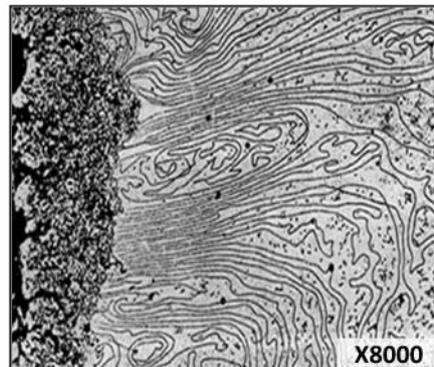


### V. Relation entre chromatine, chromosome et ADN.

Au cours de l'interphase le nucléofilament apparaît comme un collier constitué de l'enroulement d'une molécule d'ADN autour des histones pour former des nucléosomes.

Pendant la prophase, la spiralisation des nucléofilaments, puis leur enroulement autour d'un squelette protéique forme les chromosomes qui apparaissent formés de deux chromatides.

Donc la chromatine et les chromosomes constituent le même élément dont la structure varie selon les phases du cycle cellulaire. Ils sont constitués d'une molécule d'ADN associée à de nombreuses protéines.





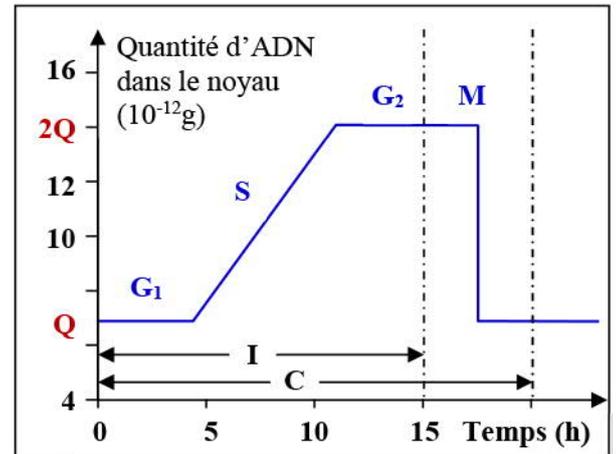
## VI. Mécanisme de duplication de l'ADN.

### 1. La duplication de l'ADN :

On effectue le dosage de la quantité d'ADN contenue dans le noyau d'une cellule, au cours d'un cycle cellulaire (Figure ci-contre).

G<sub>1</sub> et G<sub>2</sub> (Growth) = première et deuxième phase de croissance ;  
S (Synthesis) = Phase de synthèse ; M = Mitose ; I = Interphase ;  
C = cycle cellulaire.

La réplication de l'ADN : phénomène biologique permettant la formation de deux molécules d'ADN à partir d'une seule molécule d'ADN.



### 2. Mécanisme de réplication de l'ADN (réplication semi-conservative) :

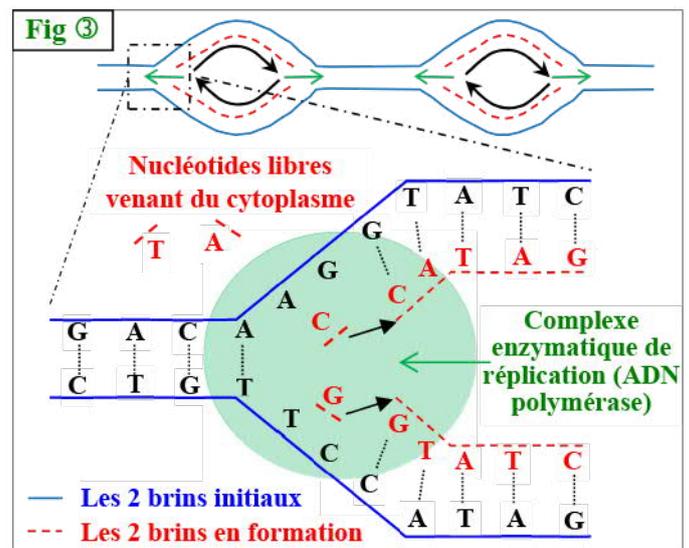
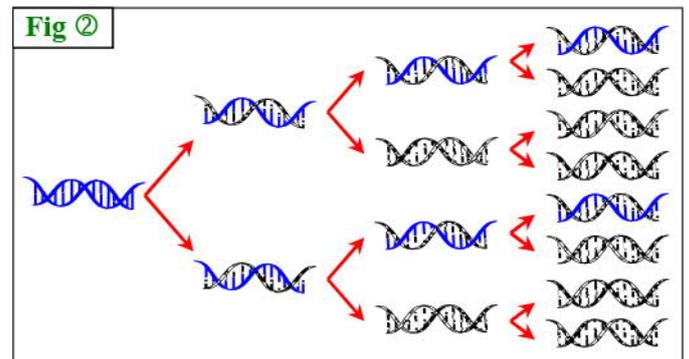
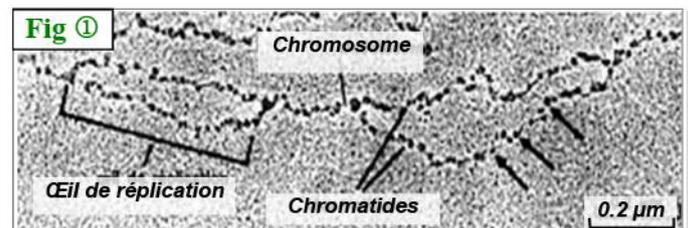
★ Fig ① : L'observation au microscope électronique d'un chromosome pendant la phase S de l'interphase, montre que la double hélice de l'ADN se sépare en différents points du chromosome, en deux brins, formant des "yeux de réplication".

★ Fig ② : est un schéma d'interprétation de la réplication d'ADN. Cette réplication se fait selon le mode semi-conservatif, selon lequel chaque brin de la molécule "mère" sert de matrice pour la synthèse d'un brin complémentaire.

★ Fig ③ : Chaque brin sert de modèle pour la synthèse d'un nouveau brin complémentaire. Chaque œil de réplication comporte deux fourches de réplication, figures-en Y. Ces fourches progressent en sens inverses (réplication bidirectionnelle).

★ Fig ④ : Un ensemble de protéines enzymatiques consommatrices d'énergie réalise la réplication de l'ADN :

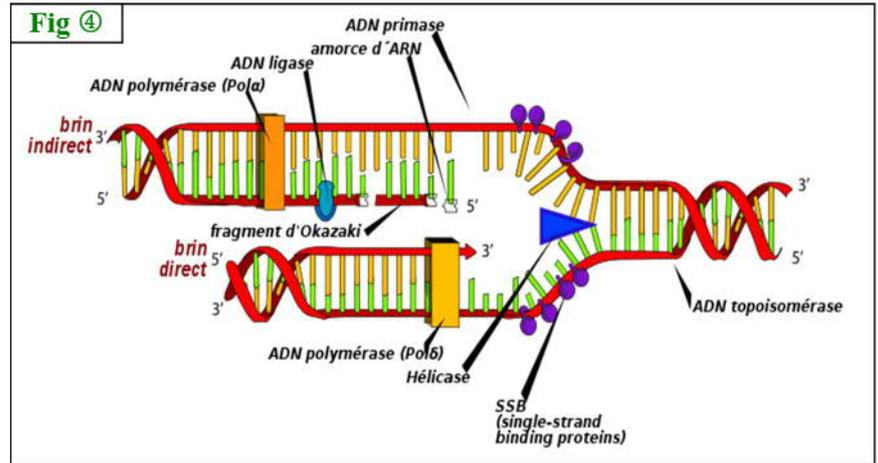
- Les protéines de reconnaissance reconnaissent les sites d'initiation et de terminaison.
- L'hélicase : déroule la double hélice par rupture des liaisons hydrogènes présentes entre les deux brins de l'ADN.
- L'ADN topoisomérase : enzyme qui supprime les contraintes de torsion de l'ADN au cours des processus de réplication et de la transcription.
- L'ADN polymérase : associe en face d'un nucléotide du brin parent, un nouveau nucléotide complémentaire formant le brin fils. Cet enzyme ne fonctionne que dans le sens 5' → 3' (Sens du nouveau brin).
- Les protéines SSB (pour Single Stranded binding Protein) ont une forte affinité pour l'ADN simple brin et l'empêche ainsi de se réenrouler lors de la migration des fourches répliquatives.
- La primase est une ARN polymérase qui permet la synthèse de courts segments d'ARN qui sont ensuite utilisés comme amorces par l'ADN polymérase répliquative.
- Les ADN ligases catalysent la formation de la liaison phosphodiester.





★ Les origines de réplication :

- La réplication d'une molécule d'ADN se fait dans le sens 5' => 3' et commence sur des sites particuliers, appelés origines de réplication, il s'agit de courts segments d'ADN ayant une séquence nucléotidique spécifique.
- Un chromosome d'Eucaryote linéaire, possède des centaines ou des milliers d'origines de réplication.
- Chez les procaryotes comme la bactérie, le chromosome circulaire possède une seule origine de réplication.

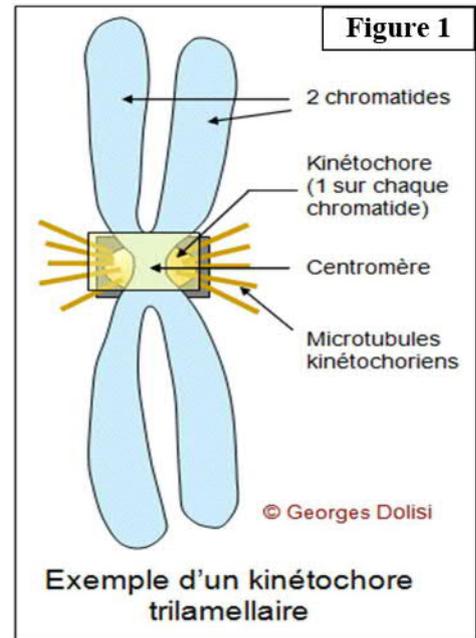


- La synthèse d'ADN doit respecter certaines propriétés : les deux fourches répliquatives doivent migrer dans des sens opposés, la synthèse de l'ADN se fait dans la direction 5' vers 3' et ainsi le brin matriciel est lu de 3' vers 5', les deux brins de l'ADN sont antiparallèles et synthétisés simultanément.
- La réplication est asymétrique. L'un des deux brins est synthétisé de façon continue (brin précoce ou avancé), tandis que l'autre est synthétisé sous forme de fragments connus sous le nom de fragments d'Okazaki (brin tardif ou retardé).

Remarque : Quelques structures caractérisant le matériel génétique

★ Figure 1 : Les Kinétochores :

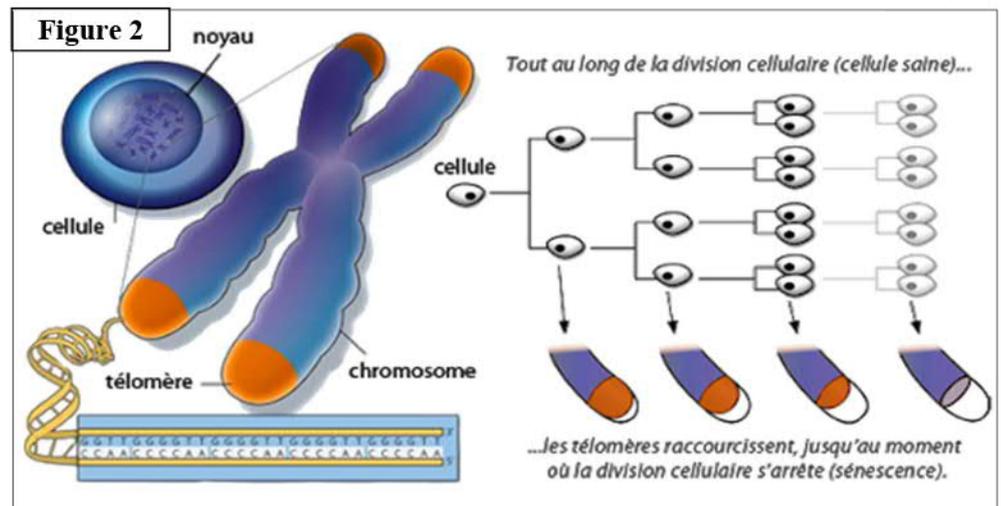
En fin de prophase, des structures spécialisées, appelées kinétochores (Figure 1), formés de complexes protéiques, se développent et s'attachent dans la région du centromère. Il y a un kinétochore pour chaque chromatide. Ils vont jouer un rôle primordial au moment de la séparation des chromatides. Les microtubules kinétochoriens, insérés dans le kinétochore se développent progressivement et, dans la prophase tardive, ils vont progressivement s'attacher aux microtubules du fuseau.



★ Figure 2 : Les télomères :

Les télomères sont des régions hautement répétitives de l'ADN, située à l'extrémité de chaque chromosome (figure 2). Ces séquences d'ADN répétitives ne contiennent pas de gènes : elles sont là pour préserver l'intégrité de notre patrimoine génétique.

Mais à chaque fois qu'une cellule recopie son ADN avant de se diviser, elle perd un petit bout de télomère, tant et si bien que ces protections finissent par s'user. La cellule arrête alors de se diviser et de fonctionner normalement. Les chercheurs parlent de cellules "sénescences", dont l'accumulation contribue au vieillissement de l'organisme.





## Chapitre 2 : Expression de l'information génétique

### I. Notion de caractère, gène, allèle et de mutation :

#### 1. Relation entre information génétique et caractère :

##### a) Notion de caractère héréditaire :

Le caractère héréditaire est une particularité qualitative ou quantitative qui différencie un individu à l'autre et se transmet de génération à la suivante. Certains caractères peuvent être visible comme la couleur, la taille... d'autres nécessite des analyses comme les groupes sanguins.

##### b) Notion de mutation :

- Les mutations sont des modifications de l'information génétique, qui se caractérisent par la rareté, la spontanéité, et la stabilité. Elles peuvent être favorisées par l'action de certains facteurs de l'environnement, qualifiés d'agents mutagènes : physiques (rayon X, ultraviolet...), chimiques (amiante, toluène...) ou biologiques (virus...).
- La mutation est une source de diversité allélique (génétique). La forme originale du gène est l'allèle sauvage et la forme modifiée est l'allèle mutant.
- Les mutations peuvent être de substitution (= remplacement), d'insertion (= addition), de délétion (= suppression).
- Les mutations peuvent être de type : silencieuse (si mêmes acides aminés), faux sens (si acides aminés différents), non-sens (si remplacement de l'acide aminé par le codon STOP).

##### c) Notion de gène et d'allèle :

- Le gène est un fragment de la molécule d'ADN qui porte l'information génétique correspondant à un caractère héréditaire. C'est une molécule séquencée en nucléotides. Le gène a un emplacement précis sur un chromosome, appelé locus.
- L'allèle est une forme ou version de gène. En général un gène est représenté chez les diploïdes par deux allèles (occupant le même locus) qui peuvent être identiques ou différents.

#### 2. Relation protéine - caractère :

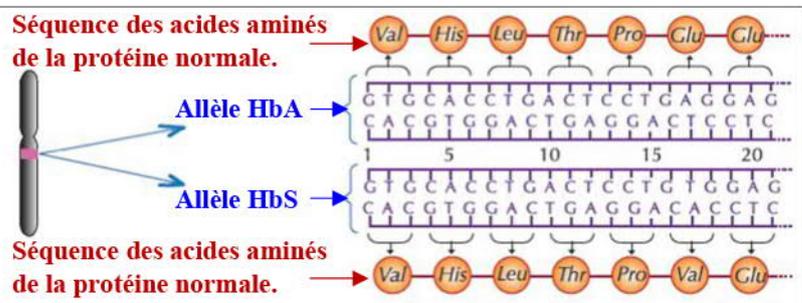
La synthèse de la mélanine à partir de la tyrosine fait intervenir plusieurs enzymes (protéines). Cette synthèse peut être schématisée de façon simplifiée de la manière suivante :



La couleur noire du pelage chez le lapin est liée à la présence d'un pigment sombre, la mélanine. L'absence totale de ce pigment est à l'origine du caractère albinos. Or quand l'enzyme tyrosinase (protéine), est fonctionnelle, elle permet la synthèse de la mélanine d'où la coloration sombre. Alors que le défaut d'activité de cette enzyme est responsable de l'absence de mélanine, donc le caractère « coloration de pelage » dépend de l'activité d'une protéine « l'enzyme tyrosinase ».

#### 3. Relation gène - protéine :

Le document ci-contre, présente une portion du chromosome 11 portant les séquences de nucléotides (allèles impliqués dans la synthèse de l'hémoglobine normale HbA ET l'hémoglobine anormale HbS responsable de la drépanocytose.



Une modification de la séquence des nucléotides de la molécule d'ADN (= mutation) entraîne des modifications au niveau de la séquence d'acides aminés de la protéine. Donc l'ordre des nucléotides d'une séquence d'un gène détermine la séquence d'acides aminés dans la protéine.

Les mutations sur les séquences nucléotidiques entraînent une modification de la séquence en acides aminés de la protéine et par la suite une modification du caractère. Il existe donc une relation de cause à effet entre gène, protéine et caractère.

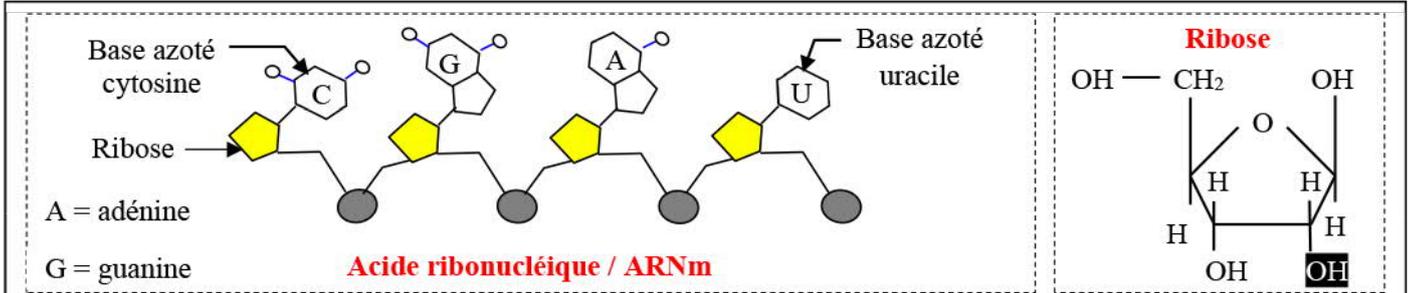


## II. Mécanisme de l'expression de l'information génétique :

### 1. Le lieu de la synthèse des protéines :

L'ARNm est en fait le médiateur entre le matériel génétique au niveau du noyau et la synthèse protéique au niveau du cytoplasme. L'ARN est donc le « messenger » entre le noyau et le cytoplasme, il est nommé ARN messenger.

### 2. Structure de la molécule d'ARN :



La molécule d'ARN est une molécule simple brin (Monocaténaire) il est constitué de nucléotides. Le nucléotide contient : un acide phosphorique ; un pentose : le ribose (C<sub>5</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>), au lieu du désoxyribose ; une base azotée : Adénine (A) ou Cytosine (C) ou Guanine (G) ou Uracile (U).

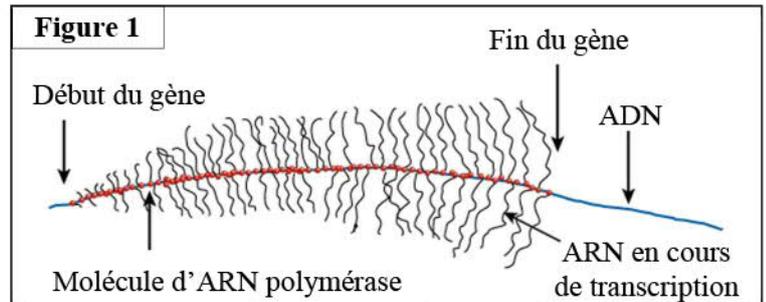
### 3. Les étapes de l'expression de l'information génétique :

#### a) La transcription : synthèse de l'ARN

★ **Figure 1** : L'ARNm est formé à partir d'un unique brin d'ADN d'un gène. Ce brin d'ADN porte le nom de brin transcrit (ou brin matrice).

La transcription commence en un point précis de l'ADN, le site d'initiation, pour se terminer en un point précis, le site de terminaison.

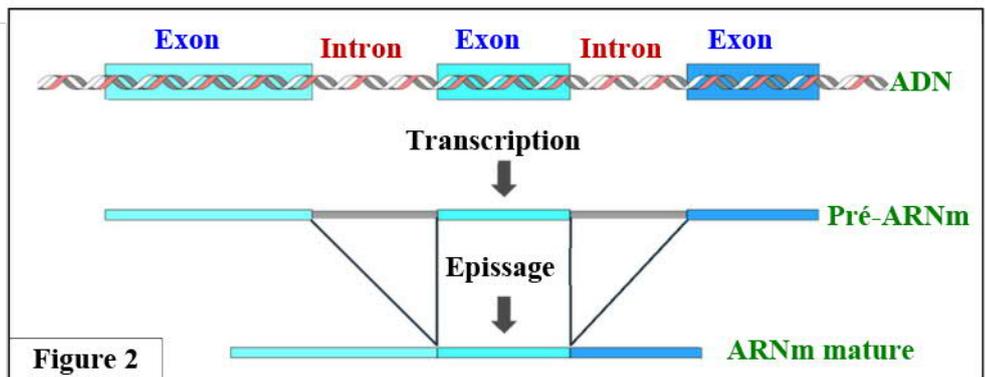
La transcription de l'ARN se fait dans le noyau sous l'action d'une enzyme appelé l'ARN polymérase.



★ **Figure 2** : Un gène de cellule eucaryote présente une alternance de régions codantes - **les exons** - et de régions non codantes - **les introns**.

Les gènes sont transcrits sous forme d'ARNm prématurés (pré-ARNm) qui contiennent les introns et les exons.

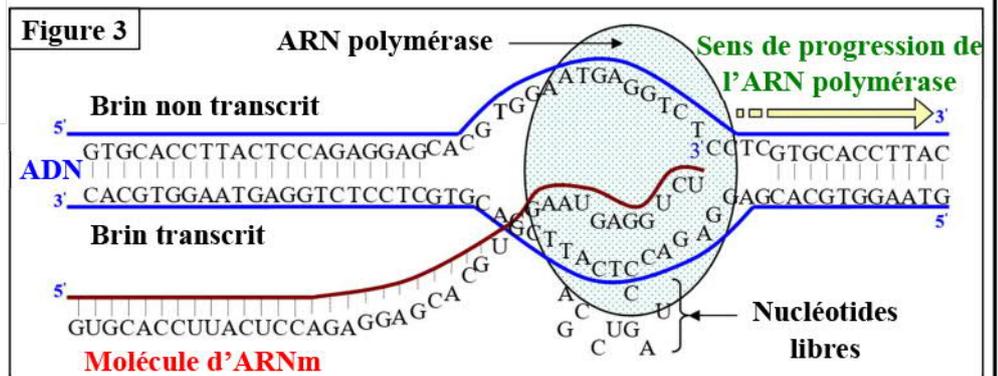
Les introns sont non retenus : ils sont clivés selon un mécanisme appelé épissage, pour donner l'ARN messenger mature (ARNm mature).



★ **Figure 3** : La transcription se déroule selon les étapes suivantes :

✓ **L'initiation** : Sur l'ADN, chaque gène est précédé d'une séquence, qui indique à la fois le brin à transcrire et le début de la zone à transcrire. Celui-ci permet également la fixation de l'ARN polymérase.

Une fois fixé sur l'ADN, L'ARN polymérase provoque localement l'ouverture de la double hélice d'ADN.





- ✓ **L'élongation** : L'ARN polymérase progresse le long de l'ADN suivant le sens 3'→5', et en respectant la complémentarité des bases azotées, il associe à chaque désoxyribonucléotide un ribonucléotide complémentaire (A à T, C à G, G à C et U à A). L'ARN obtenu est donc complémentaire du brin transcrit et identique, aux uraciles et riboses près, au brin non transcrit.
- ✓ **La terminaison** : Quand l'ARN polymérase rencontre sur l'ADN un site de terminaison il y a libération de l'ARN qui pourra quitter le noyau en empruntant les pores nucléaires.

**b) La traduction : synthèse des protéines**

⇒ **Notion de code génétique :**

Chaque triplet de nucléotide de l'ARNm code pour un acide aminé déterminé, ce triplet est appelé codon. La plupart des acides aminés sont codés par plusieurs triplets de nucléotides (que l'on nomme codons synonymes). 3 triplets UAA, UAG et UGA sont non-sens (Stop).

⇒ **Les éléments nécessaires à la traduction :**

En plus de l'ARN messenger (ARNm), La traduction nécessite la collaboration entre les ribosomes, un type d'ARN appelé ARN de transfert ou ARNt, des acides aminés, le Mg<sup>2+</sup>, le GTP et l'ATP.

★ **Le ribosome :**

Le ribosome est un complexe composé d'ARN ribosomiques (ARNr) et de protéines.  
 Les ribosomes sont soit libres dans le cytoplasme, ou associé à la membrane du réticulum endoplasmique granuleux.  
 Les ribosomes sont communs à toutes les cellules (procaryotes et eucaryotes), et sont toujours composés de deux sous-unités distinctes.

Les procaryotes possèdent un ribosome de 70S, alors que Le ribosome des eucaryotes est appelé 80S (S est une unité de mesure du taux de sédimentation de (S en l'honneur du chimiste Svedberg).

★ **L'ARN de transfert (ARNt) :**

Les ARNt (Figure 3), sont de petits ARN responsables du transport des acides aminés jusqu'aux ribosomes lors de la traduction des ARNm : chaque ARNt transporte un acide aminé, de façon spécifique. Sa séquence comporte une série de trois nucléotides, nommée anticodon, qui reconnaît le codon correspondant à l'acide aminé qu'il transporte.

Les ARNt, représentent environ 15% de l'ARN cellulaire total.

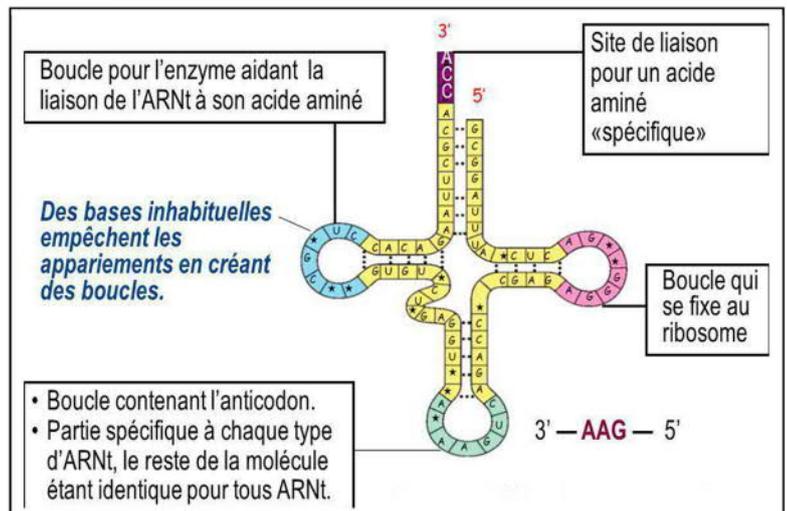
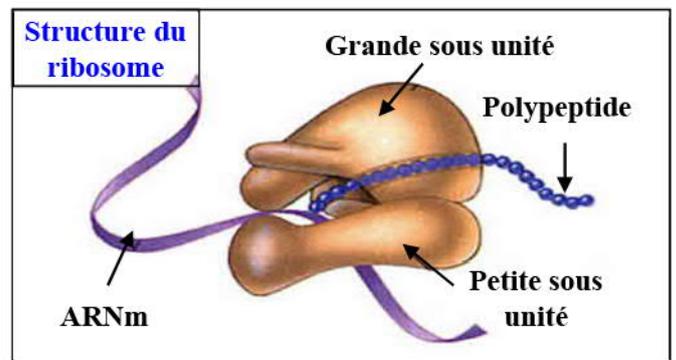
⇒ **Les étapes de la traduction :**

- ✓ **Le codon** : triplet de nucléotides de l'ARN, correspondant à un seul et unique acide aminé.
- ✓ **Le code génétique** : est le système de correspondance entre les codons et les acides aminés.
- ✓ **Codons synonymes** : Il existe des codons ayant la même signification c-à-d codent pour le même acide aminé.
- ✓ **Codons stops** : Il n'y a pas d'acide aminé codé par ces codons, ce sont UAA ; UAG ; UGA.

Les ribosomes sont les ateliers de la synthèse des protéines. Ils permettent de décoder de façon ordonnée la séquence d'ARNm en acides aminés. Ils lisent l'ARNm dans un seul sens (de façon unidirectionnelle).

✓ **Les étapes de la traduction :**

- **Initiation** : débute toujours au niveau d'un codon AUG appelé codon initiateur (code pour la méthionine).
- **Elongation** : le ribosome glisse le long de la molécule d'ARNm, ce qui permet la mise en place des différents acides aminés suivant l'ordre des codons de la séquence de nucléotides de l'ARNm.
- **Terminaison** : Lorsque le ribosome arrive au niveau d'un codon stop, la synthèse s'arrête. La protéine est libérée et le ribosome se scinde en deux.





### RESUME.3 – TRANSMISSION DES CARACTERES HEREDITAIRES CHEZ LES DIPLOÏDES

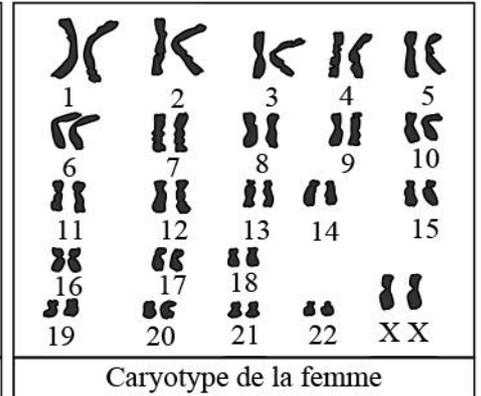
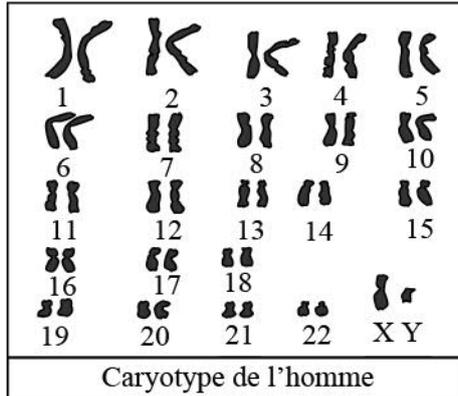
#### I. Le caryotype (Carte chromosomique) :

- ★ **Définition :** Le caryotype est l'ensemble des chromosomes métaphasiques d'une seule cellule, organisés en fonction de leurs aspects, leurs tailles et la position de leurs centromères dans un ordre décroissant.
- Si les chromosomes sont identiques deux à deux (chromosomes homologues), alors la cellule est diploïde et sa formule chromosomique est 2n. Exemple : Cellules somatiques normales.
- Si les chromosomes sont différents entre eux, la cellule est haploïde et sa formule chromosomique est n. Exemple : cellules germinales (reproductrices ou gamètes).

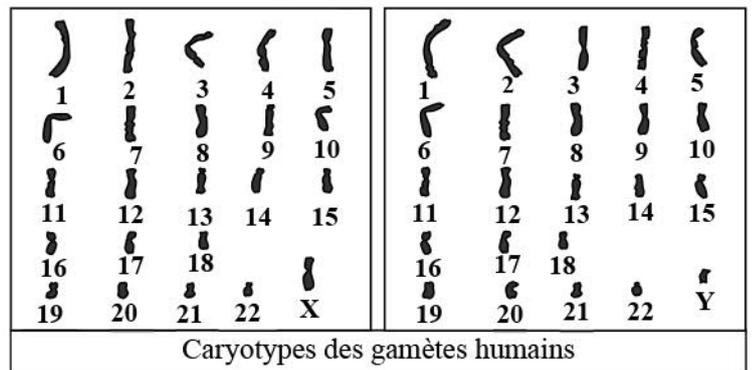
#### ★ Caryotype humain :

Chez l'Homme, on distingue deux types de chromosomes : les autosomes (A) ou chromosomes non sexuels, au nombre de 44, et les gonosomes ou chromosomes sexuels au nombre de 2.

La formule chromosomique du caryotype humain est :

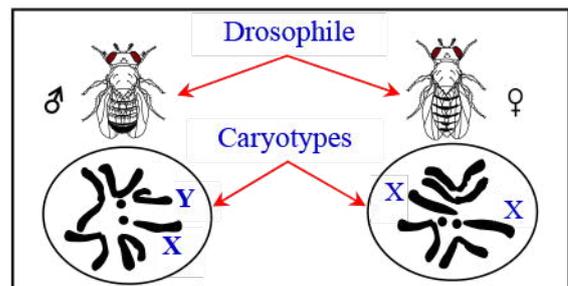


- Chez le mâle humain :
  - La garniture chromosomique est représentée par la formule :  $2n = 46 = 22AA + XY = 44A + XY$ .
  - Ses gamètes mâles ou spermatozoïdes :  $n = 23 = 22A + X$  et  $n = 22A + Y$ .
- Chez la femelle humaine :
  - La garniture chromosomique est représentée par la formule :  $2n = 46 = 22AA + XX = 44A + XX$ .
  - Ses gamètes femelles ou ovules :  $n = 23 = 22A + X$ .



#### ★ Caryotype de la drosophile :

- Chez le mâle :  $2n = 8 = 3AA + XY = 6A + XY$
- Chez la femelle :  $2n = 8 = 3AA + XX = 6A + XX$

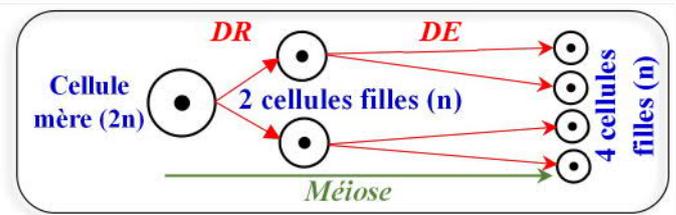


#### II. Méiose et diversité génétique :

Pendant le cycle de vie (ou cycle de développement) de tout organisme, la reproduction sexuée alterne deux phénomènes :

- La méiose caractérisée par la réduction chromatique ( $2n \rightarrow n$ ) ;
- La fécondation caractérisée par la caryogamie (Fusion des noyaux) ( $n \rightarrow 2n$ ).

- ★ **Définition :** La succession de deux divisions cellulaires précédée d'une seule répllication d'ADN (interphase) ;
  - Une première division réductionnelle DR ( $2n \rightarrow n$ ) ;
  - Une deuxième division équationnelle DE ( $n \rightarrow n$ ).
- La méiose produit 4 cellules filles haploïdes (n) à partir d'une seule cellule mère diploïde (2n).



#### ★ Rôle de la méiose :

- La méiose produit des cellules reproductrices ou gamètes (gamétogenèse) et parfois des spores.
- Les cellules haploïdes sont différentes car la méiose permet le brassage génétique (= recombinaison génétique) source de diversité génétique donc de polymorphisme.

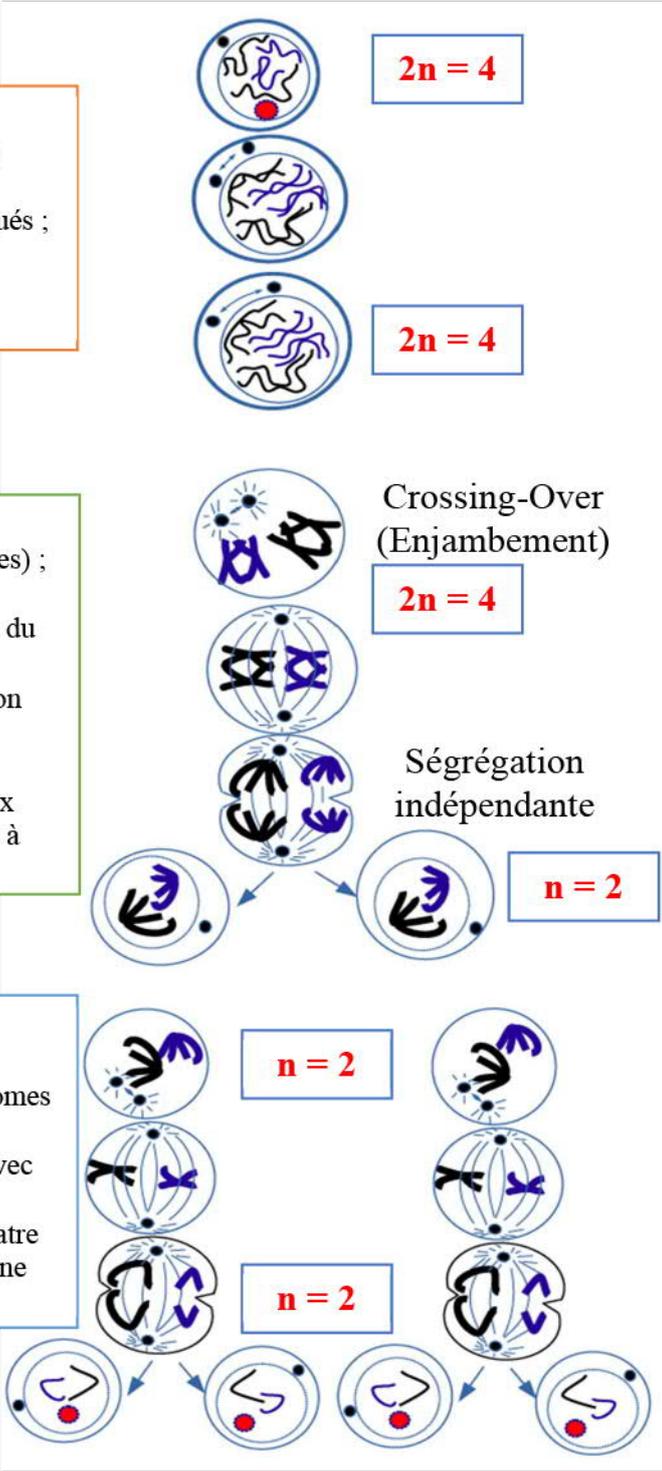


★ Étapes de la méiose :

- **G1** : Membrane nucléaire et nucléoles ; Nucléofilament simple ; Centrioles simples ;
- **G2** : Membrane nucléaire et nucléoles ; Nucléofilament dupliqué ; Centrioles dupliqués ;
- **S** : Membrane nucléaire et nucléoles ; Nucléofilament avec yeux de répllication ; Duplication des centrioles.

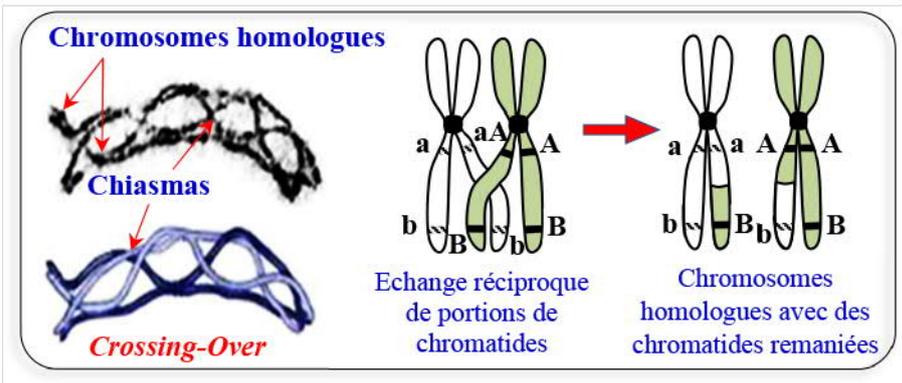
- **P-I** : Individualisation des chromosomes ; Tétrades (chiasmata/chromosomes homologues) ;
- **M-I** : Fuseau achromatique (asters) ; Plaque équatoriale ; Chromosomes de part et d'autre du plan équatorial ;
- **A-I** : Fuseau achromatique (asters) ; Migration polaire des chromosomes (sans clivage des centromères) ;
- **T-I** : Membrane nucléaire et nucléoles ; Deux cellules filles (deux noyaux) ; Chromosomes à deux chromatides.

- **P-II** : Chromosomes individualisés (non appariés) ;
- **M-II** : Plaque équatoriale avec des chromosomes (Sur le plan équatorial) ;
- **A-II** : Migration polaire des chromosomes avec clivage des centromères ;
- **T-II** : Membrane nucléaire et nucléoles ; Quatre cellules filles (4 noyaux) ; Chromosomes à une chromatide.



★ Les différents types de brassage génétique méiotique :

- **Brassage Intrachromosomique** : Pendant la prophase I : Présence de tétrades donc de chiasmata entre chromatides des chromosomes homologues => crossing-over (= enjambement) (Échange de segments de chromatides entre chromosomes homologues) => Recombinaison intrachromosomique => formation de cellules type recombiné TR => diversité génétique.





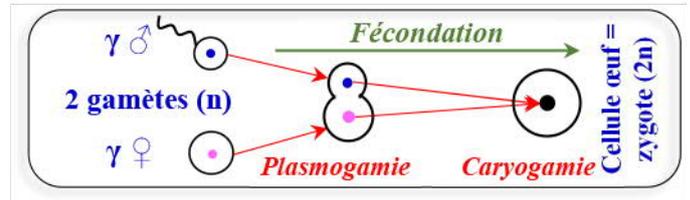
• **Brassage interchromosomique :**

Pendant l'anaphase I : Migration (répartition) aléatoire des chromosomes => séparation indépendante des chromosomes => Recombinaison interchromosomique => formation de cellules types recombinées TR => diversité génétique.

**NB :** On peut observer un brassage interchromosomique à l'anaphase II s'il est précédé d'un crossing-over en PI.

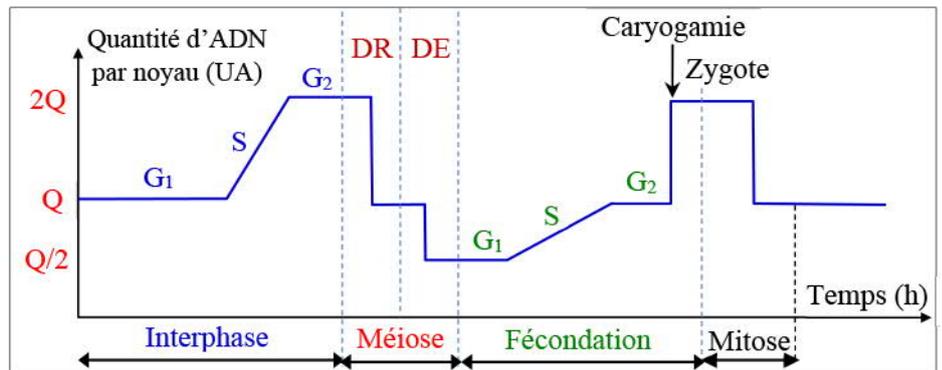
**III. Fécondation et diversité génétique**

★ **Définition :** C'est l'union de deux gamètes (n) mâle et femelle pour donner une cellule-œuf ou zygote (2n) ; La fusion des deux noyaux mâle et femelle s'appelle caryogamie alors que la fusion des deux cytoplasmes s'appelle plasmogamie.



★ **Rôle de la fécondation :**

- Pendant la fécondation se détermine le sexe en fonction du type de chromosomes sexuels (XX ou XY) ;
- La fécondation donne des zygotes différents par brassage interchromosomique donc il y a une recombinaison génétique source de diversité génétique (polymorphisme).
- L'alternance de la méiose et de la fécondation entraîne :



- ✓ Une conservation du nombre de chromosomes = constance du caryotype car si la méiose réduit la formule chromosomique :  $2n \rightarrow n$ , la fécondation rétablit la diploïdie :  $n \rightarrow 2n$  ;
- ✓ Une diversité génétique = recombinaison génétique car il y a brassage de l'information génétique pendant la méiose et la fécondation.

**IV. Lois statistiques de la transmission des caractères héréditaires chez les diploïdes :**

★ **Définitions :**

- **Gène :** fragment d'ADN qui contrôle un caractère héréditaire précis.
- **Allèle :** version d'un gène donné qui peut varier d'un individu à un autre.
- **Monohybridisme :** Etude de la transmission d'un seul caractère héréditaire, la transmission d'un couple d'allèle.
- **Dihybridisme :** Etude de la transmission de deux caractères héréditaires, la transmission de deux couples d'allèles.
- **Lignée pure :** Lignée pour laquelle les caractères se retrouvent inchangés d'une génération à l'autre. Les individus d'une lignée pure sont homozygotes, ils possèdent pour un caractère donné sur les deux chromosomes homologues, deux allèles identiques d'un même gène.
- **Lignée sauvage :** Individu présentant un caractère très courant dans la nature (Opposition du caractère mutant).
- **Hybridation :** Croisement entre parents nettement différents, appartenant généralement à la même espèce. Il en résulte des descendants hybrides.
- **Phénotype :** Les caractères physiques et physiologiques d'un organisme.
- **Génotype :** La combinaison d'allèles pour tout caractère donné, ou la composition génétique entière d'un organisme.
- **Homozygote :** Un organisme qui a deux allèles identiques d'un gène donné. Exemple : A//A ou a//a.
- **Hétérozygote :** Un organisme qui a deux allèles différents d'un gène donné. Exemple : A//a.
- **Test-cross :** (croisement-test) : C'est un croisement entre un individu récessif et un individu à génotype inconnu dont le phénotype est celui de l'allèle dominant. Pour différencier le génotype de l'individu phénotypiquement dominant.
- **Backcross :** (croisement en retour ou rétrocroisement) C'est un croisement entre un individu F<sub>1</sub> hybride et un de ses parents homozygote. Un backcross peut correspondre à un test-cross si le parent avec lequel le croisement a été effectué, est de souche récessive.
- **Croisement réciproque :** Deux croisements impliquant deux parents dans lesquels, on change les phénotypes des parents en fonction de leur sexe (croisement 1 : mâle : [A]x femelle : [B] – croisement 2 : mâle : [B]x femelle : [A]).



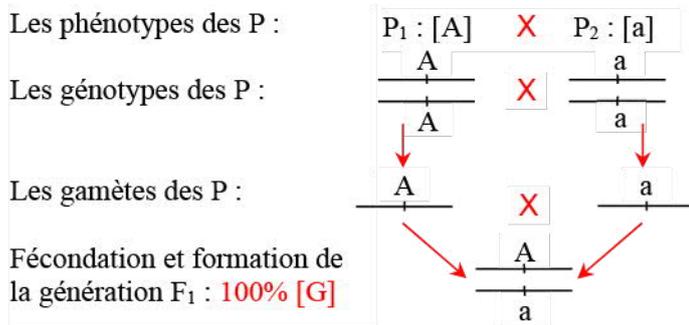
★ Les lois de Mendel :

- **La première loi : loi d'uniformité des hybrides :** Tous les individus de la 1ère génération F<sub>1</sub> (hybrides) sont phénotypiquement identiques (homogène) et semblable à l'un des parents ayant le caractère dominant.
- **La deuxième loi : loi de la pureté des gamètes :** Lors de la formation des gamètes (Méiose), les facteurs héréditaires portant les deux formes du caractère étudié se séparent (ségrégent) dans les gamètes. Un gamète ne contient qu'un facteur de chaque caractère, on dit qu'il est pur.
- **La troisième loi : loi de la ségrégation indépendante des allèles :** Pendant la gamétogenèse, dans un croisement dihybride et au cours de la prophase I, chaque élément d'un couple d'allèles aura autant de chance de se retrouver avec l'une des deux éléments de l'autre couple d'allèles, c'est ce que l'on appelle ségrégation indépendante des allèles.

★ **Monohybridisme (transmission d'un couple d'allèles) :**

**Dominance**

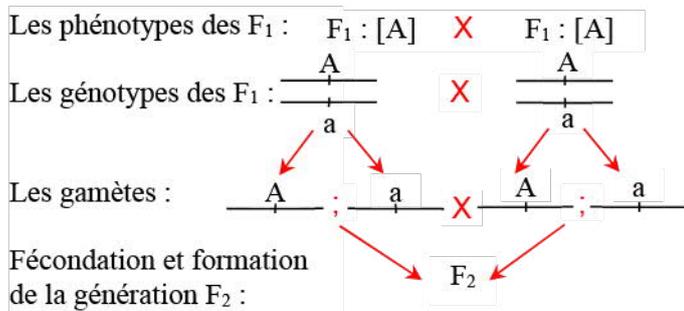
Croisement entre deux parents de phénotypes différents :



**F<sub>1</sub> homogène**

**Expression d'un phénotype parental (Dominant)**

Croisement entre les individus F<sub>1</sub> (F<sub>1</sub> x F<sub>1</sub>) :



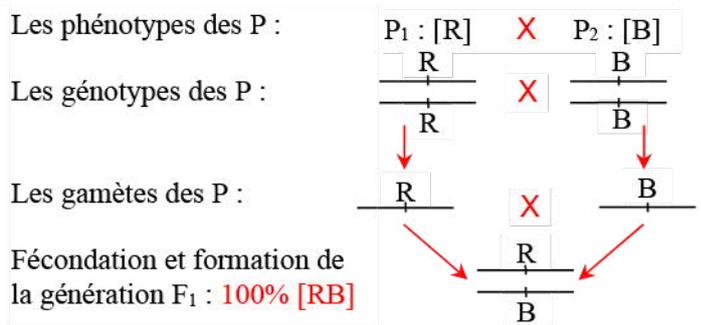
**Echiquier de croisement**

♂ \ ♀	50% $\frac{A}{A}$	50% $\frac{a}{a}$
50% $\frac{A}{a}$	25% $\frac{A}{A}$	25% $\frac{A}{a}$
50% $\frac{a}{a}$	25% $\frac{A}{a}$	25% $\frac{a}{a}$

**F<sub>2</sub> : 2 phénotypes (3/4 + 1/4)  
75% dominant [A] + 25% récessif [a]**

**Codominance**

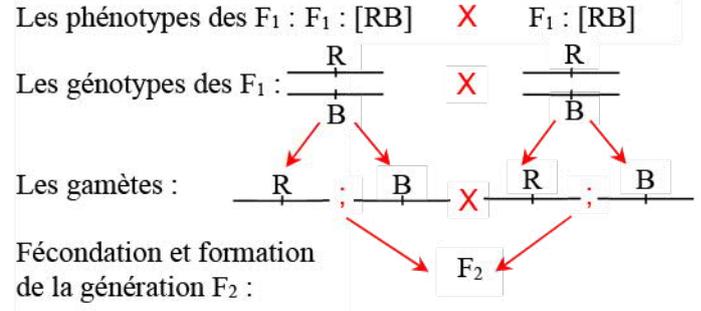
Croisement entre deux parents de phénotypes différents :



**F<sub>1</sub> homogène**

**Expression d'un phénotype non parental**

Croisement entre les individus F<sub>1</sub> (F<sub>1</sub> x F<sub>1</sub>) :



**Echiquier de croisement**

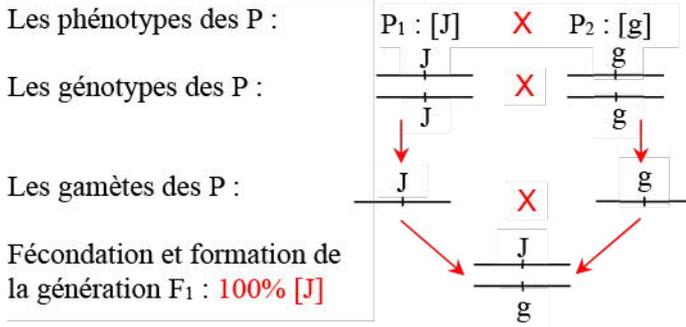
♂ \ ♀	50% $\frac{R}{R}$	50% $\frac{B}{B}$
50% $\frac{R}{B}$	25% $\frac{R}{R}$	25% $\frac{R}{B}$
50% $\frac{B}{B}$	25% $\frac{R}{B}$	25% $\frac{B}{B}$

**F<sub>2</sub> : 3 phénotypes (1/2 + 1/4 + 1/4)  
50% [RB] + 25% parental [R] + 25% parental [B]**



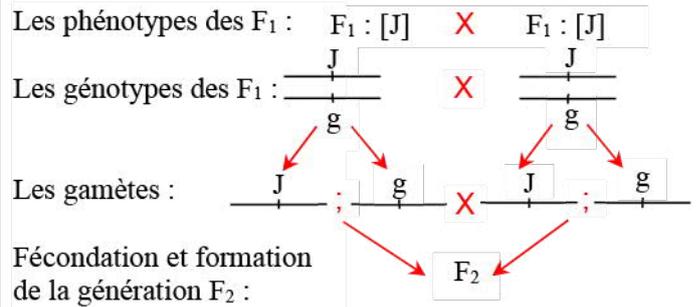
Cas d'un caractère lié à un gène létal

Croisement entre deux parents de phénotypes différents



**F<sub>1</sub> homogène**  
Expression d'un phénotype parental (Dominant)

Croisement entre les individus F<sub>1</sub> (F<sub>1</sub> x F<sub>1</sub>)

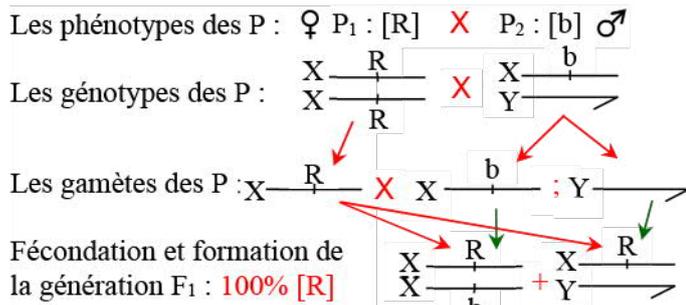


**F<sub>2</sub> : 2 phénotypes théoriques : 3/4 [J] + 1/4 [g]**  
**Et 3 génotypes théoriques : 1/4 J//J + 1/4 g//g 3/4 J//g**  
**F<sub>2</sub> : 2 phénotypes expérimentaux : 2/3 [j] + 1/3 [g]**  
**Et génotypes : (25% J//g + 25% J//g + 25% g//g),**  
**ce qui indique que 25% des (J//J) sont éliminés.**

Cas d'un caractère lié aux chromosomes sexuels

1<sup>er</sup> croisement

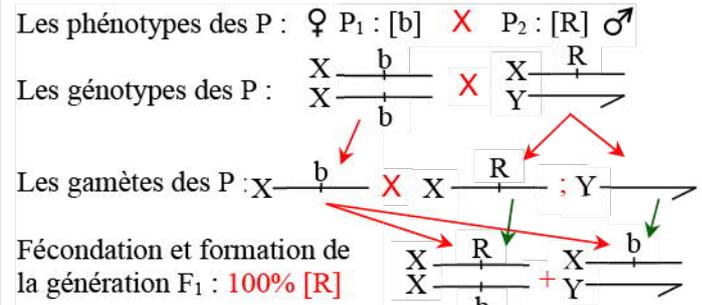
Croisement entre deux parents de phénotypes différents :



**F<sub>1</sub> homogène (50% ♂ [R] + 50% ♀ [R])**  
Expression d'un phénotype parental (Dominant)  
50% mâles X<sup>R</sup>Y + 50% femelles X<sup>R</sup>X<sup>R</sup>

2<sup>ème</sup> croisement (Réciproque)

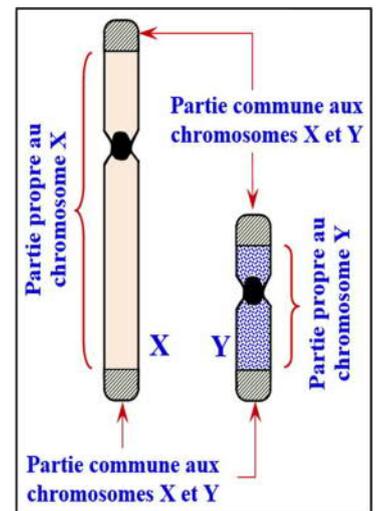
Croisement entre deux parents de phénotypes différents :



**F<sub>1</sub> non homogène malgré les parents purs ; dimorphisme sexuel (50% ♂ [b] + 50% ♀ [R])**  
50% mâles X<sup>b</sup>Y + 50% femelles X<sup>R</sup>X<sup>b</sup>

Pour les caractères liés aux chromosomes sexuelles :

- Si un caractère est associé à la partie commune du chromosome X et du chromosome Y, sa transmission sera de mode autosomal ;
- Si un caractère est associé à la partie propre du chromosome X, il n'est présent qu'en un seul exemplaire chez le mâle (qui ne porte qu'un X) et en deux exemplaires chez la femelle ;
- Si un caractère est associé à la partie propre du chromosome Y, il sera présent que chez les mâles et aura une transmission de type toujours dominant.
- Chez l'Homme, la drosophile et la plupart des organismes vivants :
  - ✓ Le mâle : est hétérogamétique (XY) ; donne 2 types de gamètes.
  - ✓ La femelle : homogamétique (XX) ; donne 1 type de gamète.
- Chez d'autres organismes tel que les oiseaux, quelques poissons et certains insectes comme les papillons :
  - ✓ Le mâle : est homogamétique (ZZ) ; donne 1 type de gamète.
  - ✓ La femelle : est hétérogamétique (ZW) ; donne 2 types de gamètes.
- Chez certains insectes (criquet, punaise...), les mâles sont hétérogamétiques, on les désigne par XO (le chromosome X n'a pas d'homologue). Alors que Les femelles sont homogamétiques XX.
- Chez d'autres espèces (poulet domestique), ce sont les femelles qui ne possèdent qu'un seul chromosome sexuel ZO, alors que les mâles sont homogamétiques ZZ.





★ **Dihybridisme (transmission de deux couples d'allèles) :**

1 <sup>er</sup> Cas : A partir de la génération F <sub>2</sub>	2 <sup>ème</sup> Cas : A partir du croisement test
<p><i>Croisement entre deux parents de même phénotype :</i>                      (Double hétérozygote) F<sub>1</sub> X F<sub>1</sub> (double hétérozygote)                      ↓                      Descendance : F<sub>2</sub> (Hétérogène)</p> <p>✓ <b>Si les deux gènes sont indépendants, la répartition phénotypique des descendants est de la forme : /16</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Si les deux gènes sont transmis avec dominance :                              (3/4 + 1/4) (3/4 + 1/4) = 9/16, 3/16, 3/16, 1/16.</li> <li>• Si les deux gènes sont transmis l'un avec dominance et l'autre avec codominance :                              (3/4 + 1/4) (1/4 + 1/4 + 1/2) = 6/16, 3/16, 3/16, 2/16, 1/16, 1/16.</li> <li>• Si les deux gènes sont transmis avec codominance :                              4/16, 2/16, 2/16, 2/16, 2/16, 1/16, 1/16, 1/16, 1/16.</li> </ul> <p>✓ <b>Si ces proportions ne sont pas vérifiées, les deux gènes sont liés.</b></p>	<p><i>Croisement entre un individu hybride de la génération F<sub>1</sub> et un parent P double homozygote récessive :</i>                      F<sub>1</sub> X P → Descendance : F'<sub>2</sub> (Hétérogène)</p> <p>✓ <b>Si les deux gènes sont indépendants, la répartition phénotypique de F<sub>2</sub> doit vérifier les proportions : 1/4, 1/4, 1/4, 1/4.</b></p> <p>✓ <b>Si ces proportions ne sont pas vérifiées, les deux gènes sont liés.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Si la descendance F'<sub>2</sub> comporte 4 phénotypes : deux phénotypes majoritaires (parentaux) et deux phénotypes minoritaires (recombinés) : donc l'individu hybride présente un linkage partiel (la femelle de la drosophile)</li> <li>• Si la descendance F'<sub>2</sub> comporte uniquement deux phénotypes de proportions 1/2, 1/2 donc l'individu hybride, double hétérozygote, présente un linkage absolu (le mâle de la drosophile).</li> </ul>

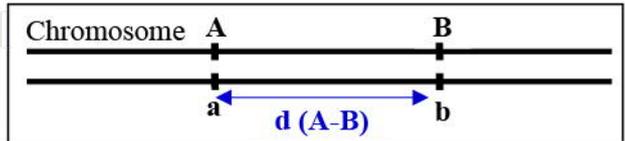
**V. La carte factorielle ou carte génétiques :**

★ **Définitions :** La carte factorielle ou génétique est la représentation linéaire de la localisation des gènes sur un chromosome, basé sur les fréquences de recombinaison.

★ **Établissement de la carte factorielle :**

Le pourcentage de recombinaison existant entre deux gènes liés, (A, a) et (B, b), reflète exactement la distance (d) qui les sépare. L'unité de mesure utilisée est le centimorgan (cMg). 1 cMg = 1% de recombinaisons.

$$d = \% \text{ de recombines} = \frac{\text{Nombre d'individus recombinés}}{\text{Nombre total d'individus}} \times 100$$



★ **Exemple :**

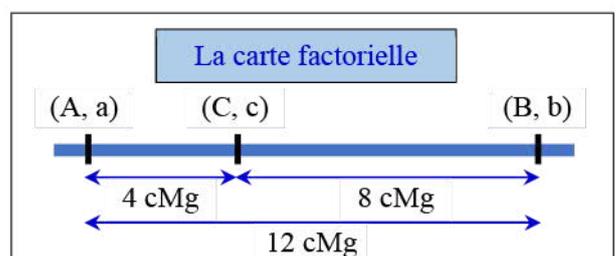
Chez une variété de plantes, on a effectué trois séries de croisements pour réaliser l'étude des gènes A, B, et C, et on a obtenu les résultats suivants :

- ✓ AB / ab X ab / ab → 455 [AB] + 58 [Ab] + 62 [aB] + 425 [ab] ;
- ✓ BC / bc X bc / bc → 453 [BC] + 41 [Bc] + 39 [bC] + 467 [bc] ;
- ✓ AC / ac X ac / ac → 473 [AC] + 21 [Ac] + 19 [aC] + 487 [ac].

Dressez la carte chromosomique (comment ces gènes sont-ils disposés sur leur chromosome ?).

**Réponse :**

- ✓ La distance entre le gène (A, a) et le gène (B, b) est d<sub>1</sub> :  
 d<sub>1</sub> = (120/1000) x 100 = 12 cMg
- ✓ La distance entre le gène (B, b) et le gène (C, c) est d<sub>2</sub> :  
 d<sub>2</sub> = (80/1000) x 100 = 8 cMg
- ✓ La distance entre le gène (A, a) et le gène (C, c) est d<sub>3</sub> :  
 d<sub>3</sub> = (40/1000) x 100 = 4 cMg



**RESUME.4 – UTILISATION DES MATIERES ORGANIQUES ET INORGANIQUES****Chapitre 1 : Les déchets ménagers issus de l'utilisation des matières organiques et inorganiques**

- Les déchets ménagers sont tous les résidus issus des activités quotidiennes des ménages. Ils contiennent les résidus alimentaires, emballages, bouteilles, papiers, cartons, journaux... On distingue deux catégories de déchets : déchets organiques et déchets inorganiques.
- La croissance démographique et le nouveau mode de vie, ont engendrés une augmentation des besoins de l'homme. Cette évolution est accompagnée d'une augmentation et d'une variation des déchets ménagers.
- Les déchets ménagers sont formés essentiellement par de la matière facilement biodégradable comme les restes de nourritures, ou persistante très longtemps dans l'environnement comme le plastique.

**I. Les moyens d'élimination des ordures ménagères et leur traitement.****1. La collecte des déchets ménagers :**

Dans la plupart des zones urbaines, la collecte des déchets se fait après leurs assemblages dans des poubelles, par camions depuis les quartiers résidentiels vers une décharge située à la périphérie de la ville. Ces déchets sont généralement collectés et transportés vers les décharges publiques sans aucun traitement.

Les décharges anarchiques autour des villes constituent une véritable menace pour la santé et pour l'environnement. Cette menace peut être évitée par gestion raisonnable des déchets ménagers dont le contenu est riche en substances pouvant être réutilisées comme matière première (recyclage), ce qui donne aux déchets ménagers une importance économique.

**2. Le tri des déchets ménagers :**

- Le tri consiste à trier et à récupérer les déchets selon leur nature : métaux, papier, verre, organique... pour faciliter leur recyclage.
- Le tri est un travail minutieux qui nécessite d'abord l'intervention du citoyen lui-même. Ensuite, vient le rôle des services spécialisés des centres de tri où on utilise des machines automatisées.
- Après le tri sélectif des déchets ménagers, les matières bien séparées en catégories différentes, sont compactées et mises en balle, puis envoyés dans des unités industrielles de traitement et de recyclage.
- **Quelques avantages du tri des déchets ménagers :**
  - ✓ La réduction du volume des déchets.
  - ✓ La réduction des risques d'interactions possibles entre les composants des déchets.
  - ✓ La préservation des réserves naturelles.
  - ✓ Valorisation des déchets en classant ses composants en fonction de leurs natures.

**3. Les techniques de traitement et de valorisation des déchets ménagers :****a) Le recyclage des déchets ménagers.**

Le recyclage des déchets ménagers, consiste à réutiliser les matériaux tels quels ou à les réintroduire dans un nouveau cycle de production. Le tableau ci-dessous, décrit quelques exemples de réutilisation des matériaux récupérés pour recyclage :

<b>Matériaux récupérés</b>	<b>Exemple de valorisation</b>
<b>Papier - carton</b>	Reproduire des cartonnages de containers, base de boîte de carton, des sachets de papiers, papiers de photocopie et d'imprimerie...
<b>Plastique</b>	Conteneurs non alimentaires, tubes et tuyaux industriels, jouets, matériaux de revêtement, semelles...
<b>Verre</b>	Fabrication d'emballage en verre...
<b>Aluminium</b>	Après traitement, les boîtes sont fondues et moulées puis laminées en feuillets et coupées pour produire de nouvelles boîtes ou autres.
<b>Métal ferreux</b>	Reproduire de nouveaux aciers.
<b>Les Os</b>	Décoration de meubles et bijoux. Utilisé comme absorbant dans le traitement des eaux...



• **Quelques avantages du recyclage des déchets ménagers :**

- ✓ La réduction du volume des déchets, et limitation de la pollution dont ils sont responsables.
- ✓ Eviter le gaspillage des ressources naturelles et d'énergie.
- ✓ Réduire les coûts d'extraction des matières premières...

**b) Le compostage : la production des engrais organiques.**

- Le compostage est la décomposition biologique de matière organique fermentescibles par des microorganismes (Les décomposeurs), sous des conditions aérobies, en une matière qu'on appelle compost (engrais organique).
- Le compostage permet la conversion et de valorisation des déchets organiques en un produit stabilisé, hygiénique, riche en composés minérales appelé compost.
- Le compostage comprend trois phases :

- ✓ Une phase mésophile courte où le milieu se réorganise après brassage de constitution et où les microorganismes commencent à le coloniser.
- ✓ Une phase thermophile où le milieu est envahi de microorganismes qui se nourrissent du carbone le plus biodégradable. Cette phase se caractérise par des élévations de température.
- ✓ Une phase de mûrissement, où la température a tendance à être plus faible que durant la deuxième phase. Durant cette troisième phase, le milieu est colonisé par des champignons qui vont s'attaquer aux formes de carbone les plus résistantes comme la lignine.

• **Quelques avantages du compostage :**

- ✓ Le compostage permet la réduction du volume des déchets ménagers.
- ✓ Le compost remplace les engrais chimiques qui sont nuisibles et peuvent polluer les sols et les eaux.
- ✓ Le compost peut améliorer le rendement agricole avec un coût faible.

**c) La méthanisation : production du méthane.**

La méthanisation est le processus de production d'un biogaz par décomposition des matières organiques, dans des « digesteurs » (Figure ci-contre), sous l'action de bactéries productrice de méthane : (les methanobactérium).

Le tableau ci-dessous présente la composition du biogaz :

La composition du biogaz	
Nature du gaz	%
Méthane CH <sub>4</sub>	50 à 80
CO <sub>2</sub>	20 à 50
Hydroxyde du soufre H <sub>2</sub> S	0 à 0.5

La méthanisation aboutit à la production d'un biogaz et d'un produit riche en matière organique appelé digestat, utilisé comme engrais organique (compost).

La méthanisation, est l'une des principales techniques pour valoriser une part importante des déchets fermentescibles.

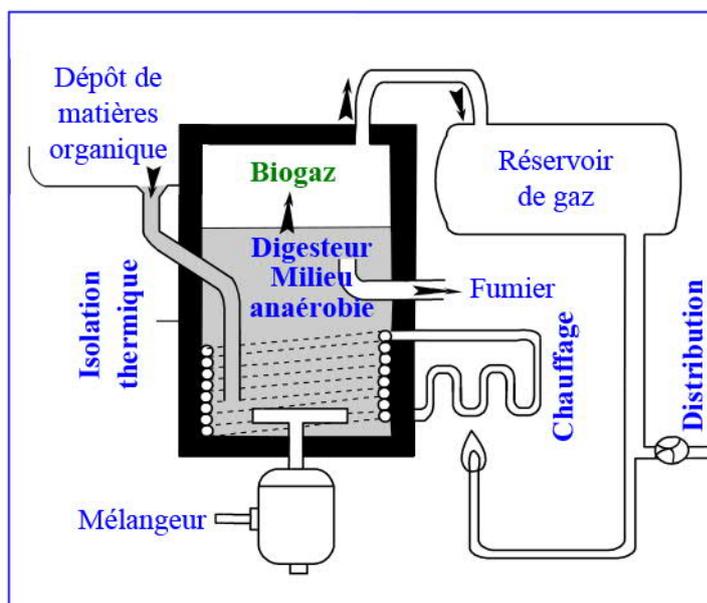
• **Les avantages de cette technique de méthanisation sont :**

- ✓ Réduction du volume des déchets
- ✓ Le biogaz est utilisé comme source d'énergie (production d'électricité, chauffage, biocarburant...) ce qui permet de diminuer l'utilisation de combustibles fossiles (pétrole, charbon).
- ✓ En brûlant le biogaz (CH<sub>4</sub>), on limite son action sur l'effet de serre.
- ✓ Utilisation des résidus comme engrais organique.

**d) L'incinération des ordures ménagères :**

L'incinération est une technologie qui implique la combustion aérobie des ordures ménagères dans un four, sous une haute température (800°C à 1000°C).

La chaleur issue de la combustion chauffe l'eau qui se transforme en vapeur. La vapeur est utilisée pour le chauffage ou fait actionner des alternateurs qui génèrent de l'électricité.





• **Les avantages de l'incinération :**

- ✓ Elle permet de réduire le volume des déchets d'un pourcentage qui peut atteindre 90 %. Donc réduire l'impact néfaste des déchets pour les sols les mers et cours d'eaux.
- ✓ Elle permet de réduire le taux des maladies dues à la pollution.
- ✓ Elle permet de réduire le réchauffement climatique due aux déchets ménagers.
- ✓ Elle permet de produire de l'électricité ou de la chaleur et du fait, réduire la facture énergétique qui pèse lourd dans la balance commerciale.
- ✓ Les mâchefers ou résidus solides de l'incinération sont réutilisés dans le recyclage du fer et dans les travaux publics surtout la construction de routes.

• **Les inconvénients de l'incinération :**

- ✓ Les fumées rejetées par les usines d'incinération contiennent des métaux lourds, de la dioxine... qui sont une menace pour la santé de l'homme et l'environnement.

**e) L'enfouissement des déchets ménagers :**

L'enfouissement des déchets est une méthode qui consiste à les enterrer dans des fosses spécialement aménagées à cet effet, en tenant compte de la nature des déchets, de leur dangerosité et en veillant à bien isoler le site, pour empêcher la pollution des sols et de la nappe phréatique. L'enfouissement concerne les déchets ultimes, c'est-à-dire impossible à recycler ou valoriser.

## **II. L'impact des ordures ménagères sur l'environnement, la santé et l'économie :**

### **1. Impacts des ordures ménagères sur l'environnement :**

- La fumée dégagée des décharges non contrôlées contient des gaz comme CO, CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>..., dont les principaux impacts sur l'environnement, sont l'effet de serre et la destruction de la couche d'ozone.
- Les lieux de dépôts et de stockages des déchets deviennent des foyers de prolifération de rongeurs et d'insectes nuisibles (Mouches et moustiques), en plus de l'émanation des odeurs nauséabondes (qui provoquent des nausées).
- Les matières organiques et minérales (Cl, Pb, C, F, N, S...) qui s'échappent des décharges d'ordures, réagissent avec le CO<sub>2</sub> et l'eau des pluies pour former des composés toxiques (Dioxine, SO<sub>2</sub>, HCl, L'acide fluorhydrique...), formant un jus, connu sous le nom de lixiviat, chargé en polluants chimique, organique et en germe biologique.
- Le lixiviat présente un grand risque de contamination des sols, des eaux de surface, des nappes phréatiques et des domaines marins. Ainsi que l'intoxication des chaînes alimentaires et par suite, l'extinction de certains êtres vivants dans des milieux naturels.

### **2. Impacts des ordures ménagères sur la santé :**

- Les ordures ménagères représentent une source de divers maladies respiratoires et cutanées ainsi que des cancers.
- La combustion des déchets ménagers par incendie dans les décharges publiques ou par incinération et leur fermentation, provoquent le dégagement de plusieurs gaz toxiques comme l'hydrogène sulfureux, le méthane, le dioxyde de carbone... qui ont des effets néfastes sur la santé de l'homme.
- L'accumulation des ordures ménagères dans une ville, peut être à l'origine de la prolifération des microbes, des parasites et autres vecteurs de maladies : paludisme (la malaria ou fièvre des marais) ; fièvre typhoïde, choléra...
- La prolifération des déchets ménagers s'accompagne de la prolifération de rongeurs, de bactéries toxiques et d'insectes nuisibles, vecteurs de maladies infectieuses et autres épidémies...

### **3. Impacts des ordures ménagères sur l'économie :**

Malgré les valeurs économiques des déchets ménagers comme source de matières première pour plusieurs industries, et comme source de postes de travail, ils ont un effet négatif sur l'économie des pays.

- La gestion des ordures ménagères coûte chère, elle est estimée à 37 milliards de dirhams par an pour le Maroc.
- Les déchets ménagers détériorent les milieux naturels tels que les fleuves, les mers, les sols et les eaux souterraines, limitant ainsi les potentialités de ces milieux comme ressources naturelles exploitables.

Pour atténuer l'incidence des ordures ménagères sur l'économie, il faut développer des techniques de réutilisation des ordures ménagères. Ainsi, on peut limiter leur effet polluant et les exploiter comme ressources économiques.



## Chapitre 2 : Les pollutions issues de la consommation des produits énergétiques, de l'utilisation de la matière organique et inorganique dans les industries chimiques, alimentaires et minérales

**La pollution** : désigne la contamination d'un milieu environnemental par un agent chimique, physique ou biologique, ce qui modifie les caractéristiques naturelles de ce milieu, altérant de manière plus ou moins importante le fonctionnement de son écosystème.

### I. Les polluants et les milieux pollués

#### 1. La pollution de l'air :

##### a) L'effet de serre :

##### • Mécanisme de l'effet de serre :

Lorsque le rayonnement solaire atteint l'atmosphère terrestre, une partie (environ 30 %) est directement réfléchi (renvoyé vers l'espace). Les rayons incidents qui n'ont pas été réfléchis vers l'espace sont absorbés par l'atmosphère (20 %) et par la surface terrestre (50 %).

La partie du rayonnement absorbée par la Terre lui apporte de la chaleur (énergie), qu'elle restitue à son tour en direction de l'atmosphère sous forme de rayons infrarouges. Ce rayonnement est alors absorbé en partie par les gaz à effet de serre, puis réémis dans toutes les directions, notamment vers la Terre. C'est ce rayonnement qui retourne vers la Terre qui crée l'effet de serre, il est à l'origine d'un apport supplémentaire de chaleur à la surface terrestre.

L'effet de serre est donc un phénomène naturel qui permet à la Terre de maintenir une température acceptable pour entretenir la vie. Sans ce phénomène naturel, la température moyenne sur Terre chuterait à (-18°C).

##### • L'impact des activités humaines sur l'effet de serre :

Le phénomène de l'effet de serre n'est devenu négatif que lorsque son intensité a dépassé certaines limites, notamment suite à la révolution industrielle responsable de l'émission de gaz de nature différentes dans l'atmosphère ((Vapeur d'eau H<sub>2</sub>O) ; (NO<sub>2</sub>) ; (O<sub>3</sub>) ; (CO<sub>2</sub>) ; (CH<sub>4</sub>) ...).

##### ✓ Les principales sources de gaz à effet de serre :

- ★ Sources naturelles : explosions volcaniques, incendies, êtres vivants (tubes digestifs).
- ★ Activités humaines : activités industrielle (réfrigération, usines, carburants, ...), activités agricoles (élevages des animaux...), déchets ménagers.

##### ✓ Les activités de l'Homme qui ont amplifiées le phénomène de l'effet de serre :

- ★ La combustion des énergies fossiles, surtout des dérivées du pétrole.
- ★ La destruction des forêts qui absorbent une grande partie du CO<sub>2</sub> lors de la photosynthèse.
- ★ Emissions des gaz à effets de serres des usines et des moyens de transports.
- ★ Emissions du méthane des décharges publics et des rizières (où on cultive le riz).
- ★ Emissions des gaz à effets de serres par fermentation des tubes digestifs des animaux.

##### ✓ Les conséquences de l'augmentation de l'effet de serre :

- ★ Changement du climat terrestre.
- ★ Elévation progressive de la température de la planète terre.
- ★ Elévation des niveaux des mers, provoquée par la fonte d'une partie de la glace polaire.
- ★ Submersions des zones terrestres basses (Disparition de plusieurs îles et pays sous l'eau).
- ★ Extinction des êtres vivants qui ne supporteront pas l'élévation de température.
- ★ Risques sanitaires, famine dans certaines régions...

##### b) La destruction de la couche d'ozone :

- La couche d'ozone stratosphérique (20 - 40 Km d'altitude) est formée de molécule d'ozone O<sub>3</sub>. Elle agit comme filtre qui empêche la pénétration d'une grande quantité de rayons ultra-violet (UV) solaires vers la Terre. C'est donc une couche protectrice, car les rayons UV sont dangereux pour les cellules vivantes et ils participent au réchauffement de la Terre.
- Les mesures d'ozone stratosphérique, par satellites, ont permis d'observer un trou dans la couche d'ozone au niveau du pôle Sud (Antarctique), qui se caractérise par une faible concentration du gaz d'ozone (O<sub>3</sub>). Ce trou atteint en 2009 une des plus importantes superficies de son histoire.



- La diminution de la concentration d'ozone est due sa destruction par les composés  $CIO$ , issues des chlorofluorocarbures (CFC). Ces composés inodores, ininflammables, non corrosifs et non toxiques sont largement utilisés dans la réfrigération et la climatisation, dans la fabrication de mousse et de plastique et dans les aérosols.
- L'élément chlore ( $Cl$ ) qui se trouve en abondance dans ces composés, détruit la molécule d'ozone selon la réaction suivante :  $Cl + O_3 \rightarrow CIO + O_2$  et la reconstitution du chlore se fait selon la réaction suivante :  $CIO + O \rightarrow Cl + O_2$ . Ainsi, la couche d'ozone est détruite.
- La dégradation de la couche d'ozone engendre une augmentation des rayons ultraviolets (UV) qui vont atteindre la terre. Ces rayons, invisibles à l'œil nu, sont nocifs pour toute forme de vie, notamment à cause de leur effet mutagène car leur haute teneur énergétique leurs permet de casser la molécule d'ADN des êtres vivants. L'exposition aux UV pour des durées moyennes ou longues à pour effets :
  - ✓ Le vieillissement prématuré de la peau et le déclenchement de plusieurs types de cancer de la peau (mélanomes), surtout pour les peaux Claire.
  - ✓ Inflammation de la cornée (même pour les animaux), l'opacification partielle ou totale du cristallin (La cataracte), la cécité, les cancers oculaires.
  - ✓ Affaiblissement général du système immunitaire.
  - ✓ Réduction de l'intensité de la photosynthèse et donc de la quantité d' $O_2$  produite et de  $CO_2$  absorbé, d'où la diminution du rendement agricole.
  - ✓ Cause la disparition de certains animaux.
  - ✓ Réchauffement climatique par renforcement de l'effet de serre.

### c) Les pluies les acides et leurs impacts sur l'environnement :

L'expression « pluie acide » désigne toute forme de précipitations anormalement acides, dont le pH peut atteindre 4.

- Les pluies acides se forment par interaction entre l'eau atmosphérique, les oxydes de soufre ( $SO_2$ ) et les oxydes d'azote ( $NO_2$ ), pour former respectivement de l'acide sulfurique  $H_2SO_4$  et de l'acide nitrique  $HNO_3$ .  
( $SO_2$ ) et ( $NO_2$ ) sont libérés naturellement par l'activité volcanique et l'activité des bactéries du sol. Mais l'émission de ces gaz est devenue plus importante suite à l'utilisation intense des combustibles fossiles.
- L'acidification des précipitations a des conséquences néfastes sur l'environnement, comme :
  - ✓ La pollution des eaux douces de surface et les eaux marines ;
  - ✓ L'acidification des eaux des lacs, l'acidification des sols, ce qui tue ainsi les êtres vivants qui y résident ;
  - ✓ Perturbation des équilibres écologiques ;
  - ✓ La perturbation et l'arrêt de la croissance des arbres, ce qui détruit la couverture végétale et la destruction de certains forêts ;
  - ✓ L'effet néfaste sur le cheptel (Les animaux d'élevage) et l'agriculture ;
  - ✓ La corrosion de certains édifices et métaux exposés à l'air libre.

## 2. La pollution de l'eau :

- **Définition :** La pollution des eaux est toute variation de leurs caractéristiques physiques, chimiques ou biologiques, suite aux déversements de substances solides, liquides ou gazeuses, susceptibles de nuire à la qualité de l'eau et à la santé.
- **Pollution des eaux douces :** Ces eaux reçoivent plusieurs éléments polluants, produits par les activités humaines domestiques, industrielles et agricoles :
  - ✓ Les pluies acides ;
  - ✓ Les déchets liquides rejetés par les habitations (Les eaux usées) ;
  - ✓ Les eaux du lessivage des sols.
  - ✓ Les engrais chimiques et les pesticides utilisés dans le domaine agricole.
  - ✓ Les déchets de l'industrie, tel que : la dioxine, les métaux lourds, les substances radioactives...

Tout ceci provoque une dégradation de la qualité des eaux de surface et par suite la contamination des eaux souterraines (nappe phréatique), ce qui est susceptibles de porter atteinte à la santé humaine et au milieu aquatique lui-même en tant qu'écosystème.



- **La pollution des mers et des océans :** En plus des décharges déversées par les rivières et les oueds, les mers et les océans reçoivent les déchets des agglomérations citadines et des unités industrielles situés sur le littoral. Ainsi que les hydrocarbures déversés par les navires, notamment les grands pétroliers.
- **Principales manifestations de la pollution des eaux :** la pollution de l'eau se manifeste principalement par :
  - ✓ La présence de produits toxiques provenant de l'industrie chimique, de l'industrie des métaux, de l'activité agricole et des décharges de déchets domestiques ou industriels.
  - ✓ Une modification physique du milieu récepteur : le milieu peut être perturbé par des apports aux effets divers : modification de la salinité, augmentation de la température...
  - ✓ La présence de bactéries ou virus dangereux : les foyers domestiques, les hôpitaux, les élevages et certaines industries agro-alimentaires rejettent des germes susceptibles de présenter un danger pour la santé.
  - ✓ Une prolifération d'algues de manière importante et devenant extrêmement gênantes en démarrant le processus d'eutrophisation.
  - ✓ Le pétrole répandu dans la mer rend difficile l'oxygénation des eaux et empêche la photosynthèse indispensable au développement du phytoplancton.
  - ✓ La diminution de la teneur en oxygène dissous, réduit l'activité biologique normale et favorise la multiplication des micro-organismes pathogènes qui vivent en anaérobiose.

### 3. La pollution du sol :

Le sol occupe une place importante entre l'atmosphère, les eaux de surface et les eaux souterraines. C'est le support des diverses activités humaines, ainsi il subit les effets négatifs dus à certaines activités.

- **La pollution agricole :** L'utilisation excessive d'engrais chimiques et de pesticides devient une source de pollution. À forte dose, les pesticides sont toxiques pour les plantes et les animaux ; il contient des métaux lourds tels que le chrome, le cuivre le plomb et le mercure. En plus de la pollution du sol, ces substances polluent les eaux.
- **La pollution industrielle :** Les gaz rejetés dans l'atmosphère par les activités industrielles provoquent des pluies acides. Le sol reçoit des millions de tonnes d'oxydes de soufre et d'azote issus de ces pluies. Ce qui provoque l'augmentation de l'acidité du sol, la mort de plusieurs microorganismes et la perturbation de l'absorption de l'eau et des sels minéraux par les plantes.
- **La pollution due aux eaux usées :** L'infiltration des eaux de l'assainissement liquide, ainsi que le rejet anarchique des ordures, provoquent une grande pollution au niveau du sol qui devient aussi riche en microorganismes pathogènes. Ces polluants qui s'accumulent dans le sol, vont rejoindre les eaux de surface par ruissellement, ou les eaux souterraines par lessivage.

## II. Impacts des pollutions sur la santé, l'environnement et l'économie :

### 1. Impact de la pollution sur la santé :

- **Impact de la pollution de l'air :**
  - ✓ Le Smog est une brume brunâtre épaisse stagnante au-dessus des concentrations urbaines et industrielles, il résulte de la condensation dans les basses couches de l'atmosphère de l'humidité (brouillard) et de polluants atmosphériques ( $\text{SO}_2$  ;  $\text{CO}$  ;  $\text{CO}_2$  ;  $\text{NO}_2$  ;  $\text{NO}_3$  ;  $\text{O}_3$ ...).  
Le smog peut avoir de nombreux effets défavorables sur la santé surtout chez les enfants, les personnes âgées et les personnes ayant des troubles cardiaques et respiratoires.
  - ✓ L'ozone ( $\text{O}_3$ ) et le dioxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ ) pénètrent jusqu'aux bronches, provoquent de la toux et peuvent aggraver les crises d'asthme. Certains polluants sont toxiques, même à faible dose, comme le plomb, le mercure, le cadmium et le nickel ou sont cancérigènes, comme la dioxine.
  - ✓ Les gens en contact prolongé avec la pollution de l'air sont plus exposés aux maladies infectieuses à cause de la faiblesse de leur système immunitaire.
- **Impact de la pollution de l'eau :** La pollution de l'eau a aussi des conséquences néfastes sur la santé :
  - ✓ L'eau est un vecteur des maladies infectieuses tel que le choléra, la malaria la typhoïde...
  - ✓ L'usage alimentaire des eaux polluées par le Plomb, le cadmium, le Zinc relève le taux de maladies nerveuses et autres les cancers.
  - ✓ L'eau devient un vecteur d'insectes nuisibles et autres virus ou bactéries dangereuses.



## 2. Impact de la pollution sur l'environnement :

La pollution par les substances nutritives (nitrates et phosphates), représente un danger pour les eaux douces dans lesquelles ces effluents sont déversés, ce type de pollution s'appelle l'eutrophisation.

- **Définition :** L'eutrophisation est un phénomène qui résulte de la multiplication des algues à la surface des eaux riches en phosphates et azotes provenant de l'activité agricole ou des certains détergents, ce qui entraîne un appauvrissement de l'eau en oxygène, s'ensuit une diminution de la biodiversité.
- **Les étapes d'eutrophisation :**
  - ✓ **Stade ① :** Le lac exposé à une pollution croissante accumule dans ses eaux de grandes quantités de sels minéraux nutritifs amenés par des effluents d'origines diverses (Les eaux usées, l'irrigation...).
  - ✓ **Stade ② :** L'enrichissement des eaux en éléments nutritifs déclenche la prolifération des algues vertes en surface, ce qui diminue la transparence de l'eau, et la photosynthèse n'est possible que dans les couches superficielles, ce qui provoque la diminution du taux d'oxygène.
  - ✓ **Stade ③ :** Mort de l'énorme quantité d'algues, puis décomposition aérobie de la matière organique, avec consommation rapide de l'oxygène contenu dans les eaux profondes.
  - ✓ **Stade ④ :** Dans les couches profondes, apparition de fermentations anaérobies après disparition de l'oxygène dissous, ce qui provoque le dégagement de sulfure d'hydrogène ( $H_2S$ ) et d'ammoniac ( $NH_3$ ). Cette phase ultime de l'évolution est marquée par la disparition de tous les êtres vivants de ce milieu.
- **Les solutions :** Pour éviter l'eutrophisation :
  - ✓ Eviter l'utilisation des engrais chimiques (ou les utiliser selon des normes bien précis), et utiliser des engrais organiques.
  - ✓ Réduire l'utilisation des pesticides utilisés dans les cultures.
  - ✓ Construction des stations d'épuration pour traiter les eaux usées avant de les rejeter dans les milieux naturels.

## 3. L'impact de la pollution sur l'économie :

La pollution dans tous ses aspects, atmosphérique, hydrique et édaphique, est accompagnée d'impacts négatifs sur l'économie car tous les milieux qui constituent notre environnement et tous les écosystèmes sont des ressources naturelles exploitées par l'Homme.

### III. Alternatives à l'usage des matières énergétiques et des matières organiques et inorganiques dans les industries :

#### 1. Des alternatives d'origine physique :

- L'énergie solaire :** Energie récupérée à partir de la lumière du soleil, par des panneaux solaires, qui la transforment en chaleur (photo thermique) ou en énergie électrique (photovoltaïque).
- Les éoliennes :** Energie cinétique véhiculée par les masses d'air, c'est-à-dire par le vent. C'est le fait de convertir l'énergie éolienne en une énergie mécanique qui alimente ensuite un générateur électrique où elle est convertie en électricité.
- L'énergie hydraulique :** Energie fournie par les mouvements de l'eau, sous toutes ses formes : chutes d'eau, cours d'eau, courants marin, marée, vagues... C'est une énergie cinétique liée au déplacement de l'eau. Ce mouvement peut être utilisé directement, par exemple avec un moulin à eau, ou plus couramment être converti, en énergie électrique dans une centrale hydroélectrique.
- L'énergie géothermique :** La géothermie ou "chaleur de la terre" se présente sous forme de réservoirs de vapeur ou d'eaux chaudes ou encore de roches chaudes. Lorsque le réservoir géothermique est à une température modérée, cette ressource est exploitée pour de la production de chaleur distribuée par un réseau de chaleur. Lorsque la température du réservoir géothermique est plus élevée et permet de produire de la vapeur, il est possible de produire de l'électricité.

#### 2. Des alternatives d'origine biologique (Biocarburants) :

Contrairement aux carburants issus des sources fossiles, les biocarburants tel que le bioéthanol, sont extraits à partir de la matière organique végétale fraîche, et sont donc peu polluants en  $CO_2$ .



## Chapitre 3 : Les matières radioactives et l'énergie nucléaire

## I. Les substances radioactives :

## 1. La découverte de la radioactivité :

En 1896, Henri Becquerel avait placé, en obscurité, un objet contenant de l'uranium dans un tiroir où il a déjà rangé une plaque photographique vierge, protégée par du papier épais et sombre. Quelques jours après, il observa que l'objet contenant l'uranium avait laissé une impression sur la plaque photographique.

L'uranium émet donc naturellement un rayonnement qui lui est propre et que l'intensité de ce rayonnement persiste dans le temps et traverse la matière. Henri Becquerel vient donc de découvrir la radioactivité.

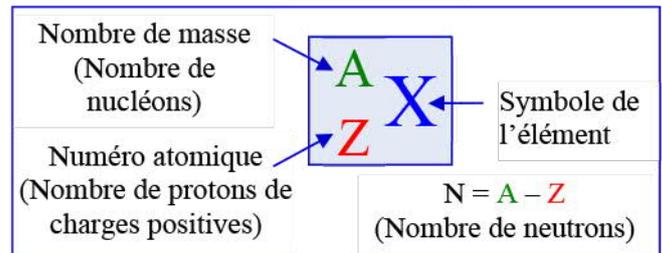
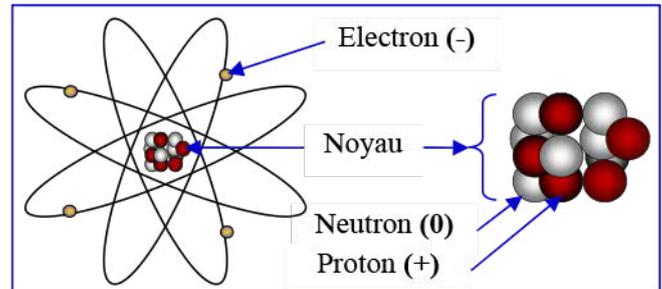
## 2. La structure de l'atome :

Les atomes sont les constituants de base de toute la matière. Ils sont tous bâtis sur le même modèle ci-contre : un noyau, formé de protons, de charges positives, et neutrons, de charges nulles, ces particules s'appellent des nucléons, autour desquels se déplacent les électrons, de charges négatives. Le nombre de protons est égal au nombre d'électrons.

Dans la nature, la plupart des noyaux d'atomes sont stables mais d'autres sont instables car ils possèdent trop de protons ou de neutrons.

L'organisation du noyau atomique, de la matière dépend des forces de cohésion entre ses éléments et c'est l'instabilité de cette cohésion qui rend la matière radioactive.

Un nucléide est un type de noyau atomique, caractérisé par le nombre de protons et de neutrons qu'il contient. Il est défini par le numéro atomique (Z) et par le nombre de masse (A).



## • Exemples :

- ✓ **Le carbone (C)** : ( $^{12}\text{C}$ ) avec  $A=12$  et  $Z=6$ , ( $^{13}\text{C}$ ) avec  $A=13$  et  $Z=6$ , ( $^{14}\text{C}$ ) avec  $A=14$  et  $Z=6$ .
- ✓ **Le magnésium (Mg)** : ( $^{24}\text{Mg}$ ) avec  $A=24$  et  $Z=12$ , ( $^{25}\text{Mg}$ ) avec  $A=25$  et  $Z=12$ , ( $^{26}\text{Mg}$ ) avec  $A=26$  et  $Z=12$ .

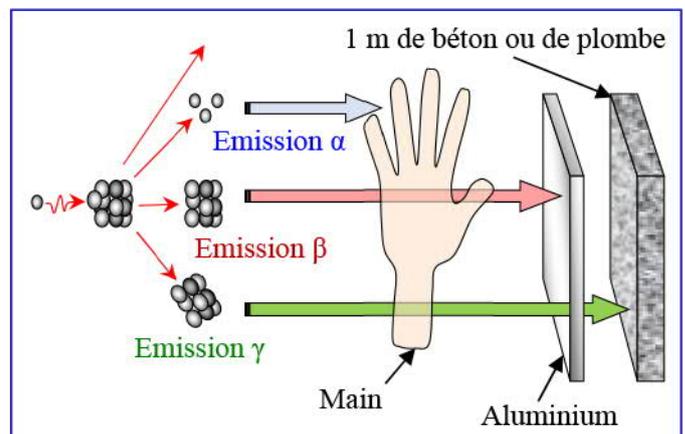
On constate donc que, même s'il s'agit du même élément chimique (le carbone, magnésium...), le nucléide peut changer le nombre de masse A.

Les nucléides qui ont le même numéro atomique (Z), mais des nombres de masse (A) différents, sont appelés isotopes.

## 3. La radioactivité émise lors de la désintégration des éléments radioactifs :

- **La désintégration** : Phénomène physique au cours duquel des noyaux atomiques instables se transforment, spontanément ou de façon provoquée, pour revenir à un état plus stable, et qui libère une partie de son énergie sous forme de rayonnements (alpha, bêta, gamma).
- Les nucléides radioactifs pères se désintègrent pour donner de nouveaux nucléides fils, en libérant des radiations qui sont :

- ✓ **Particules  $\alpha$**  : sont des noyaux d'hélium de faible énergie. Elles parcourent quelques cm dans l'air, et une main ou une feuille de papier ordinaire les arrête.
- ✓ **Particules  $\beta$**  : sont des électrons ( $\beta^-$ ) ou des positrons ( $\beta^+$ ). Elles parcourent quelque cm à quelques mètres dans l'air. Elles ne peuvent être stoppées que par une feuille d'aluminium dont l'épaisseur dépasse 6 mm.
- ✓ **Particules  $\gamma$**  : sont des photons de haut niveau d'énergie. Ils peuvent parcourir des dizaines de mètres dans l'air. Une épaisseur de plomb ou de béton les atténue efficacement.





## 4. Quelques caractéristiques des isotopes radioactifs et la fission nucléaire :

### a) La désintégration radioactive :

Un nucléide père (P) instable (radioactif), se désintègre et génère ainsi un nucléide fils (F) plus stable (figure ci-contre), avec émission d'une ou plusieurs particules. Il s'agit donc d'une réaction nucléaire.

La demi-vie d'un nucléide radioactif est la période T qui correspond à la désintégration de 50 % des nucléides constituant un échantillon donné (Tableau ci-dessous).

Isotope	Demi-vie	Unité temps
<sup>72</sup> Ti	0.2	Seconde
<sup>131</sup> I	8.04	Jour
<sup>14</sup> C	5730	Année
<sup>238</sup> U	4.46.10 <sup>9</sup>	Année

Une famille radioactive est une suite de nucléides descendant d'un même noyau, le noyau père, par une suite de désintégrations successives jusqu'à l'obtention d'un noyau stable.

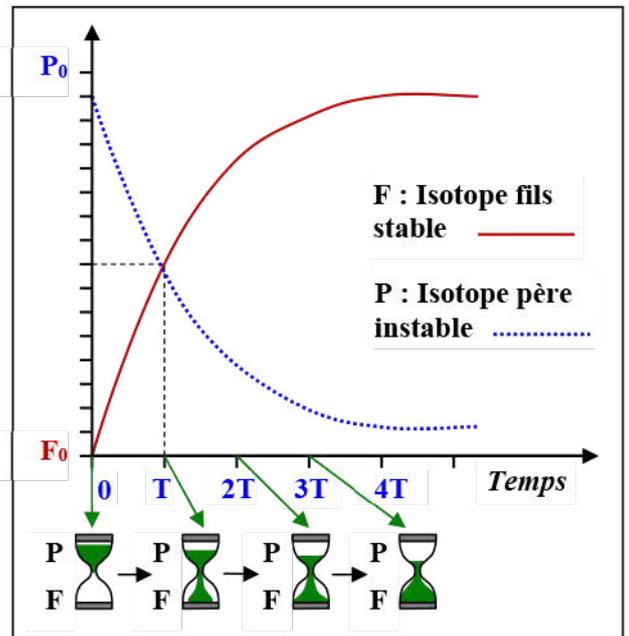
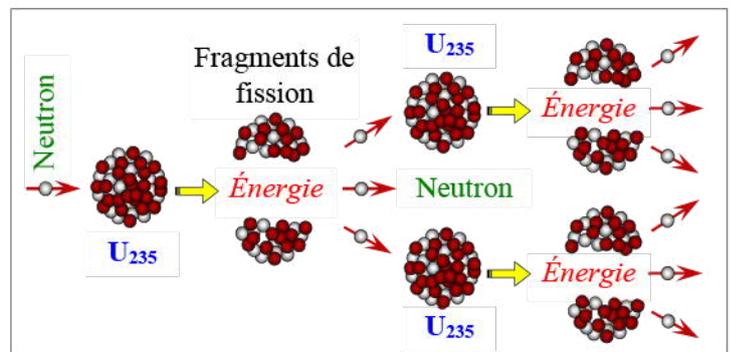
### Exemple : radionucléides de la famille de l'uranium 238 :

Uranium 238 → Thorium 234 → Protactinium 234 → Uranium 234 → Thorium 230 → Radium 226 → Radon 222 → Polonium 218 → Plomb 214 → Bismuth 214 → Polonium 214 → Plomb 210 → Bismuth 210 → Polonium 210 → **Plomb 206**.

### b) La radioactivité artificielle ou induite : La fission nucléaire :

Le bombardement des noyaux d'uranium, au sein des réacteurs nucléaires par des neutrons, provoque un éclatement donnant plusieurs noyaux avec libération d'autres neutrons, qui à leur tour provoquent d'autres éclatements. Il s'agit alors d'une fission en chaîne.

A chaque fission, une très haute énergie est libérée, au sein du réacteur nucléaire, sous forme de chaleur qui est récupérée et exploitée de plusieurs façons, tel que la production de l'énergie électrique.

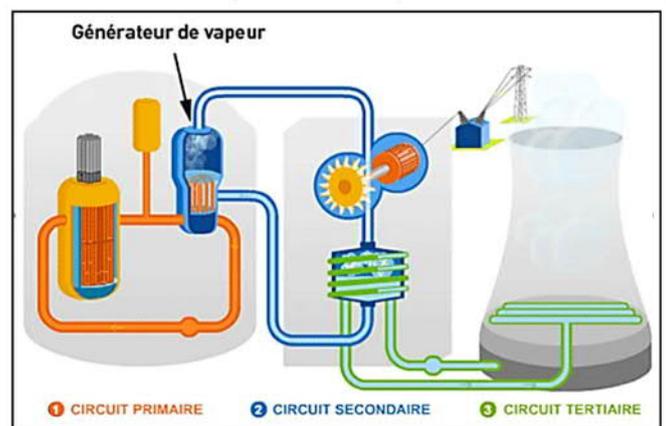


## II. Utilisation des substances radioactive :

### 1. Rôle des éléments radioactifs dans la production d'énergie :

Une centrale nucléaire est un site industriel destiné à la production d'électricité, qui utilise l'énergie thermique qui provient de la fission nucléaire de noyaux d'atomes lourds (combustible nucléaire tel que l'Uranium) :

- Dans le réacteur nucléaire. L'énergie thermique dégagée par la fission sert à chauffer de l'eau dans un circuit primaire. Cette eau chauffe par la suite l'eau contenue dans un circuit secondaire, jusqu'à vaporisation.
- La vapeur d'eau produite, entraîne la rotation d'une turbine à vapeur, qui produit l'énergie mécanique convertie par un alternateur en énergie électrique.
- La centrale nucléaire produit une grande quantité d'énergie électrique, moins chère et sans émission de CO<sub>2</sub>, mais elle utilise la fission nucléaire de noyaux d'atomes lourds, qui produisent des déchets radioactifs très nocifs pour la santé.





## 2. Rôle des éléments radioactifs dans la datation absolue :

- La datation relative permet de classer les événements les uns par rapport aux autres et d'établir un ordre chronologique. Par contre La datation absolue est une datation aboutissant à un résultat chiffré, exprimé en années.
- Tout système (être vivant, fossile, roche...) contient, lors de sa formation, des éléments radioactifs qui se désintègreront au cours du temps. Les méthodes de datation absolue reposent donc sur la décroissance radioactive d'isotopes de ces éléments chimiques. Pour cela on mesure la quantité restante (a) d'un élément radioactif père, dans l'échantillon à dater, et en le comparant à sa quantité initiale (a<sub>0</sub>) dans un échantillon similaire actuel de la même espèce, on peut évaluer le rapport a/a<sub>0</sub>, et en connaissant la demi-vie T de l'élément radioactif, on peut calculer le temps (t) qui correspond à l'âge absolu de l'échantillon.

## 3. Rôle des éléments radioactifs dans le domaine industriel et médical :

### a) Le rôle des éléments radioactifs dans le domaine agroalimentaire :

- L'irradiation des aliments est une méthode qui consiste à exposer les aliments à un niveau contrôlé d'énergie, tel que les rayons gamma ( $\gamma$ ), les rayons X ou un faisceau d'électrons. Cette énergie pénètre dans les aliments pour tuer les microorganismes (bactéries et champignons), sans élever de façon importante la température des aliments. Elle assure aussi une inhibition de la germination des graines et la stérilisation des boîtes de conserves.
- L'irradiation des aliments ne rend pas l'aliment radioactif. Elle ne doit pas être confondue avec la contamination radioactive (incorporation d'éléments ou composés radioactifs polluants).

### b) Le rôle des éléments radioactifs dans le domaine médical :

Les applications de la radioactivité dans le domaine médical ont participé au progrès de la médecine :

- L'imagerie par scintigraphie est utilisée pour détecter les anomalies qui affectent certains organes. Elle consiste à injecter, au patient examiné, une faible quantité d'un élément radioactif, qui se fixe spécifiquement sur l'organe concerné. Le rayonnement émis, par l'élément radioactif, est capté par une caméra spéciale qui donne l'image de l'organe en question.
- Dans les expériences de marquage nucléaire pour mettre en évidence le devenir d'un élément étudié.
- La radiothérapie : le traitement des cancers par irradiation en appliquant des doses radioactives à l'endroit où sont localisées les cellules cancéreuses. Ces dernières sont bombardées et éliminées.

## III. Les dangers de la pollution nucléaire :

### 1. Les dangers de la pollution nucléaire sur la santé :

#### a) Les unités de mesures de la radioactivité :

Trois unités sont fréquemment utilisées dans le domaine du nucléaire :

- Le becquerel (Bq) qui mesure l'activité (nombre de désintégration par seconde) de la matière radioactive.
- Le Gray (Gy) qui mesure la quantité de rayonnements absorbés par un organisme ou un objet exposé aux rayonnements.
- Le sievert (Sv) qui évalue les effets des rayonnements ionisants sur la matière vivante.

#### b) Les sources de la pollution nucléaire :

- Sources naturelles : Rayonnements cosmiques du soleil, de l'écorce terrestre, du radon et du corps humain.
- Sources artificielles : Examens radiologiques, des poussières radioactives de sources diverses, essais nucléaires, accidents dans les centrales nucléaires, la télévision...

#### c) Les dangers de la pollution nucléaire sur la santé :

- L'exposition aux fortes doses des radiations, entraîne des dégâts biologiques, en agissant sur les tissus et molécules organiques, notamment l'ADN, cette dernière peut subir des altérations et des mutations, qui conduisent à des malformations congénitales, à la stérilité et aux cancers (cancer du sang par exemple).



## 2. Les dangers de la pollution nucléaire sur l'environnement :

Si un accident nucléaire, comme la catastrophe nucléaire de Tchernobyl en avril 1986, libère des produits radioactifs dans l'atmosphère, c'est l'ensemble de l'environnement qui risque d'être contaminé.

Un accident nucléaire peut libérer une grande variété d'éléments radioactifs, tel que :

- L'iode-131 : Ce produit de la fission nucléaire dans les réacteurs constitue le principal danger de contamination à court terme en cas de rejets dans l'atmosphère. C'est un élément volatil très mobile qui se propage rapidement dans l'environnement : dispersion dans l'atmosphère, dépôt au sol ou sur les feuilles de végétaux, captation par les racines, ingestion par l'animal et éventuellement consommation par l'homme.
- Le césium-137 : Ce produits de la fission nucléaire, est la principale source de contamination de la chaîne alimentaire due aux essais nucléaires et à l'accident de Tchernobyl. Il est peu mobile et s'enfonce lentement dans le sol, où il est fixé par les minéraux. Il se concentre dans la chaîne alimentaire, par exemple dans les poissons.

Tchernobyl montre que l'énergie nucléaire civile mal contrôlée peut causer des dommages majeurs aux populations exposés et à l'environnement.

### IV. Problématique de la gestion des déchets nucléaires et les alternatives écologiques :

Selon la définition de l'AIEA (Agence internationale de l'énergie atomique), les déchets nucléaires ou déchets radioactifs, est toute matière radioactive, dont aucun usage n'est prévu et dont la dispersion dans l'environnement n'est pas autorisée.

#### 1. Classification des déchets nucléaires :

Les déchets nucléaires sont classés selon de deux critères : leur niveau de radioactivité et leur durée de vie (période radioactive = Demi-vie).

##### a) Classification selon le niveau de radioactivité des déchets :

- **Déchets de très faible activité (TFA)** : Niveau de radioactivité inférieur à 100 Bq par gramme.
- **Déchets de faible activité (FA)** : Niveau de radioactivité entre quelques centaines et un million de Bq/g.
- **Déchets de moyenne activité (MA)** : Niveau de radioactivité de l'ordre d'un million à un milliard de Bq/g.
- **Déchets de haute activité (HA)** : Niveau de radioactivité de l'ordre de plusieurs milliards de Bq/g.

##### b) Classification selon la période radioactive des radionucléides présents dans le déchet :

- **Déchets à très vie courte (VTC)** : contiennent des radionucléides dont la période < 100 jours
- **Déchets à vie courte (VC)** : contiennent des radionucléides dont la période > 100 jours et ≤ à 31 ans ;
- **Déchets à vie longue (VL)** : contiennent des radionucléides dont la période est supérieure à 31 ans.

**Remarque :** les déchets du **type A** = (FMA-VC) ; du **type B** = (FMA-VL) ; du **type C** = (HA-VL)

#### 2. Problématique de stockage des déchets nucléaires :

Le principe de stockage des déchets nucléaires consiste à accompagner le déchet jusqu'à ce que la radioactivité qu'il contient soit comparable à la radioactivité naturelle.

Période Activité	(VTC)	(VC)	(VL)
(TFA)	Gestion par décroissance radioactive	(TFA- VC) et (TFA-VL) : Stockage de surface (Centre industriel de regroupement et de stockage)	(FA-VL) : Stockage à faible profondeur
(FA)		(FA-VC) et (MA - VC) Stockage de surface	
(MA)			(MA-VL) et (HA-VL) :
(HA)		Stockage géologique profond	

Les déchets radioactifs sont confinés dans du verre (vitrifiée) ou du béton, puis placés dans des colis de stockage, et pour éviter tout risque, ces colis sont stockés dans un lieu éloigné des habitations, dans une couche géologique imperméable et stable d'argile ou de granite à une profondeur de plusieurs centaines de mètres.



Chapitre 4 : Contrôle de la qualité et de la salubrité des milieux naturels

I. Des critères pour mesurer la qualité des milieux aquatiques.

1. Critères physicochimiques de la qualité des eaux :

- L'évaluation de la qualité des eaux est basée sur plusieurs normes internationales, notamment la concentration en O<sub>2</sub>, en MES (matières en suspension) et en sels minéraux dissous. Pour qu'une eau soit de très de bonne qualité, il faut que :
  - ✓ Sa température soit inférieure à 20°C (l'élévation de température est un signe d'une pollution thermique).
  - ✓ Sa concentration en dioxygène (O<sub>2</sub>), soit élevée (> 7mg/L)
  - ✓ Sa concentration en sels minéraux ne dépasse pas des normes données : (Ammonium < 25mg/L, les nitrates < 44mg/L, les chlorures < 100mg/L...)
  - ✓ Sa valeur de DBO5 et de DCO, soit basse (DBO5 < 3 mg/L et DCO < 20mg/L), plus la DBO5 et la DCO sont élevées, plus la charge polluante des eaux est grande.
- Le rejet des eaux usées dans les rivières provoque l'accumulation de matières organiques oxydable, ce qui entraîne la multiplication des bactéries qui utilisent O<sub>2</sub> dissous, pour dégrader les matières organiques. Cette activité des bactéries entraîne la diminution d'O<sub>2</sub> dans l'eau. La mesure de la consommation d'O<sub>2</sub> donne une idée sur le degré de pollution. On utilise pour cette raison les indices :
  - ✓ **DBO5** : la demande biologique en O<sub>2</sub> pendant 5 jours : C'est la quantité d'O<sub>2</sub> nécessaire pour oxyder les substances organiques biodégradables, qui se trouvent dans l'eau, par les bactéries aérobies, pendant 5 jours. La DBO5 se mesure en obscurité à 20 °C, elle est exprimée en mg/L. La DBO5 exprime indirectement le taux des substances organiques biodégradables dans l'eau.
  - ✓ **DCO** : La demande chimique en oxygène : C'est la quantité d'oxygène nécessaire à l'oxydation chimique de toutes les substances organiques. Elle est mesurée dans les mêmes conditions de mesure de la DBO5. La DCO traduit indirectement le taux de toutes les substances organiques.

2. Critères biologiques de la qualité des eaux (Indice biotique) :

La détermination de la qualité des eaux courantes, en termes de pollution, peut se faire à l'aide d'indices biotiques, en utilisant des organismes aquatiques invertébrés du macrofaune.

- Les indicateurs d'eau pure** : Des espèces invertébrées très sensibles à la pollution organique et aux bactéries, tel que les larves d'éphéméroptères et plécoptères.
- Les indicateurs d'eaux polluées** : Des espèces invertébrées qui ne se développent que dans une eau riche en matières organiques, tel que les larves chironomes, vers tubifex, de nombreuses bactéries et algues.
- L'indice biotique (IB)** : Indice qui caractérise la qualité des eaux.

- ✦ C'est une valeur allant de 0 à 10, on la détermine à partir de la grille de détermination ci-contre.
- ✦ Sur un échantillon d'eau, on détermine les organismes invertébrés sensibles à la pollution organique, ainsi que le nombre total d'unités systématiques (classification) présentes dans l'échantillon. Le croisement de la ligne du groupe indicateur, avec la colonne du nombre d'unités, indique une valeur de l'indice biotique (IB).
- ✦ Si **IB ≥ 6** ⇒ Eau non polluées ;  
Si **IB < 5** ⇒ Eau polluée.

**Exemple** : L'existence des larves de libellules dans un échantillon comportant 12 unités taxonomiques correspond à l'indice 6 : eau non polluée.

Grille de détermination de l'indice biotique						
	Unités taxonomiques (Groupes faunistiques classés par ordre de sensibilité décroissante à la pollution)	Nombre total des unités taxonomiques dans l'échantillon				
		1	2 à 5	6 à 10	11 à 15	≥ 16
		<b>Indice biotique</b>				
	① Plécoptères ; Ephéméroptères	5	6	7	8	9
	② Trichoptères	5	5	6	7	8
	③ Ephéméroptères ; Bivalve	3	4	5	6	7
	④ Hémiptères ; Libellules ; Crustacés ; Snails d'eau	3	4	5	6	7
	⑤ Sangsue ; Hémiptères	2	3	4	5	-
	⑥ Vers ; Larves ; chironomes.	1	2	3	-	-
	⑦ Larves des mouches des fleurs	0	1	1	-	-

Sensibilité décroissante à la pollution organique

..... Limite de pollution ; □ Eaux non polluées ; ■ Eaux polluées



## II. Les paramètres de contrôle de la qualité de l'air et du sol.

### 1. Paramètres de contrôle de la qualité de l'air :

L'évaluation de la qualité et de la pureté de l'air repose sur la surveillance de la concentration de certains polluants, tel que :  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $NH_4$ ,  $NO_x$ ,  $SO_2$ , particules en suspension (PES)...

- Des organismes comme l'OMS, ont établies des normes pour chaque polluant. Si la mesure est en deçà de cette norme le milieu est considéré comme salubre, alors si elle est au-dessus de la norme, le milieu est déclaré pollué.
- Pour respecter les recommandations de l'OMS, chaque pays dispose d'un certain nombre de stations de contrôle de la qualité de l'air répartis sur plusieurs sites.

### 2. Paramètres de contrôle de la qualité du sol :

- La diversité biologique est considérée comme un bon critère d'évaluation de la qualité du sol. Elle peut être mesurée à l'aide de l'Indice Biotique de Qualité des Sols (**IBQS**).
- L'Indice Biologique de Qualité des Sols (**IBQS**) est basé sur l'étude de l'ensemble des peuplements de macro-invertébrés du sol, comme bioindicateurs de son état physique, chimique et écologique.
- L'**IBQS** se calcule en fonction de l'abondance moyenne des groupes faunistiques indicateurs présents dans les échantillons ( $D_i$ ) et en fonction du pouvoir indicateur ( $S_i$ ) des groupes faunistiques indicateurs :

$$IBQS = \sum Ln (D_i + 1) \times S_i$$

- $D_i$  = abondance moyenne des groupes faunistiques indicateurs dans 10 relevés du sol.
- $S_i$  = capacité de distinction de ces groupes. Ln = logarithme népérien.

- Grâce à l'IBQS calculé on attribue aux sols échantillonnés une note sur 20 en utilisant le tableau de calibrage suivant

IBQS	Note attribuée	Type de qualité	Evaluation de qualité
282 - 685	1 - 4	I	Mauvaise
686 - 1089	5 - 8	II	Moyenne
1090 - 1492	9 - 12	III	Bonne
1493 - 1997	13 - 17	IV	Très bonne
1998 - 2300	18 - 20	V	Excellente

- IBQS faible  $\Rightarrow$  le sol est de mauvaise qualité.
- IBQS élevé  $\Rightarrow$  le sol est de bonne qualité.

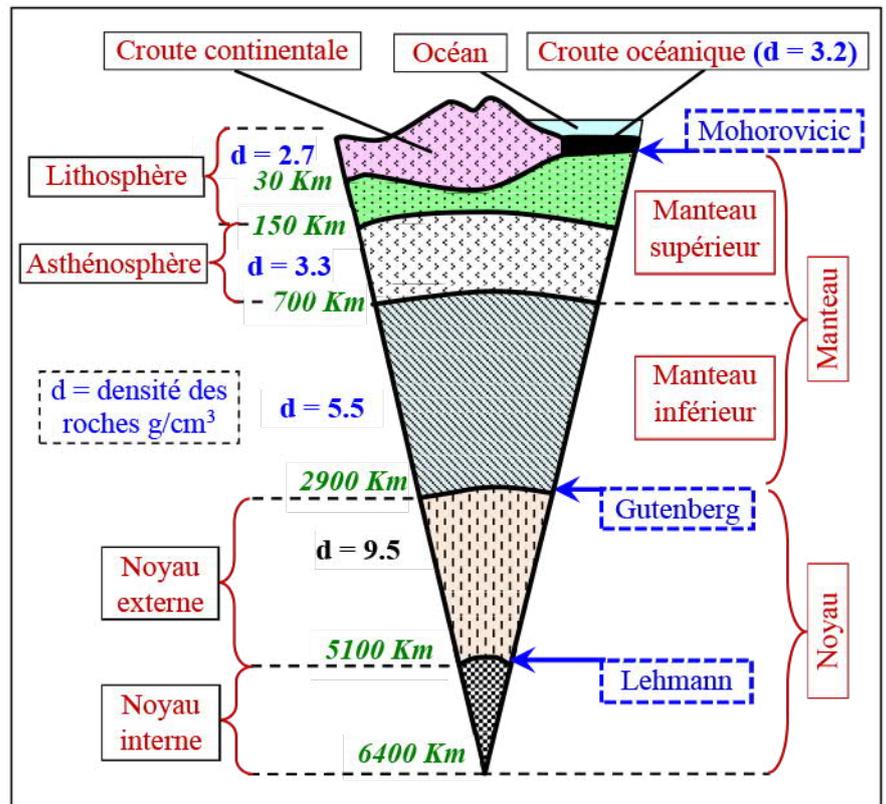


### RESUME.5 – LES PHENOMENES GEOLOGIQUES ACCOMPAGNANT LA FORMATION DES CHAINES DE MONTAGNES ET LEUR RELATION AVEC LA TECTONIQUE DES PLAQUES

Rappel : la structure interne de la terre.

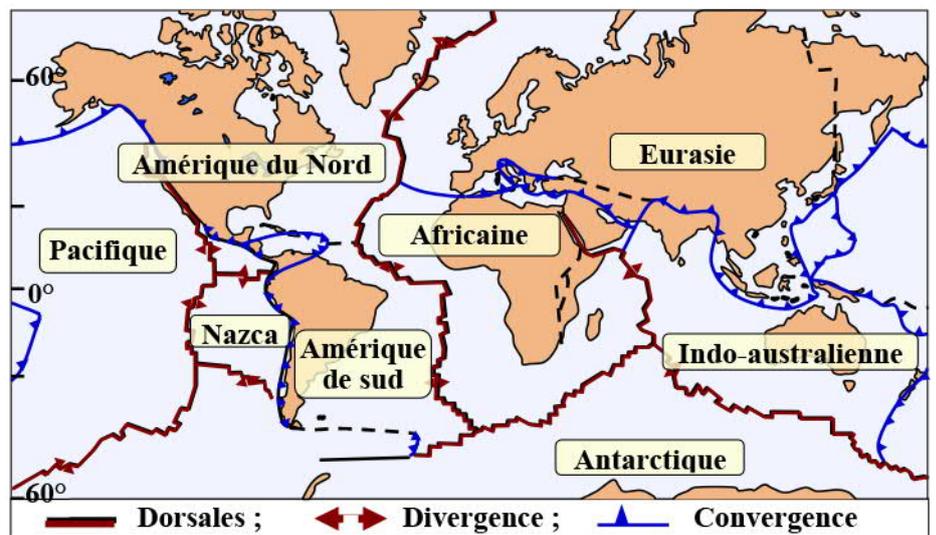
★ L'intérieur de la terre est constitué d'une succession de couches de propriétés physiques différentes. La figure ci-contre est une coupe schématique présentant la structure interne du globe. Il est composé de :

- **Croûte terrestre**, qui présente :
  - ✓ **Une croûte océanique** (7 Km d'épaisseur) de composition proche du "basalte", et de densité élevée (3,2 g/cm<sup>3</sup>) ;
  - ✓ **Une croûte continentale** (30 à 70 Km d'épaisseur) de composition proche de celle du "granite", et de densité faible (2,7 g/cm<sup>3</sup>).
- **Manteau** : composé de péridotites. Et se divise en :
  - ✓ **Manteau supérieur**, subdivisé en **Lithosphère** comprenant la croûte et la partie la plus superficielle du manteau qui se différencie par sa rigidité. Et l'**asthénosphère**, partie sous-jacente du manteau supérieur (jusqu'à une profondeur de 500 à 700 km) qui est relativement plastique.
  - ✓ **Manteau inférieur**, solide.
- **Le noyau** : se divise en noyau interne solide et noyau externe liquide.



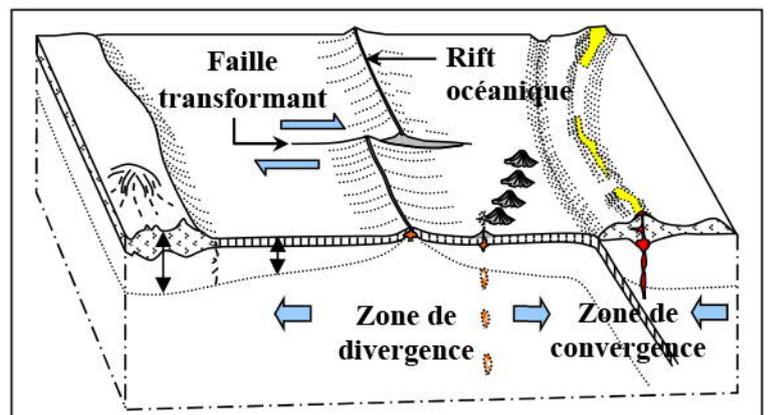
★ Selon la théorie de la tectonique des plaques, l'ensemble de la lithosphère est divisé en une douzaine de grandes plaques qui se déplacent les unes par rapport aux autres.

La figure ci-contre représente une carte de répartition des plaques lithosphériques.



★ Les frontières entre les plaques sont de trois sortes (figure ci-dessous) :

- ✓ **Frontières divergents** : Quand une plaque s'éloigne d'une autre plaque, exemple les dorsales médio-océaniques.
- ✓ **Frontière convergente** : Quand il y a deux plaques qui entre en collision. Exemple les zones de subduction.
- ✓ **Les frontières transformantes** : Quand deux plaques se déplacent horizontalement l'une par rapport à l'autre. Ce sont des zones de frottement.

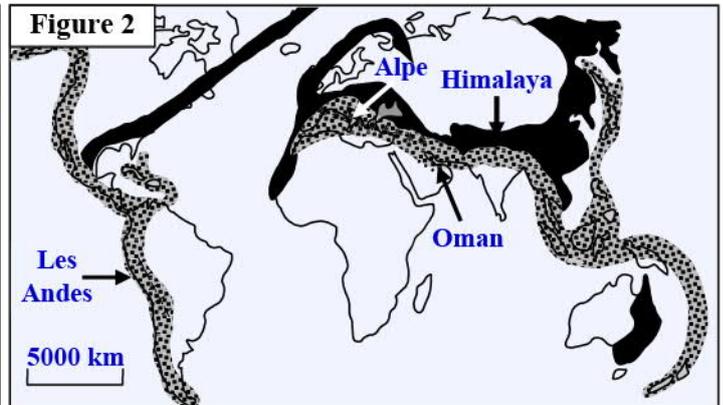
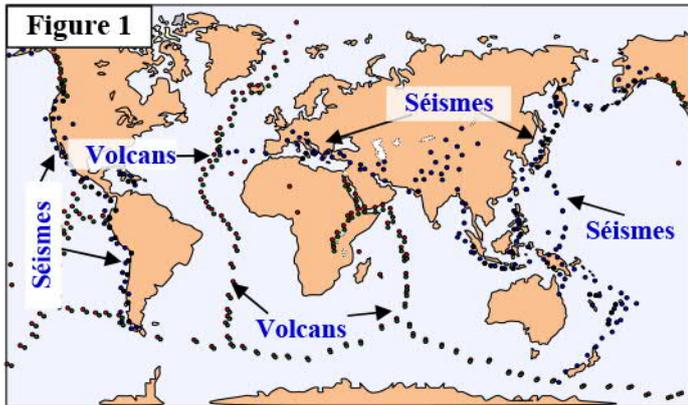




Chapitre 1 : Les chaînes de montagnes récentes et leurs relations avec la tectonique des plaques

I. Les différents types de chaînes de montagnes récentes.

- La figure 2 : Répartition des séismes et volcans à l'échelle mondiale.
- La figure 3 : Répartition des chaînes de montagnes.



- La répartition des chaînes de montagnes récentes, coïncide avec les limites des plaques dans les zones de convergences. Donc les chaînes de montagnes récentes sont le résultat de l'activité des limites convergentes des plaques tectoniques.
- Les chaînes de montagne récentes peuvent être classifiées par la façon de formation en :
  - ✓ **Chaînes de subduction** : Lorsqu'une plaque lithosphérique océanique s'incurve et plonge sous une autre plaque avant de s'enfoncer dans le manteau.
  - ✓ **Chaînes d'obduction** : lorsqu'une croûte océanique chevauche une autre croûte.
  - ✓ **Chaînes de collision** : lorsque deux plaques lithosphériques continentales se rencontrent.

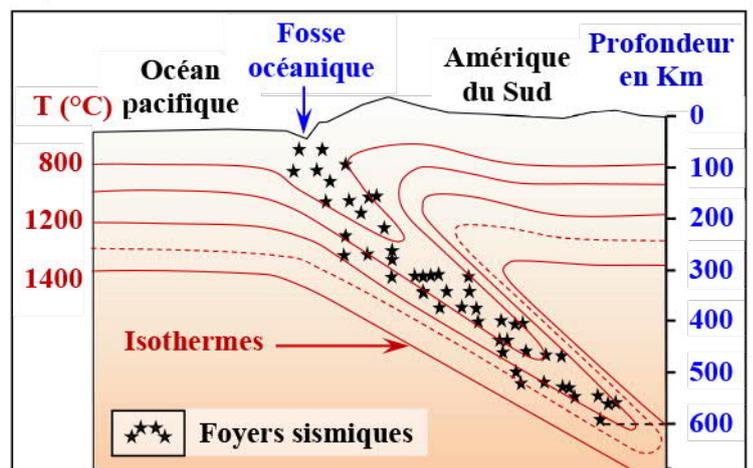
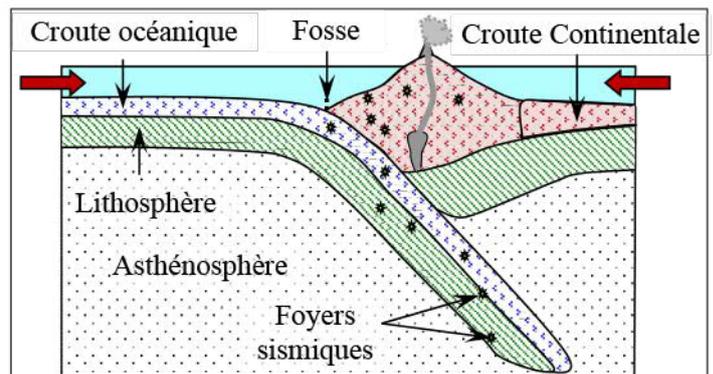
II. Caractéristiques des chaînes de montagnes récentes.

1. Les chaînes de subduction (Exemple les Andes) :

a) Caractéristiques structurales et géophysiques des zones de subduction :

Une chaîne de subduction, tel que La cordillère des Andes, est un type de chaîne de montagne formé sur la bordure d'une plaque continentale à la suite de l'enfoncement d'une plaque tectonique océanique dense sous une plaque continentale de densité plus faible. Cette zone de subduction est caractérisée par la présence de :

- **La fosse océanique** : dépression sous-marine profonde, créée par la plongée d'une plaque sous une autre.
- **Prisme d'accrétion** : structure géologique en forme triangulaire correspondante à l'accumulation de sédiments rabotés et raclés par la plaque chevauchante.
- **Importante activité sismique** : Une sismicité importante dont les foyers se répartissent en profondeur selon un plan oblique appelé plan de Bénihoff.
- **Importante activité magmatique** : La fusion partielle de la péridotite du manteau supérieur conduit à la formation d'un magma qui migre vers la surface. Une partie du magma cristallise en profondeur donnant naissance à des plutons alors que l'autre partie atteint la surface donnant naissance à un volcanisme andésitique.





- **Anomalie thermique** : Les isothermes, au lieu d'être horizontaux et parallèles à la surface terrestre, ils plongent en profondeur d'une façon inclinée suivant le plan de Wadati-Benioff. Ces anomalies sont de types négatives au-dessus de la fosse océanique et positives au-dessus de l'arc volcanique.

**b) Caractéristiques tectoniques des zones de subduction :**

Des déformations simples, en générale des plis de grand amplitude, associés à des failles inverses.

**c) Caractéristiques pétrographiques des roches magmatiques liées aux zones de subduction :**

Les chaînes de subduction se caractérisent par l'abondance des roches magmatiques :

- **L'andésite** : de type volcanique qui présente des phénocristaux, des microlites et une pâte vitreuse non cristallisée on parle de **structure microlitique**. Cette structure signifie que l'andésite s'est formée en 3 étapes :

- ✓ Les phénocristaux en profondeur dans la chambre magmatique ;
- ✓ Les microlites pendant la remontée de la lave dans la cheminée ;
- ✓ La pâte vitreuse à la surface par refroidissement rapide.



Échantillon de l'andésite



Lame mince d'andésite

- **La granodiorite** : de type plutonique, formée de gros cristaux soudés, sans vitre donc entièrement cristallisée on parle de **structure grenue**. Cette structure signifie que cette roche s'est formée en profondeur suite à un refroidissement lent.



Échantillon de granodiorite



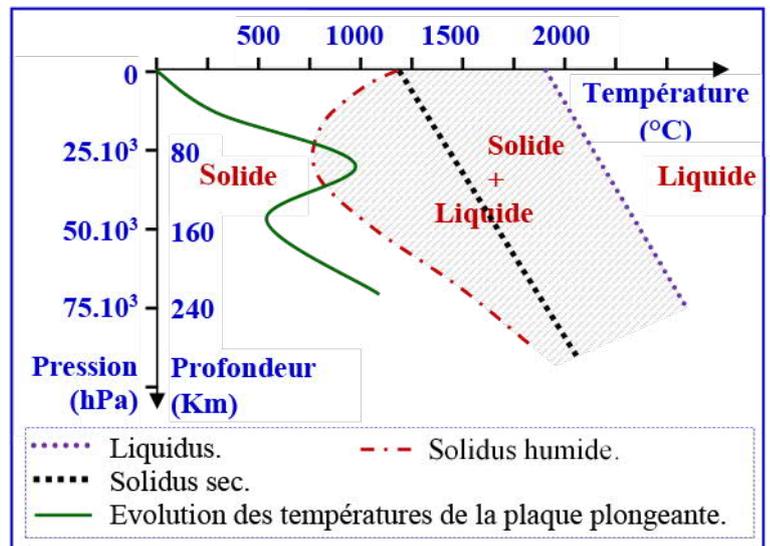
Lame mince de granodiorite

**d) L'origine du magma des zones de subduction :**

- Pour déterminer les conditions de fusion partielle de la péridotite on propose le diagramme ci-contre, représentant des résultats d'étude au laboratoire de la fusion de roches dans différentes conditions de pression et de températures montrant que, dans un contexte de subduction :

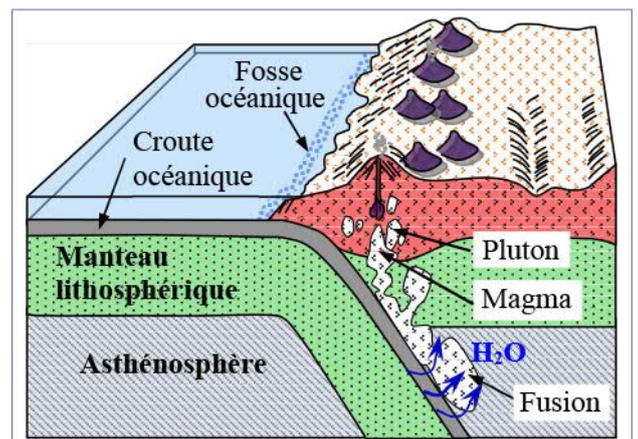
- ✓ Une péridotite anhydre ne peut pas fondre car la géothermie de la zone de subduction n'atteint pas les conditions de pression et de température du solidus nécessaire à une fusion partielle.
- ✓ Une péridotite hydratée peut fondre partiellement car son solidus (température de fusion partielle) a été abaissée par hydratation.

Le magma des zones de subduction provient donc de la fusion partielle de la péridotite hydratée de la plaque chevauchante.



- Schéma ci-contre explique le processus de la fusion partielle de la péridotite au niveau de la zone de subduction.

Au cours de la subduction les roches subduites subissent une augmentation de la pression et de la température, ce qui provoque des réactions minéralogiques accompagnées par la libération d'eau au niveau de la péridotite, ainsi se réalisent les conditions de sa fusion partielle conduisant à la formation d'un magma qui migre vers la surface. Une partie de ce magma cristallise en profondeur et donne naissance à des plutons de granitoïdes, et l'autre partie atteint la surface et se refroidit rapidement pour former l'andésite.

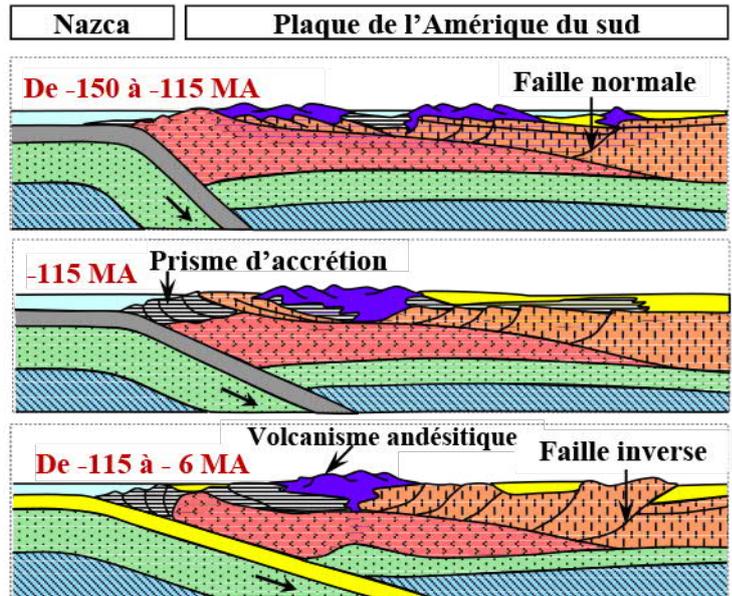




**e) Les étapes de formation des chaînes de subduction :**

La formation de la cordillère des Andes s'est produite selon les étapes suivantes (document ci-contre) :

- Suite aux contraintes tectoniques compressives la plaque océanique Nazca s'enfonce lentement sous la plaque continentale d'Amérique du sud.
- Création d'une fosse et Les sédiments marin recouvrant la plaque plongeante seront raclés par la plaque chevauchante et forment le prisme d'accrétion.
- Les roches de la croute océanique subduites subissent en profondeur des transformations minéralogiques et libèrent l'eau qui crée les conditions de fusion partielle de la péridotite, produisant un magma Andésitique.
- Sous l'effet des contraintes tectoniques compressives, il se produit un raccourcissement et un empilement du matériel, ce qui entraîne un épaissement de la croute continentale et le soulèvement d'un relief.



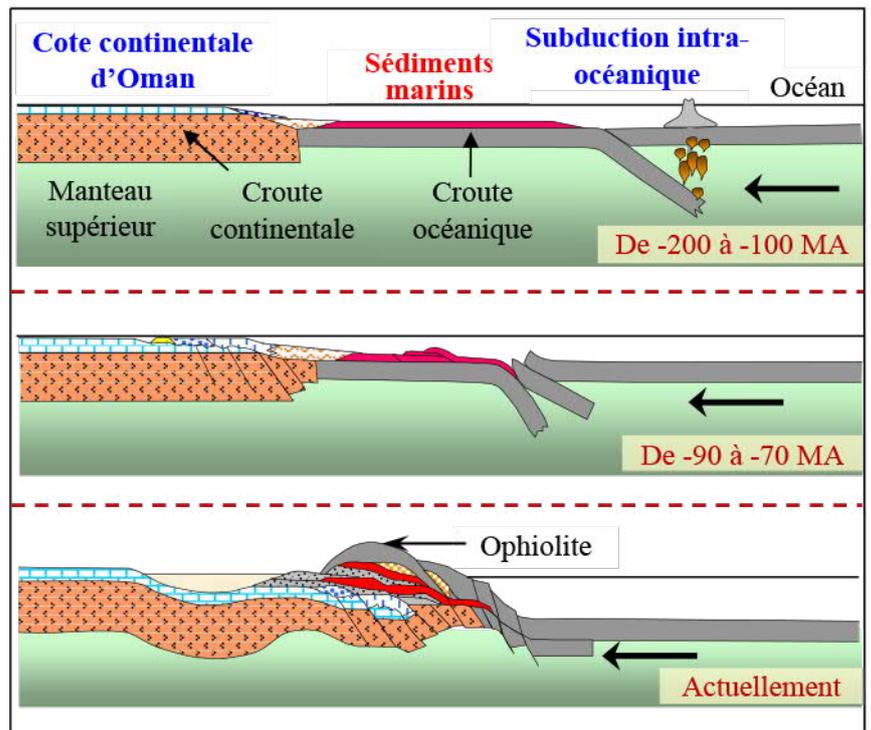
**2. Les chaînes d'obduction (Exemple chaîne d'Oman) :**

**a) Caractéristiques structurales et pétrographiques des chaînes d'obduction :**

- Définition : L'obduction est un phénomène géodynamique au cours duquel des portions de croûte océanique, moins dense (ophiolites), émergent sur la marge continentale (plus dense) sous l'effet de forces de convergence. Ce phénomène entraîne la formation des chaînes d'obduction. Exemple chaîne d'Oman.
- La chaîne d'obduction présente les caractéristiques suivantes :
  - ✓ **Pétrographiques :** Présence d'un complexe ophiolitique (Péridotite, gabbro, basalte en filons, Basalte en coussins et roches sédimentaires océaniques) avec la présence de sédiments des fonds océaniques (radiolarites...) au-dessus d'un socle continental.
  - ✓ **Structurales et tectoniques :** présence de plis, de failles inverses et des nappes de charriages.

**b) Les étapes de la formation des chaînes d'obduction**

- **-100 MA :** Action des forces compressives entraîne le rapprochement entre deux plaques. La plaque océanique subit une grande cassure (faille) suivi d'une subduction intra-océanique (Entre deux croutes océaniques).
- **-90 MA :** Poursuite progressive de la subduction, la croute continentale se rapproche de la zone de subduction et le domaine marin disparaît.
- **Blocage de la subduction :** Arrivant à la zone de subduction, la lithosphère continentale moins dense, ne s'enfonce pas sous la lithosphère océanique.
- **-70MA à l'actuel :** La poursuite des forces compressives pousse la lithosphère océanique (Allochtones) à glisser sur la lithosphère continentale (Autochtone), provoquant la déformation des couches et le soulèvement de reliefs représentant les chaînes d'obduction.





### 3. Les chaînes de collision (Exemple l'Himalaya) :

#### a) Caractéristiques structurales et pétrographiques des chaînes de collision :

• Définition : La collision est un phénomène géodynamique se produisant à la limite convergente de deux lithosphères continentales qui se rencontrent après la fermeture totale de l'ancien océan. Ce phénomène entraîne la formation de chaînes de collision, tel que la chaîne de l'Himalaya.

• La chaîne de collision présente les caractéristiques suivantes :

##### ✓ Pétrographiques :

- ⇒ Présence des granitoïdes (pluton granitique) et l'andésite ainsi que le prisme d'accrétion qui témoignent d'une subduction ancienne.
- ⇒ Présence de suture ophiolitique, témoignant d'une obduction anciennes, et des sédiments du fond marin expliqués par la fermeture d'un ancien océan.
- ⇒ Présence de roches métamorphique caractérisant un métamorphisme régional.

✓ **Tectoniques** : Plissements, failles inverses, chevauchements et charriages témoignent d'une forte compression lors de la collision.

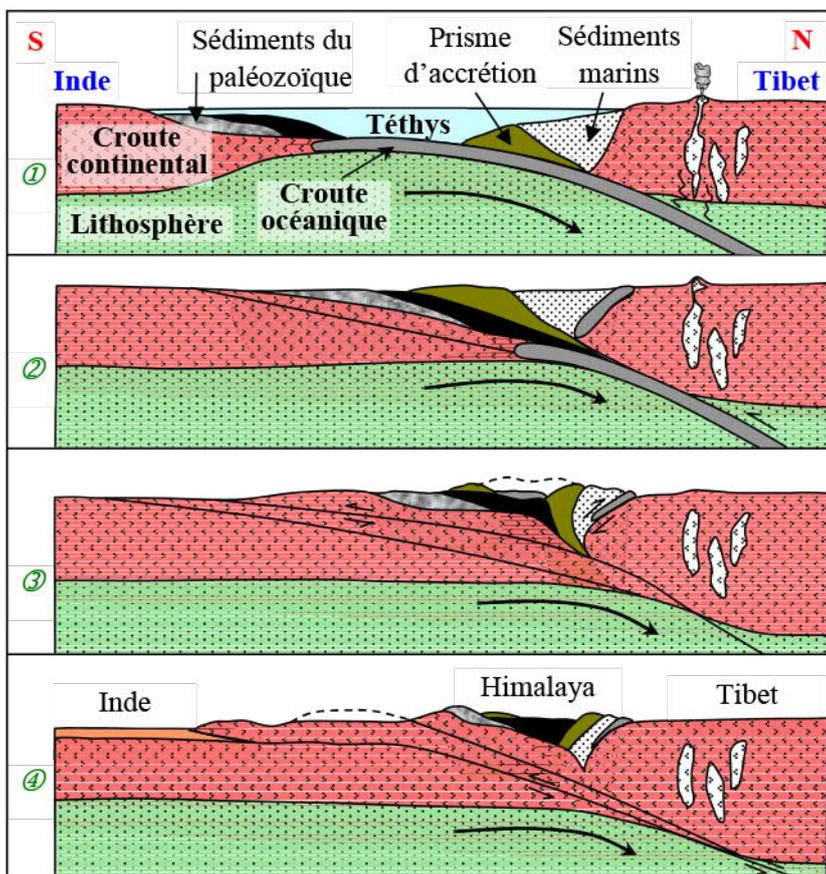
#### b) Les étapes de la formation des chaînes de collision :

• **Etape ①** : Sous l'action des forces compressives, il y'a rapprochement de deux plaques tectoniques, ce qui conduit à une subduction de la lithosphère océanique sous la marge continentale.

• **Etape ②** : Poursuite de la subduction, faisant disparaître petit à petit l'ancien océan, et lorsque la lithosphère continentale arrive au niveau de la subduction, il y a blocage de la subduction, entraînant une obduction d'un morceau de la lithosphère océanique sur la lithosphère continentale (complexe ophiolitique).

• **Etape ③** : Les forces compressives se poursuivent entraînant la collision entre deux marges continentales. Cette collision résulte de l'impossibilité de la lithosphère continentale de faible densité de s'enfoncer profondément dans le manteau plus dense.

• **Etape ④** : Déformation des couches et le soulèvement et épaississement de la croûte pour former une chaîne de collision tel que la chaîne de l'Himalaya.



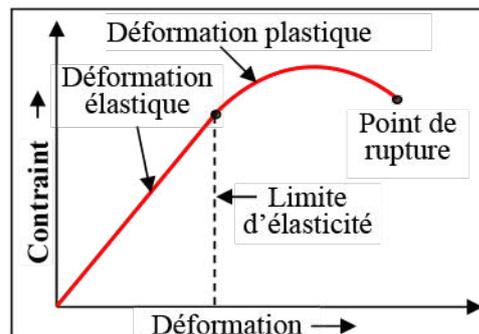
### III. Les déformations tectoniques accompagnant la formation des chaînes de montagnes :

#### 1. Les facteurs influençant la déformation des roches :

Les déformations résultent le plus souvent des mouvements des plaques lithosphériques qui se traduisent par des contraintes qui modifient les roches.

• Les principaux facteurs influençant la déformation des roches :

- ✓ **Des facteurs externes** : La profondeur, pression, la température et l'action des fluides.
- ✓ **Des facteurs internes** : En relation avec la composition de la roche.
- ✓ **Le temps** : Durée de l'application des forces tectoniques (en millions d'années).





- Relations entre les types de déformation, la nature des contraintes tectoniques et les facteurs de déformation :

On reconnaît trois principaux types de déformations :

- ✓ **La déformation élastique** : Si la contrainte est relâchée, le matériau reprend sa forme et son volume initial.
- ✓ **La déformation plastique** : Si la contrainte dépasse la limite de la déformation élastique, le matériau est déformé de façon permanente ; il en résulte une déformation plastique.
- ✓ **La déformation cassante** : Avec une augmentation de la contrainte, le matériau atteint un second seuil, son point de rupture, et il casse ; c'est la déformation cassante.

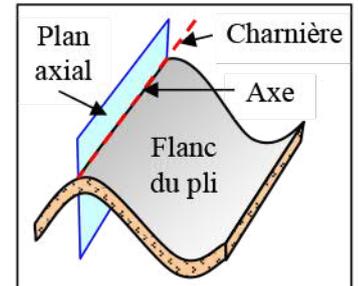
## 2. Les déformations tectoniques :

### a) Les déformations souples continues ou ductiles = les plis :

- Définition : Les plis sont des déformations souples et continues des couches géologiques. Elles se présentent soit en saillie, il s'agit d'un anticlinal ou en creux c'est un synclinal.

- Les éléments d'un pli (Figure ci-contre) :

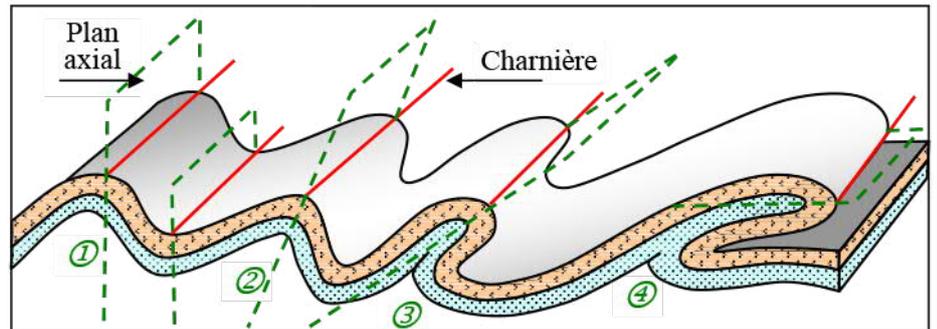
- ✓ **La charnière** : c'est la zone de courbure maximale d'un pli.
- ✓ **Flanc du pli** : c'est la surface qui relie deux charnières successives.
- ✓ **Plan axial** : (ou surface axiale) : surface imaginaire qui relie les charnières des couches du pli.
- ✓ **Axe du pli** : est la ligne décrivant le lieu de courbure maximum de la surface plissée.



- Classification des plis (Figure ci-contre) :

En fonction de l'inclinaison du plan axial, on peut distinguer :

- ✓ **Pli droit ①** : Plan axial vertical ;
- ✓ **Pli déjeté ②** : Plan axial oblique inférieur ou proche de 45° ;
- ✓ **Pli déversé ③** : Plan axial oblique supérieur à 45° ;
- ✓ **Pli couché ④** : Plan axial presque horizontal.



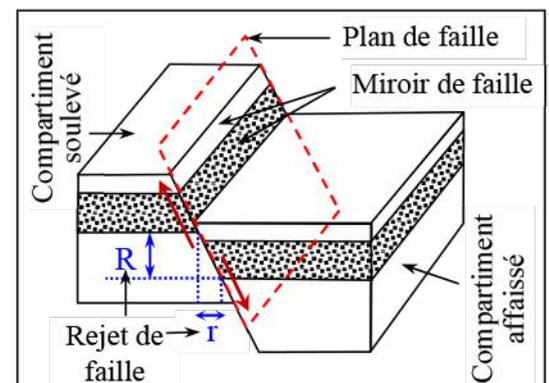
Si les couches gardent une épaisseur constante, le pli est dit isopaque, par contre si les flancs sont étirés ou laminés, le pli est dit anisopaque.

### b) Les déformations cassantes discontinues = les failles :

- Définition : Les failles sont des déformations cassantes discontinues des couches de terrain, qui s'accompagnent d'un déplacement relatif des deux compartiments ainsi créés.

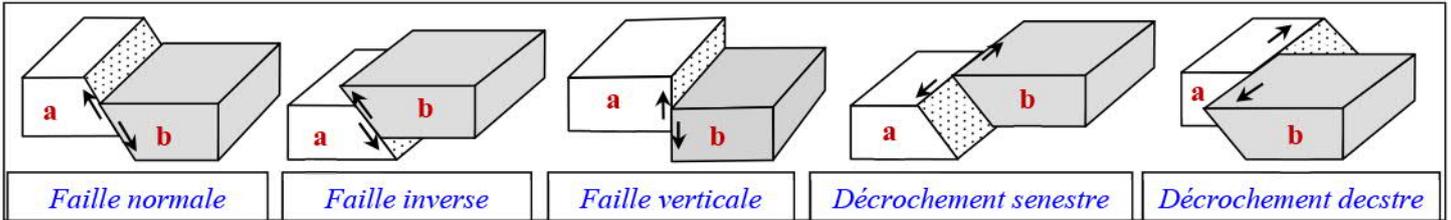
- Les éléments d'une faille (Figure ci-contre) :

- ✓ **Le mur et le toit** : Le toit est le compartiment situé au-dessus du plan de faille (compartiment affaissé). Le mur est le compartiment situé en-dessous du plan de faille (compartiment soulevé).
- ✓ **Le plan de la faille** : C'est la surface le long de laquelle les deux compartiments ont glissé, soit à l'oblique, soit à la verticale. On peut décrire le plan de faille en mesurant son inclinaison ou son angle de pendage ( $\alpha$ ) par rapport à la verticale.
- ✓ **Le miroir de la faille** : C'est la surface polie résultant du glissement des deux compartiments.
- ✓ **Le rejet de la faille** : C'est la valeur du déplacement qui s'est produit entre les deux compartiments séparés. R = rejet vertical : mesure la différence d'altitude entre les deux compartiments. r = rejet horizontal : mesure l'éloignement des compartiments l'un contre l'autre.





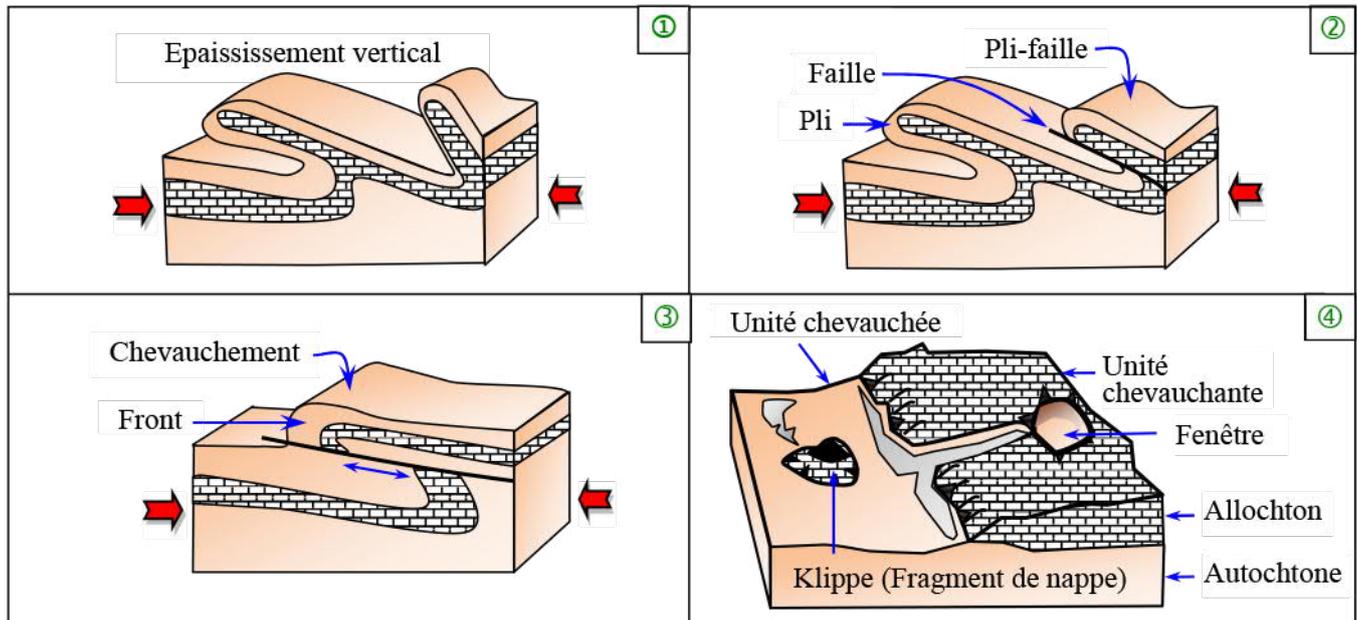
• Classification des failles : En fonction de la nature des forces et du rejet de la faille, on distingue (figure ci-dessous) :



- ✓ **Faille normale** : Le toit de la faille se déplace vers le bas par rapport au mur. Les failles normales se forment lorsque deux blocs de roche s'éloignent l'un de l'autre en raison d'une distension (il y a extension).
- ✓ **Faille inverse** : Le toit de la faille se déplace vers le haut par rapport au mur. Les failles inverses se forment lorsque deux blocs de roche sont poussés l'un vers l'autre en raison d'une compression.
- ✓ **Faille verticale** : faille dont le plan est vertical.
- ✓ **Faille transformante ou de décrochement** : faille le long de laquelle le déplacement relatif des compartiments s'effectue horizontalement le long du plan de faille. Le décrochement dextre (sens des aiguilles d'une montre), et le décrochement senestre (sens contraire des aiguilles d'une montre).
- ✓ **Failles composées** : C'est la combinaison de plusieurs failles. Si ces failles sont inverses, ça entraîne un soulèvement appelé Horst, mais si les failles sont normales, ça entraîne un fossé d'effondrement appelé Graben.

**c) Les déformations intermédiaires :**

Les contraintes compressives auxquelles la croûte terrestre a été exposée dans les zones de subduction et de collision ont compliquées les déformations tectoniques, se transformant en déformations intermédiaires (Figure ci-dessous) :



- ✓ **Pli-faille** : pli déversé ou couché dont le flanc inverse a été laminé par une faille inverse.
- ✓ **Chevauchement** : Mouvement tectonique où une série de terrains en recouvre une autre par le biais d'un contact anormal de type faille inverse, généralement de faible inclinaison et d'une portée limitée (quelque Km).
- ✓ **Nappe de charriage** : c'est un ensemble de couches géologiques de grande dimension, déplacées sur de grandes distances (plusieurs dizaines à plus de la centaine de Km.). Dans ce cas on distingue l'unité chevauchée restée sur place dite autochtone et l'unité charriée est dite allochtone.



## Chapitre 2 : Le métamorphisme et sa relation avec la tectonique des plaques

Les zones de subduction et les zones de collision sont caractérisées par l’affleurement de roches qui ont une structure et une composition minéralogique qui résulte d’une transformation de la roche préexistante à l’état solide sous l’effet de l’augmentation de la température et de la pression. Ces roches sont appelées roches métamorphiques.

### I. Les caractéristiques structurales et minéralogiques des roches métamorphiques des zones de collision.

#### 1. Définition du métamorphisme :

Le métamorphisme est l'ensemble des transformations structurales et minéralogiques à l'état solide d'une roche préexistante (sédimentaire ou magmatique ou métamorphique), sous l'effet de la variation des facteurs physiques (pression et température).

#### 2. Caractéristiques structurales des roches métamorphiques :

Observation à l’œil nu de trois roches métamorphiques (R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> et R<sub>3</sub>) rencontrées dans la zone de collision :

La roche	R <sub>1</sub> (Schiste vert)	R <sub>2</sub> (Micaschiste)	R <sub>3</sub> (Gneiss)
Observation à l’œil nu			

L’observation à l’œil nu montre que ces roches présentent des structures différentes :

- ✓ **Le schiste vert** : Roche à structure schisteuse (minéraux alignés) caractérisée par le chlorite (minéral vert).
- ✓ **Le micaschiste** : Roche qui brille dont les minéraux forment des lits fins ce qui donne à la roche un aspect folié (Foliation) simple à cliver.
- ✓ **Le gneiss** : Roche qui se caractérise par une structure en foliation, non clivable, avec une alternance de lits clairs et de lits sombres (recristallisation et réorganisation des minéraux en bondes clairs et bondes sombres).

#### 3. Structure microscopique et composition minéralogiques des roches métamorphiques :

La roche	R <sub>1</sub> (Schiste vert)	R <sub>2</sub> (Micaschiste)	R <sub>3</sub> (Gneiss)
Observation d’une lame mince			
Schéma d’interprétation de la lame mince			

- ✓ **Le schiste vert** : c’est une roche qui a gardé le litage sédimentaire, elle présente des minéraux de séricite et de chlorite de petite taille, orientés selon la surface de stratification.
- ✓ **Le micaschiste** : c’est une roche dont les minéraux (biotite muscovite et quartz) de taille moyenne, sont orientés selon un plan différent de celui de la stratification et forment des lits fins, ce qui donne à la roche un aspect folié simple à cliver.
- ✓ **Le gneiss** : c’est une roche fortement métamorphisée, dure, non clivable, formée d’une alternance de lits sombres (mica) et de lits clairs (feldspath et quartz).

Les trois roches métamorphiques étudiées, ont la même composition chimique générale. Ce sont des silicates d’alumine, elles ont donc la même origine (roche mère) et elles ont subi des conditions différentes de pression et températures.



## II. Les caractéristiques structurales et minéralogiques des roches métamorphiques des zones de subduction.

### 1. Caractéristiques structurales et minéralogiques des roches métamorphiques des zones de subduction :

La roche	Gabbro Ophiolitique	Schiste bleu	Eclogite						
Observation d'échantillons de roches à l'œil nu									
	Roche dont la couleur principale est le vert foncé. Comprendent plus de 50% de plagioclase en plus du pyroxène, biotite...	Roche métamorphique caractérisée par la présence de glaucophane (minéral bleu) (= schiste bleu) et de mica blanc.	Roche métamorphique caractérisée par la présence du grenat et la jadéite qui indiquent des conditions extrêmes.						
Observation d'une lame mince au microscope polarisant									
Composition minéralogique	Cpx : Pyroxène PL : Plagioclase	Cpx : Pyroxène Glc : Glaucophane	Cpx : Pyroxène ; Ep : Epidote Glc : Glaucophane ; Gt : Grenat						
Même composition chimique générale	Éléments	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CaO	MgO	FeO	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
	%	0.4	2.2	9.9	12.7	11	2.3	14.2	47.1

Les roches métamorphiques des anciennes zones de subduction ont des structures et compositions minéralogiques différentes, ce qui indique que ces roches ont subi des degrés différents de pression et de températures :

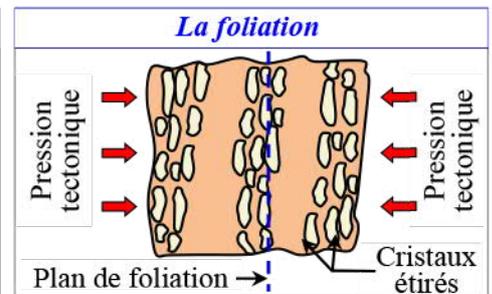
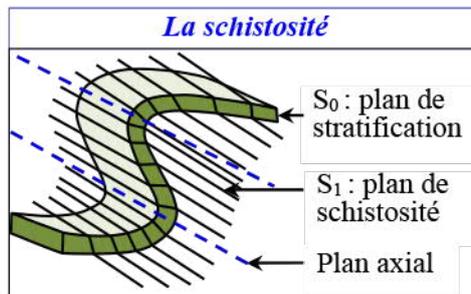
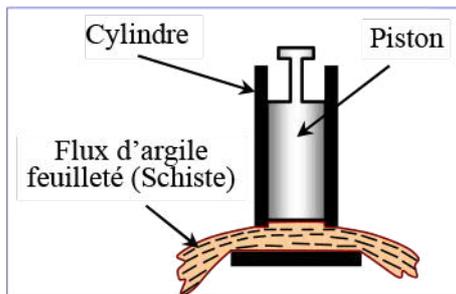
- ✓ **Les gabbros** : Sont des roches plutoniques magmatiques dont la couleur principale est le vert foncé. Du point de vue minéralogique, ces roches comprennent plus de 50% de plagioclases.
- ✓ **Le schiste bleu ou schiste à glaucophane** : C'est une roche métamorphique caractérisée par la présence de glaucophane (couleur bleue) et de mica blanc.
- ✓ **Eclogite** : C'est une roche métamorphosée dans les conditions extrêmes. Elle contient du grenat et la jadéite.

Les roches métamorphiques (Schiste bleu et éclogite) ont une composition chimique identique à celle du Gabbro (roche magmatique du complexe ophiolitique), donc l'origine de ces roches métamorphiques est le gabbro.

## III. Les facteurs du métamorphisme.

### 1. Mise en évidence des conditions du métamorphisme :

#### a) Action de la pression :



- Une contrainte tectonique (Pression) sur une roche, conduit à l'organisation et l'orientation des minéraux perpendiculairement à l'orientation des contraintes. On parle de **schistosité** (Feuilletage distinct de la stratification).
- A un degré élevé de pression, la roche présente une **foliation** (Orientation préférentielle de minéraux).
- La pression produit donc l'organisation et l'orientation des minéraux et l'apparition de la structure schisteuse apparue chez la roche métamorphique.

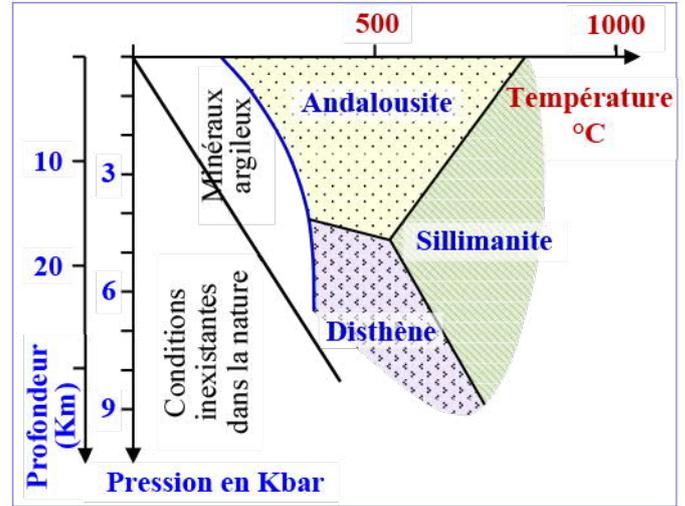


**b) Action de la température :**

- La température, influence le comportement des roches. Elle transforme la composition minéralogique de ces roches à l'état solide. En effet, certains minéraux deviennent instables dans les nouvelles conditions et se transforment en nouveaux minéraux stables dans ces conditions.

**c) Action simultanée de la pression et de la température :**

- La figure ci-contre, représente le diagramme Pression / Température des domaines de stabilité de ces minéraux repères. Les trois droites représentent les limites du domaine de stabilité de chaque minéral.



- Chaque minéral se trouve stable dans certaines valeurs de pression et de température, l'ensemble de ces valeurs constitue le domaine de stabilité du minéral :

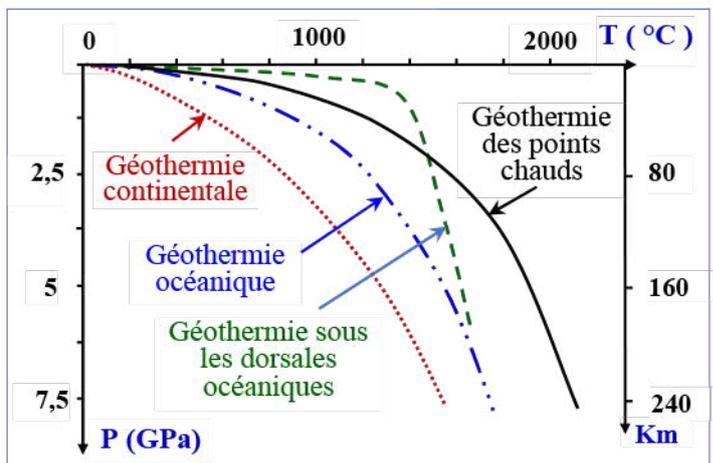
- ✓ **Andalousite** :  $P \leq 5 \text{ Kbar}$  et  $200^\circ\text{C} \leq T \leq 700^\circ\text{C}$  (Température et pression faible).
- ✓ **Disthène** :  $5 \text{ Kbar} \leq P \leq 10 \text{ Kbar}$  et  $200^\circ\text{C} \leq T \leq 600^\circ\text{C}$  (Température faible et pression élevée).
- ✓ **Sillimanite** :  $P \leq 10 \text{ Kbar}$  et  $500^\circ\text{C} \leq T \leq 700^\circ\text{C}$  (Température élevée quel que soit la pression).

- La présence de l'un de ces minéraux (Andalousite, disthène, sillimanite) dans une roche métamorphique permet d'indiquer les conditions de formation de cette roche (P et T), ces minéraux sont nommés indicateurs (ou index).

**Définition du métamorphisme :** Le métamorphisme est l'ensemble des transformations minéralogiques et structurales à l'état solide, que connaissent les roches préexistantes sous l'effet de l'augmentation de la pression, ou de la température ou des deux facteurs.

**2. Variation des conditions du métamorphisme dans la nature :**

- Dans la nature, la température augmente en fonction de la profondeur (gradient géothermique), (Figure ci-contre), la valeur de cette augmentation varie d'une zone à l'autre. Elle est faible dans les zones géologiquement stables et forte, dans les zones géologiquement actives.



- Les roches de la lithosphère sont soumises à une pression qui est la somme de trois types de pression :
  - ✓ Pression des couches sus-jacentes qui varie selon la profondeur et la densité de ces couches.
  - ✓ Pression tectonique qui varie selon la nature des forces tectoniques (compression ou distension).
  - ✓ Pression des fluides interstitiels comme le CO<sub>2</sub> et la vapeur d'eau.

**IV. La séquence, la série et le faciès métamorphiques.**

**1. Notion de séquence métamorphique :**

Le tableau de la figure ci-contre, présente la succession d'apparition de minéraux index selon les conditions de la pression et de la température dans une séquence métamorphique (Intensité croissante du métamorphisme) :

	Argile	Schiste	Micaschiste	Gneiss
Argiles alumineuses		Séricite	Muscovite	Andalousite
Silicates hydratés + Ca <sup>2+</sup>			Grenat	Feldspath Potassique
Argile ferromagnésiennes	Chlorite			Biotite

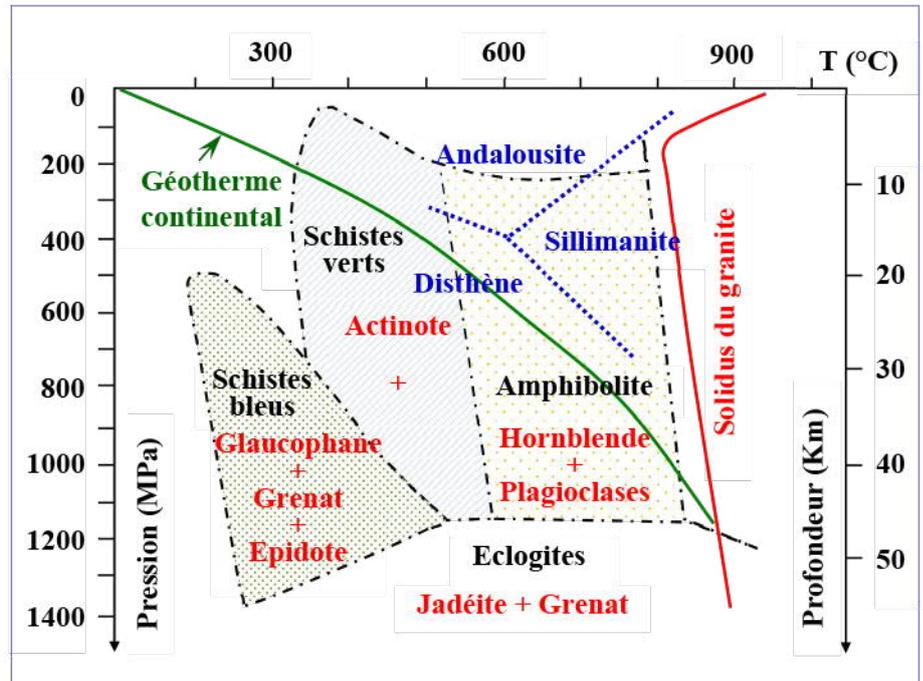
Intensité croissante du métamorphisme →



- Avec l'augmentation de la température et de la pression les roches d'origine se transforment en nouvelles roches, ainsi que la disparition de certains minéraux et l'apparition d'autres.
- **La séquence métamorphique** : Ensemble de roches métamorphiques de différents degrés de métamorphisme, dont les compositions chimiques sont voisines, et étant issues d'une même roche initiale. On distingue par exemple :
  - ✓ **La séquence pélitique** (Argileuse), issue des roches sédimentaires :  
Argile → schiste → micaschiste → gneiss
  - ✓ **La séquence basique** : issue des roches magmatiques basiques :  
Basalte → gabbro ophiolitique → schiste bleu → éclogite

## 2. Notion de faciès et de série métamorphiques :

La figure ci-contre représente le diagramme des champs des différents faciès métamorphiques en fonction des conditions de T et de P.



- Selon les conditions de pression et de température on peut déterminer le domaine de stabilité d'un ensemble de minéraux, ce domaine s'appelle **faciès métamorphique**.
- Si on applique les mêmes conditions sur d'autres roches, on obtient les mêmes minéraux ou des associations proches. Exemple, une argile se métamorphose en :
  - ✓ **Micaschiste à glaucophane** dans le faciès des schistes bleus.
  - ✓ **Micaschiste à disthène** ou à **sillimanite** dans le faciès des amphibolites.

### Définitions :

- ✓ **Faciès métamorphique** : Assemblage de minéraux qui apparaissent dans une roche métamorphique dans un champ précis de température et de pression. La présence de cet assemblage de minéraux dans une roche nous renseigne sur les conditions de formation de cette roche.
- ✓ **Série métamorphique** : Les séries métamorphiques correspondent à la succession de différentes roches métamorphiques le long d'un gradient pression/température.

## V. Les domaines et types de métamorphisme :

### 1. Le métamorphisme dans les zones de subduction :

Dans les zones de subduction, les roches de la lithosphère océanique (basalte et gabbro) subissent une forte augmentation de pression et, relativement, une faible augmentation de température. Dans ces conditions, la roche se déshydrate et se transforme en schistes bleus puis en éclogite caractérisée par le grenat et la jadéite : **Métamorphisme dynamique**.

### 2. Le métamorphisme dans les zones de collision :

Dans les zones de collision les roches lithosphériques continentales subissent une forte augmentation de la pression et de la température, elles se transforment en schiste vert puis en amphibolites caractérisées par le disthène ou la sillimanite qui se forment dans des conditions de pression et de température moyennes à fortes : **Métamorphisme thermodynamique (= général ou régional)**.

### 3. Le métamorphisme thermique :

Au cours de la montée des magmas dans les fissures de la croûte océanique, les roches encaissantes sont soumises à une augmentation brutale de la température à basse pression : **Métamorphisme thermique ou métamorphisme de contact**.



### Chapitre 3 : La granitisation et sa relation avec le métamorphisme

- **La granitisation** est le phénomène géologique résultant de la transformation suivie d'une fusion partielle de roches préexistantes à haute température et sous haute pression pour donner un granite.
- **Le granite** est une roche plutonique issue d'un refroidissement lent d'un magma en profondeur, ce qui lui confère sa texture grenue à grands cristaux. On distingue : Un granite d'anatexie et un granite intrusif.

#### I. Origine du granite d'anatexie :

##### 1. Les caractéristiques du granite d'anatexie :

Le granite d'anatexie est caractérisé par :

- Une étendue géographique importante dépassant les dizaines de kilomètres.
- Des bords diffus et progressif avec les roches métamorphiques gneissiques, dont il est séparé par une zone de transition, constituée de migmatite qui est une roche formée d'un mélange de granite et de gneiss.
- L'existence de roches avoisinantes qui subissent un métamorphisme élevé comme le micaschiste et le Gneiss.



##### 2. Les caractéristiques du granite et des roches avoisinantes :

La roche	Gneiss	Migmatite	Granite
Observation à l'œil nu			
Observation d'une lame mince			
Schéma d'interprétation de la lame mince			
Structure	Foliacé	Foliacé + Grenue	Grenue

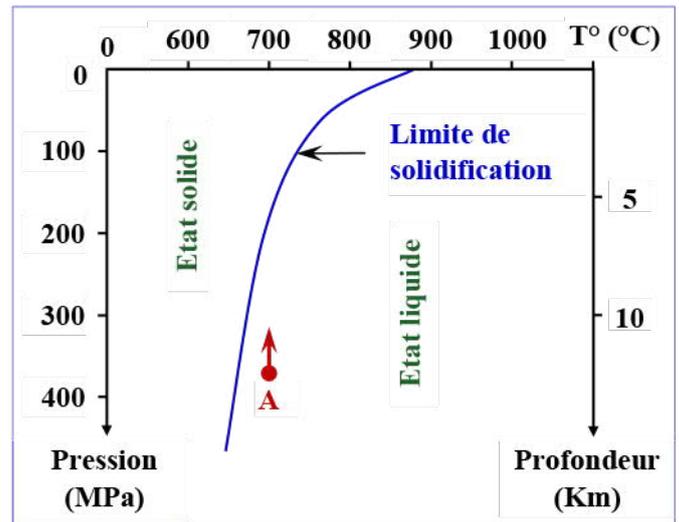
- La migmatite, présente une partie gneissique avec une alternance de lits sombres riches en micas noirs et de lits clairs (foliation) mais aussi des parties claires à texture grenue formées de quartz et de feldspaths similaire à la composition granitique.
- Les minéraux non orientés du granite témoignent du passage par un état liquide en passant du granite au gneiss, c'est à dire que la roche métamorphique (gneiss) subit une fusion partielle, sous des hautes pressions et températures, et donne après refroidissement le granite, on appelle ce type de granite : Granite d'anatexie.
- L'anatexie est le processus de la fusion totale des roches (source du granite d'anatexie) ou partielle (source de la migmatite), suite à l'élévation très importante de la température ou à un enfouissement profond.

#### II. L'anatexie et sa relation avec la formation des montagnes :

##### 1. Les conditions de cristallisation du magma granitique :



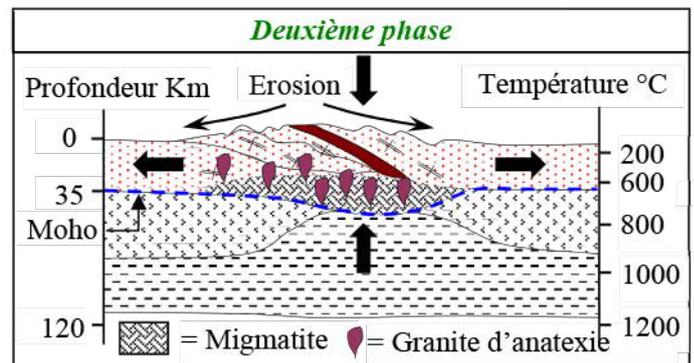
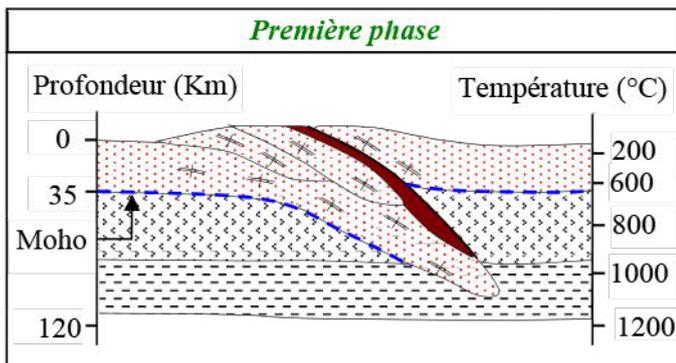
La courbe de la figure ci-contre, représente la limite séparant l'état solide de l'état liquide du magma granitique. Elle correspond à la courbe de cristallisation (solidification) du magma granitique et qu'on appelle solidus.



- Le point A du graphique, représente un magma granitique, les points de contact du magma avec les limites de solidification correspondent à sa cristallisation.
- A des profondeurs de l'ordre de dizaines de kilomètres (50 à 70 Km), les roches subissent des conditions de pression et de température particulières et se transforment en roches métamorphiques comme les gneiss.
- Lorsque la température et la pression atteignent des valeurs très importantes, il y a fusion partielle de ces roches qui vont donner du magma qui a trois devenir :
  - ✓ Rester en profondeur avec refroidissement lent pour donner une roche plutonique comme le granite d'anatexie.
  - ✓ Remonte à une profondeur moyenne puis refroidit lentement pour donner une roche plutonique comme le granite intrusif, les granitoïdes de la zone de subduction (diorite, granodiorite) ...
  - ✓ Remonte à la surface sous forme de laves puis refroidissement rapide pour donner une roche volcanique à structure microlithique ou vitreuse comme l'andésite, la rhyolite ...

## 2. Relation entre granitisation et formation des chaînes de montagnes :

### a) Formation du granite d'anatexie dans les chaînes de collision :



- Première phase :** Collision suivi par l'épaississement crustal et l'enfouissement de la croûte continentale à des profondeurs où elle subit des conditions de pression et de température croissante.

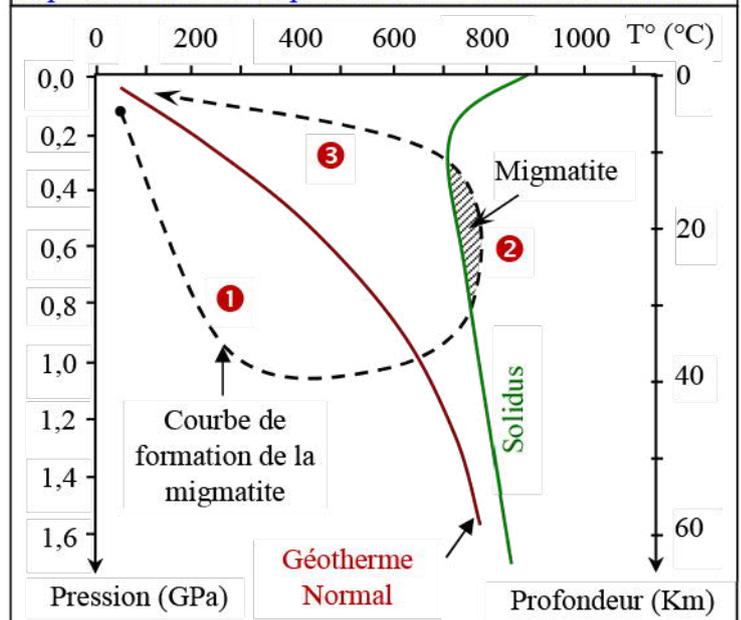
Les roches d'origine subissent le métamorphisme, aboutissant à la formation de gneiss (*partie 1* de la courbe, figure ci-contre).

- Deuxième phase :** La chaîne de montagnes est soumise aux processus d'altération et d'érosion, elle perd de sa masse et de son volume.

Sous l'effet de l'isostasie par poussée de l'asthénosphère, la racine crustale remonte, la pression diminue mais la température reste élevée (*partie 2* de la courbe, figure ci-contre). Ces conditions conduisent à la fusion partielle et à la formation du magma anatectique.

Progressivement le magma refroidit sur place, une partie du magma reste liée au gneiss pour former la roche migmatite, et une autre partie forme du granite (*partie 3* de la courbe, figure ci-contre).

Trajet de la formation de la migmatite selon la variation de la pression et de la température dans les zones de collision.





**b) La formation des granitoïdes de la zone de subduction :**

- **Première phase :** La plaque océanique (constituées de minéraux hydratés) subit en profondeur, pendant la subduction, un métamorphisme dynamique les minéraux hydratés deviennent instables et perdent l'eau. La plaque chevauchante devient hydratée.
- **Deuxième phase :** L'eau libérée abaisse le point de fusion de la péridotite de la plaque chevauchante qui peut alors fondre partiellement et former un magma à faible profondeur, où la température est relativement faible. Le magma formé sera à l'origine de roches magmatiques plutoniques, ou intrusives (les granitoïdes), s'il n'atteint pas la surface et subit un refroidissement lent en profondeur.

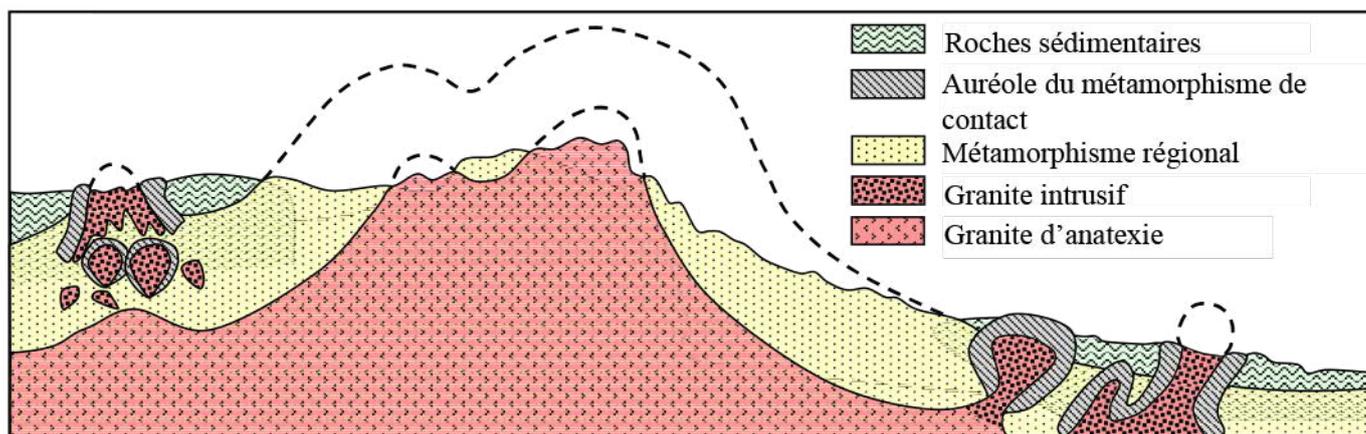
**III. Origine et mise en place du granite intrusif :**

**1. Formation du granite intrusif :**

- Le magma en fusion d'origine mantellique (zone de subduction) ou crustale (zone de collision) peut migrer vers la surface sous formes d'intrusions traversant les couches encaissantes donnant, après refroidissement, le granite intrusif.
- La haute température du granite intrusif, va métamorphiser par contact les roches voisines, formant une auréole métamorphique. Ce métamorphisme est dit thermique ou métamorphisme de contact qui donne des cornéennes.

**2. Comparaison entre le granite d'anatexie et le granite intrusif :**

Le graphique ci-dessous présente une coupe géologique schématique montrant la relation entre le granite d'anatexie et le métamorphisme régional, d'une part, et entre le granite intrusif et le métamorphisme de contact d'autre part.



	Granite d'anatexie	Granite intrusif
Origine du granite	Magma issue de l'anatexie et qui se refroidit sur place.	Magma issue de l'anatexie, qui monte à travers les roches encaissantes.
Surface du granite	Large	Limitée
Relation entre le granite et le métamorphisme	Constitue la phase extrême du métamorphisme régional (Thermodynamique)	Ce granite est responsable du métamorphisme de contact (Thermique)
Caractéristiques de la limite entre le granite et les roches métamorphiques avoisinantes	Passage progressif des roches métamorphiques au granite, (Zone de transition, constituée de migmatite)	Zonation des transformations autour de l'intrusion magmatique. (Auréole de métamorphisme)