

Royaume du Maroc



Ministère de l'éducation nationale du préscolaire et des sports  
Académie régionale de l'éducation nationale de Marrakech  
*Direction provinciale Marrakech*

**Résumé de:**  
**Cours de SVT**  
**2<sup>ème</sup> bac – série science physique**  
**option français**

Proposé par prof : Khadija Zekrite  
2025/2026

## Les réactions responsables de la libération de l'énergie potentielle de la matière organique au niveau cellulaire

★ La cellule convertit l'énergie chimique potentielle emmagasinée dans la matière organique (sucres, lipides, protides) en molécules d'ATP qui est la forme chimique d'énergie utilisable dans les différentes activités de la cellule

**ATP = adénosine triphosphate**

★ Il existe deux voies métaboliques de dégradation du glucose pour la production d'ATP :

- **La respiration cellulaire** : voie métabolique aérobie (nécessite la présence d'O<sub>2</sub>).

- **La fermentation** : voie métabolique anaérobie (se déroule sans O<sub>2</sub>).

★ La fermentation et la respiration cellulaire sont **des séries de réactions chimiques**, elles commencent par une étape commune appelée **la glycolyse**.

★ Toutes les réactions de la fermentation se déroulent dans l'hyaloplasme = le cytosol (cytoplasme sans organites).

★ Les réactions de la respiration se déroulent dans l'hyaloplasme et la mitochondrie.

### I/ La glycolyse :

★ La glycolyse correspond à une série de réactions chimiques anaérobies.

★ La glycolyse se déroule dans l'hyaloplasme.

★ La réaction fondamentale de la glycolyse est une réaction d'oxydoréduction au cours de laquelle :

◆ Le glucose s'oxyde (il perd des électrons et des protons H<sup>+</sup> = déshydrogénation) et se scinde (se casse) en deux molécules d'acide pyruvique (= pyruvate : CH<sub>3</sub>COCOOH).

◆ Cette réaction est couplée à une réduction de deux accepteurs d'électrons : NAD<sup>+</sup> qui se réduisent (ils gagnent des électrons et des protons H<sup>+</sup>) et donnent 2NADH, H<sup>+</sup>, selon la réaction suivante :



**Réaction de réduction et d'hydrogénation**

◆ Ces réactions sont combinées à une phosphorylation de deux molécules d'ADP (adénosine diphosphates) qui se convertissent en deux molécule d'ATP (adénosine triphosphates) selon la réaction suivante :

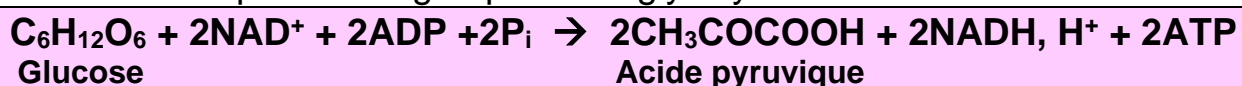


**Réaction de phosphorylation**

**NAD** : Nicotinamide adénine dinucléotide est une coenzyme qui existe dans toutes les cellules vivantes sous deux formes : NAD<sup>+</sup> (forme oxydée) et NADH, H<sup>+</sup> (forme réduite) forment un couple redox (NAD<sup>+</sup>/NADH, H<sup>+</sup>)

**La déshydrogénation** est catalysée par des **déshydrogénases**. Une déshydrogénase est une enzyme qui oxyde une molécule par le transfert d'un ou de plusieurs protons H<sup>+</sup> à un accepteur comme NAD<sup>+</sup> et FAD.

- \* Le bilan chimique et énergétique de la glycolyse est :



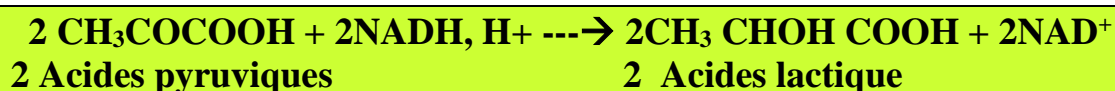
## II/ La fermentation :

- 7\* On peut citer deux types de fermentation chez les cellules : la fermentation lactique et la fermentation alcoolique:

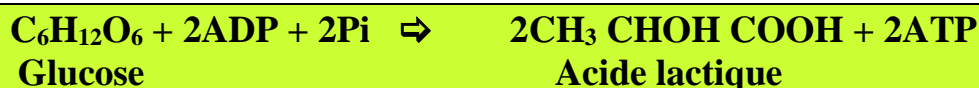
### 1/ La fermentation lactique

- \* Lors de la fermentation lactique, l'acide pyruvique se réduit en acide lactique avec réoxydation du NADH, H<sup>+</sup> en NAD<sup>+</sup>.

La réaction de la fermentation lactique à partir de l'acide pyruvique est :



- \* La réaction globale de la fermentation lactique à partir du glucose est :

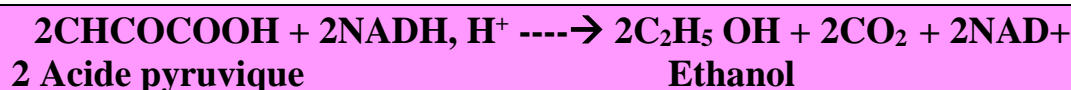


- \* Parmi les cellules qui ont recours à la fermentation lactique : les cellules musculaires et les bactéries du lait de type lactobacillus.

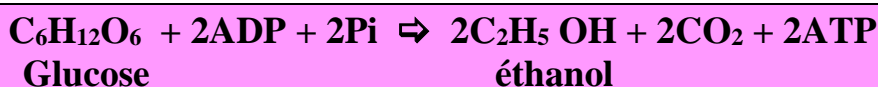
### 2/ La fermentation alcoolique :

- \* Lors de la fermentation alcoolique, l'acide pyruvique se réduit et il subit aussi une décarboxylation (arrachement d'un carbone) et donne l'éthanol (alcool éthylique), avec libération du CO<sub>2</sub>, cette réaction est couplée avec une réoxydation du NADH, H<sup>+</sup> en NAD<sup>+</sup>.

- \* La réaction de la fermentation alcoolique à partir de l'acide pyruvique est :



- \* La réaction globale de la fermentation alcoolique à partir du glucose est :



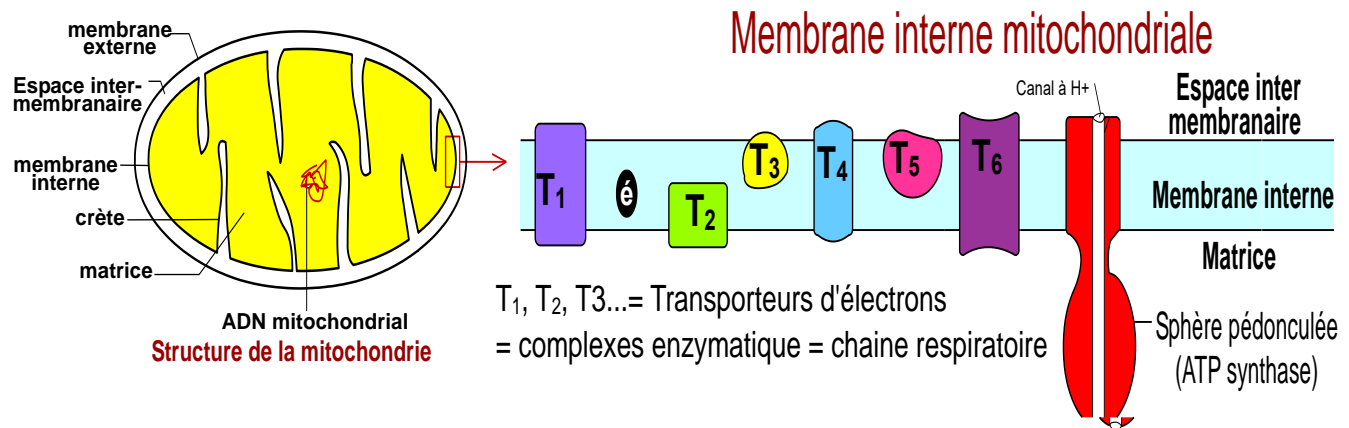
- \* Parmi les cellules qui ont recours à la fermentation alcoolique : les cellules de la levure.

- \* Le bilan énergétique de la fermentation (lactique et alcoolique) est **2 molécules d'ATP** (ceux de la glycolyse), lors de la dernière phase de la fermentation, il n'y a pas de synthèse d'ATP. L'importance de cette phase réside dans la réoxydation du NADH, H<sup>+</sup> pour assurer la présence en permanence de NAD<sup>+</sup> indispensable à la continuation de la glycolyse et la synthèse d'ATP.

### III/ La respiration cellulaire :

✦ Les réactions de la respiration se déroulent dans l'hyaloplasme et dans la mitochondrie.

#### 1/ La structure de la mitochondrie



✦ La mitochondrie est un organe cellulaire clos, délimitée par deux membranes : la membrane externe et la membrane interne. La membrane interne délimite un espace dit matrice :

- ✦ La membrane externe : semblable à la membrane cytoplasmique.
- ✦ La membrane interne : présente de nombreux crêtes. Elle est riche en protéines intégrées, parmi lesquelles on trouve les sphères pédonculées et les transporteurs d'électrons (hydrogénases). La tête des sphères pédonculée est orientée vers la matrice elle joue le rôle d'ATP synthase (enzyme qui catalyse la formation d'ATP).
- ✦ La matrice : espace interne rempli d'un gel composé de plusieurs composés oxydés (NAD<sup>+</sup> et FAD) et de composés réduits (NADH, H<sup>+</sup> et FADH<sub>2</sub>), de déshydrogénases, de décarboxylases, riche en ADP, Pi et ATP.

**Une décarboxylase** est une enzyme qui catalyse la réaction de **décarboxylation** : réaction au cours de laquelle l'enzyme arrache un groupement carboxyle (COOH) d'un composé organique et l'élimine sous forme de CO<sub>2</sub>

#### 2/ Les étapes de la respiration

La respiration se déroule dans les étapes suivantes :

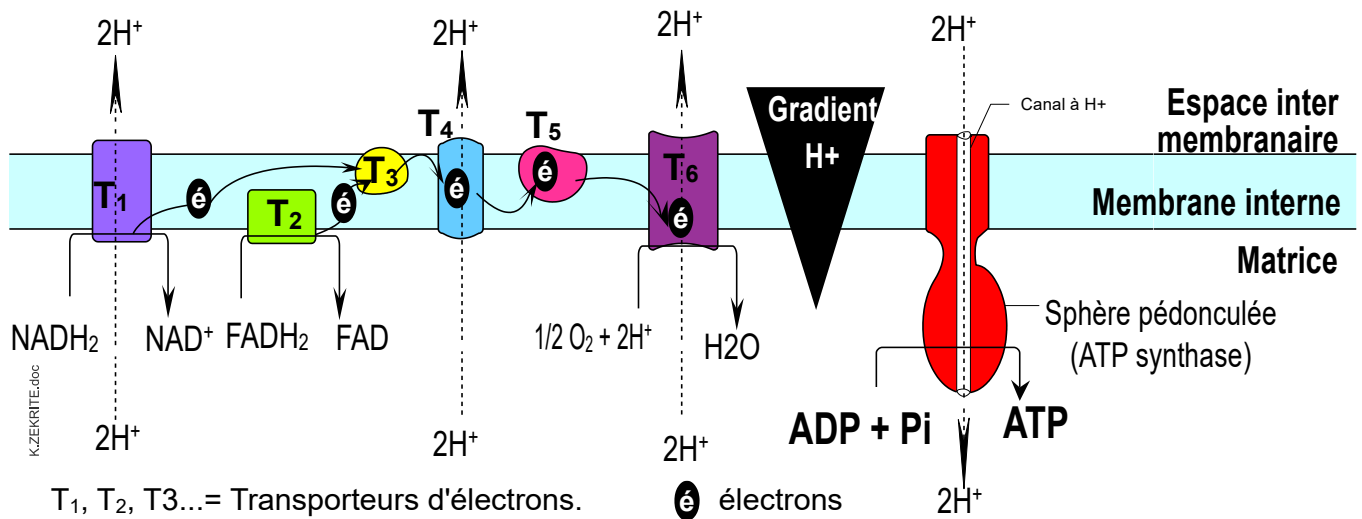
- ✦ La glycolyse : voir les réactions dans le premier paragraphe.
- ✦ La formation de l'acétyl coenzyme A : se déroule dans la matrice mitochondriale.
- ✦ Le cycle de Krebs : se déroule dans la matrice mitochondriale.
- ✦ La phosphorylation oxydative : se déroule dans la membrane interne mitochondriale.

##### a/ La formation de l'acétyl coenzyme A

Chaque molécule de pyruvate, issue de la glycolyse pénètre dans la matrice mitochondriale et subit les transformations suivantes :

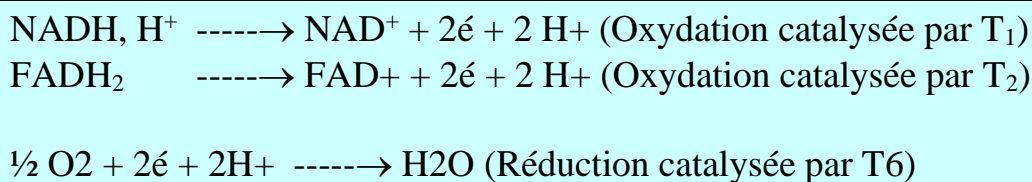


se caractérisent par des valeurs de potentiel redox différentes, ce qui leur permet de céder ou capter des électrons au cours des réactions d'oxydoréduction en cascade.



### Mécanisme de la phosphorylation oxydative

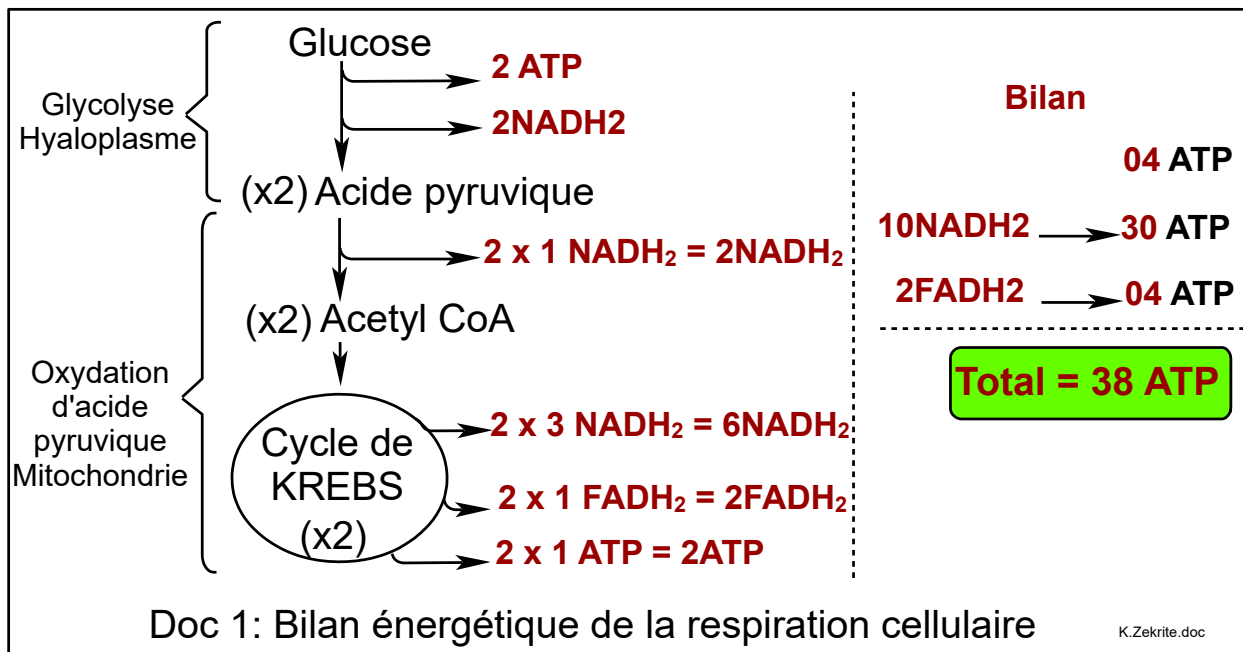
◆ Les transporteurs réduits (NADH, H<sup>+</sup> et FADH<sub>2</sub>) issus de la glycolyse et de l'étape de formation de l'acétyl CoA et du cycle de Krebs et stocké dans la matrice mitochondriale, cèdent leurs deux électrons à un système de transporteurs qui, par une cascade de réactions d'oxydo-réduction, amène ces électrons jusqu'à l'accepteur final, l'oxygène moléculaire qui se réduit en molécule d'eau.



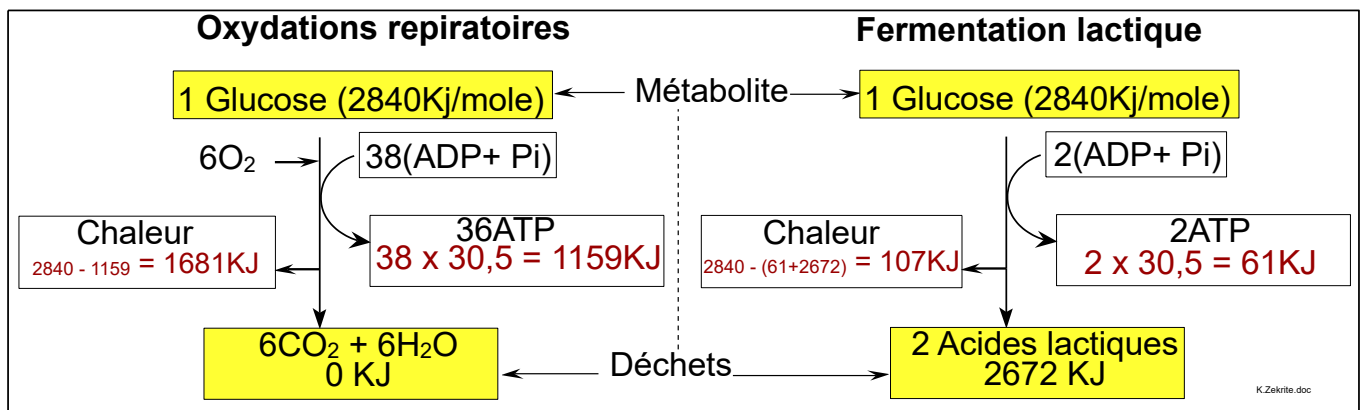
- ◆ L'énergie cédée au cours du transfert d'électrons est exploitée pour pomper les protons H<sup>+</sup> de la matrice vers l'espace inter membranaire ce qui engendre un gradient de concentration de part et d'autre la membrane interne mitochondriale.
- ◆ La membrane interne est imperméable aux protons sauf au niveau des sphères pédonculées. L'énergie du gradient est exploitée lors du retour des protons vers la matrice, traversant l'ATP synthase, pour activer la synthèse de l'ATP (ADP + Pi → ATP).
- ◆ La phosphorylation de l'ADP est couplée à l'oxydation des transporteurs d'électrons. C'est pour cela qu'on parle de « **phosphorylation oxydative** » ou « **oxydation phosphorylante** ».
- ◆ L'oxydation d'une mole de NADH, H<sup>+</sup> donne l'énergie nécessaire à la synthèse de 3 moles d'ATP.
- ◆ L'oxydation d'une mole de FADH<sub>2</sub> donne l'énergie nécessaire à la synthèse de 2 moles d'ATP.

### 3/ Le bilan énergétique de la respiration

La respiration est une **oxydation complète** du glucose qui s'accompagne de la synthèse de **36 à 38 ATP** avec des résidus minéraux (H<sub>2</sub>O et CO<sub>2</sub>) dépourvus d'énergie



### III/ Le rendement énergétique de la respiration cellulaire et de la fermentation :



**Rendement énergétique** : représente le rapport entre l'énergie récupérée et l'énergie qu'il a fallu pour la produire

$$R = \frac{\text{énergie produite}}{\text{énergie utilisée}} \times 100$$

Rendement de la fermentation =  $61/2840 \times 100 = 2\%$

Rendement de la respiration =  $1159/2840 \times 100 = 41\%$

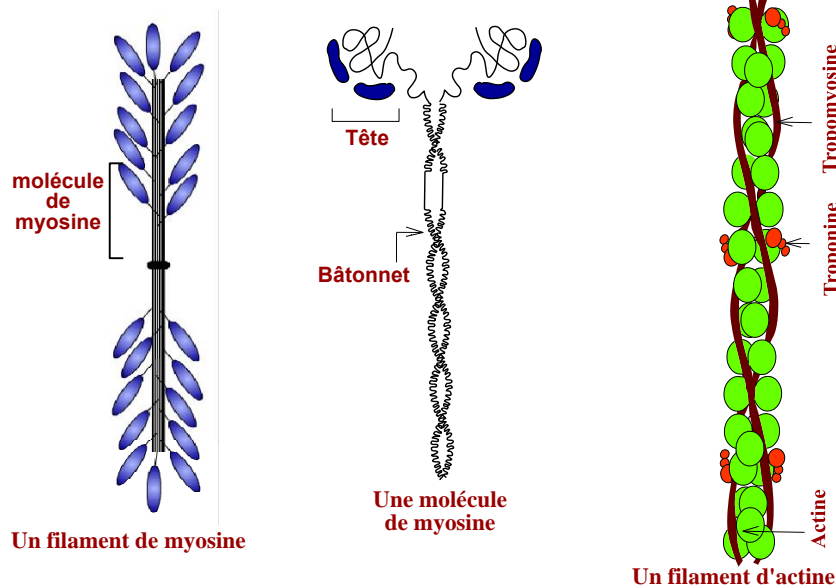
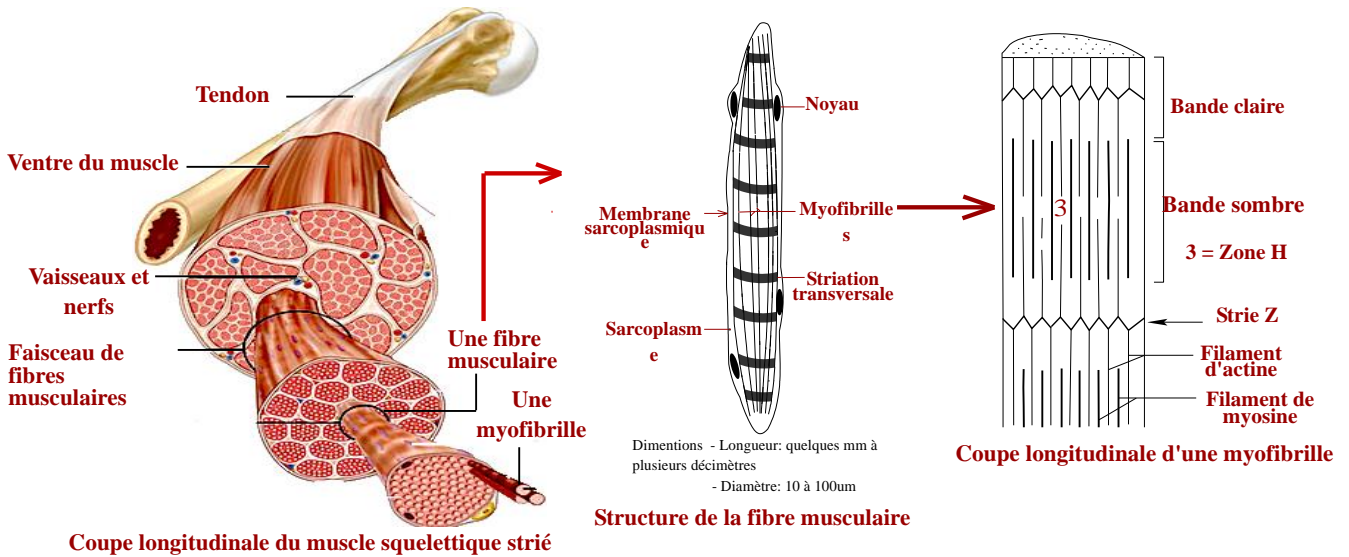
❁ Le rendement énergétique de la fermentation est beaucoup plus faible que celui de la respiration.

❁ Cette différence résulte du fait que la respiration provoque *la dégradation complète* du glucose (déchets minéraux sans valeur énergétique) alors que *la dégradation est partielle* au cours de la fermentation, le résidu organique (acide lactique ou éthanol) est encore riche en énergie.

# Rôle du muscle squelettique strié dans la transformation de l'énergie

Les muscles squelettiques striés se contractent en réponse à une activité volontaire ou à une excitation externe, ainsi ils assurent la posture de l'organisme et des mouvements multiples.

## I/ La structure et l'ultrastructure du muscle strié squelettique :

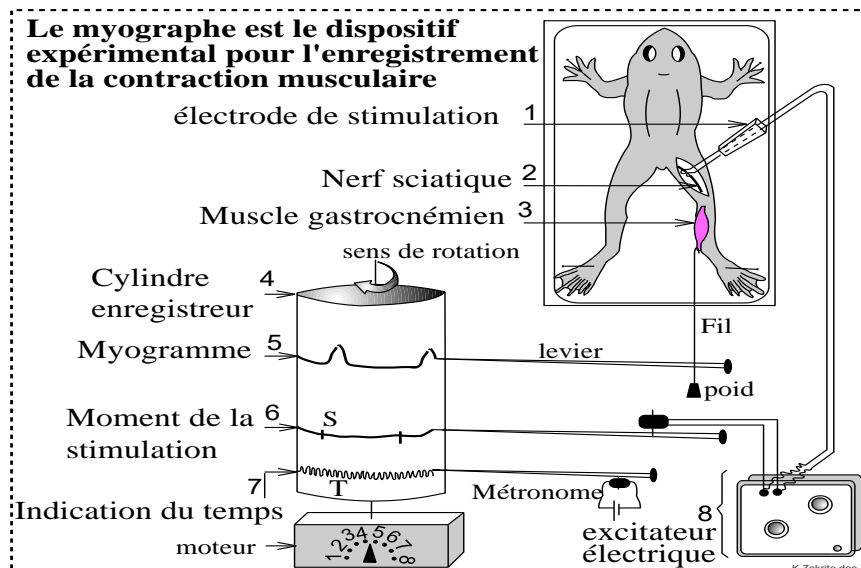


Le muscle squelettique est constitué de plusieurs **faisceaux de fibres** musculaires entourés par **des membranes conjonctives** qui s'unissent pour former **les tendons** qui attachent le muscle aux os.

**Une fibre musculaire** est une cellule géante qui possède plusieurs noyaux. Le cytoplasme de la fibre appelé **sarcoplasme** est contient des organites responsables de son fonctionnement (mitochondries, réticulum sarcoplasmique...), mais il est occupé presque totalement par des **myofibrilles** (fibrilles musculaires) s'étendant sur toute la longueur de la fibre, ce qui donne à la fibre une striation longitudinale.

- Le sarcoplasme de la fibre musculaire est riche en réserves de glycogène et de myoglobine (protéine qui transporte l'O<sub>2</sub> en se fixant avec).
- La fibre musculaire présente une striation transversale très caractéristique qui est à l'origine du nom « *muscle strié squelettique* » que l'on donne aux muscles attachés au os et responsables des mouvements.
- La myofibrille est constituée par une alternance de *bandes claires I* et de *bandes sombres A*. Chaque bande claire est traversée au milieu par *une strie Z*. Chaque bande sombre est occupée en son milieu par *une zone H*.
- La zone séparant deux stries Z successives constitue *le sarcomère* qui représente l'unité structurale et fonctionnelle de la fibre musculaire. Une myofibrille est donc constituée d'une suite de sarcomères.
- Au sein de chaque myofibrille on distingue deux types de myofilaments :
  - *Myofilaments fins d'actines* : constituées de 3 catégories de protéines : *la tropomyosine, la troponine* et essentiellement de *l'actine*.
  - *Myofilaments épais* : sont des faisceaux d'environ 200 molécules de *myosines*. Chaque molécule de myosine a la forme d'un bâtonnet terminé par deux têtes. Les tiges se collent les unes aux autres pour former le myofilament épais, tandis que les têtes font saillie latéralement tout autour du myofilament.
- Au niveau de la bande sombre, il y'a des filaments fins et des filaments épais. La bande claire contient des filaments fins seulement. La zone H contient les filaments épais uniquement. La zone Z est le lieu de rencontres des filaments fins de deux sarcomères voisins.

## II/ Enregistrement mécanique de la contraction musculaire :



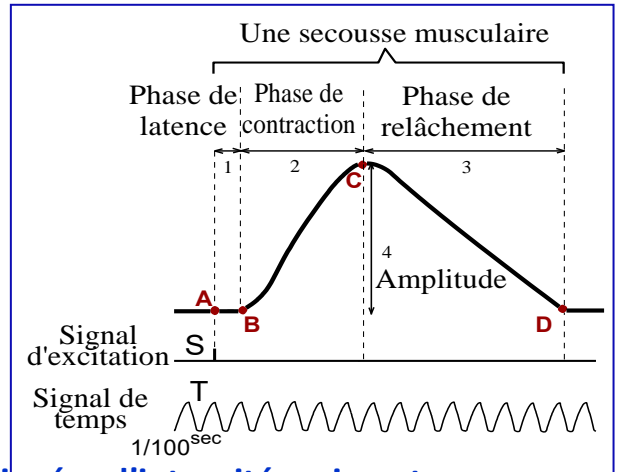
- Le phénomène mécanique de la contraction musculaire est enregistré grâce à un appareil nommé myographe.
- Si le muscle se contracte et se relâche le cylindre enregistreur dessine *une courbe* qu'on nomme myogramme = secousse musculaire.

## 1/ Réponse du muscle à une seule excitation

Suite à une excitation efficace, on enregistre une **secousse musculaire isolée** composée de trois étapes :

- **La phase de latence** (AB),
- **La phase de contraction** (BC).
- **La phase de relâchement** (CD):

Le muscle est donc **excitable et contractile**



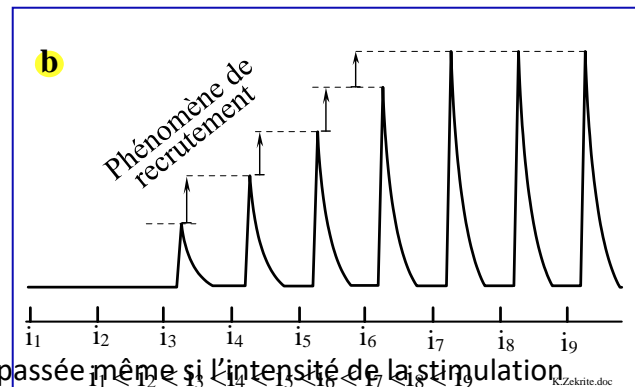
## 2/ Réponse du muscle à des excitations éloignées d'intensité croissante.

✳ Les stimulations inférieures au seuil d'excitation électrique (inférieures à la rhéobase) comme  $i_1$  et  $i_2$  ne donnent pas de réponse.

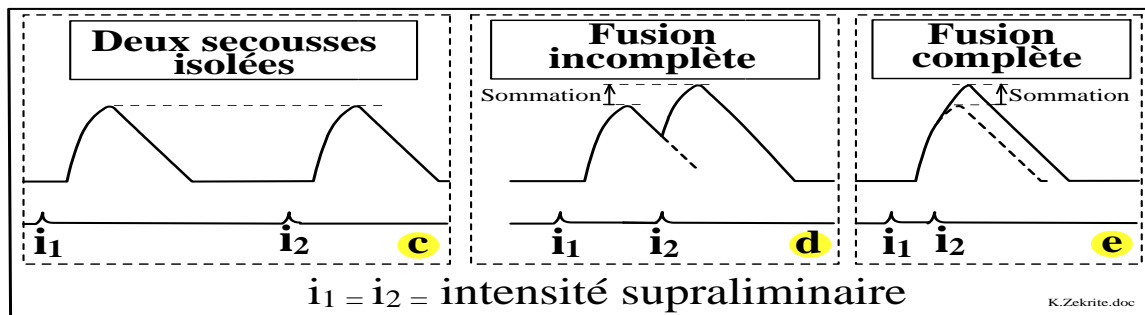
✳ Les stimulations dont l'intensité est égale ou supérieure à la rhéobase donnent une réponse, elles sont dites efficaces.

✳ Lorsque l'intensité de l'excitation augmente, l'amplitude de la réponse s'accroît jusqu'à ce

qu'elle atteigne une valeur maximale qui ne peut être dépassée même si l'intensité de la stimulation continue à augmenter. L'augmentation de l'amplitude est expliquée par le phénomène de recrutement : le nombre de fibres musculaires augmente en fonction de l'augmentation de l'intensité de l'excitation. Lorsque toutes les fibres musculaires sont excitées, l'amplitude est alors maximale et reste constante :



## 3/ Réponse du muscle à deux excitations successives de même intensité.



Lorsqu'on soumet le muscle à deux excitations efficaces successives, on obtient :

- **Deux secousses distinctes** de même amplitude : si la deuxième excitation atteint le muscle après la phase de relâchement.
- **Une fusion incomplète des deux secousses** avec une sommation : si la deuxième excitation atteint le muscle pendant la phase de relâchement.

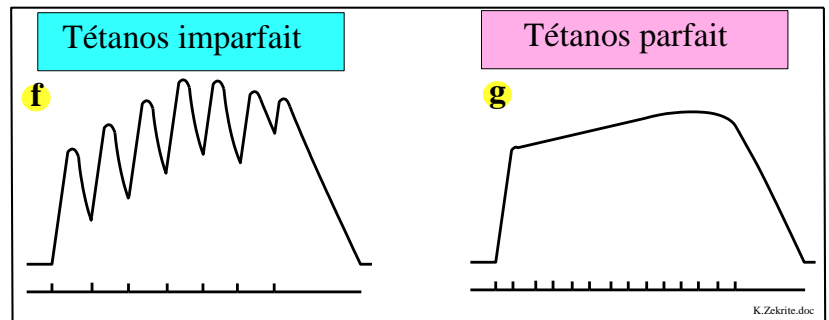
- **Une fusion complète des deux secousses en une seule** avec une sommation : Si la deuxième excitation atteint le muscle pendant la phase de contraction.
- Si la deuxième excitation atteint le muscle pendant la phase de latence, le muscle ne répond pas à la deuxième excitation

#### 4/ Réponse du muscle à une série d'excitations identiques de fréquence variable.

Lorsqu'on soumet le muscle à des excitations répétées de même intensité, il se tétanise, on dit que le muscle est **tétanisable**, en effet on obtient :

- **Un tétanos imparfait** : lorsque chacune des excitations atteint le muscle pendant la phase de relâchement.

- **Un tétanos parfait** : lorsque chacune des excitations atteint le muscle pendant la phase de contraction.

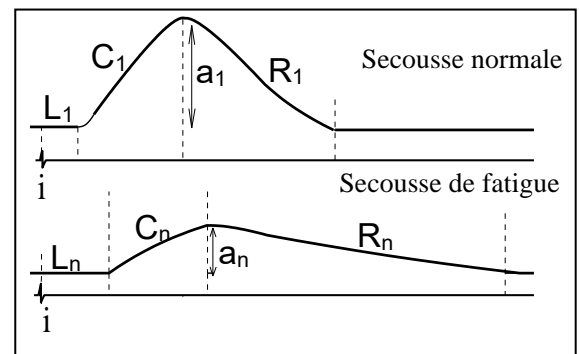


#### 5/ Fatigue musculaire

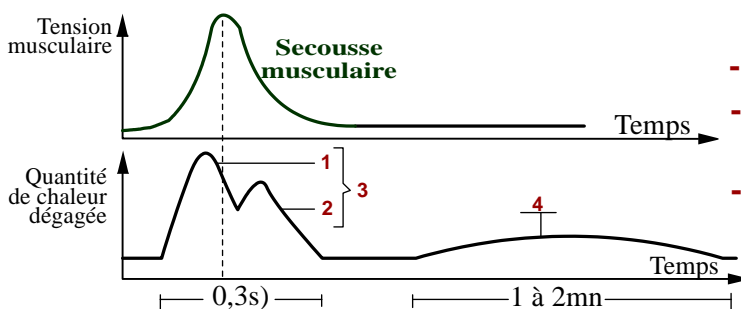
Quand un muscle subit un grand nombre d'excitations successives, il se fatigue, on dit que le muscle est **fatigable**.

La fatigue musculaire se manifeste par :

- **Une diminution de l'amplitude.**
- **Une augmentation de la durée** des différentes phases de la secousse et de la durée totale de la secousse.



### III/ Phénomènes thermiques accompagnants la contraction musculaire :



- 1- Chaleur de contraction
- 2- Chaleur de relâchement
- 3- Chaleur initiale
- 4- Chaleur retardée

#### Types de chaleurs dégagés par un muscle en milieu aérobie

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

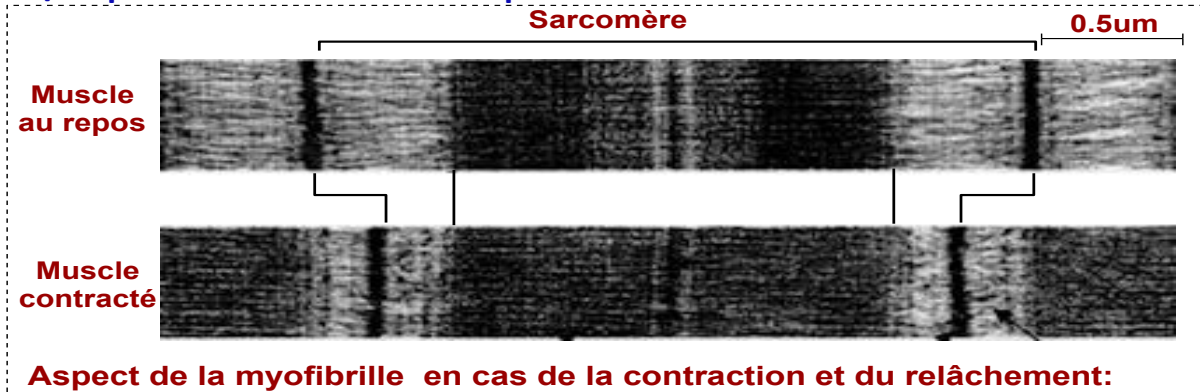
- **La chaleur initiale** : libérée au cours de la secousse musculaire pendant une courte durée mais en grande quantité, une partie est libérée au cours de la phase de contraction et l'autre partie au cours de la phase de relâchement. Cette chaleur persiste même en milieu anaérobie, elle provient des réactions chimiques anaérobies (fermentation,

hydrolyse de l'ATP lors de la contraction musculaire, la réaction de synthèse d'ATP à partir de l'ADP et de la phosphocréatine).

- **La chaleur retardée** : se libère après la secousse musculaire. Elle est d'intensité faible mais elle dure plus longtemps. Cette chaleur provient des réactions chimiques aérobies (respiration), elle disparaît si le muscle n'est pas approvisionné en oxygène.

### III/ Mécanisme de la contraction musculaire :

#### 1/ Aspects et conditions chimiques de la contraction musculaire



✳ La contraction d'un sarcomère se traduit par :

- Un raccourcissement de la longueur du sarcomère : les stries Z se rapprochent.
- une réduction de la longueur des bandes claires et des zone H.
- Une constance de la longueur des bandes sombres.

Ces modifications sont dues à un glissement des filaments d'actine entre les filaments de myosine: C'est **la théorie des filaments glissantes**.

✳ La contraction musculaire nécessite la présence d'ATP et des ions  $Ca^{++}$  (ces ions sont stockés dans le réticulum sarcoplasmique de la fibre musculaire)

#### 2/ Les étapes de la contraction musculaire (voir schéma)

La contraction musculaire nécessite la présence des molécules d'ATP et des ions  $Ca^{++}$ . Elle s'effectue suivant les étapes suivantes :

↪ En cas de repos, les filaments d'actines sont détachés des filaments de myosine. La tête de myosine porte une molécule d'ADP et de  $P_i$ .

↪ L'arrivée de l'influx nerveux, provoque la libération des ions  $Ca^{++}$  par le réticulum sarcoplasmique et leur transfert dans le sarcoplasme.

↪ Les ions  $Ca^{++}$  se fixent sur la troponine, ce qui déplace la tropomyosine, les sites de liaison de l'actine sur la myosine sont alors exposés.

↪ Ainsi, La tête de myosine porteuse d'ADP et  $P_i$  se lie avec l'actine, permettant la formation d'un pont acto-myosine.

↪ Le départ du  $P_i$  puis de l'ADP entraîne le pivotement de la tête de myosine.

↪ Ce pivotement permet le glissement des filaments d'actine vers le centre du sarcomère et donc le raccourcissement de ce dernier (contraction).

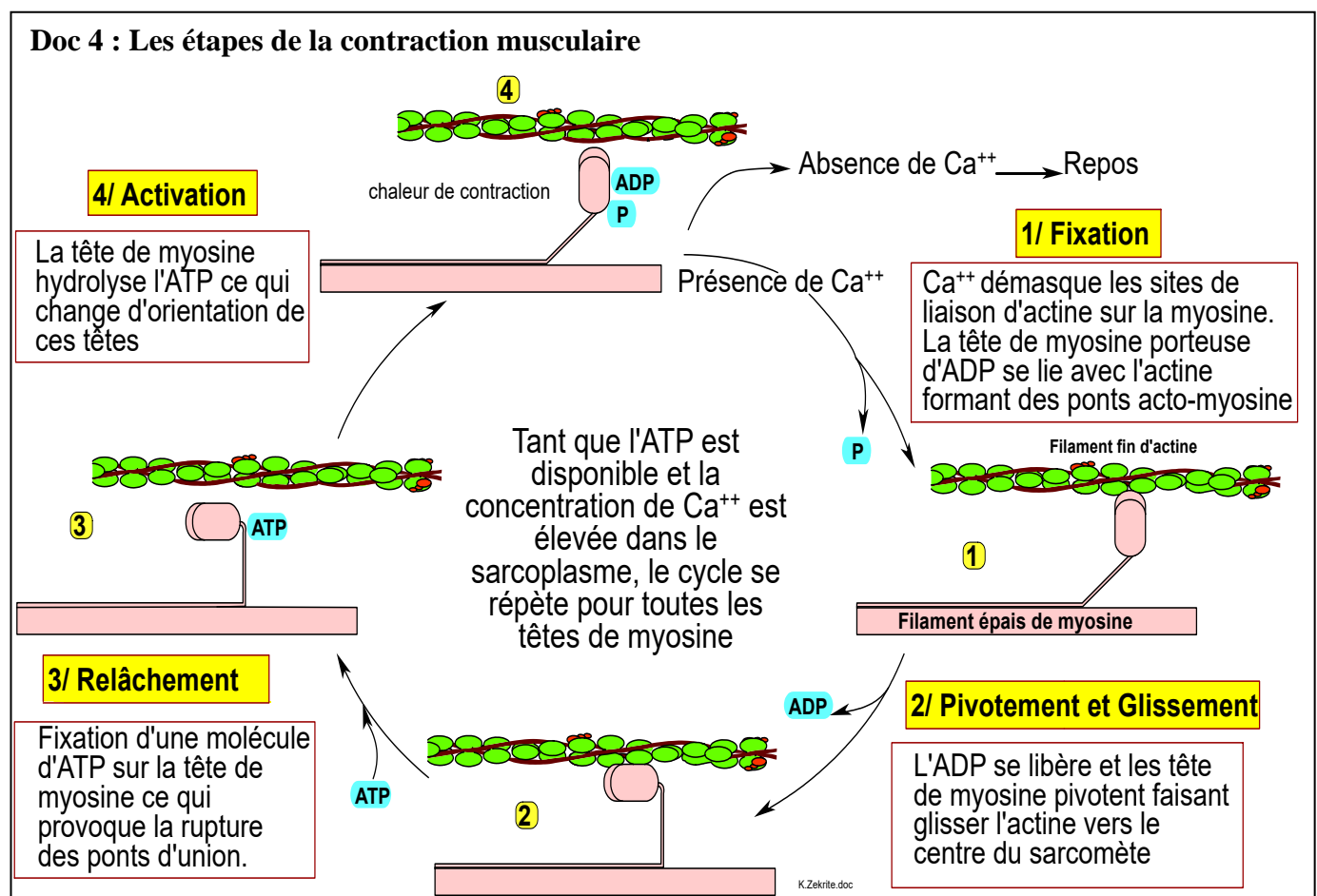
↪ Le complexe actine myosine reste stable (complexe de rigidité), et seul l'union de la tête de myosine avec une molécule d'ATP, permet la rupture de cette liaison.

En effet les phénomènes se déroulent comme suit : une molécule d'ATP se fixe sur la tête de myosine lié à l'actine, ce complexe a le pouvoir d'une enzyme ATP<sup>ase</sup> qui catalyse l'hydrolyse de l'ATP ( $ATP \rightarrow ADP + P$ ), l'énergie libérée active la tête de myosine qui s'oriente perpendiculairement à l'axe du filament d'actine, ainsi la myosine se détache de l'actine progressivement. L'actine revient alors passivement à son état initial : état de relâchement. D'autre part la tête de myosine reste fixé à la molécule d'ADP et de Pi.

↳ Lorsque les excitations s'arrêtent, il y'a retour actif des ions  $Ca^{++}$  vers le réticulum sarcoplasmique, le cycle contraction /relâchement s'arrête alors.

↳ En absence d'ATP, les têtes de myosine restent fixées sur l'actine, ce qui explique la rigidité cadavérique après la mort de l'organisme (التيبس الجثي).

↳ En absence des ions  $Ca^{++}$ , l'attachement de la myosine à l'actine est impossible, ce qui empêche la contraction.



### Conclusion :

La cellule musculaire a la capacité de convertir de l'énergie chimique (ATP) en énergie mécanique (mouvement). D'autre part une partie de l'énergie issue de l'hydrolyse d'ATP ou de la synthèse de l'ATP par des voies divers (voir paragraphe suivant) est dissipée sous forme de chaleur (chaleur initiale et chaleur retardée).

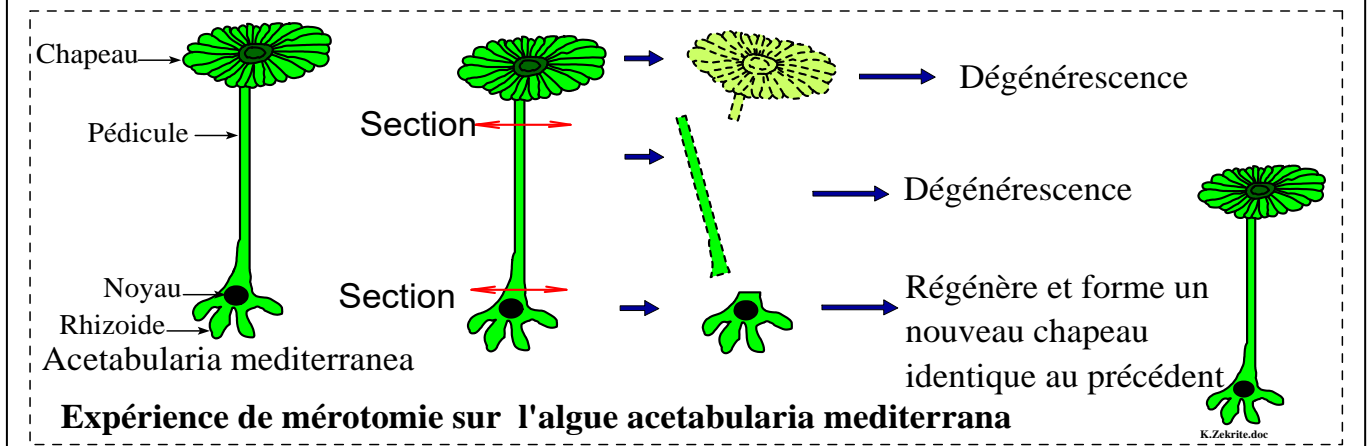


## Information génétique : Nature et expression

L'information génétique, est l'ensemble des données qui déterminent les caractéristiques héréditaires d'un organisme, contenues dans son ADN ou son ARN. Elle est transmise de génération en génération et code pour la production de protéines qui jouent un rôle dans le développement et le fonctionnement du corps.

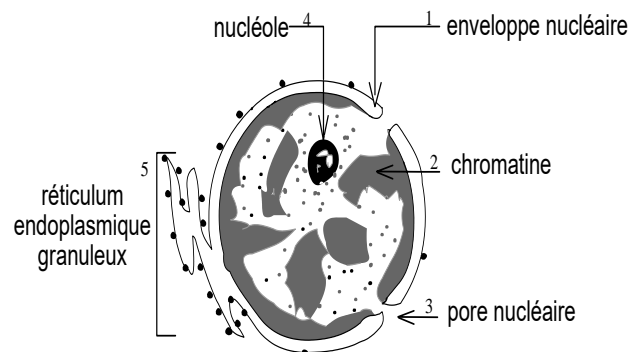
### Localisation de l'information génétique dans la cellule

L'acétabulaire est une algue verte unicellulaire de grande taille. Le noyau de cette algue est toujours situé près du rhizoïde. On sectionne cette algue en deux endroits différents, ce qui permet de séparer trois parties : le chapeau, le pédicule et le rhizoïde. La figure ci-dessous représente les endroits des sections et les résultats obtenus



Les expériences de transfert du noyau réalisées chez l'acétabulaire et chez le crapaud montrent que l'information génétique se localise dans le noyau de chaque cellule (animale ou végétale).

Ce programme détermine les caractéristiques spécifiques et individuels de chaque être vivant



**Ultrastructure du noyau**

### Transmission de l'information génétique d'une cellule à une autre

#### **I/ Les étapes de la mitose**

★ La croissance des tissus et le renouvellement des cellules sont assurés par une division cellulaire appelée mitose.

★ La mitose est un processus continu mais on peut le diviser en 4 phases : la prophase, la métaphase, l'anaphase et la télophase

★ La mitose est précédée par une phase plus longue appelée interphase.

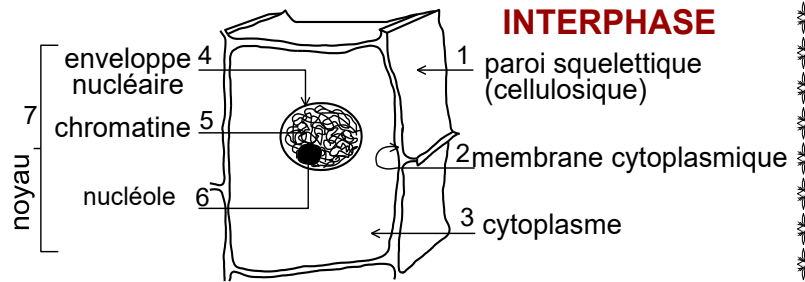
★ La mitose donne naissance à deux cellules filles identiques et semblables à la cellule mère (même nombre de chromosomes et même information génétique). On dit que la

mitose est une reproduction asexuée conforme.

## 1/ Les étapes de la mitose chez une cellule végétale

### ❖ L'interphase

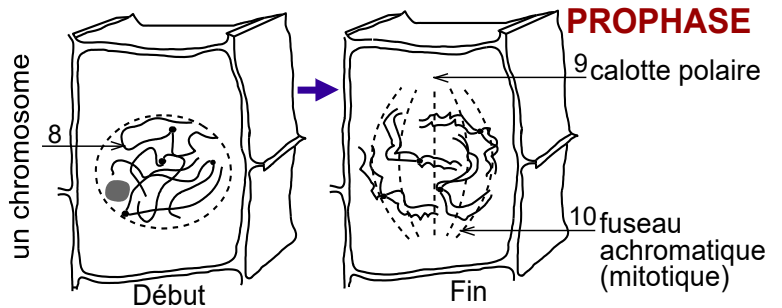
Pendant l'interphase, la cellule possède un noyau entier avec sa membrane, sa chromatine (nucléofilaments enchevêtré متشابكة) et son nucléole



### ❖ La prophase

Ce stade est le plus long, il se caractérise par :

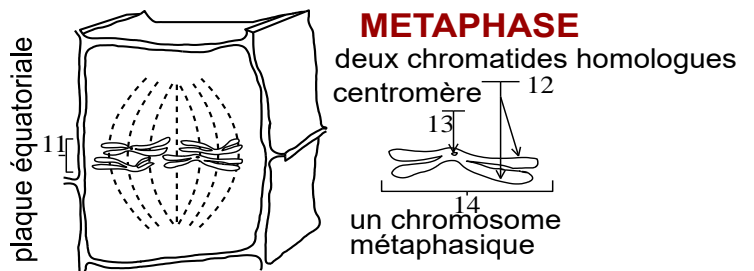
- Un gonflement du noyau et la disparition de l'enveloppe nucléaire et du nucléole.
- Une condensation de la chromatine en chromosomes, les chromosomes s'individualisent et deviennent visible.
- Chaque chromosome est fissurée longitudinalement en **deux chromatides** homologues, réunies par **un centromère**.
- L'apparition d'un fuseau de fibres entre les deux pôles de la cellule appelé **fuseau achromatique = mitotique**.



### ❖ la métaphase

Stade très court (quelques minutes), se caractérise par :

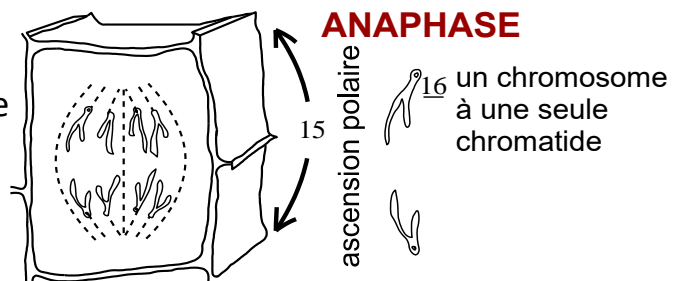
- Une condensation maximale des chromosomes clivés.
- Un regroupement des chromosomes dans le plan équatorial de la cellule formant une **plaque équatoriale**.
- Chaque chromosome métaphasique constitué de 2 chromatides est lié par son centromère aux fibres du fuseau achromatique.



### ❖ l'anaphase

Stade, dont la durée est longue, se caractérise par :

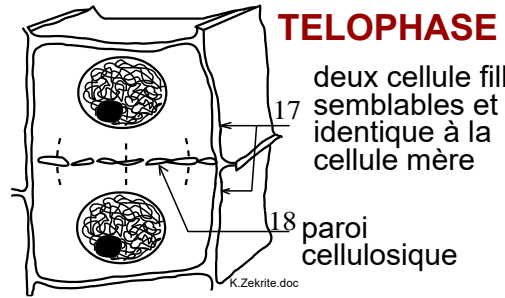
- Un regroupement et une décondensation des chromosomes en chromatine.
- L'enveloppe nucléaire entoure chacun des deux lots de chromatine, donnant naissance à deux noyaux fils.
- La disparition du fuseau mitotique.
- La division du cytoplasme (cytodiérèse) par formation d'une nouvelle membrane et d'une paroi cellulosique.
- La formation de deux cellules filles identiques.



## ❖ la télophase

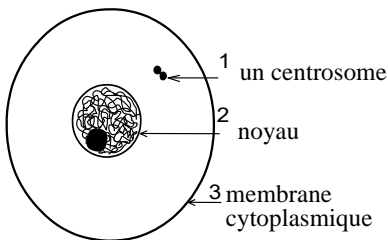
Stade très court (2 à 3 mn), se caractérise par :

- Un clivage du centromère et séparation des chromatides homologues.
- Les chromatides de chacun des chromosomes migrent vers les pôles opposés de la cellule.
- Cette migration, appelée ascension polaire, est sous l'effet de la contraction des fibres achromatiques.
- Ainsi, il se forme deux lots identiques de chromosomes dans chacun des deux pôles de la cellule.

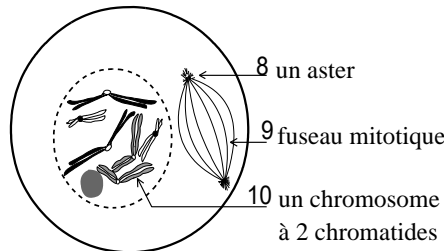


## 2/ La mitose chez la cellule animale

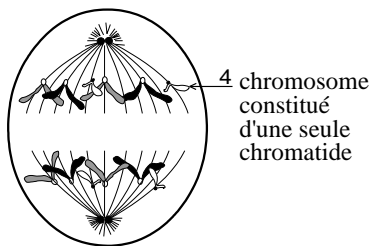
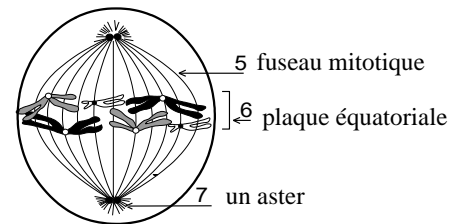
### Intérphase



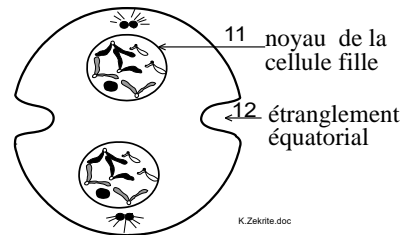
### Prophase



### Métaphase



### Anaphase



### Télophase

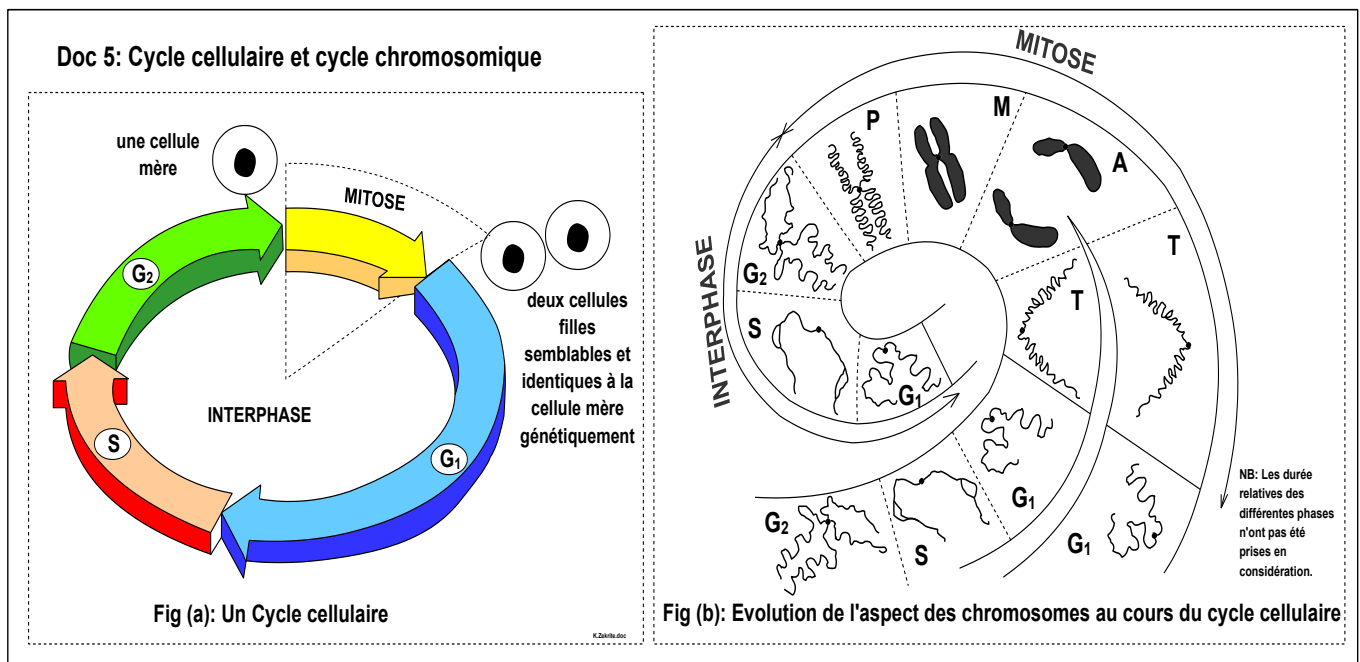
**Le centrosome est un organite propre à la cellule animale, il est constitué de deux centrioles. Au cours de la prophase cet organite se divise en deux centrioles et chaque centriole formera par la suite un aster qui migre vers un pôle de la cellule**

★ La mitose chez la cellule animale et chez la cellule animale se déroulent dans les mêmes étapes (prophase, métaphase, anaphase et télophase) et ont les mêmes caractéristiques générales.

★ Il y'a deux différences majeurs entre la mitose chez la cellule animale et chez la cellule végétale :

- Le fuseau achromatique se forme, chez la cellule animale, entre deux asters issus de la division du centrosome ; par contre chez la cellule végétale, le fuseau achromatique se forme entre deux calottes polaires (condensation cytoplasmique).
- Pendant la télophase, la division du cytoplasme (cytodiérèse) s'effectue, chez la cellule animale par un étranglement équatorial (resserrement médian de la membrane plasmique), alors que chez la cellule végétale, la séparation des deux cellules filles se fait par la formation d'une nouvelle paroi cellulosique.

### 3/ Le cycle cellulaire et le cycle chromosomique :



- Les cellules ont un fonctionnement cyclique. Un cycle cellulaire comporte deux étapes : l'interphase suivi par la mitose.
  - L'interphase comporte trois phases :
    - La phase  $G_1$  (growth): première phase de croissance de la cellule : chaque chromosome est constitué d'une seule chromatide (monochromatidien).
    - La phase S, phase de synthèse : dédoublement des chromosomes.
    - La phase  $G_2$ , deuxième phase de croissance (growth) : chaque chromosome devient bichromatidien, la cellule achève sa croissance et se prépare à la division.
  - La mitose : *en prophase et en métaphase de la mitose les chromatides subissent une condensation (enroulement = spiralisation) qui se traduit par une augmentation du diamètre apparent et une diminution de longueur, ils deviennent visibles et on parle alors de chromosome. Pendant l'anaphase, les chromatides se séparent et chacun rejoint une cellule fille. Pendant la télophase les chromosomes se décondensent et redonnent la chromatine et un nouveau cycle chromosomique commence.*
- La mitose donne naissance à deux cellules semblables entre elles et identiques à la cellule mère : se caractérisent par les mêmes caractères héréditaires et renferment le même nombre de chromosomes.

#### Nature chimique de l'information génétique

### I/ Les chromosomes sont le support de l'information génétique

#### 1/ La formule chromosomique

- Le nombre de chromosomes présents dans chaque cellule constitue la formule chromosomique. La formule chromosomique varie d'une espèce à une autre, c'est une caractéristique de l'espèce.
- Il existe des espèces dites haploïdes et des espèces diploïdes.
- Un individu diploïde ( $2n$  chromosomes) possède deux exemplaires homologues de

chaque chromosome.

❖ Chez un individu haploïde (n chromosomes) chaque chromosome est représenté par un seul exemplaire

## 2/ Le caryotype = la carte chromosomique

❖ **Le caryotype ou carte chromosomique**, est une représentation ordonnée de tous les chromosomes d'une cellule.

- Une analyse du caryotype humain révèle que la formule chromosomique est la même chez l'homme et chez la femme, ce stock est diploïde formé de 23 paires de chromosomes homologues ( $2n=46$ ). Les 22 paires de chromosomes sont identiques dans les deux sexes, ce sont **les autosomes** (A). Cependant une différence notable existe entre le caryotype masculin et féminin : la paire n°23, qui est différente constitue les **chromosomes sexuels ou gonosomes**.

Deux chromosomes X chez la femme, un chromosome X et un chromosome Y chez l'homme.

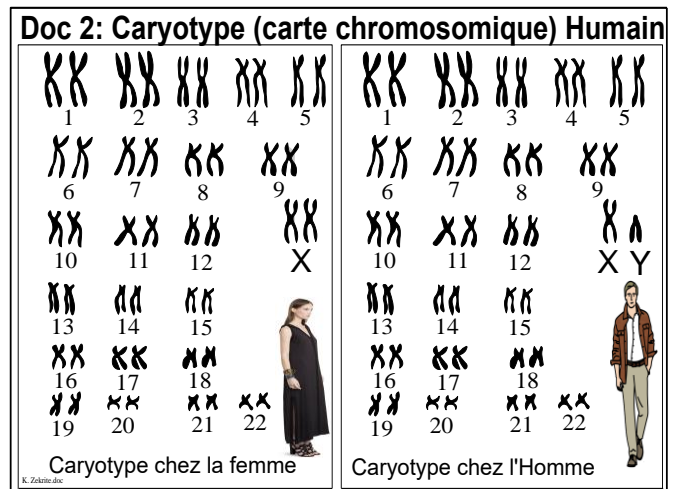
- On peut écrire la formule chromosomique développée des deux sexes comme suit :

**Chez la femme :  $2n = 46 = 44A + XX = 22AA + XX$**

**Chez l'homme :  $2n = 46 = 44A + XY = 22AA + XY$**

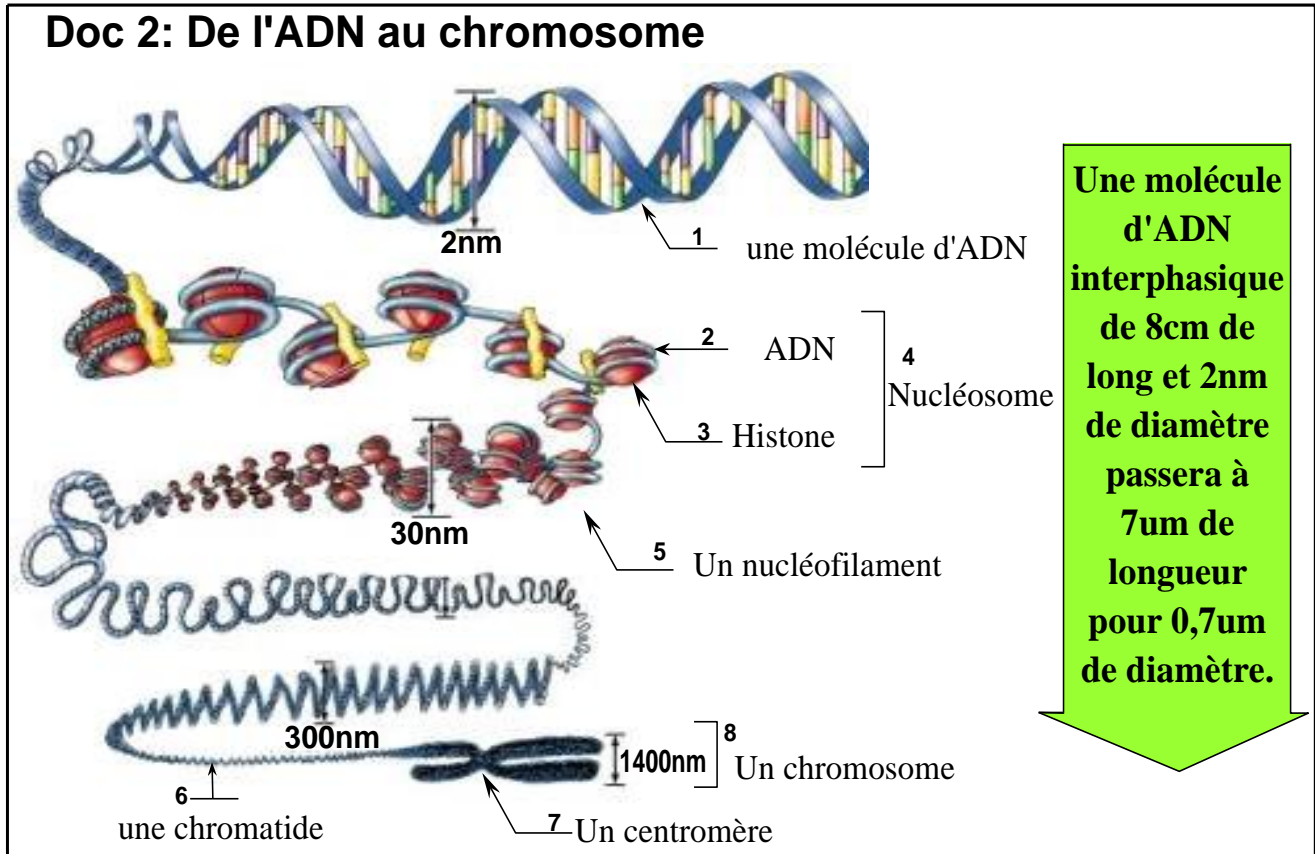
❖ La réalisation d'un caryotype passe par les techniques suivantes :

- Culture de globules blancs ou toute cellule capable de se diviser en culture.
- Ajout de la colchicine au milieu de culture, substance qui bloque les divisions en métaphase (stade de la mitose où les chromosomes sont bien visibles).
- Placer les cellules dans un milieu hypotonique (moins concentré) pour les faire éclater, les chromosomes métaphasiques se dispersent.
- Coloration et fixation des chromosomes.
- Prise d'une photographie des chromosomes, la photo obtenue est une **garniture chromosomique** : ensemble des chromosomes de la cellule mais non classés.
- Après agrandissement des clichés, on découpe et on classe les chromosomes selon leur taille (du plus grand au plus petit), selon la position du centromère et les bandes colorées. Si la cellule est diploïde on regroupe les chromosomes par paires. On peut faire ce travail grâce à un ordinateur.



**Conclusion :** Le caryotype et la formule chromosomique sont caractéristiques de l'espèce et du sexe ce qui confirme que les chromosomes sont le support de l'information génétique. Leur constance des cellules mère aux cellules filles pendant la mitose permet un transfère conforme de l'information génétique

## II/ Constituants et structure des chromosomes

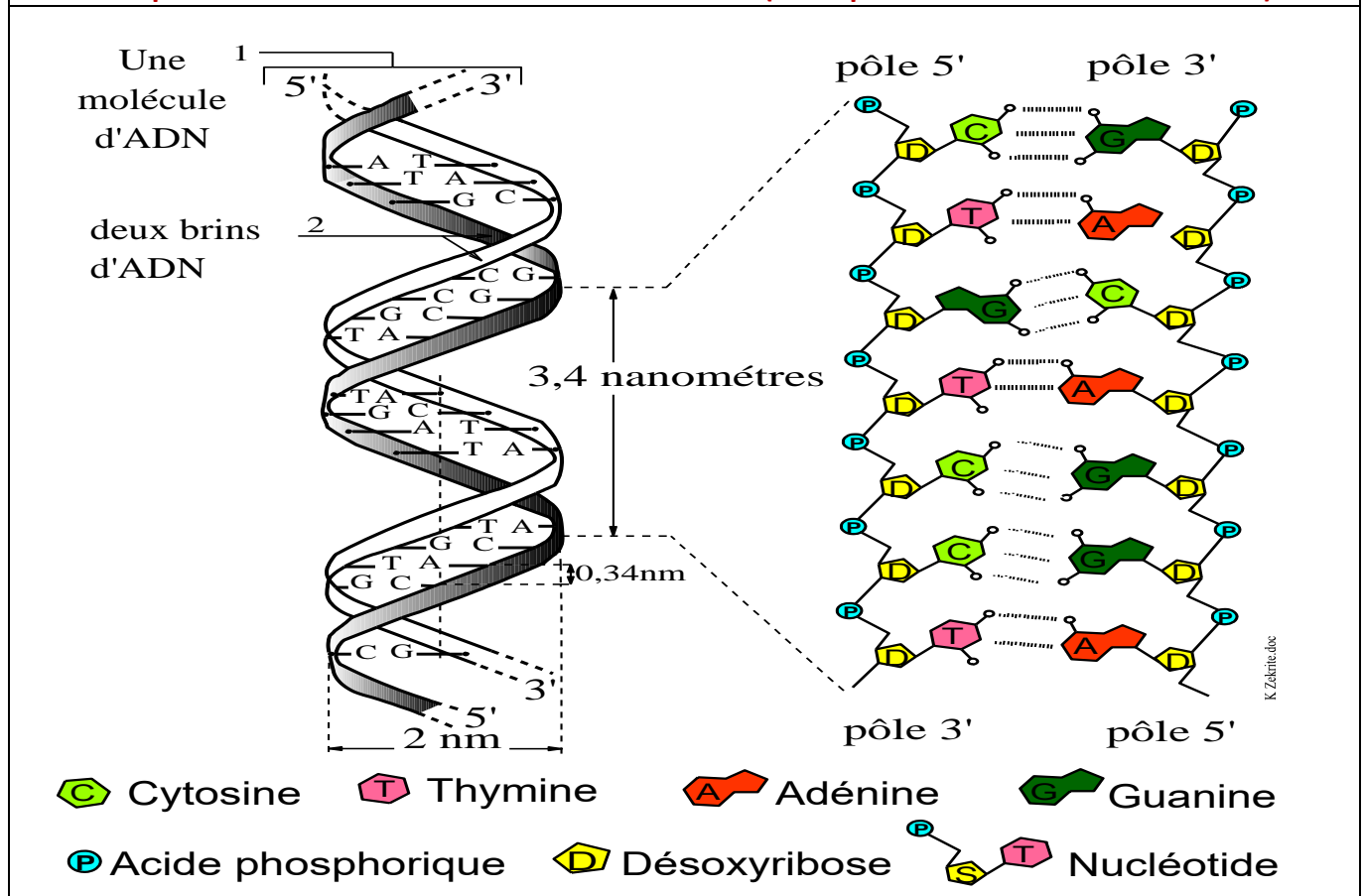


- ❖ Au cours de l'interphase la chromatine apparaît constituée d'un ensemble de **nucléofilaments** (fibres de chromatine) enchevêtrés. Chaque nucléofilament est formé d'une molécule d'**ADN (acide désoxyribonucléique)**, qui s'enroule autour de protéines appelées **histones**, ce qui donne au nucléofilament l'aspect d'un collier de perle قلادة لؤلؤ
- ❖ Le chromosome métaphasique est constitué de deux chromatides, chaque chromatide est formé d'une molécule d'ADN. Le chromosome métaphasique contient donc deux molécules d'ADN.
- ❖ La molécule d'ADN s'enroule autour des histones et donne un nucléofilament. Les nucléofilaments légèrement condensés au cours de l'interphase constituent la chromatine.
- ❖ Au cours de la prophase et de la métaphase, le nucléofilament dupliqué (constitué de deux nucléofilaments accolés au niveau du centromère), s'enroule fortement et s'organise sous forme de chromosome : bâtonnet court épais, bien individualisé, visible au microscope optique et surtout facilement transportable.
- ❖ Vers la fin de la mitose, chaque nucléofilament se décondense, devient long et fin, non visible au microscope optique. L'ensemble des nucléofilaments s'enchevêtrent et reconstituent la chromatine.

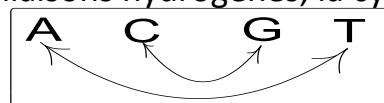
❖ Plusieurs expériences ont permis de conclure que la nature chimique de l'information génétique chez les êtres vivants est chimique, il s'agit de la molécule d'acide désoxyribonucléique : ADN, composante essentielle des chromosomes.  
Remarque : Chez certains virus, comme le VIH, agent du sida, le matériel génétique est contenu dans la molécule d'ARN : 'acide ribonucléique.

## II/ Structure de la molécule d'ADN :

Doc 2 : Aspect de la double hélice de la molécule d'ADN (conception de Watson et Crick : 1953)



- ❖ L'acide désoxyribonucléique (ADN) est une macromolécule hélicoïdale formée de deux brins associés : **double hélice**.
- ❖ Chaque brin d'ADN est formé par l'enchaînement de nombreux **nucléotides** : polymère pluri-nucléotidique.
- ❖ Chaque nucléotide est constitué de 3 éléments : un **acide phosphorique**, un **désoxyribose** et une **base azotée**.
- ❖ Chaque nucléotide se distingue de l'autre par la base azotée qu'il renferme : **l'adénine (A)**, **la guanine (G)**, **la cytosine (C)** et **la thymine**.
- ❖ Des liaisons hydrogènes entre les bases complémentaires assurent la structure double hélice : l'adénine se lie à la thymine par deux liaisons hydrogènes, la cytosine se lie à la guanine par trois liaisons hydrogènes.



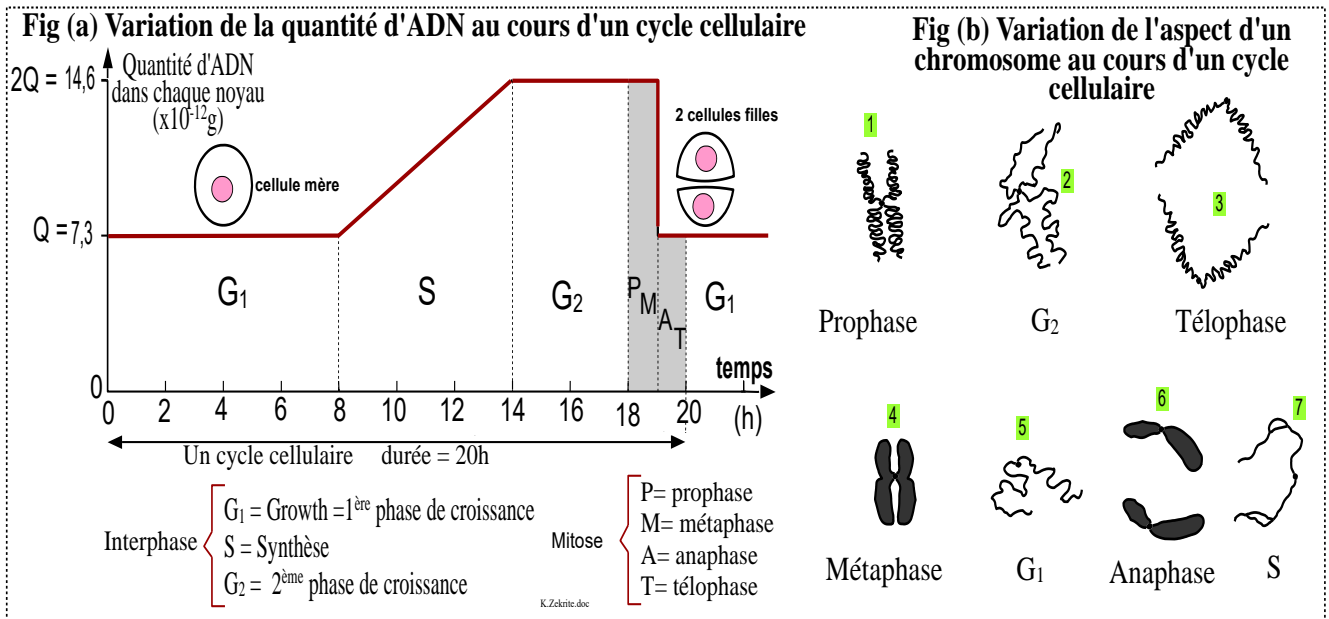
❖ Les deux brins d'ADN sont complémentaires de **polarité antagoniste** (l'un 3' → 5') et l'autre 5' → 3').

❖ L'information génétique réside dans le nombre et l'ordre des nucléotides. La suite des nucléotides le long d'un brin d'ADN. La molécule d'ADN peut être décrite comme un message écrit dans un code à 4 lettres (A, T, C et G).

## La réplication de l'ADN

La réplication de l'ADN est le processus par lequel une molécule d'ADN est dupliquée pour produire deux copies identiques

### I/ Variation de la quantité d'ADN au cours d'un cycle cellulaire :



❖ La quantité d'ADN, comme l'aspect du chromosome, subie des variations au cours du cycle cellulaire :

❖ Pendant l'interphase :

- phase G<sub>1</sub> : la quantité d'ADN est constante et égale à Q.
- phase S : la quantité d'ADN augmente progressivement et atteint le double (2Q), cette évolution est due à une duplication de l'ADN (réplication de l'ADN)
- phase G<sub>2</sub> : la quantité d'ADN est constante et égale à 2Q.

❖ Pendant la mitose :

- En prophase et en métaphase, la quantité d'ADN est constante et égale à 2Q.
- En anaphase : la quantité d'ADN diminue de la moitié et revient à sa valeur initiale Q, cela est dû à la migration polaire des chromatides (répartition égale de l'information génétique).
- En télophase la quantité d'ADN de chaque cellule fille reste stable et égale à Q. En fin de télophase se forme deux cellules filles portant la même quantité d'ADN de la cellule mère, chaque cellule entre en interphase et un nouveau cycle commence.

❖ Conclusion : le maintien de la quantité d'ADN d'une cellule mère aux cellules filles est le résultat de:

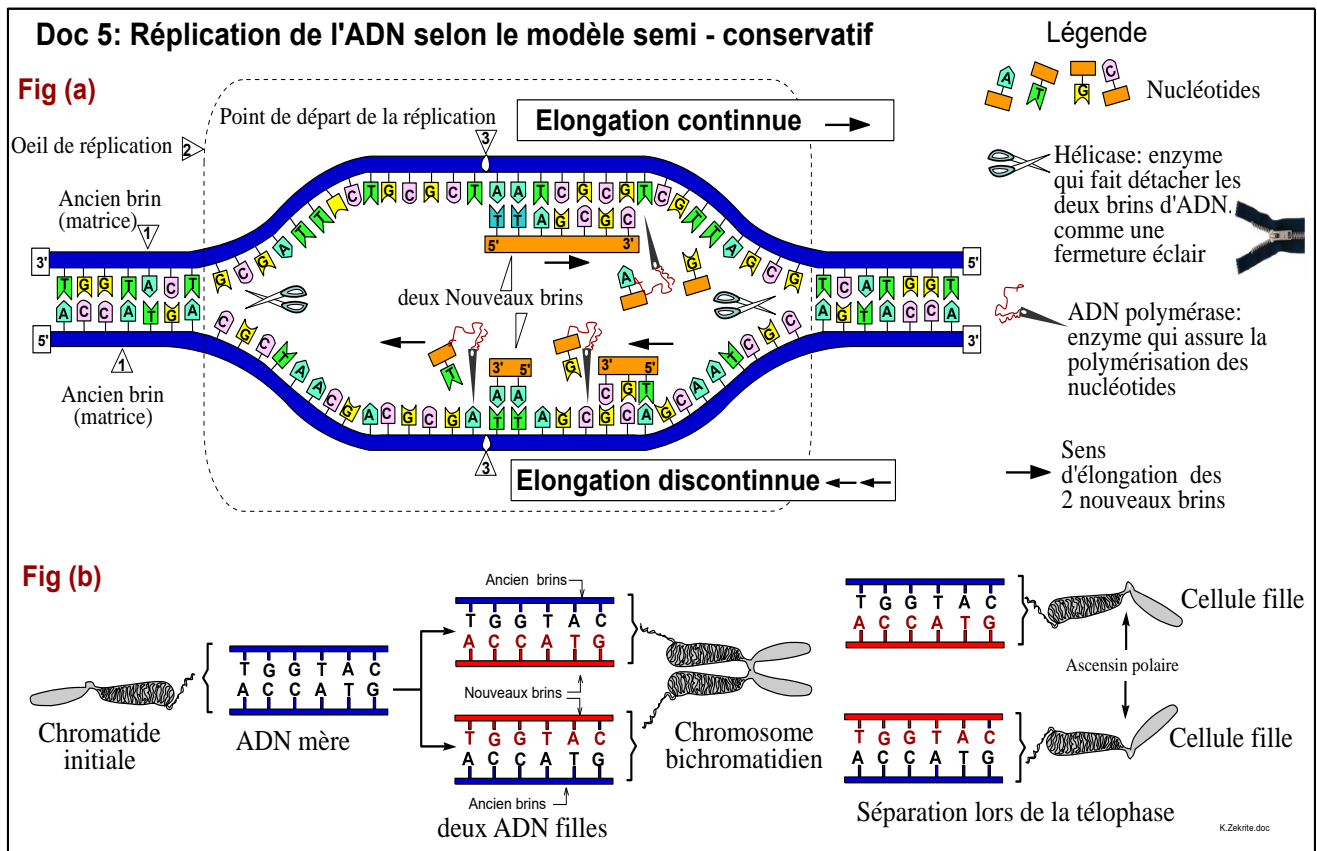
- La duplication d'ADN pendant la phase S de l'interphase, qui est la cause de la duplication du chromosome.

- La séparation des chromatides pendant l'anaphase de la mitose, qui engendre la diminution de la quantité d'ADN et son retour à la quantité initiale. Ainsi en fin de télophase, les deux cellules filles contiennent la même quantité d'ADN.

**Conclusion : Pendant la phase S de l'interphase la cellule se prépare à la division, elle dédouble son information génétique, en effet, chaque molécule d'ADN se duplique, on parle de réplication d'ADN. (نسخ)**

## II/ Mécanisme de la réplication de l'ADN

La réplication d'ADN se déroule selon un modèle semi conservatif : Chaque molécule d'ADN fille conserve la moitié (un brin) de la molécule mère ; alors que l'autre moitié est élaboré en utilisant les nucléotides du milieu de vie.



❖ Une observation de la chromatine en microscopie électronique pendant la phase S de l'interphase, montre l'existence de plusieurs zones appelées « *yeux de réplication* » où la molécule d'ADN est localement en deux exemplaires.

❖ La réplication se produit à l'extrémité de chaque œil et progresse en sens inverse. Les différents yeux de réplication finissent par se rejoindre et la molécule d'ADN est ainsi dupliquée.

❖ Au niveau d'un œil, La réplication se déroule suivant les étapes suivantes :

- Les deux brins de la molécule d'ADN parentale s'écartent par rupture des liaisons hydrogènes qui unissent les bases azotées, Cette ouverture est assurée par une enzyme appelée : **hélicase**.

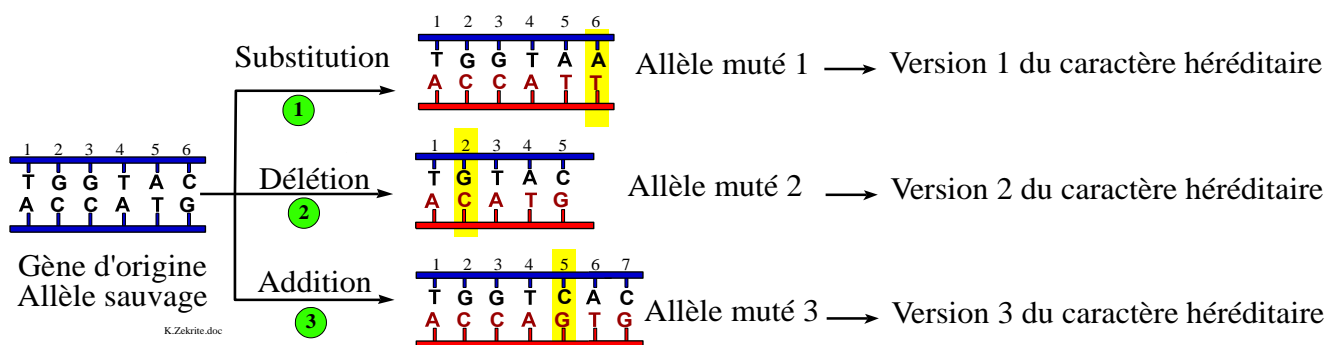
- Les deux brins parentaux jouent le rôle de matrice ( قالب ), en effet, Les nucléotides libres fournis par les nutriments se positionnent en face de leurs bases complémentaires : (A devant T et inversement, C devant G et inversement). **L'ADN polymérase** assure la liaison (la polymérisation) de ces nucléotides entre eux pour former un nouveau brin d'ADN.
- l'ADN polymérase ne peut relier les nucléotides que dans le sens 5' → 3', de ce fait :
  - + l'élongation du brin néo- formé se fait dans le sens 5' → 3'.
  - + Au niveau d'un nœud de réplication, la duplication s'effectue de façon synchrone pour les deux brins, mais suivant deux sens contraires.
- A la fin de la réplication et en absence d'erreur, on obtient deux copies conforme d'ADN, semblables à la molécule mère. Chaque molécule fille est la réplique ( نسخة ) de la molécule mère (ce qui justifie la désignation : réplication d'ADN), elle est composée d'un brin ancien (parental) et d'un brin néo- synthétisé, c'est la réplication semi conservative.
- Les deux copies d'ADN restent accrochées l'une à l'autre au niveau de la zone

### Expression de l'information génétique

#### I/ Notion de caractère héréditaire, mutation, Gène et allèle :

- ❖ **Un caractère héréditaire** est une particularité externe ou interne, qualitative ou quantitative, morphologique ou physiologique qui se transmet de génération en génération, il est programmé au niveau de l'ADN. Ex : Couleur des yeux, nombre de doigts de la main, groupes sanguins, couleur des pétales d'une fleur, forme du petit pois, quelques maladies ...
- ❖ **Un phénotype** : caractère observable d'un individu, Il s'exprime à l'échelle moléculaire (groupes sanguins), cellulaire (pneumocoques R et S) et macroscopique ou individuel (Couleur des pétales, forme de la langue...).
- ❖ **Une mutation** : est une modification brusque de la séquence nucléotidique d'un gène (l'ADN), ce qui entraîne, la plupart du temps, un changement du caractère correspondant. Une mutation est :
  - Spontanée ou provoquée.
  - Rare : une probabilité d'environ  $1/10^8$ .
  - Réversible : (le caractère sauvage ↔ le caractère muté)
  - Généralement les mutations sont indépendantes l'une de l'autre.

#### Les types de mutations



❖ On peut citer trois types de mutations :

- **Mutation par substitution** : remplacement d'un ou de plusieurs nucléotides par un autre (d'autres).
- **Mutation par délétion** : perte d'un ou de plusieurs nucléotides.
- **Mutation par insertion** : addition d'un ou de plusieurs nucléotides.

❖ **Un gène** : est une portion de chromosome (donc d'ADN) qui gouverne un caractère héréditaire. L'emplacement de chaque gène sur un chromosome s'appelle **locus**, cet emplacement reste fixe chez les individus de la même espèce, exemple, chez l'Homme : le gène qui détermine le groupe rhésus est porté par le chromosome n° 1, le gène qui détermine le groupe sanguin (ABO) est porté par le chromosome n° 9 (voir la figure de la couverture). Sur un même chromosome on trouve plusieurs gènes, par exemple, chez l'Homme : le chromosome n° 1 contient 2281 gènes, le chromosome Y comporte 104 gènes.

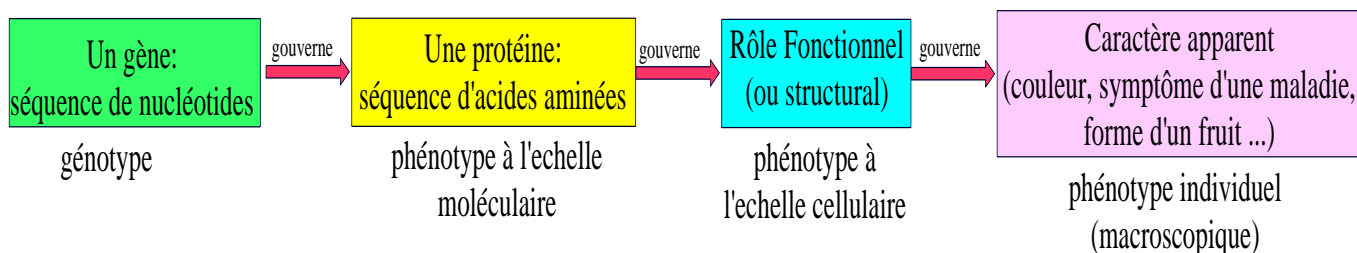
❖ **Génome** : l'ensemble des gènes d'un individu.

❖ **Génotype** : l'ensemble des gènes (allèles) concernant les caractères étudiés.

❖ **Un allèle** : est une version d'un même gène occupant un même locus, qui peut varier d'un individu à l'autre. Au sein d'une même espèce. Le génome d'un individu est différent de celui d'un autre individu, c'est le polymorphisme génétique. Ce polymorphisme est dû aux mutations. Exemple: l'un des gènes du chromosome 9 chez l'humain détermine le groupe sanguin, il peut exister sous trois versions différents: l'allèle A, l'allèle B et l'allèle O.

## II/ Relation gène protéine caractère

❖ Il y'a une relation : gène → protéine → caractère : en effet, un gène étant une séquence ordonnée de nucléotides (niveau génétique), cette séquence code pour une séquence d'acides aminés, correspondant à une protéine donnée (niveau moléculaire), La protéine synthétisée effectue une fonction déterminée ou bien joue un rôle structural dans la cellule (niveau cellulaire), par conséquent apparait un phénotype macroscopique. Le phénotype est donc caractérisé à différentes échelles : individuel, cellulaire et moléculaire et il est le résultat de l'expression du génotype.

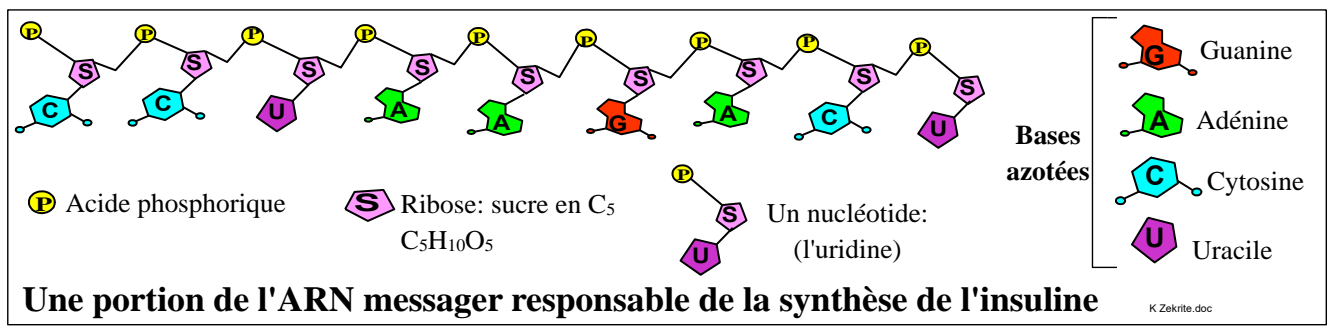


Le génotype gouverne le phénotype à différents niveaux

## III/ L'ARNm intermédiaire entre les gènes et les protéines

❖ L'ARN messager (ARNm) est un intermédiaire portant les informations génétiques de l'ADN au cytoplasme. Il est synthétisé dans le noyau au cours d'un processus appelé **transcription** et assure, au niveau du cytoplasme, l'assemblage des acides aminés pour donner une protéine par un processus appelé **Traduction = Lecture**.

❖ La molécule d'ARN est plus courte que celle de l'ADN, et par conséquent, sa masse moléculaire est inférieure à celle de l'ADN. Sa durée de vie est courte, elle est rapidement dégradée juste après la synthèse de la protéine. Il existe trois types d'ARN dans la cellule : ARN messager : ARNm ; ARN de transfert : ARNt ; ARN ribosomal : ARNr.



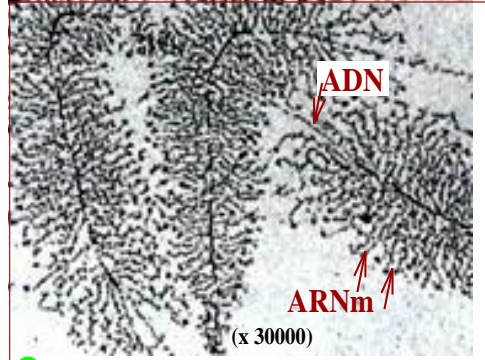
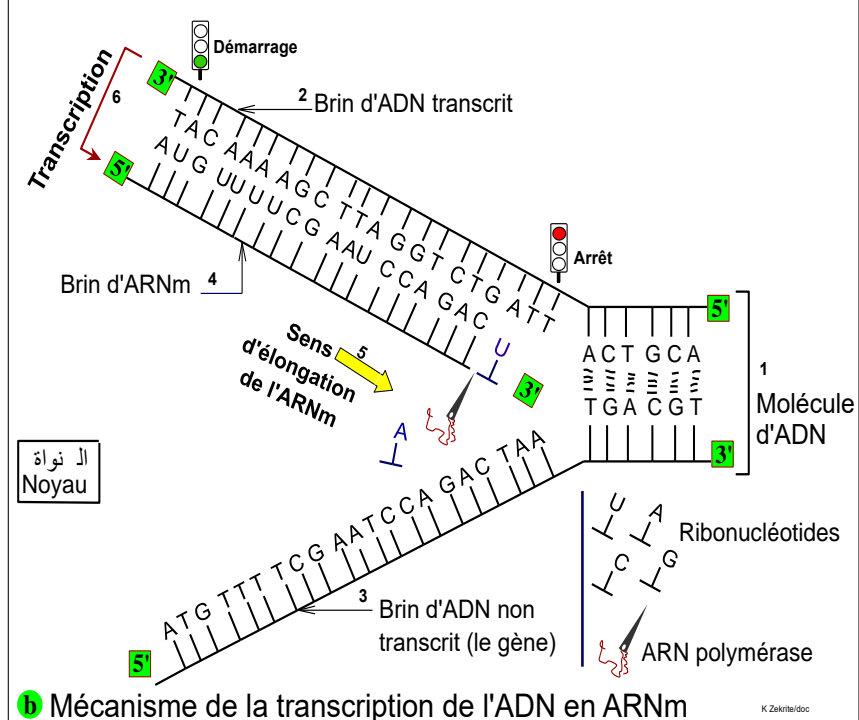
❖ La molécule d'ADN et la molécule d'ARN sont toutes les deux constituées d'une séquence de nucléotide, les différences entre les deux sont citées dans le tableau suivant :

	L'ADN	L'ARN
Le sucre	Désoxyribose : $C_5H_{10}O_4$	Ribose : $C_5H_{10}O_5$
Nombre de brins	Deux brins en double hélice	Un seul brin
Les bases azotées	A ; C ; G ; T	A ; C ; G ; U : U remplace T de l'ADN

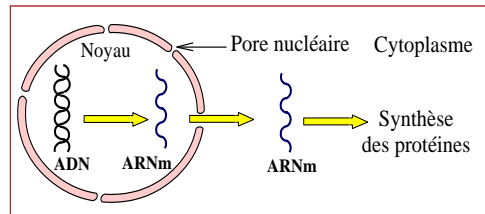
❖ L'ARNm comme l'ADN est une succession de 4 nucléotides différents, le nombre l'agencement et les types de nucléotides dans un fragment donné d'ADN ou d'ARN, définissent des informations génétiques.

### III/ La transcription : Synthèse de l'ARNm à partir de l'ADN

❖ La transcription est l'opération de copiage de l'ADN en ARNm, elle se déroule dans le noyau pendant la phase S de l'interphase.



**a Electronographie montrant des molécules d'ARNm en cours de synthèse**



**c Migration de l'ARNm du noyau vers le cytoplasme**

- ❖ La transcription se déroule suivant les étapes suivantes :
  - Séparation des deux brins d'ADN
  - Des nucléotides viennent s'apparier (تطابق) aux nucléotides de l'un des brins d'ADN.
  - L'ARNm est synthétisé par polymérisation des nucléotides sous l'action de **l'ARN polymérase**: L'ARN polymérase permet l'établissement des liaisons chimiques entre les nucléotides.
  - L'appariement des nucléotides respecte la complémentarité des bases azotées : la cytosine se place devant la guanine et inversement. L'adénine se place devant la thymine et l'uracile se place devant l'adénine.
  - On appelle ce mécanisme de copiage : **la transcription**, le brin servant de modèle à l'ARNm est appelé **brin transcrit**.
  - L'ARNm s'allonge dans **le sens 5' → 3'**, qui est le sens d'avancement de l'ARN polymérase. Cette enzyme se détache lorsqu'elle rencontre un code qui indique la fin du gène, ainsi la transcription prend fin.
- ❖ Le brin d'ARNm ainsi synthétisé est complémentaire du brin d'ADN non transcrit. L'information contenue dans l'ARNm est identique à celle du brin non transcrit, le nucléotide uracile (U) occupe dans l'ARNm la place du nucléotide thymine (T) de l'ADN.
- ❖ La transcription de l'ADN n'est pas totale ; elle est discontinue et produit des molécules d'ARNm plus courtes que celles d'ADN. Seules les séquences portant les gènes sont transcrites.
- ❖ Après sa transcription, l'ARNm formé, **quitte** le noyau vers le cytoplasme à travers les pores nucléaires pour jouer le rôle d'**intermédiaire** entre l'ADN et la synthèse des protéines.

#### IV : La traduction de l'ARNm en protéine

La traduction est le processus qui consiste à « lire » les informations contenues dans l'ARNm et à les convertir en une séquence d'acides aminés : protéine, elle se déroule dans le cytoplasme

##### 1/ Le code génétique

Tableau du code génétique

		2 <sup>ème</sup> lettre				
		U	C	A	G	
1 <sup>ère</sup> lettre	U	UUU] phénylalanine UUC] ] UUA] leucine UUG] ]	UCU] sérine UCC] ] UCA] ] UCG] ]	UAU] tyrosine UAC] ] UAA] non sens UAG] ]	UGU] cysteine UGC] ] UGA non sens UGG] tryptophane	3 <sup>ème</sup> lettre
	C	CUU] leucine CUC] ] CUA] ] CUG] ]	CCU] proline CCC] ] CCA] ] CCG] ]	CAU] histidine CAC] ] CAA] glutamine CAG] ]	CGU] arginine CGC] ] CGA] ] CGG] ]	
	A	AUU] isoleucine AUC] ] AUA] ] AUG] méthionine	ACU] thréonine ACC] ] ACA] ] ACG] ]	AAU] asparagine AAC] ] AAA] lysine AAG] ]	AGU] sérine AGC] ] AGA] arginine AGG] ]	
	G	GUU] valine GUC] ] GUA] ] GUG] ]	GCU] alanine GCC] ] GCA] ] GCG] ]	GAU] acide GAC] aspartique GAA] acide GAG] glutamique	GGU] glycine GGC] ] GGA] ] GGG] ]	

❖ Les types d'acides aminés incorporés dans la protéine dépendent des types de nucléotides qui forment l'ARNm, il y'a donc une correspondance entre les nucléotides et les acides aminés ; ce qui impose que la succession de nucléotides de l'ARNm se traduit (traduction = lecture) en une séquence d'acide aminé tout en respectant un code génétique.

❖ **Un codon** : Séquence de trois nucléotides portés par l'ARNm correspondant à un acide aminé ou à un codon stop.

❖ **Le code génétique** repose sur la correspondance entre, d'une part, des **codons** portés par l'**ARN messager** et, d'autre part, les acides aminés incorporés dans les protéines synthétisées. Le code génétique est universel, il est le même quelle que soit la cellule vivante considérée. N'importe quelle cellule est capable de « lire » un gène provenant de n'importe qu'elle autre espèce et de produire la protéine correspondante.

❖ Le code génétique comporte 64 triplets ou codons. A trois exceptions près, chaque codon sur l'ARNm correspond un acide aminé donné.

❖ Un même acide aminé peut être codé par plusieurs codons différents. En revanche, un même codon, code toujours, le même acide aminé.

❖ Trois codons ne désignent aucun acide aminé (codons stop), ils correspondent à un signal de ponctuation, qui marque la fin de la synthèse de la protéine.

## 2/ Les éléments nécessaires à la traduction :

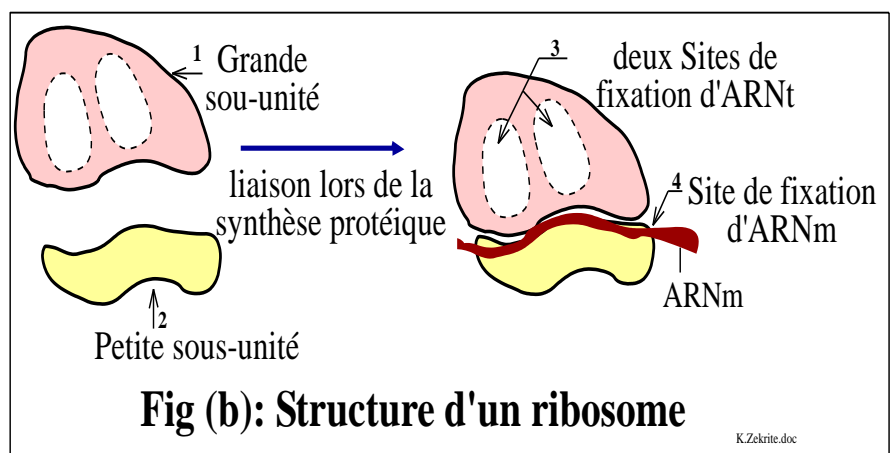
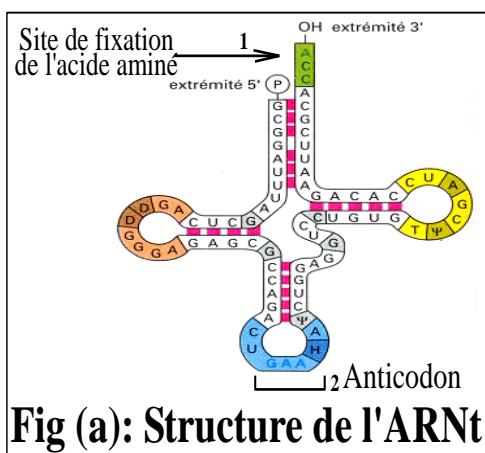
La traduction fait intervenir les éléments suivants :

- L'ARNm en provenance du noyau porte le message du gène et les acides aminés, éléments de base des protéines.

- Les ribosomes : organites cellulaires formés d'ARN ribosomique et de protéines. Ils sont constitués de deux sous unités une plus petite qui « lit » l'ARN messager et une plus grosse qui se charge de la polymérisation des acides aminés pour former la protéine correspondante. Ils sont les sites d'incorporation des acides aminés.

- L'ARN de transfert (ARNt) qui a pour rôle de transporter les acides aminés vers les ribosomes.

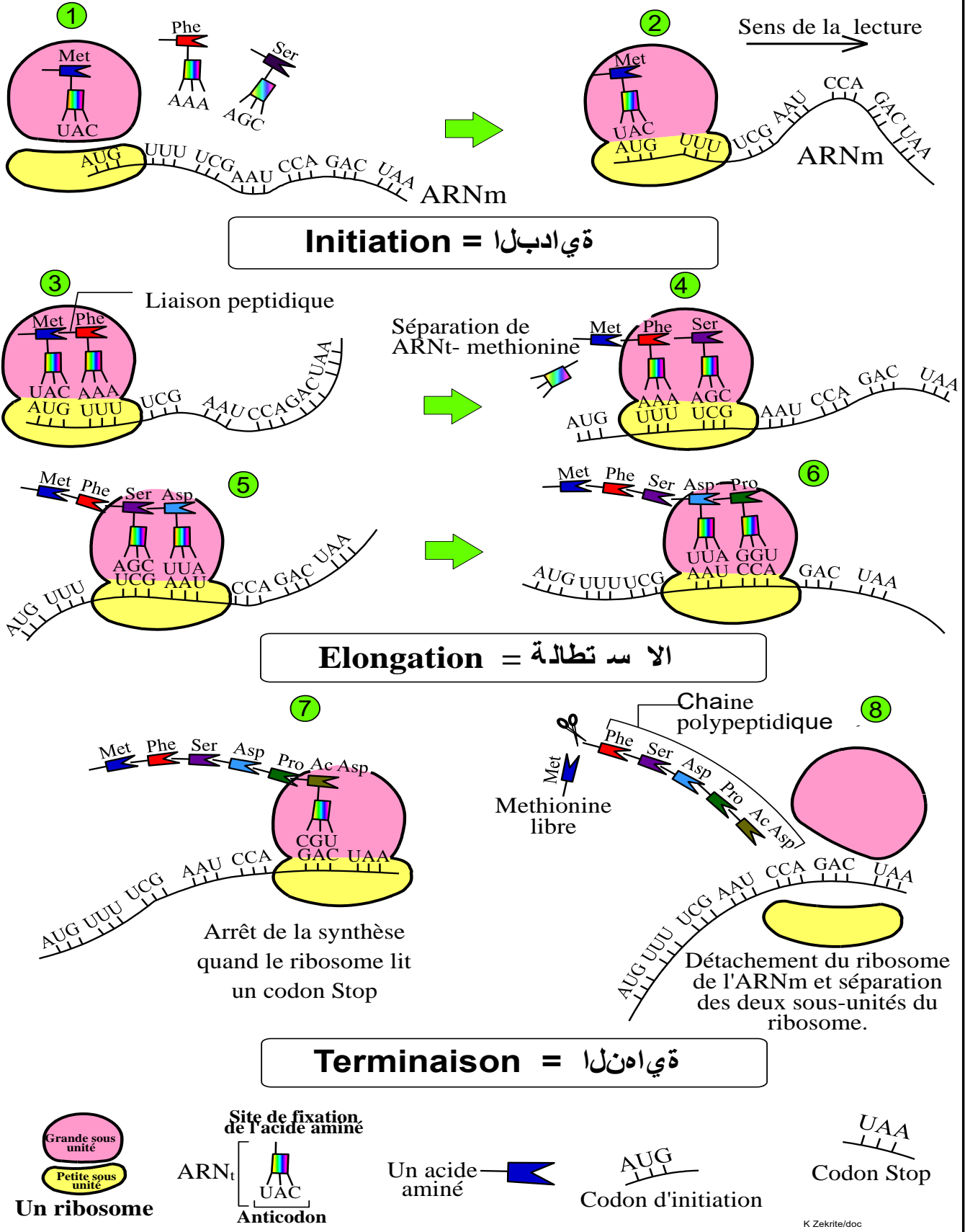
- Les acides aminés : élément de base des protéines.



K.Zekrite.doc

### 3/ Les étapes de la traduction

## Doc 5: Les trois étapes de la traduction



La traduction est le décodage de l'information génétique portée par l'ARNm en une protéine (succession d'acides aminés). Elle a lieu dans le cytoplasme et se déroule en trois étapes :

① **L'initiation** : au cours de laquelle la petite sous unité du ribosome se fixe au niveau d'un triplet de l'ARNm. Ce triplet est toujours le codon AUG qui code pour la méthionine. C'est le codon d'initiation. Il y'a lecture de ce codon par le ribosome ce qui entraîne l'appel d'un ARNt à anticodon complémentaire (UAC), et porteur de l'acide aminé correspondant : la méthionine. La grande sous unité s'installe, ainsi le ribosome devient fonctionnel.

② **L'élongation** :

- La lecture du 2<sup>ème</sup> codon de l'ARNm fait venir un 2<sup>ème</sup> ARNt à anticodon complémentaire et porteur d'un 2<sup>ème</sup> acide aminé bien déterminé par le code génétique.
- Une *liaison peptidique* s'établit entre le 1<sup>er</sup> et le 2<sup>ème</sup> acide aminé.
- Le 1<sup>er</sup> ARNt est libéré dans le cytoplasme.
- Le ribosome se déplace alors sur l'ARNm au niveau d'un 3<sup>ème</sup> codon.
- La lecture de l'ARNm recommence : il y'a appel d'un 3<sup>ème</sup> ARNt et mise en place d'un 3<sup>ème</sup> acide aminé. Le polypeptide à trois acides aminés ainsi formé peut continuer à s'allonger par la mise en place d'autres acides aminés grâce à la succession des mêmes événements (association codon- anticodon → formation de liaison peptidique entre deux acides aminés → déplacement du ribosome).

③ **La terminaison** : Lorsque le ribosome arrive à un *codon Stop* (UGA ou UAG ou UAA), la traduction s'arrête car aucun ARNt ne contient l'anticodon correspondant à l'un de ces trois codons. Il y'a dissociation des deux sous-unités du ribosome et libération du polypeptide dans le cytoplasme.

**Remarque :**

Sur une même molécule d'ARNm, se placent plusieurs ribosomes les uns à la suite des autres, cela forme une structure sous forme d'un collier appelée **polysome** ou **polyribosome**.

## Rôle de la reproduction sexuée dans la transmission de l'information génétique et de la stabilité du caryotype.

La reproduction sexuée implique la participation de deux organismes parentaux de la même espèce, de sexe différents. Ce mode de reproduction fait intervenir deux phénomènes fondamentaux :

- la formation des gamètes, cellules haploïdes, ne contenant qu'un exemplaire de chacun des chromosomes caractéristiques de l'espèce et qui sont issues d'une division particulière appelée **la méiose**.

- **La fécondation** : Union des deux gamètes mâle (♂) et femelle (♀), et qui aboutit à la formation d'une cellule appelée œuf, cette cellule subit une intense multiplication par des mitoses successives pour donner un nouveau-né unique génétiquement (à l'exception des vrais jumeaux). Si un individu est unique, c'est que le programme génétique dans la cellule-œuf est unique génétiquement.

### I/ Les étapes de la méiose

❖ Seules les cellules germinales (héréditaires = cellules mères des gamètes) subissent la méiose. Elle se trouve au niveau des organes génitaux :

- au niveau des testicules chez les mâles d'animaux et au niveau des ovaires chez les femelles.

- au niveau des organes sexuels de la fleur (anthère et ovaire) chez les végétaux à fleurs.

❖ La méiose est la succession de deux divisions cellulaires :

■ La première division = **division réductionnelle** : elle sépare les chromosomes homologues et aboutit à la formation de 2 cellules à  $n$  chromosomes à 2 chromatides.

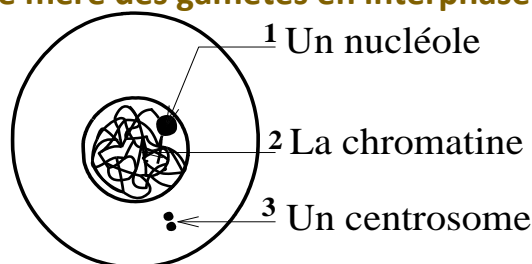
■ La deuxième division = **division équationnelle** : elle sépare les chromatides de chaque chromosome et permet la formation de 4 cellules à  $n$  chromosomes à une seule chromatide et donc réduit la quantité d'ADN.

❖ Chacune des deux divisions est constituées de 4 étapes : la prophase, la métaphase, l'anaphase et la télophase. Seule la première division est précédée d'une interphase, il n'y a pas d'interphase entre la division réductionnelle et équationnelle, en effet à la fin de la 1<sup>ère</sup> division les chromosomes sont encore dédoublés.

❖ La méiose permet la réduction du nombre de chromosomes et la quantité d'ADN : une cellule germinale diploïde produit 4 cellules haploïdes

### Les étapes de la méiose chez une cellule animale :

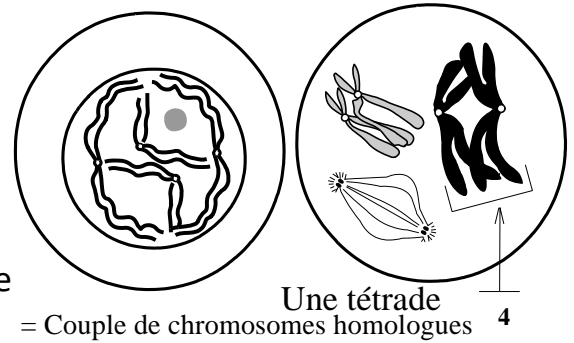
#### Cellule mère des gamètes en interphase (2n)



## 1/ Division réductionnelle

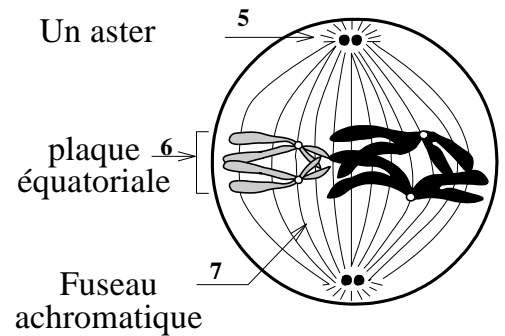
### Prophase I :

- Disparition de la membrane nucléaire et du nucléole.
- Formation du fuseau achromatique
- Condensation de la chromatine en chromosomes.
- Les chromosomes homologues constitué chacun de deux chromatides se rapprochent, deux à deux formant des **tétrades**. Cet appariement donne  $n$  paires de tétrades.



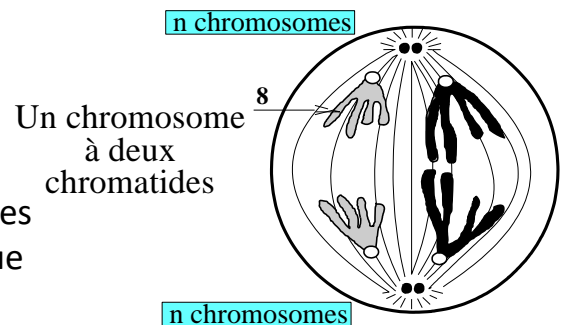
### Métaphase I

- Les paires de chromosomes homologues se placent dans le plan équatorial de la cellule formant la plaque équatoriale.
- Les deux chromosomes de chaque paire se font face car leurs centromères sont disposés de part et d'autre de la plaque équatoriale.



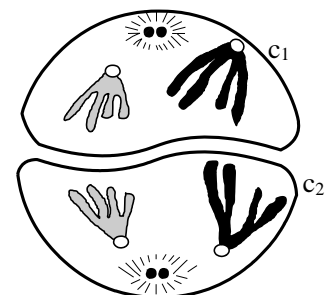
### Anaphase I

- Les chromosomes homologues de chaque paire se séparent sans scission de leur centromère et ils migrent chacun vers un pôle de la cellule, on parle de disjonction des chromosomes homologues.
- Il y'a, alors, formation de deux lot de  $n$  chromosomes se dirigeant chacun, vers un pôle de la cellule. Chaque chromosome est bichromatidien.



### Télophase I

- Les chromosomes de chaque lot, toujours constitués de deux chromatides, arrivent à un pôle de la cellule et se rassemblent
- Division du cytoplasme (cytodiérèse) et formation de **deux cellules filles haploïdes**.

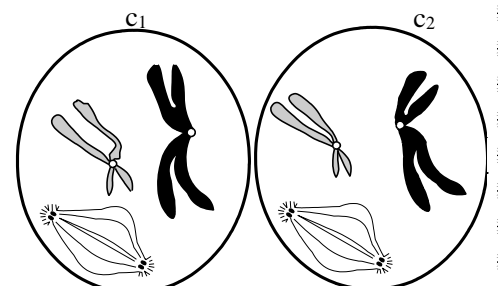


Deux cellules filles ( $n$ )

## 2/ Division équationnelle :

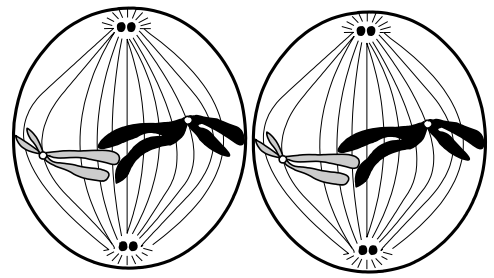
### Prophase II

- Formation du fuseau achromatique dans chaque cellule fille.
- Maintien des chromosomes dédoublés (pas de tétrades)



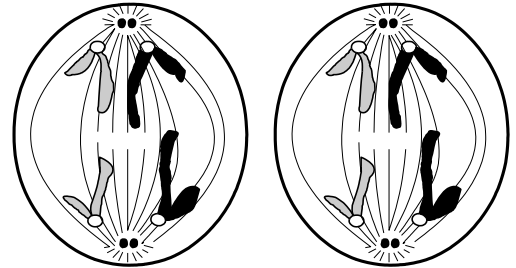
## Métaphase II

Disposition des chromosomes bichromatidiens dans le plan équatorial de la cellule, ce qui définit la plaque équatoriale.



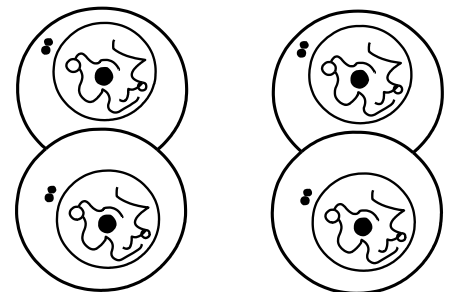
## Anaphase II

- Les chromatides soeurs de chaque chromosome se séparent après rupture de leur centromère et migrent vers les pôles opposés de la cellule.
- Ainsi il se forme à chaque pôle des deux cellules n chromosomes, chacun contient un seul chromatide



## Télophase II

- Décondensation des chromosomes en chromatine, formation de l'enveloppe nucléaire et du nucléole.
- Division du cytoplasme de chacune des deux cellules, ainsi il se forme quatre cellules filles haploïdes.

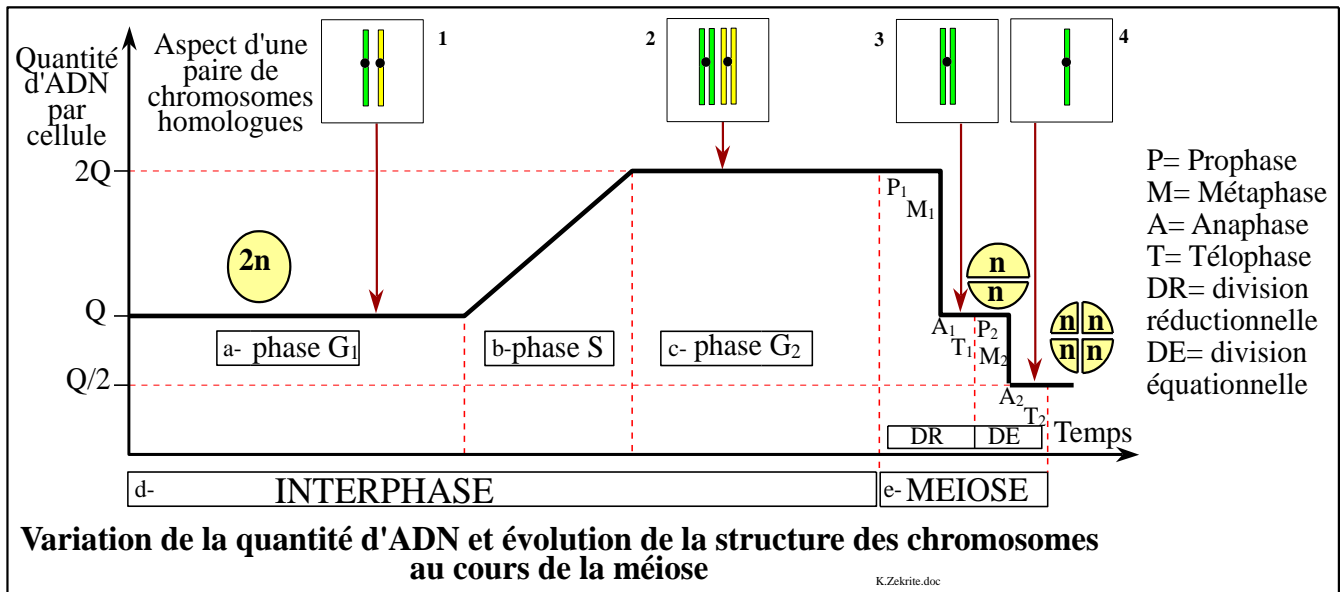


Quatre cellules filles (n)

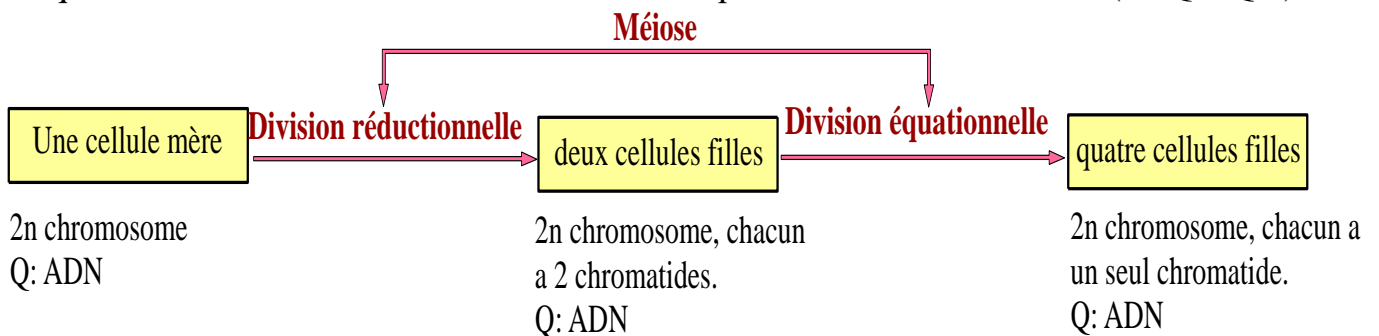
## Conclusion :

- ❖ La méiose produit 4 cellules filles haploïdes à partir d'une cellule mère diploïde.
  - ❖ L'étape fondamentale assurant la réduction du nombre de chromosomes est l'anaphase de la division réductionnelle, les deux chromosomes homologues de chaque paire se disjoignent, sans division des centromères, puis s'éloignent l'un de l'autre, ils se retrouvent finalement chacun dans une cellule fille différente. Ainsi, chaque cellule provenant de cette première division ne recevant que l'un ou l'autre des deux chromosomes d'une même paire d'homologues, contient n chromosomes différents : elle est haploïde.
  - ❖ *Pendant l'anaphase I, les chromosomes homologues se séparent et implicitement la paire des chromosomes sexuels, de ce fait :*
    - *L'homme produit deux types de gamètes :*
      - + des spermatozoïdes contenant le chromosome sexuel X ( $n = 22A + X$ ).
      - + des spermatozoïdes contenant le chromosome Y ( $n = 22A + Y$ ).
    - *La femme produit un seul type de gamète ( $n = 22A + X$ ).*
- On dit que la femme est homogamétique alors que l'homme est hétérogamétique.

## II/ Variation de la quantité d'ADN au cours de la méiose :



- ★ La méiose est précédée par **la réplication de l'ADN pendant la phase S de l'interphase**, ce qui conduit à un dédoublement de sa quantité (de Q à 2Q) et la transformation des chromosomes monochromatidiens en chromosomes bichromatidiens.
- ★ Pendant l'anaphase de la division réductionnelle, les chromosomes homologues se séparent, ce qui entraîne la diminution de la quantité d'ADN de moitié (de 2Q à Q).
- ★ Pendant l'anaphase de la division équationnelle, les chromatides de chaque se séparent, ce qui entraîne une deuxième diminution de la quantité d'ADN de moitié (de Q à Q/2).



## III/ Rôle de la méiose dans le brassage des chromosome et la diversité des gamètes

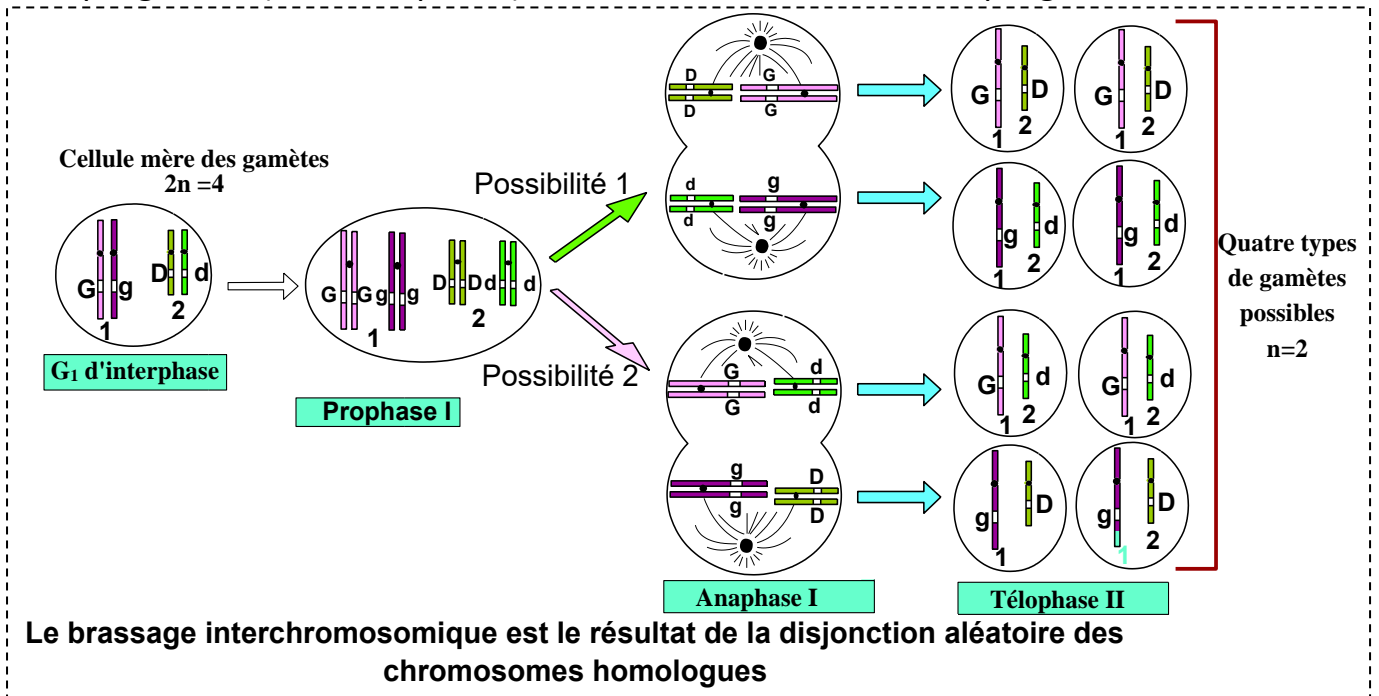
### 1/ Brassage interchromosomique et diversité des gamètes (voir schéma):

La méiose permet :

- ❖ **La réduction du nombre de chromosomes** : la méiose permet le passage de la diploidie (2n) à l'haploidie (n).
- ❖ **Le brassage interchromosomique** : lors de l'anaphase I de la division réductionnelle, les chromosomes homologues se répartissent au hasard, le chromosome d'une paire peut se mélanger avec l'un ou l'autre chromosome d'une deuxième paire, ceci est valable pour les n paires de la cellule mère diploïde. Cette disjonction aléatoire conduit à des multitudes de combinaisons possibles des chromosomes, on parle de.
- ❖ **La diversité des gamètes** : les chromosomes homologues peuvent porter des allèles

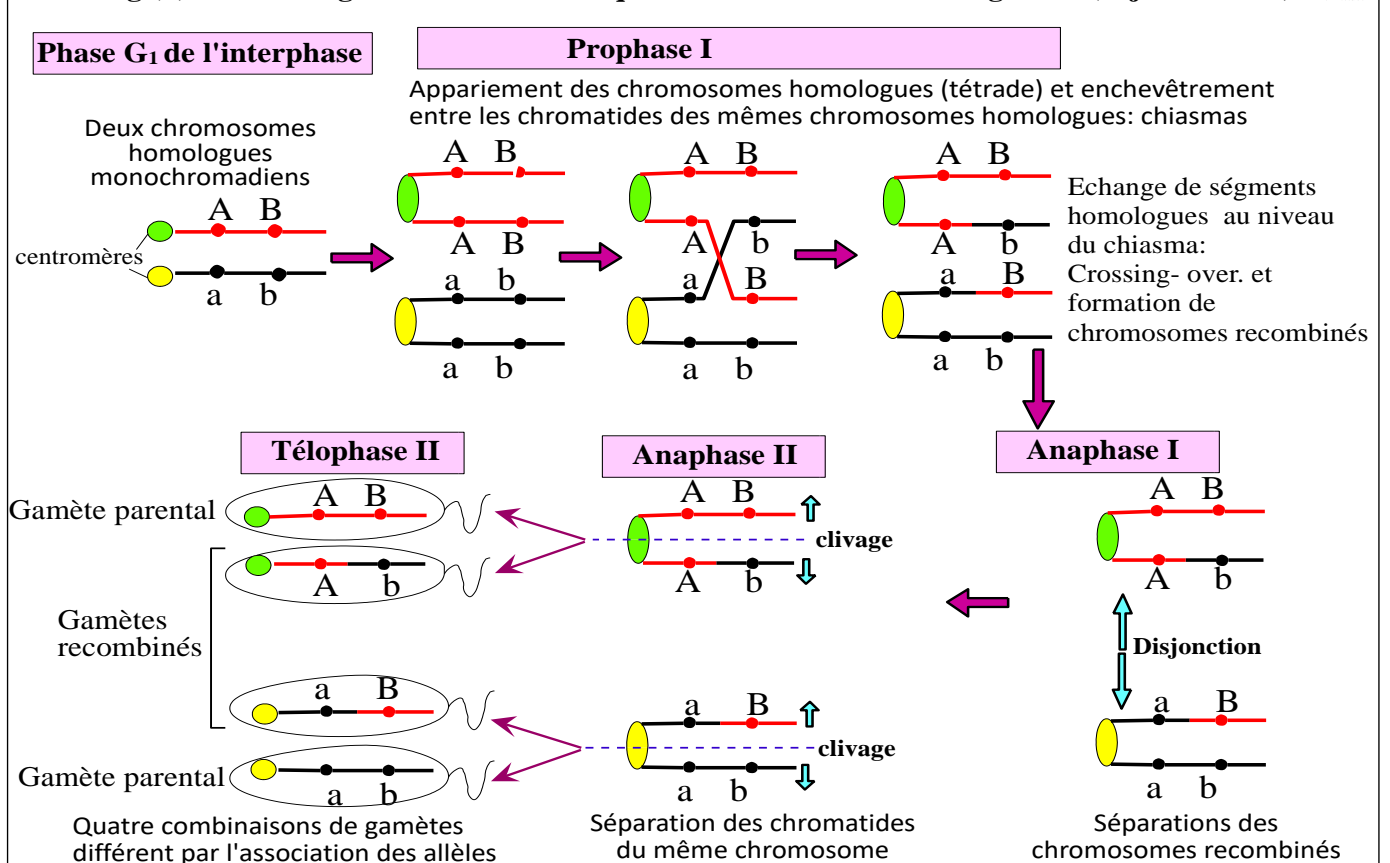
différents, leur répartition au hasard par le brassage interchromosomique entraîne un très grand nombre de combinaisons alléliques possibles dans les gamètes.

❖ **La disjonction des allèles du même gène** : la séparation des chromosomes homologues en anaphase I aboutit à la séparation des allèles du même gène, ainsi chaque gamète (cellule haploïde) contient un seul allèle de chaque gène.



## 2/ Brassage intrachromosomique et diversité des gamètes :

Fig (b): Le brassage intrachromosomique est le résultat du crossing-over (enjambement)



✿ Pendant chaque méiose, sauf cas exceptionnel, il peut se produire un échange réciproque de fragments de chromatides appartenant à deux chromosomes homologues : c'est le phénomène **d'enjambement = crossing-over** qui survient pendant la prophase I (donc avant la séparation anaphasique). Ainsi des allèles portés initialement par un chromosome, peuvent grâce aux crossing-over être « brassés » avec les allèles portés par le chromosome homologue. De nouvelles associations d'allèles sont ainsi créés donnant naissance à **des chromatides recombinés** différents génétiquement des **chromatides parentaux**. Ce brassage due aux crossing-over est appelé **brassage intrachromosomique**.

✿ Le brassage intrachromosomique permet **l'amplification de la diversité des gamètes** produites, le nombre de possibilité pour les gamètes devient gigantesque.

#### IV/ Rôle de la fécondation dans le brassage des chromosomes et la diversité des œufs :

❖ La fécondation, événement central de la reproduction sexuée, consiste en une fusion d'un gamète mâle haploïde et un gamète femelle haploïde, elle aboutit à la formation d'une cellule appelée œuf ou zygote diploïde. La fécondation permet donc le retour à la diploïdie (2n).

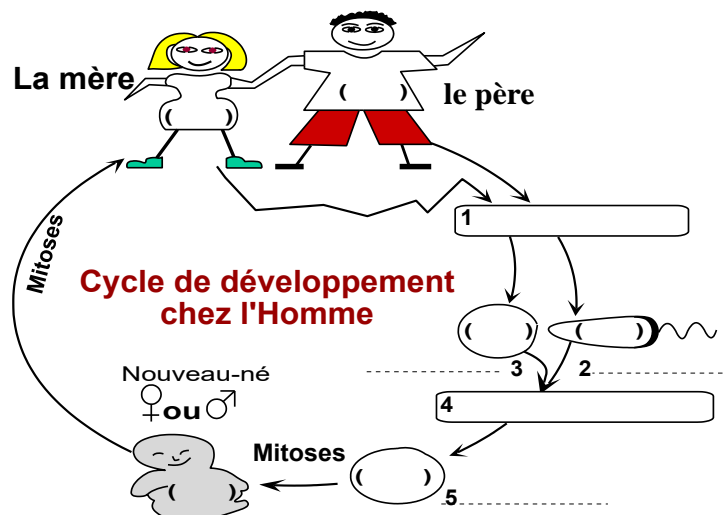
❖ La fécondation permet l'union des chromosomes homologues et le rassemblement des allèles du même gène. Le chromosome de chaque paire du caryotype d'un individu est d'origine paternel, son homologue est d'origine maternel.

❖ Lors de la fécondation, l'union des gamètes se fait au hasard. Comme chaque gamète apporte son propre groupe d'allèles, la fécondation entraîne de nouvelles combinaisons d'allèles. Le nombre de combinaisons génétiques différentes entre un ovule et un spermatozoïde est considérable. **La fécondation amplifie donc le brassage génétique ce qui approfondie la diversité génétique des individus.**

❖ Les gamètes femelles portant le chromosome sexuel X, peuvent au hasard rencontrer le spermatozoïde contenant le chromosome X ou le spermatozoïde portant le chromosome Y, c'est ce qui permet d'expliquer le sexe du nouveau-né. En général, il naît autant de garçons que de filles.

#### V/ Rôle de la méiose et la fécondation dans la stabilité du matériel héréditaire chez l'espèce.

- 1 = Méiose
- 2 = Gamète mâle (n)
- 3 = Gamète femelle (n)
- 4 = Fécondation
- 5 = Œuf (2n)



❖ L'alternance de la méiose et de la fécondation lors de la reproduction sexuée, assure donc le maintien du bagage chromosomique caractéristique de chaque espèce : la méiose produit des cellules haploïdes à partir des cellules germinales parentales diploïdes, alors que la fécondation fusionne les gamètes haploïdes et rétabli de nouveau l'état diploïde.

❖ La reproduction sexuée ne crée pas de nouveaux gènes mais elle invente un nouveau mélange génétique en créant de nouvelles combinaisons de gènes, c'est ce qui explique le fait que les descendants présentent des traits empruntés à l'un ou l'autre des parents, mais ils ne sont pas identiques ni à l'un des parents ni à leurs frères et sœurs. Chaque individu possède un génotype et un phénotype unique.

❖ **Le polymorphisme génétique** est dû aux mutations qui créent de nouveaux allèles et à la reproduction sexuée qui par le brassage inter et intra-chromosomique crée de nouvelles combinaisons d'allèles.

### **Les lois statistiques de la transmission des caractères héréditaires chez les diploïdes**

❖ La génétique est une partie de la biologie qui étudie la transmission des caractères héréditaires et les propriétés des gènes.

#### **I/ Quelques définitions :**

**Race ou lignée pure** : lignée dont laquelle le patrimoine héréditaire est identique, et les croisements entre ses individus donnent des descendants semblables et identique aux parents pour ce caractère.

**Individu homozygote = de race pure** : se dit d'un individu dont les cellules contiennent deux allèles identiques d'un gène donné (exemple A//A ou Xb//Xb).

**Individu hétérozygote = hybride** : se dit d'un individu dont les cellules contiennent deux allèles différents d'un gène donné (exemple A//a ou XB//Xb).

**Hybridation** : Croisement entre deux individus de même espèce ayant des génotypes ou des phénotypes différents concernant le même caractère héréditaire. L'hybridation participe dans la diversité des phénotypes (polymorphisme).

**Monohybridisme** : le monohybridisme est l'étude de la transmission d'un seul caractère héréditaire présentant deux formes alléliques différentes (un seul gène = un couple d'allèles).

**Dihybridisme** : Etude de la transmission de deux caractères héréditaires présentant 4 formes alléliques différentes (deux gènes = deux couples d'allèles).

**Allèle dominant** est un allèle dont l'expression confère à la cellule et/ou à l'organisme son phénotype chez un hybride. Par convention l'allèle dominant est représenté par une lettre majuscule.

**Allèle récessif** est un allèle dont l'expression est masqué et non visible dans le phénotype de la cellule et/ ou de l'organisme chez un hybride. Par convention, l'allèle récessif est représenté par une lettre minuscule.

**Codominance = dominance intermédiaire** : c'est une expression phénotypique intermédiaire entre celle des deux parents chez un hétérozygote de la génération F1. Exemple si on croise deux lignées pures de plantes, l'une à fleurs rouge et l'autre à fleurs blanches, si on obtient des individus F1 portant des fleurs rose, on dirait qu'il s'agit d'une codominance. La codominance est un facteur de diversité des phénotypes (polymorphisme génétique).

**Génération homogène** : Génération dont tous les individus ont le même phénotype.

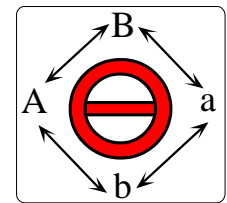
**Génération hétérogène** : Génération dont tous les individus n'ont pas le même phénotype.

## II/ Démarche de la génétique Mendélienne:

- ❖ La génétique Mendélienne repose sur une démarche expérimentale qui consiste :
  - La sélection de lignées pures pour un caractère donné chez l'être choisi pour l'étude.
  - Réaliser des croisements d'hybridation entre les individus choisis, différents par un seul caractère ou plus.
  - Exploiter les résultats :
    - Etude statistique des différents phénotypes obtenus.
    - Analyse des statistiques : on utilise les statistiques de chaque croisement pour tirer des conclusions concernant le mode de transmission du caractère.
    - Interprétation génétique des statistiques : pour effectuer l'interprétation chromosomique des résultats d'un croisement, on doit
      - Déterminer les génotypes des parents croisés.
      - Présenter les deux phénomènes de la reproduction sexuée: la méiose, qui permet la disjonction des chromosomes homologues et donc la séparation des allèles de chaque gène et la fécondation, qui permet la rencontre des chromosomes homologues des parents et donc la rencontre des allèles du même gène.
- ❖ L'interprétation chromosomique des résultats d'un croisement repose sur des conventions d'écriture :
  - ◆ Le caractère est représenté le plus souvent par la première lettre de sa nomenclature latine.
  - ◆ L'allèle dominant est représenté par une lettre majuscule. L'allèle récessif est représenté par une lettre minuscule.
  - ◆ Dans le cas de la codominance on représente le plus souvent les deux allèles par des lettres majuscules.
  - ◆ Le phénotype s'écrit entre crochets [ ], en utilisant le plus souvent les mêmes symboles que les allèles qui le déterminent.
  - ◆ Le génotype s'écrit entre parenthèse, en utilisant des symboles pour chaque allèle considéré. Chaque chromosome est représenté par une barre horizontale (ou oblique)
  - ◆ Un croisement est symbolisé par une croix (x).

### III/ Les lois de Mendel

- ❖ La génétique Mendélienne obéit aux lois de Mendel : La 1<sup>ère</sup>, la deuxième et la troisième loi de Mendel.
- ❖ La première et la deuxième loi de Mendel s'appliquent dans le cas du monohybridisme et du dihybridisme, alors que la troisième loi de Mendel s'applique seulement au dihybridisme.
- ❖ **Première loi de Mendel = loi de l'uniformité des hybrides** : « Si l'on croise deux races pures distinctes par un seul caractère, tous les descendants de la première génération (F<sub>1</sub>), sont identiques (même phénotype et même génotype) et hybrides (hétérozygotes) »
- ❖ **Deuxième loi de Mendel = loi de disjonction des allèles ou loi de pureté des gamètes** : « Les deux allèles d'un même gène se séparent lors de la formation des gamètes (méiose). Chaque gamète ne contient que l'un ou l'autre allèle. On dit que le gamète (cellule haploïde) est ***pur***. »
- ❖ **Troisième loi de Mendel : Loi d'indépendance des couples d'allèles** : « Lors de la formation des gamètes les paires d'allèles se séparent de façon indépendante, autrement dit la ségrégation du couple d'allèles (A, a) déterminant un caractère donné se fait de manière indépendante de la ségrégation du couple d'allèles (B, b) déterminant un autre caractère dont le gène est porté par une paire de chromosome différente au premier, le schéma ci-contre représente la séparation de ces allèles selon la 3<sup>ème</sup> loi de Mendel. »



### III/ Les types de croisements :

- ❖ **Croisement des parents P de race pure** : par exemple : P1 souris à pelage noir x P2 souris à pelage blanc. Ces croisements donnent une première génération de descendance symbolisée par F<sub>1</sub>
- ❖ **Croisement des hybrides**: F<sub>1</sub> x F<sub>1</sub>, ces croisements donnent une deuxième génération de descendance symbolisée par F<sub>2</sub>
- ❖ **Croisement test = test cross = croisement de contrôle** : le croisement test a pour but de déterminer le génotype d'un individu qui présente un phénotype dominant. Cet individu peut être soit hétérozygote, soit homozygote pour l'allèle dominant. Le moyen le plus efficace de connaître son génotype est de le croiser avec un organisme testeur exprimant le phénotype récessif, et donc nécessairement homozygote et qui produit un seul type de gamètes. Les phénotypes de la génération suivante permettent de déterminer le génotype du parent testé ayant un phénotype dominant.
- ❖ **Croisement en retour = rétrocroisement = « back cross »** : est le croisement d'un hybride de F<sub>1</sub> avec l'un de ses parents portant le caractère récessif. Ce croisement permet de connaître les proportions et le génotype des gamètes produits par l'individu F<sub>1</sub> (le parent récessif produit un seul type de gamètes).
- ❖ **Les croisements réciproques = inverse** : le croisement entre individus de deux souches peut être réalisé de deux façons dites réciproques : l'un des caractères alternatifs peut

être apporté soit par un parent soit par l'autre. Par exemple, on peut croiser une femelle de phénotype récessif par un mâle de phénotype dominant ou une femelle de phénotype dominant par un mâle de phénotype récessif, ces deux croisements sont dit réciproques ou inverses.

#### IV/ Résultats statistiques des croisements de quelques cas de transmission des caractères :

##### 1/ Cas de monhybridisme pour un gène non lié au sexe :

###### a – Cas de dominance de l'un des allèles

❖ les hybrides ( $F_1$ ) présentent le phénotype de l'un des parents, on dit que le caractère de ce parent est dominant, et celui de l'autre est récessif.

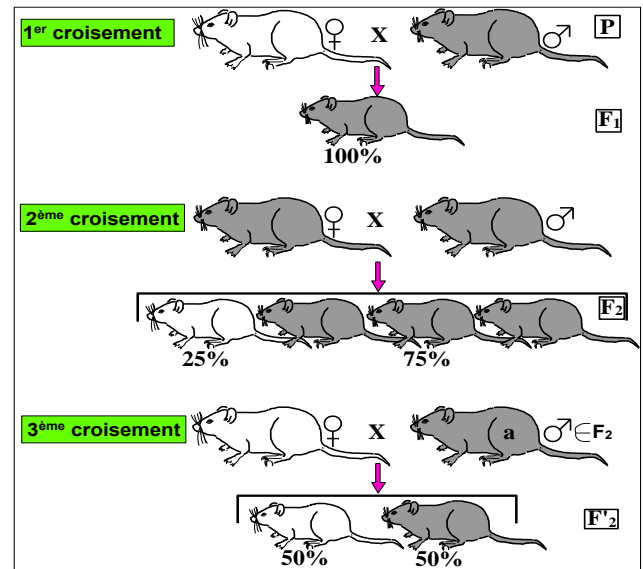
❖ Le croisement des hybrides ( $F_1 \times F_1$ ) donne une génération  $F_2$  constituée de :

- \* 75% des individus [dominant].
- \* 25% des individus [récessif]

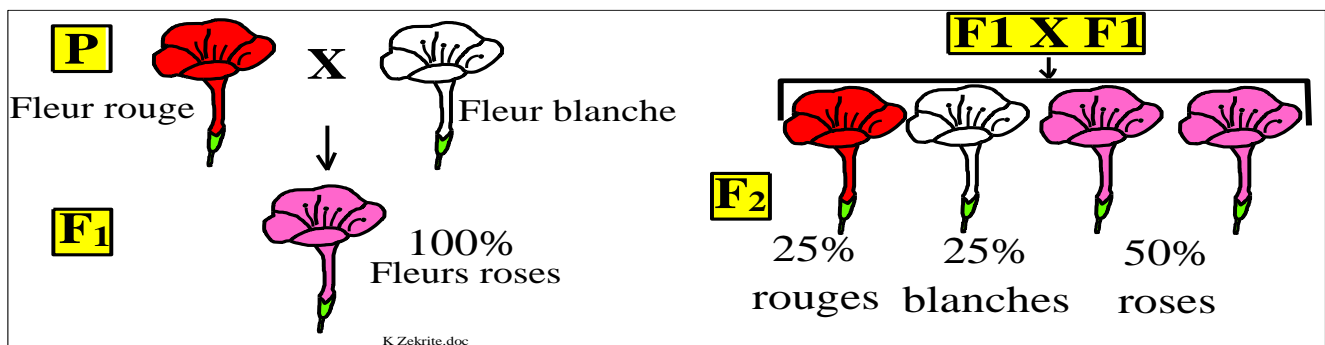
❖ Le croisement en retour (back cross) :

$F_1 \times P$  récessif donne :

- \* 50% des individus [dominant].
- \* 50% des individus [récessif]



###### b – Cas de codominance ou dominance intermédiaire



❖ Le croisement des lignées pures ( $P_1 \times P_2$ ) donne une génération  $F_1$  hybride (hétérozygote), homogène présentant un phénotype intermédiaire entre celui des parents ou un mélange des phénotypes des parents.

❖ Le croisement des hybrides ( $F_1 \times F_1$ ) donne une génération  $F_2$  constituée de trois phénotypes qui se répartissent comme suit :

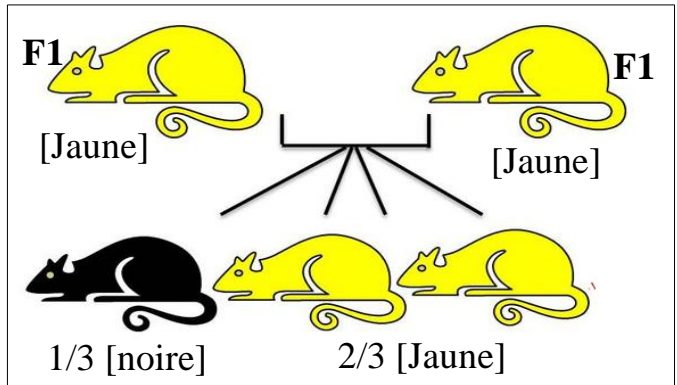
- \* 25% =  $\frac{1}{4}$  d'individus de lignée pure ressemblant à l'un des parents.
- \* 25% =  $\frac{1}{4}$  d'individus de lignée pure ressemblant à l'autre parent.
- \* 50% =  $\frac{1}{2}$  d'individus hybrides ressemblant à  $F_1$  (phénotype intermédiaire)

### c – Cas de dominance absolue avec un gène létal :

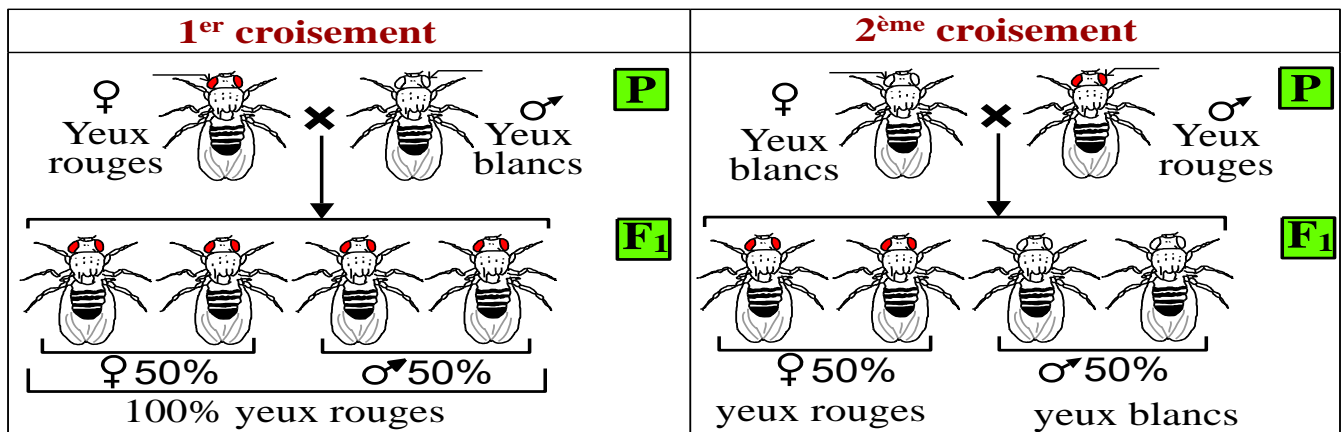
❖ Un allèle est dit létal lorsque les individus homozygotes pour le gène létal ne sont pas viables (ce génotype cause la mort des individus qui le portent).

❖ Le croisement des hybrides (F1xF1) donne une génération F2 constituée de deux phénotypes qui se répartissent comme suit :

- \* 2/3 des individus à caractère [dominant]
- \* 1/3 des individus à caractère [récessif]



### 2/ Cas de monhybridisme pour un gène lié au sexe :

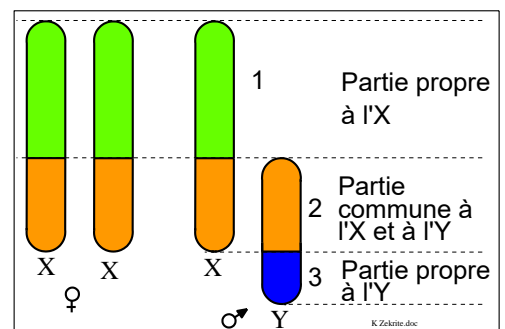


❖ On peut savoir qu'un gène est lié au sexe (porté par le gonosome sexuel X ou Y) par les critères suivants:

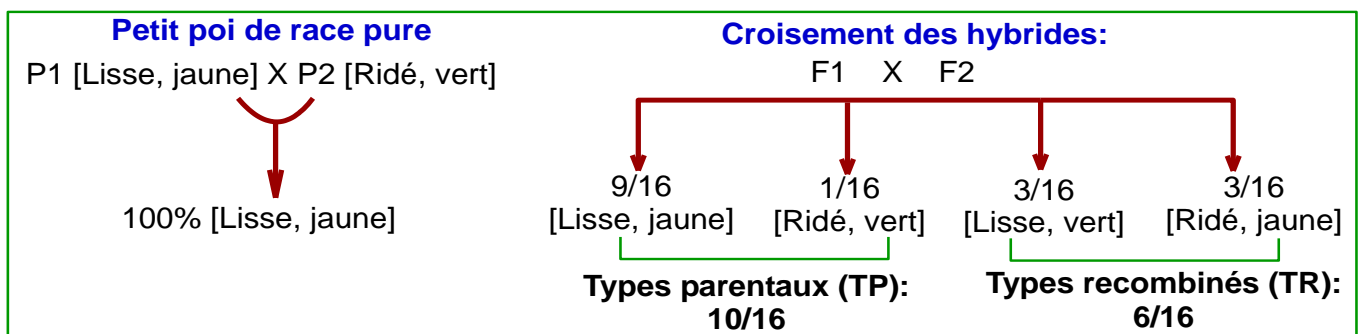
- L'exception de la 1<sup>ère</sup> loi de Mendel : la génération F1 est hétérogène même si les parents sont de race pure : le phénotype des mâles diffère du phénotype des femelles.
- Les croisements réciproques donnent des résultats différents.

❖ Si les mâles ressemblent à leur mère et les femelles ressemblent à leur père : le gène est porté par le chromosome X (partie propre à X)

❖ Si les mâles ne ressemblent qu'à leur père : le gène est porté par le chromosome Y (partie propre à Y)



### 3/ Cas de dihybridisme pour deux gènes indépendants non liés au sexe avec dominance absolue des deux gènes



Lorsqu'il s'agit de deux caractères non liés au sexe avec une dominance absolue portés par deux chromosomes différents : gène indépendants :

- La génération  $F_1$  obéit à la première loi de Mendel.
- Le croisement des individus  $F_1$  entre eux donne une génération  $F_2$  constituée de quatre phénotypes : **2 phénotypes parentaux ( $9/16 + 1/16$ ) et 2 phénotypes recombinés ( $3/16 + 3/16$ ).**
- **Le test cross** permet de vérifier l'indépendance des deux gènes. Lorsqu'on croise un hybride  $F_1$  avec un double homozygote récessif on obtient dans le cas de deux gènes indépendants quatre phénotypes avec des proportions égales ( $\frac{1}{4} + \frac{1}{4} + \frac{1}{4} + \frac{1}{4}$ ), **deux de ces phénotypes sont parentaux (50%) et les deux autres sont recombinés (50%).**

#### **4/ Cas de dihybridisme pour deux gène indépendants autosomales avec double codominance :**

Lorsqu'il s'agit de deux caractères non liés au sexe avec une double codominance portés par deux chromosomes différents : gène indépendants :

- La génération  $F_1$  obéit à la première loi de Mendel.
- Le croisement des individus  $F_1$  entre eux donne une génération  $F_2$  constituée de 9 phénotypes dont les proportions :

$$4/16 + 2/16 + 2/16 + 2/16 + 2/16 + 1/16 + 1/16 + 1/16 + 1/16$$

#### **5/ Cas de dihybridisme pour deux gène indépendants non liés au sexe avec dominance et codominance**

Lorsqu'il s'agit de deux caractères non liés au sexe portés par deux chromosomes différents : gène indépendants avec dominance absolue pour l'un des gènes et codominance pour l'autre gène

- La génération  $F_1$  obéit à la première loi de Mendel.
- Le croisement des individus  $F_1$  entre eux donne une génération  $F_2$  constituée de 6 phénotypes dont les proportions :

$$6/16 + 3/16 + 3/16 + 2/16 + 1/16 + 1/16$$

#### **6/ Cas de dihybridisme pour deux gène liés autosomales avec une double dominance absolue :**

Lorsqu'il s'agit de deux caractères non liés au sexe avec une dominance absolue pour les deux gènes et si les gènes sont portés par le même chromosome : gène liés :

- ❖ La génération  $F_1$  obéit à la première loi de Mendel.
- ❖ Le back cross permet de vérifier le linkage des deux gènes : Lorsqu'on croise un hybride  $F_1$  avec un double homozygote récessif on obtient :
  - Dans le cas du linkage absolu (absence du crossing-over lors de la formation des gamètes de  $F_1$ ): on obtient deux phénotypes parentaux avec des proportions égales ( $\frac{1}{2} + \frac{1}{2}$ ) avec absence des types recombinés.
  - Dans le cas du linkage relatif (intervention du crossing-over.): on obtient quatre phénotypes avec des proportions non équiprobables : deux phénotypes parentaux

majoritaires (une proportion élevée) et deux phénotypes recombinés minoritaires.

### **V/ Etablissement de la carte factorielle :**

↪ La carte factorielle = la carte génétique est une représentation de la disposition linéaire des loci (emplacements des gènes) sur un chromosome en respectant l'ordre dans lequel se succèdent les gènes et la distance relative entre eux.

↪ La réalisation de la carte factorielle se fait par :

- Le calcul de la distance entre les gènes portés par ce chromosome par deux à deux.
- La représentation de la carte factorielle : on représente le chromosome par un trait sur lequel on dispose les loci des gènes étudiés, en respectant les distances calculées.

↪ Le crossing-over chez un hybride permet d'obtenir des gamètes recombinés responsables de l'apparition des phénotypes recombinés (TR) qui permet de déterminer la distance entre deux gènes par la relation de Morgan :

Distance entre deux gènes en CMg = pourcentage des gamètes recombinés

Avec 1CMg = 1% des gamètes recombinés

## Unité 3 : Utilisation des substances organiques et inorganiques

La croissance de la population, l'évolution des modes de consommation et l'urbanisation accélérée demande une utilisation abusive مؤدية de la matière organique et inorganique afin de produire de l'énergie, il en résulte une augmentation des déchets ménagers, agricoles et industriels en poids et en volume qui entraînent un déséquilibre de l'environnement. Cela nécessite une gestion économique et rationnelle de ces déchets.

### Chapitre 1 : Les ordures ménagères issues de l'utilisation des matières organiques

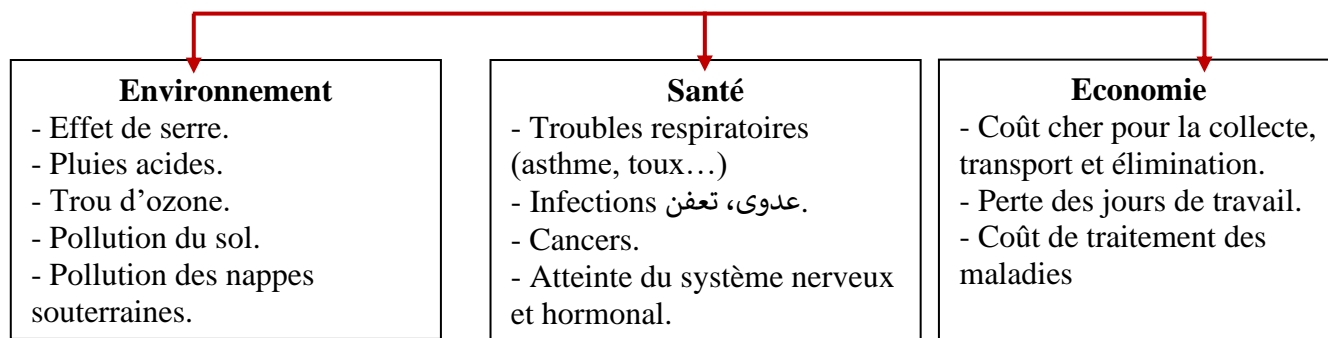
#### Les déchets ménagers ?

Ordures ménagères issues des activités quotidiennes domestiques des ménages, hôtels et restaurants sont riches en matière organiques.

#### Impact négatif des déchets ménagers ?

La gestion anarchique des déchets dans les décharges non contrôlées entraîne :

- Dégagement des gaz polluants : CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>...
- Production de lixiviats : jus pollué (filtrat de déchets) riche en germes et métaux lourds.



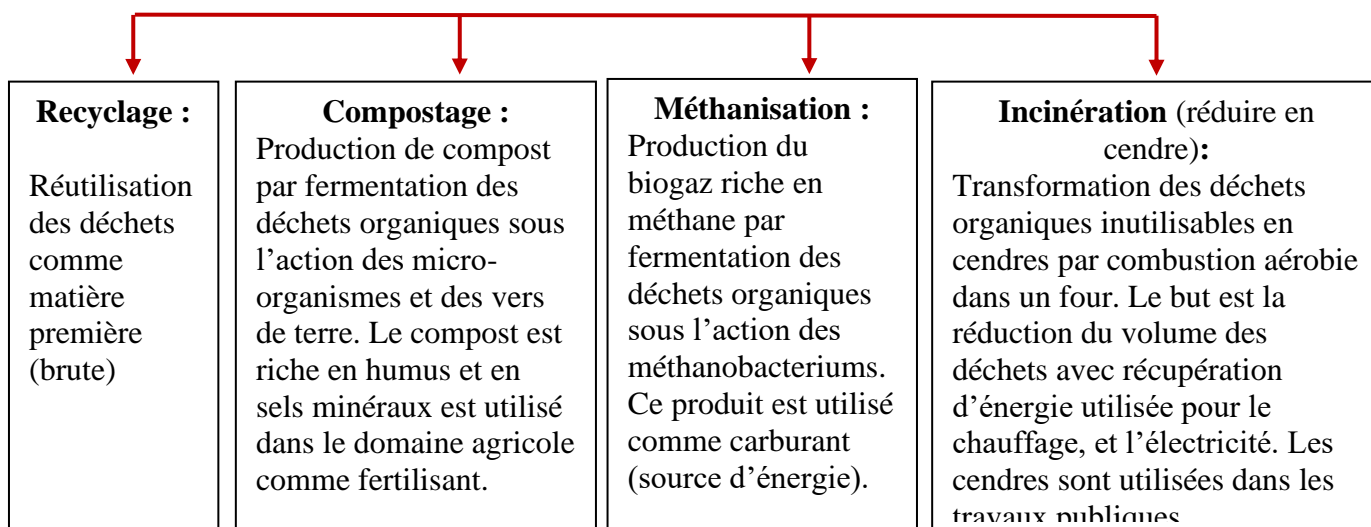
#### Impact positif des déchets ménagers ?

La gestion réfléchie des déchets dans les décharges contrôlées a permis leurs valorisations par le tri et la réutilisation.

#### Tri :

Sélection des déchets selon leurs natures et leurs catégories pour la réutilisation et le recyclage.

#### Méthodes de réutilisation des déchets triés



## Chapitre 2 : Les pollutions liées à la consommation des matières énergétiques et à l'utilisation des matières organiques et inorganiques dans les industries chimiques, alimentaires et minérales

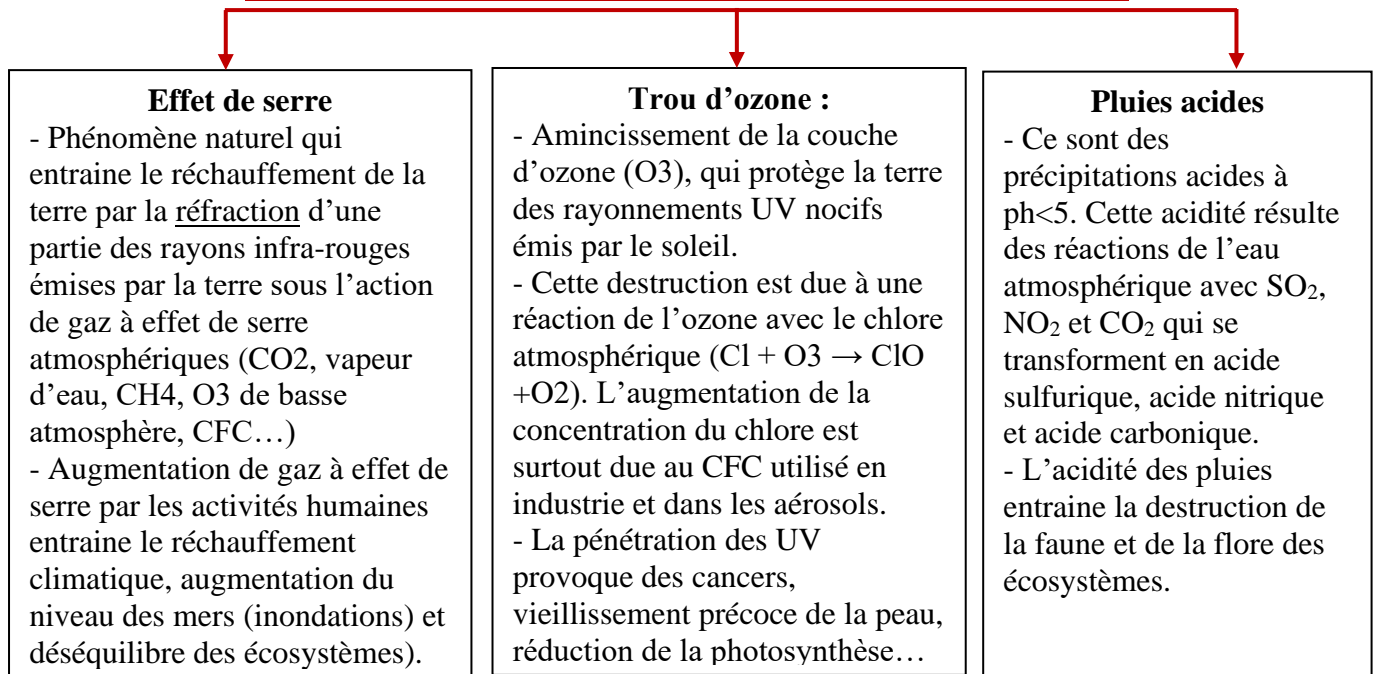
### Pollution ?

Modification des caractéristiques chimiques, physiques et biologiques d'un milieu naturel (air, eau et sol) par des polluants issus de l'activité humaine (domestiques, industrielles et agricoles).

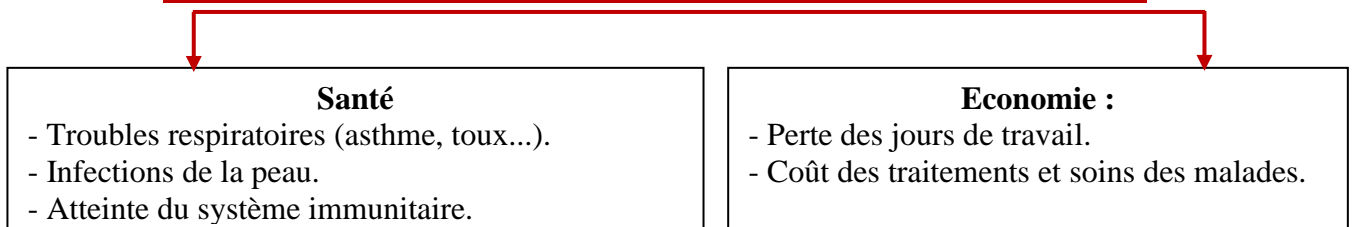
### Pollution de l'air

Résultat de l'émission de gaz polluants issus d'activités industrielles, moyens de transport : CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, O<sub>3</sub>, CFC, PES (particules en suspension), COV (composés organiques volatiles).

### Impact de la Pollution de l'air sur l'environnement



### Impact de la Pollution de l'air sur la santé et l'économie



## Pollution de l'eau

Résultat de l'activité domestique, agricole, industrielle et du transport maritime. Elle entraîne la modification des propriétés de l'eau.

### Impact de la Pollution de leau

#### **Sur l'environnement :**

- Rejet des eaux usées, des détergents et des engrais entraîne la pollution des eaux superficielles et souterraines (nappe phréatique).
- Dans les eaux stagnantes الراکضة il y'a eutrophisation : phénomène qui résulte de la multiplication intense des algues à la surface de ces eaux riches en phosphates, azote et en matières organiques, ce qui entraîne l'appauvrissement de l'eau en oxygène et le déséquilibre de l'écosystème (diminution de la biodiversité).
- Les accidents maritimes entraînent le déversement d'une quantité importante d'hydrocarbures (pétrole) qui forme une couche noire, gluante superficielle appelée marée noire. Cette pollution entraîne une perturbation de l'équilibre naturel et la mort des animaux (diminution de la biodiversité).

#### **Sur la santé :**

- Troubles digestifs (diarrhées, intoxication ...) par l'ingestion des germes et l'accumulation des métaux lourds).
- Troubles néphrétique (الكلوية), du système nerveux, lésions cutanées et augmentation des risques de cancers.

#### **Sur l'économie :**

- Coût de traitement des eaux usées et des eaux polluées.
- Perte de la biodiversité.
- Perte des jours de travail.
- Coût de soins et traitement des malades.
- Perte de sites touristiques.

## Pollution du sol

Résultat de l'activité humaine (domestique, agricole, industrielle) et l'enfouissement anarchique des déchets.

### Impact de la Pollution du sol

#### **Sur l'environnement :**

- L'utilisation exagérée de détergents المواد المنظفة, d'engrais, de pesticides ainsi que le lixiviat et les pluies acides entraînent la toxicité du sol et appauvrissement en flore et faune, d'où une perte de fertilité du sol et diminution de la productivité.

#### **Sur la santé :**

- Troubles digestifs (diarrhées, intoxication ...) par l'ingestion des germes et l'accumulation des métaux lourds).
- Troubles néphrétique (الكلوية), du système nerveux, lésions cutanées et augmentation des risques de cancers.

#### **Sur l'économie :**

- Coût de traitement des eaux usées.
- Perte des jours de travail.
- Diminution de la productivité agricole.

## Alternatives énergétiques الطاقات البديلة

Pour réduire l'impact négatif de l'utilisation abusive <sup>المسيئة</sup> des énergies fossiles épuisables <sup>غير القابلة للتجدد</sup>, l'Homme a eu recours à d'autres ressources énergétiques moins polluantes et renouvelables.

Energie solaire	Energie éolienne	Energie hydraulique	Energie de biomasse	Energie géothermique	Energie nucléaire
Transformation de l'énergie solaire en énergie électrique ou thermique.	Transformation de la force du vent en énergie électrique à l'aide des éoliennes.	Transformation de la force de l'eau en énergie électrique et mécanique.	Fermentation de la matière organique en biocarburant	Transformation de la force du flux énergétique de la terre en énergie électrique et thermique.	Utilisation de la fission nucléaire des éléments radioactifs pour la production d'énergie électrique et thermique.



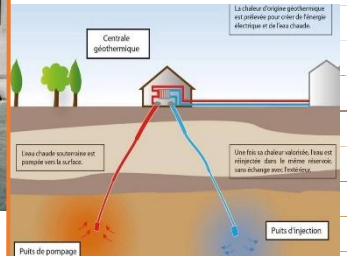
Energie solaire  
Complexe Nour  
Ouarzazate



Energie éolienne  
Eolienne de Tanger



Energie hydraulique  
Barrage ben eloudane



Energie

géothermique

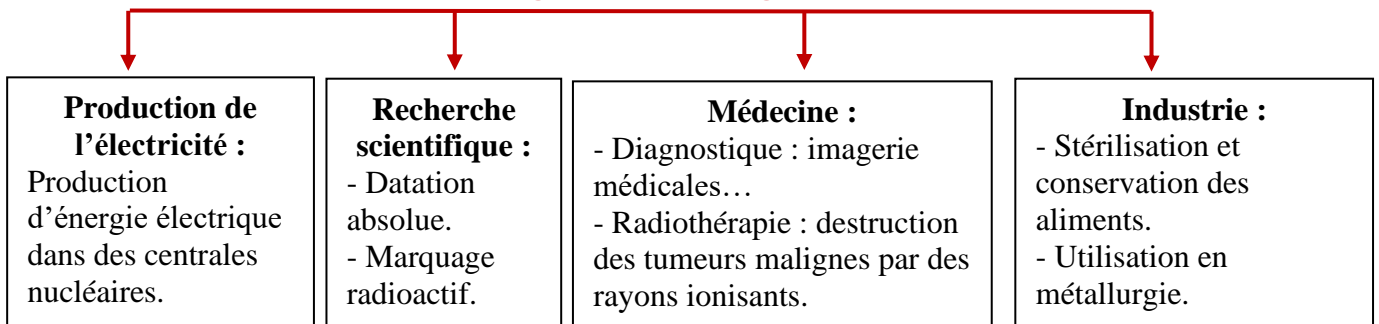
## Chapitre 3 : Les matières radioactives et l'énergie nucléaire

Pour répondre à une demande croissante en énergie électrique de la population, on a recours à l'utilisation de l'énergie nucléaire qui est moins polluante (pas de rejet de CO<sub>2</sub>) et surtout très productrice.

### Radioactivité

La radioactivité est un phénomène physique naturel au cours duquel des noyaux atomiques instables, dits radio-isotopes, se transforment spontanément par désintégration, simple ou en chaîne, en des noyaux atomiques plus stables ayant perdu une partie de leur masse, en dégageant de l'énergie sous forme de rayonnement ionisants ou particules ( $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$ ).  
recyclage.

### Avantages de l'énergie nucléaire



## Dangers de la pollution nucléaire

### **Santé :**

Augmentation des risques de cancer, de malformations embryonnaires par des mutations génétiques dues aux rayonnements radioactifs

### **Environnement :**

Pollution de tous les milieux naturels et contamination de tous les niveaux trophiques entraînant un déséquilibre des écosystèmes et une diminution de la biodiversité.

## Problématique et gestion des déchets nucléaires

### **Problématique :**

- \* Longue durée d'activité des sous-produits nucléaires selon leur classification :
  - De très faible activité (TFA).
  - De faible activité (FA).
  - Moyenne activité (MA).
  - Haute activité (HA).
- \* Stockage des déchets nucléaires.
- \* Rejet de particules et de gaz radioactifs dans l'air.

### **Gestion :**

- \* Enfouissement des déchets dans des endroits stables géologiquement et imperméables à l'eau à une profondeur minimale de 200m.
- \* Emballage des déchets sous forme de colis enfermées dans des conteneurs compacts en béton ou métalliques.

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

Face aux problèmes environnementales actuels dus à l'augmentation des différents types de polluants résultants de l'utilisation excessive de la matière organique et inorganique, des organismes internationaux d'hygiène et de santé ont instauré des normes pour maintenir une qualité et une salubrité *سلامة* convenable des milieux naturels, en se basant sur des critères caractérisant chaque milieu.

### **Contrôle de la qualité de l'air :**

Repose sur la concentration de certains polluants dans l'air : CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, particules en suspension PES...

### **Contrôle de la qualité du sol:**

Repose sur l'abondance, la diversité et l'activité des êtres vivants qui participent au fonctionnement du sol. On utilise IBQS (indice biologique de la qualité du sol) Plus IBQS augmente, plus la qualité du sol est meilleur.

### **Contrôle de la qualité de l'eau:**

Se base sur:

- Physiques : limpidité, température, conductibilité...
- Chimique : pH, teneur en O<sub>2</sub>, DBO<sub>5</sub>, DCO. Plus la valeur de DBO<sub>5</sub> et DCO augmente et la teneur en O<sub>2</sub> diminue plus l'eau est polluée et inversement.
- Biologique : se base sur des organismes indicateurs et le calcul de l'indice biotique (IB). Plus IB est grande plus la qualité du sol est meilleur.

**But : Maintenir la qualité et la santé de l'environnement naturel afin de préserver l'équilibre naturel et la biodiversité et la santé humaine.**

Participation des autorités responsables et des organisations de la société civile intéressées :

- Elaboration de lois pour la protection de l'environnement
- Réalisation de projets de protection de l'environnement
- Sensibilisation de la population envers l'importance de la préservation de l'environnement.

# Unité 4 : Les phénomènes géologiques accompagnants la formation des chaînes de montagnes et leurs relations avec la tectonique des plaques

## Rappel des acquis antérieurs

### I/ Les types de roches sur terre :

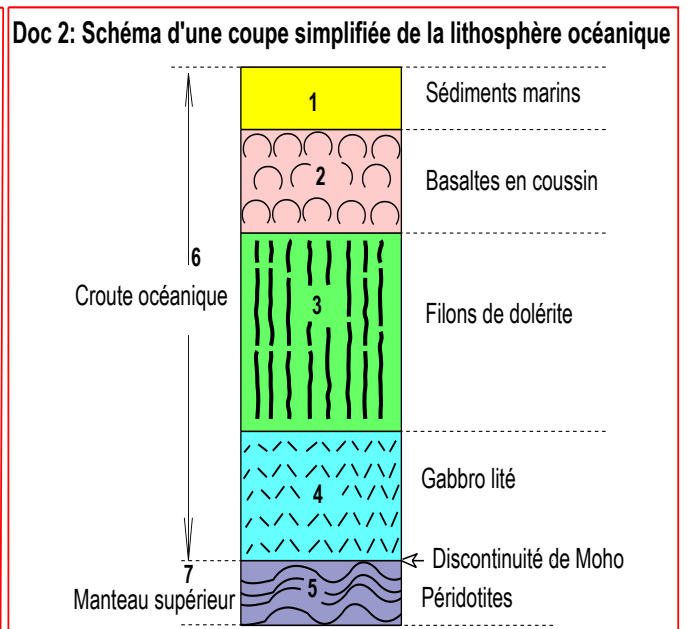
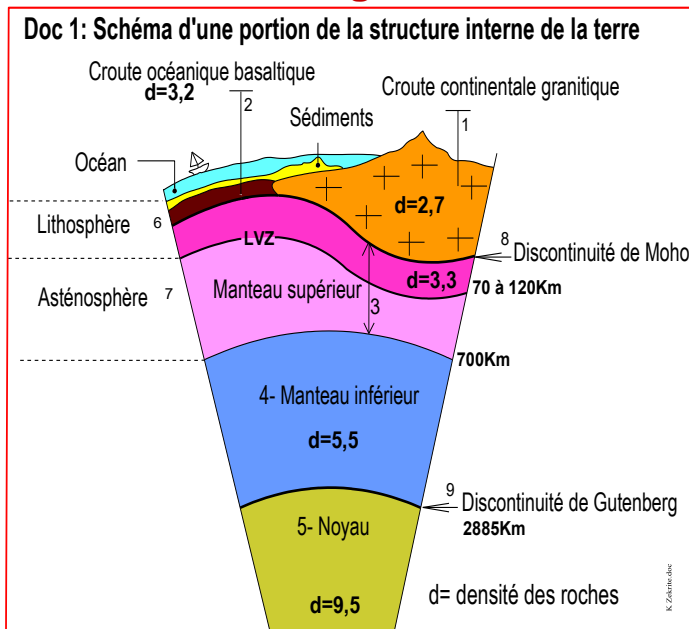
Les roches terrestres se classent en trois grandes catégories selon leur mode de formation :

- **Les roches sédimentaires** se forment à la surface par accumulation de dépôts issus de l'érosion, du transport, de la sédimentation et de la diagenèse. Elles apparaissent souvent en couches et peuvent contenir des fossiles. Exemples : l'argile, le calcaire ...

- **Les roches magmatiques** résultent du refroidissement du magma : en surface, elles donnent des roches volcaniques comme le basalte, et en profondeur, des roches plutoniques comme le granite.

- **Les roches métamorphiques** proviennent de la transformation de roches préexistantes sous l'effet de la chaleur et/ou de la pression. Exemples : le schiste, le micaschiste, le gneiss...

### II/ La structure du globe terrestre:



La Terre est formée de plusieurs couches rocheuses de densités différentes, généralement rigides, sauf le noyau externe qui est liquide et l'asthénosphère qui est souple.

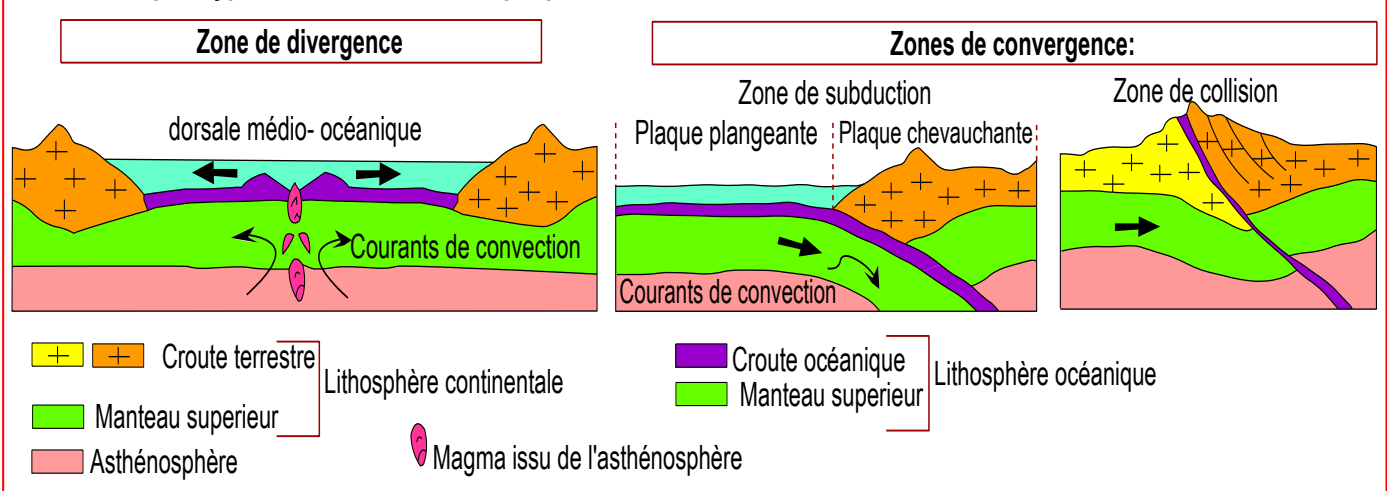
- **La croûte continentale**, riche en granite, forme les continents.

- **La croûte océanique**, composée surtout de basalte, constitue le fond des océans.

- La **lithosphère** est une couche rigide formée de la croûte et d'une partie du manteau supérieur, divisée en plaques, avec une épaisseur plus grande sous les continents que sous les océans.

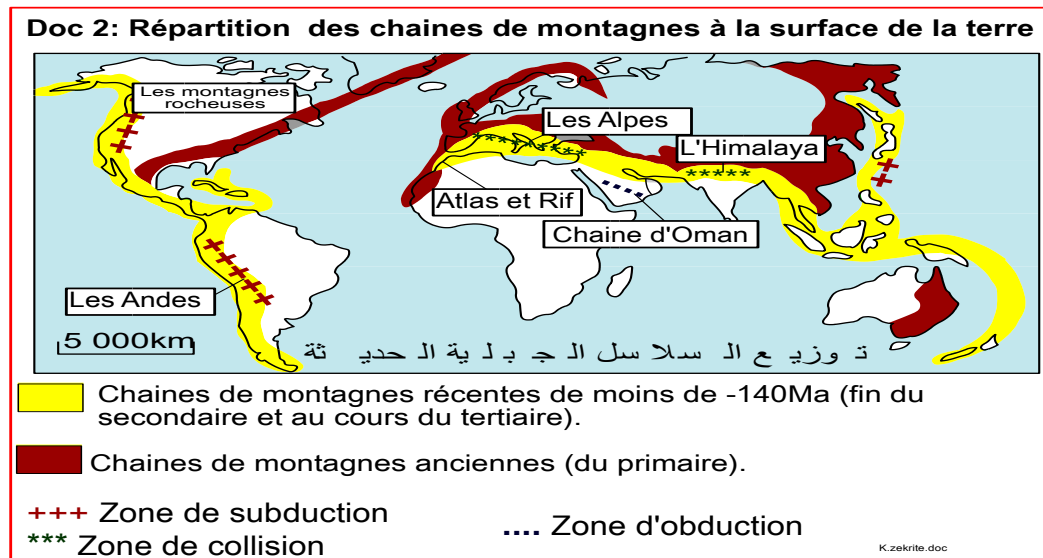
### III/ Notion de plaque tectonique et théorie des plaques :

Doc 5 Quelques types de contact entre les plaques



- Les plaques lithosphériques sont des blocs rigides en mouvement sur l'asthénosphère, selon la tectonique des plaques, avec des zones actives marquées par séismes et volcans.
- Les limites des plaques peuvent être **divergentes** (création de nouvelle croûte au niveau des dorsales médio-océaniques), **convergentes** (subduction, collision, obduction) ou **transformantes** (glissement).
- **La subduction** correspond à l'enfoncement d'une plaque océanique sous une autre, **la collision** correspond à la rencontre de deux blocs continentaux, et **l'obduction** correspond au chevauchement d'une plaque océanique sur une continentale.
- Ces mouvements sont dus aux **courants de convection** dans l'asthénosphère et entraînent l'expansion des fonds océaniques ainsi que la dérive des continents et la subduction.

## Chapitre 1 : Les chaînes de montagnes récentes et leur relation avec la tectonique des plaques



- Les chaînes de montagnes récentes résultent du rapprochement des plaques lithosphériques, donc elles sont le résultat de la tectonique des plaques.
- Elles se situent surtout aux zones de convergence, on distingue entre 3 types de chaînes :
  - Les chaînes de subduction exemple les Andes.
  - Les chaînes d'obduction exemple les chaînes d'Oman.
  - Les chaînes de collision exemple l'Himalaya.
- Les chaînes de montagnes s'accompagnent de déformations tectoniques.

**Orogenèse = formation des chaînes de montagnes.**

### Les déformations tectoniques qui accompagnent la formation des chaînes de montagnes

Les déformations tectoniques (Les structures géologiques) : sont des changements de forme, de position ou de d'orientation de roches soumises à des contraintes ضغوط.

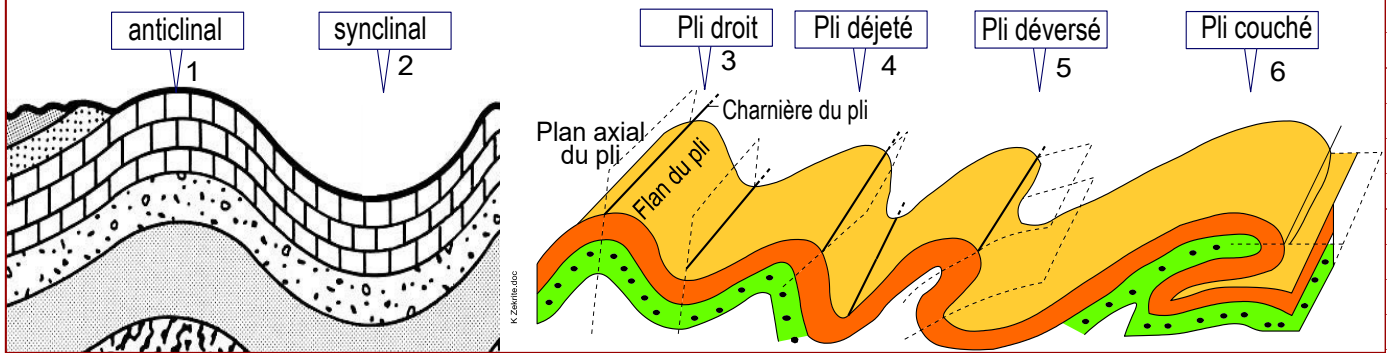
On peut classer les déformations rencontrées dans les chaînes de montagnes en :

- Déformations souples continues : les plis تشوهات مرنة متواصلة
- Déformations cassantes discontinues : les failles et les décrochements. تشوهات انكسارية غير متواصلة
- Déformations intermédiaires : chevauchements et nappes de charriages.

#### I/ Les déformations souples continues : les plis

- Les plis sont des déformations souples et continues des couches rocheuses (les couches restent continues) sous forme d'ondulations en saillie (anticlinal) ou en creux (synclinal).
- La position du plan axial et le pendage des flans définissent différents types de plis : pli droit, déjeté, déversé ou couché.

## Doc 2: Différents types de plis



## II/ Les déformations cassantes discontinues : les failles et les décrochements.

### Doc 3: Les failles et leurs types

Fig a: les éléments de la faille

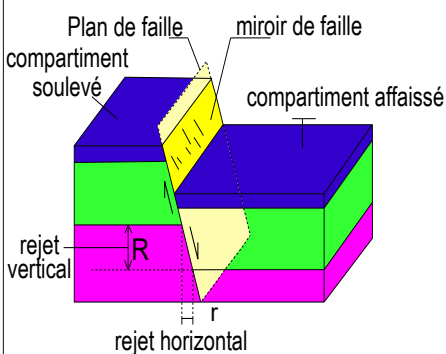
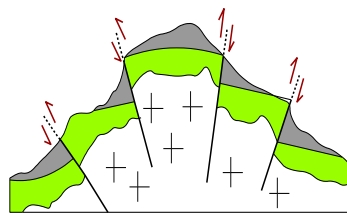


Fig c: les regroupements de failles

Horst: combinaison de plusieurs failles inverse



Grabben: combinaison de plusieurs failles normales

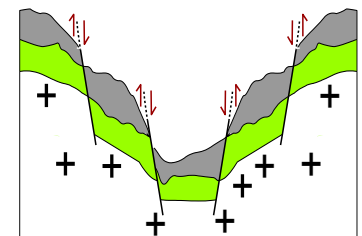
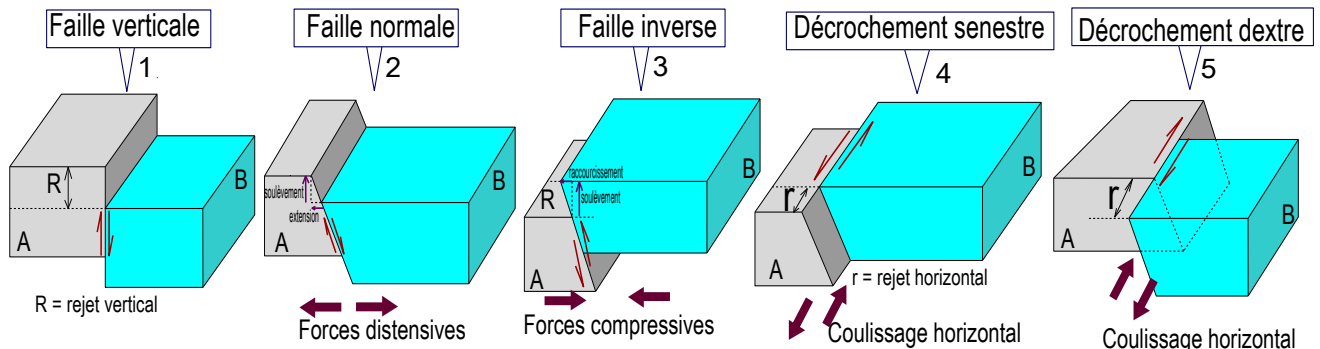


Fig b: les types de failles



**Les failles** sont des cassures des roches accompagnées d'un déplacement des blocs, appelé rejet. On distingue plusieurs types :

- **une faille verticale** : correspondent à un mouvement vertical des deux bloc sans déplacement horizontal.

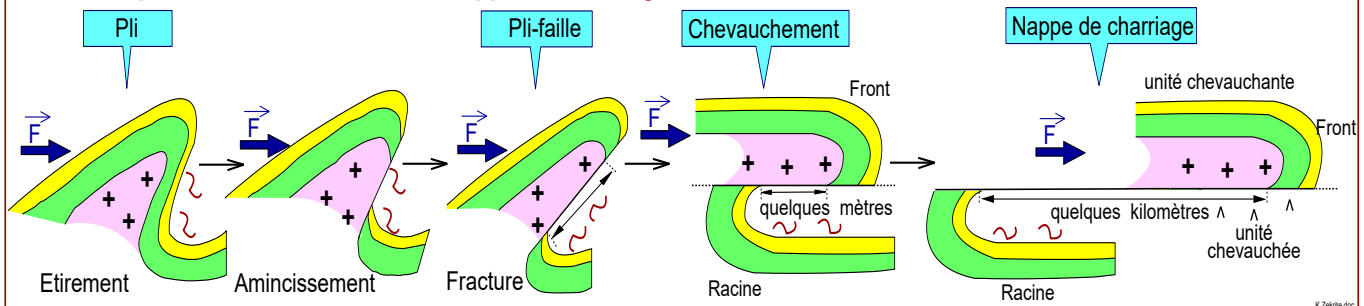
- **une faille normale** : faille le long de laquelle les roches au-dessus du plan de faille se déplacent vers le bas par rapport aux roches sous le plan de faille. Les failles normales se forment lorsque deux blocs de roches s'éloignent l'un de l'autre (écartement), en raison d'une distension **تباعد**. La combinaison de plusieurs failles normales entraîne un fossé d'effondrement appelé **Grabben**.

■ **une faille inverse**: faille le long de laquelle les roches au-dessus du plan de faille se déplacent vers le haut par rapport aux roches sous le plan de faille. Les failles inverses se forment lorsque deux bloc de roches sont poussés l'un vers l'autre (rapprochement) en raison d'une compression انضغاط. La combinaison de plusieurs failles inverses entraîne un soulèvement appelé **Horst**.

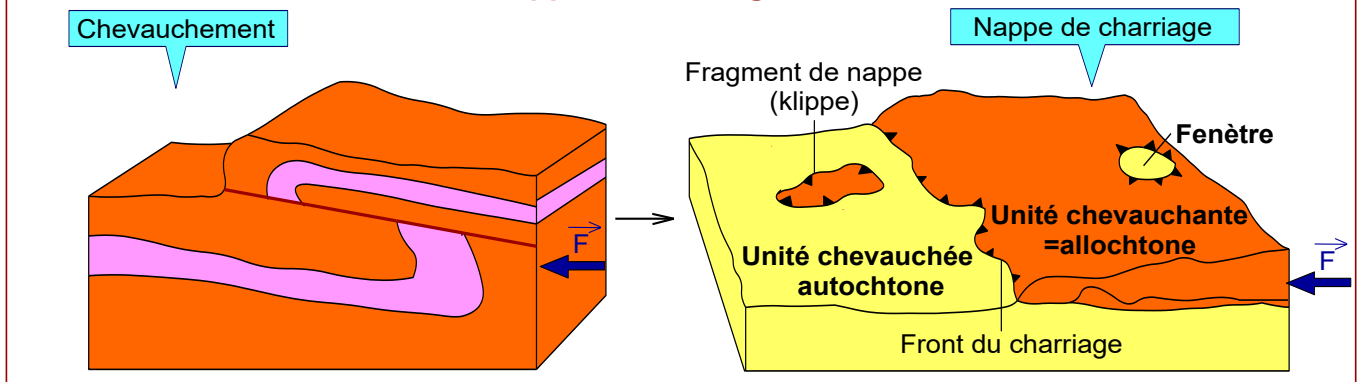
■ **un décrochement ou faille transformante** انقلاع correspondent à un coulissage horizontal انزلاق أفقي des deux bloc sans déplacement vertical.

### III/ Les déformations intermédiaires : chevauchements et nappes de charriages.

Doc 4: Du pli au chevauchement à la nappe de charriage



Doc 5: Du chevauchement à la nappe de charriage



- Sous l'effet de fortes compressions, un pli peut se casser et évoluer en pli-faille, puis se déplacer.

- Si le déplacement est faible, on parle de **chevauchement** (quelques mètres) ; s'il est très important, on parle de **nappe de charriage** (sur des kilomètres).

- Dans ces cas, une couche rocheuse (allochtone) se déplace au-dessus d'une autre (autochtone).

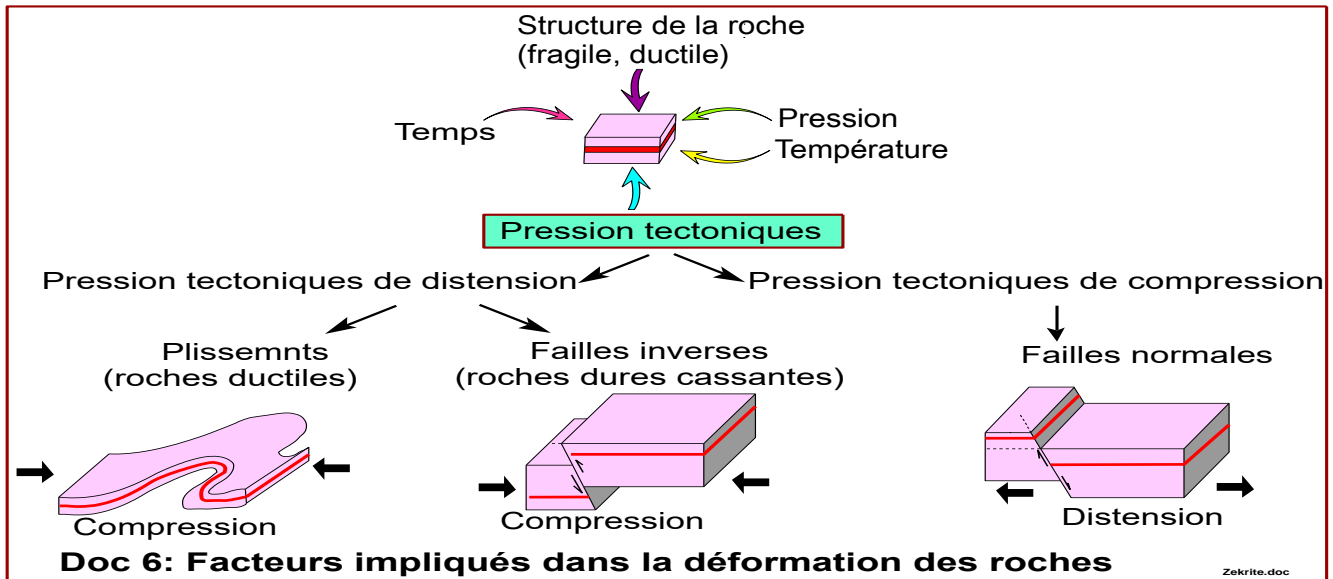
**Remarque** : Au niveau de la carte et des coupes géologiques, les chevauchements et les nappes de charriages sont représentés par un trait portant des triangles, la tête du triangle est dirigée vers l'unité chevauchante الوحدة الراكبة.

### IV/ Les facteurs impliqués dans les déformations Voir doc 6

- Les déformations des roches aux limites des plaques dépendent de plusieurs facteurs : la nature de la roche (cassante ou plastique), la pression et la température (faibles en surface → failles, élevées en profondeur → plis), et le temps d'action des forces (rapide → cassure, lent → déformation plastique).

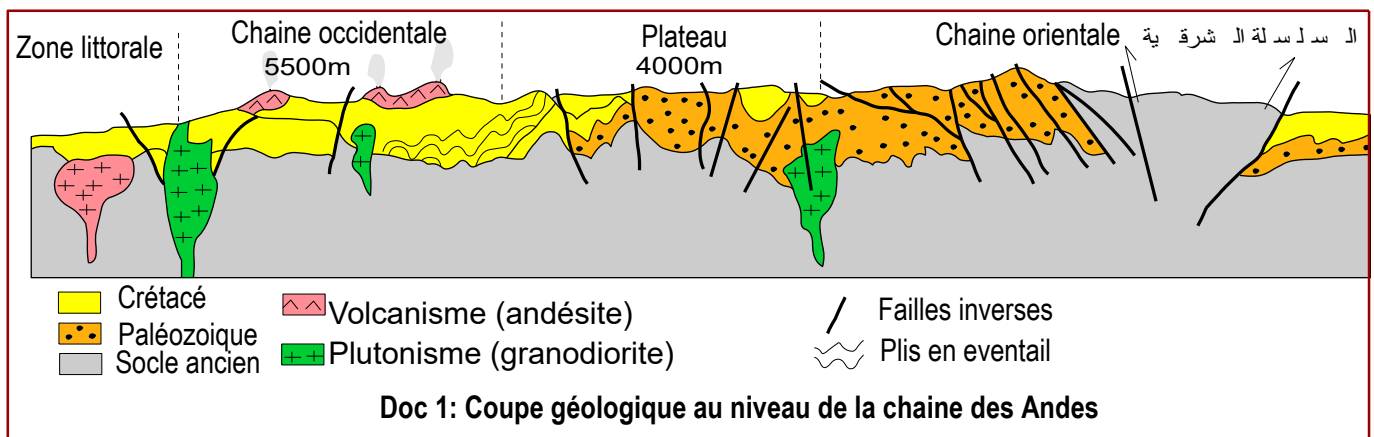
- Les mouvements tectoniques influencent aussi ces déformations : la compression

provoque des plis et des failles inverses, tandis que la distension engendre des failles normales.



## Les chaînes de subduction et leur relation avec la tectonique des plaques

### I/ Caractéristiques des Andes



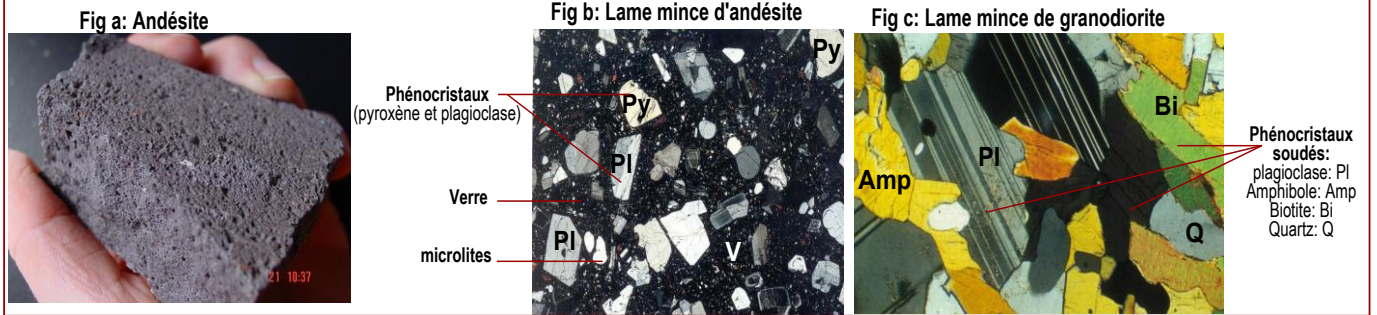
Les chaînes de subduction présentent des propriétés structurales, pétrographiques géologiques et géophysiques:

• **Caractéristiques structurales** = les déformations tectoniques : représentées essentiellement par des failles inverse et des plis, indicateurs que la zone est le siège d'une compression.

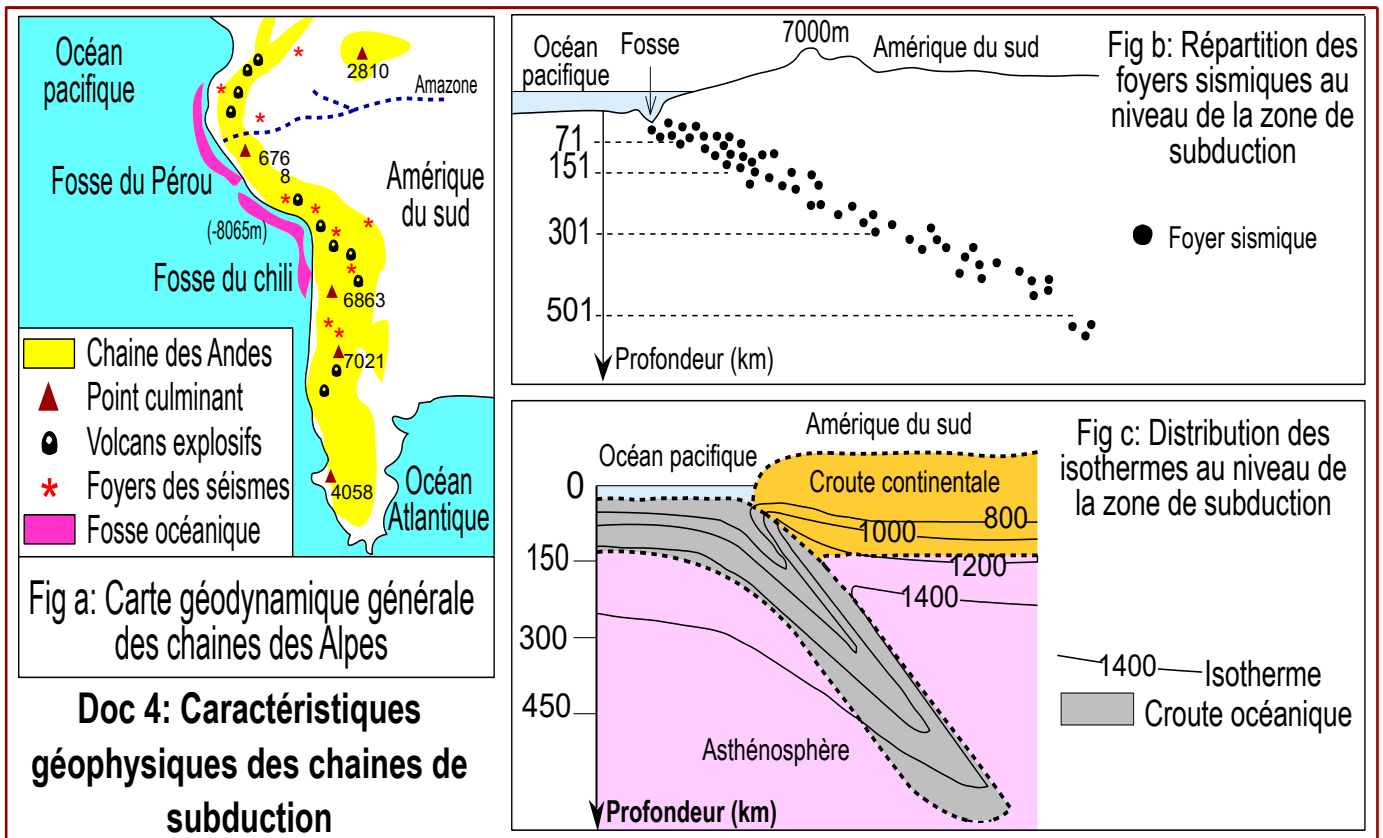
• **Caractéristiques pétrographiques** (nature des roches) : essentiellement des roches magmatiques volcaniques (l'andésite) et plutonique (la granodiorite) : (voir doc 2)  
 - L'andésite est une roche volcanique grise et poreuse, composée de cristaux de tailles variées dans une pâte vitreuse : structure microlitique. Elle se forme lorsque le magma atteint la surface et se refroidit.

- La granodiorite est une roche **plutonique** à gros cristaux soudés, sans pâte vitreuse: **structure grenue**, formée par le refroidissement lent du magma en profondeur.

Doc 2: Roches caractéristiques des chaînes de subduction



**Caractéristiques géologiques et géophysiques :** voir doc 4 et 5



**Isotherme :** Ligne imaginaire passant par les points du globe où la température moyenne est la même.

**Foyer d'un séisme ou hypocentre :** le point où prend naissance la rupture à l'origine du séisme.

Les Andes sont situées dans la zone de confrontation (تجابه) entre la plaque du Pacifique et la plaque sud-américaine. La marge ouest de cette chaîne, qualifiée par **active** est caractérisée par des activités géologiques particulières:

- **La présence de reliefs :** تضاريس: fosses océaniques profondes (6 à 12km de profondeur) bordant l'océan et de reliefs de grande altitude bordant le continent.

- **Une activité Volcanique :** volcanisme explosif بركانية انفجارية (magma visqueux et riche en gaz) de type andésitique.

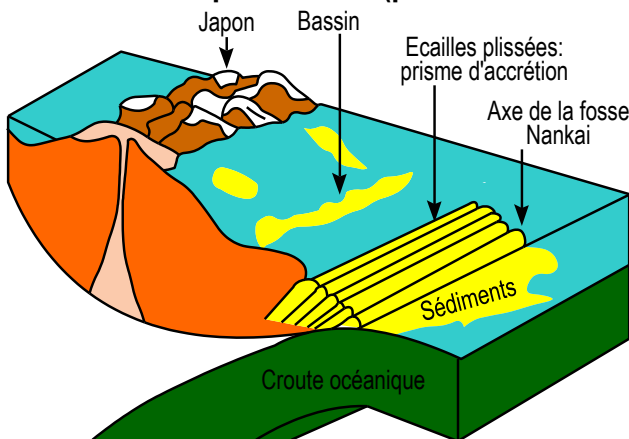
- **Une activité sismique importante** : les foyers sismiques ont des profondeurs différentes, en effet, de la fosse océanique vers le continent, la profondeur des foyers sismiques augmente suivant un plan incliné sous le continent, ce plan est appelé **plan de Bénihoff**.

Le mouvement de la lithosphère océanique sous la lithosphère continentale se fait de manière inclinée, et c'est la cause des foyers sismiques disposés selon le plan de Benioff.

- **Une anomalie thermique** : les isothermes sont inclinés vers la profondeur suivant le plan de Bénihoff, on parle d'anomalie thermique négative *شذوذ حراري سلبى*. La lithosphère océanique, en vieillissant et en s'éloignant de la dorsale, se refroidit et devient plus dense. Lors de la subduction, elle conserve sa température froide, ce qui explique les anomalies thermiques négatives observées dans ces zones.

- **Un prisme d'accrétion** : Au-dessus de la croûte océanique chevauchée, une couche sédimentaire se dépose, arrivée au niveau de la subduction, cette couche est arrêtée par la plaque chevauchante qui agit alors comme un véritable rabot *منجر* qui fait accumuler les sédiments meubles (*غير متماسكة*) sous formes d'écailles *قشور* plissées et faillées dont l'ensemble constitue le prisme d'accrétion.

**Doc 5: Autre phénomène (prisme d'accrétion) lié aux chaînes de subduction (japon)**

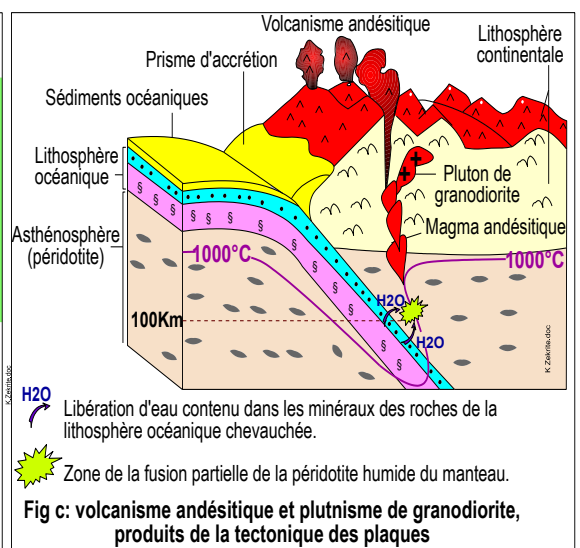
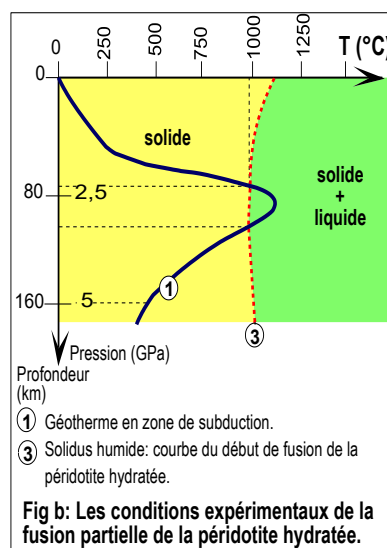
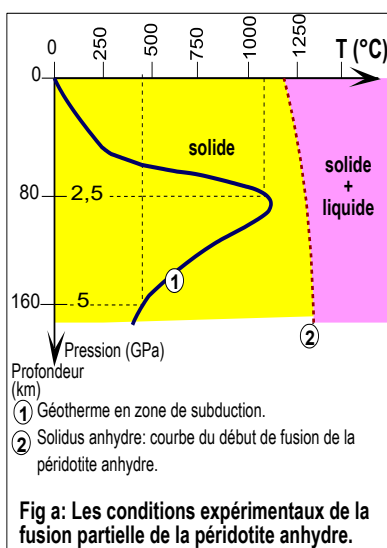


**Fig a: Prisme d'accrétion récent dans la fosse Nankai au Japon**



**Fig b: Aspect d'un prisme d'accrétion ancien (indicateur de l'échelle: les trois individus au sommet)**

**III/ Conditions de formation du magma andésitique**



● Le magma andésitique et les plutons de granodiorite proviennent de la fusion partielle de la péridotite du manteau supérieure de la plaque chevauchante.

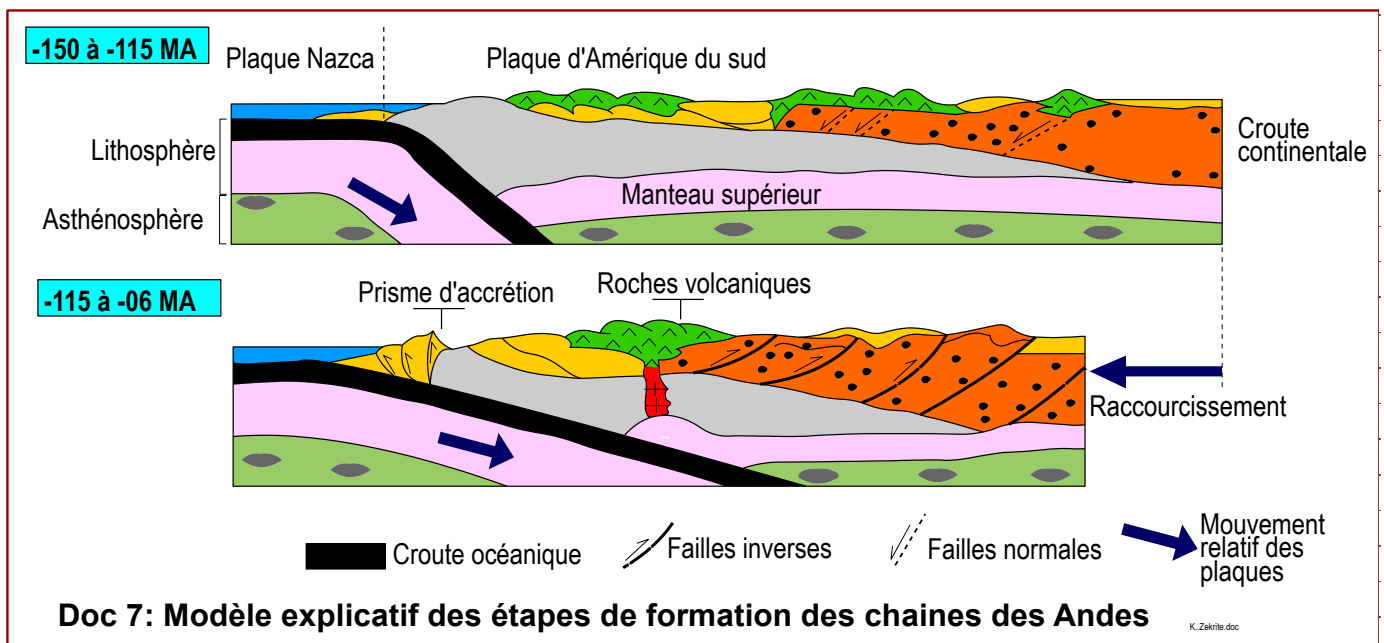
### Quelles sont les conditions expérimentales de formation du magma andésitique ?

● Dans les conditions expérimentales : En absence d'eau, la courbe du gradient géothermique de la zone de subduction ne coupe pas la courbe de fusion partielle de la péridotite. Donc la péridotite ne fusionne pas quel que soit la profondeur de la péridotite anhydre. En présence d'eau, les deux courbes se croisent, a fusion partielle de la péridotite est devenue possible, l'eau a facilité cette fusion. Donc la condition essentielle pour la fusion partielle de la péridotite est la présence d'eau, cette fusion s'établit entre **80 et 10km de profondeur** à une température voisine de 1000 à 1100°C.

### Comment se forme Le volcanisme andésitique et le plutonisme, au niveau des zones de subduction ?

- Lors de la subduction, les roches de la lithosphère océanique subissent une forte augmentation de pression et de température, provoquant la libération de l'eau contenue dans leurs minéraux.
- Cette eau hydrate le manteau (péridotite) et facilite sa fusion partielle vers 100 km de profondeur sous la plaque chevauchante.
- Le magma formé, moins dense, remonte vers la surface : soit il atteint la surface et forme des volcans produisant de l'andésite, soit il se solidifie en profondeur en plutons donnant de la granodiorite.
- Ainsi, le volcanisme et le plutonisme sont directement liés à la subduction, et cessent lorsque celle-ci s'arrête.

## IV/ Etapes de la formation des chaînes de subduction



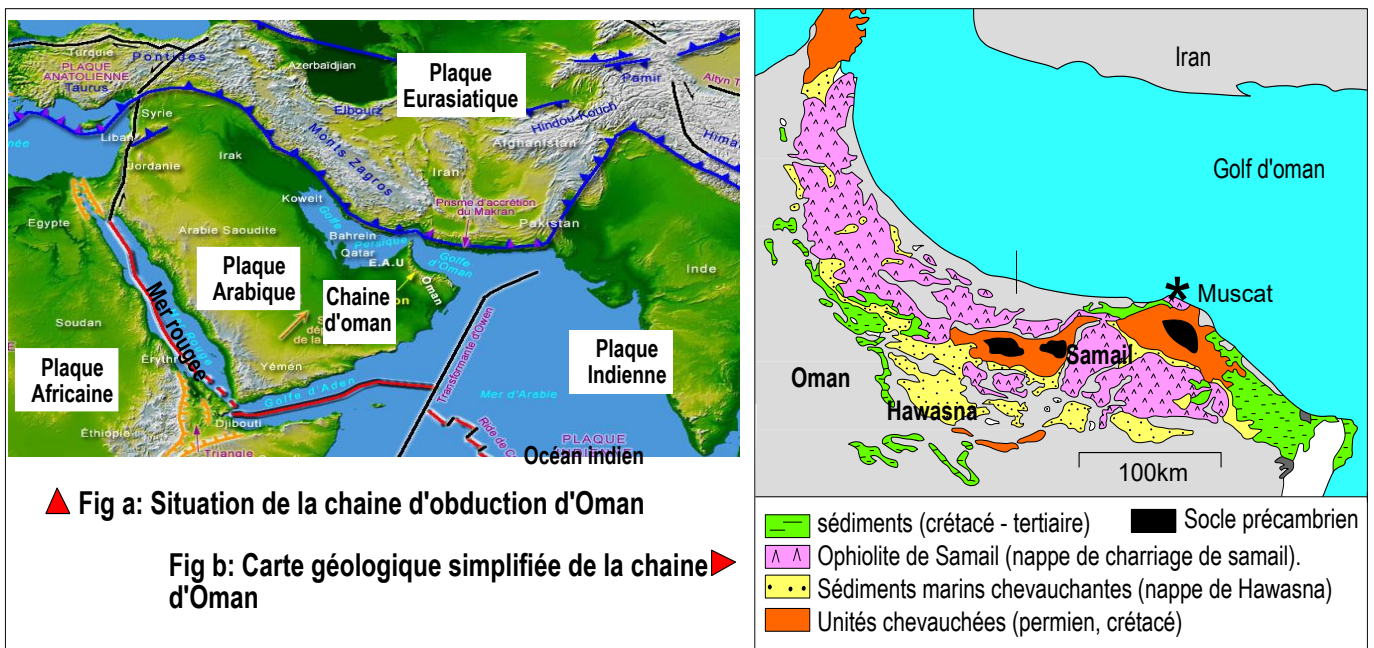
La formation des Andes commence il y a environ 150 millions d'années avec la convergence entre la plaque Nazca et la plaque sud-américaine. La plaque Nazca, plus dense, subducte sous la plaque continentale, provoquant une fosse océanique, un prisme d'accrétion et un volcanisme intense.

Les fortes compressions déforment la croûte continentale en plis et failles inverses, entraînant son épaissement et son raccourcissement sur une très longue période. Ces processus, associés au volcanisme, ont conduit à la formation de la chaîne des Andes sur la marge ouest de l'Amérique du Sud.

## Les chaînes d'obduction et leur relation avec la tectonique des plaques

### I/ Caractéristiques structurales et pétrographiques des chaînes d'obduction

#### Doc 1 : Chaîne d'Oman, un exemple de chaînes d'obduction



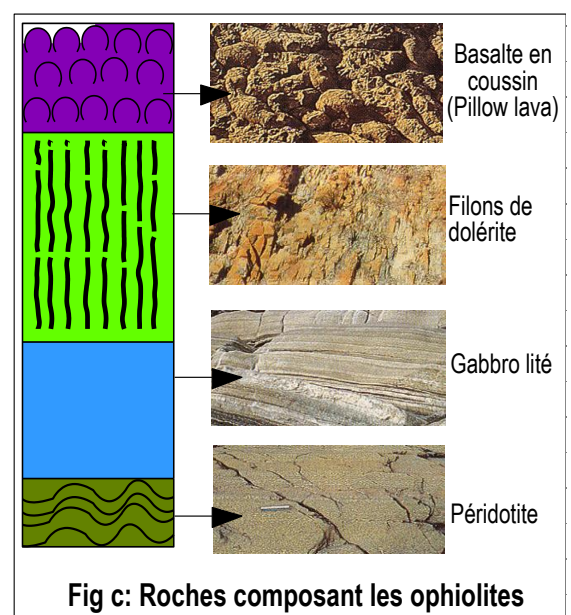
La chaîne d'Oman est située au sud-est de la péninsule arabique (شبه الجزيرة العربية) au nord de Sultanat Oman, elle s'étend sur les bordures du golf Oman. Elle présente :

- Des caractéristiques structurales: surtout des déformations tectoniques sous forme de nappes de charriage.

- Des caractéristiques pétrographiques : des roches sédimentaires et surtout un complexe rocheux appelé ophiolite.

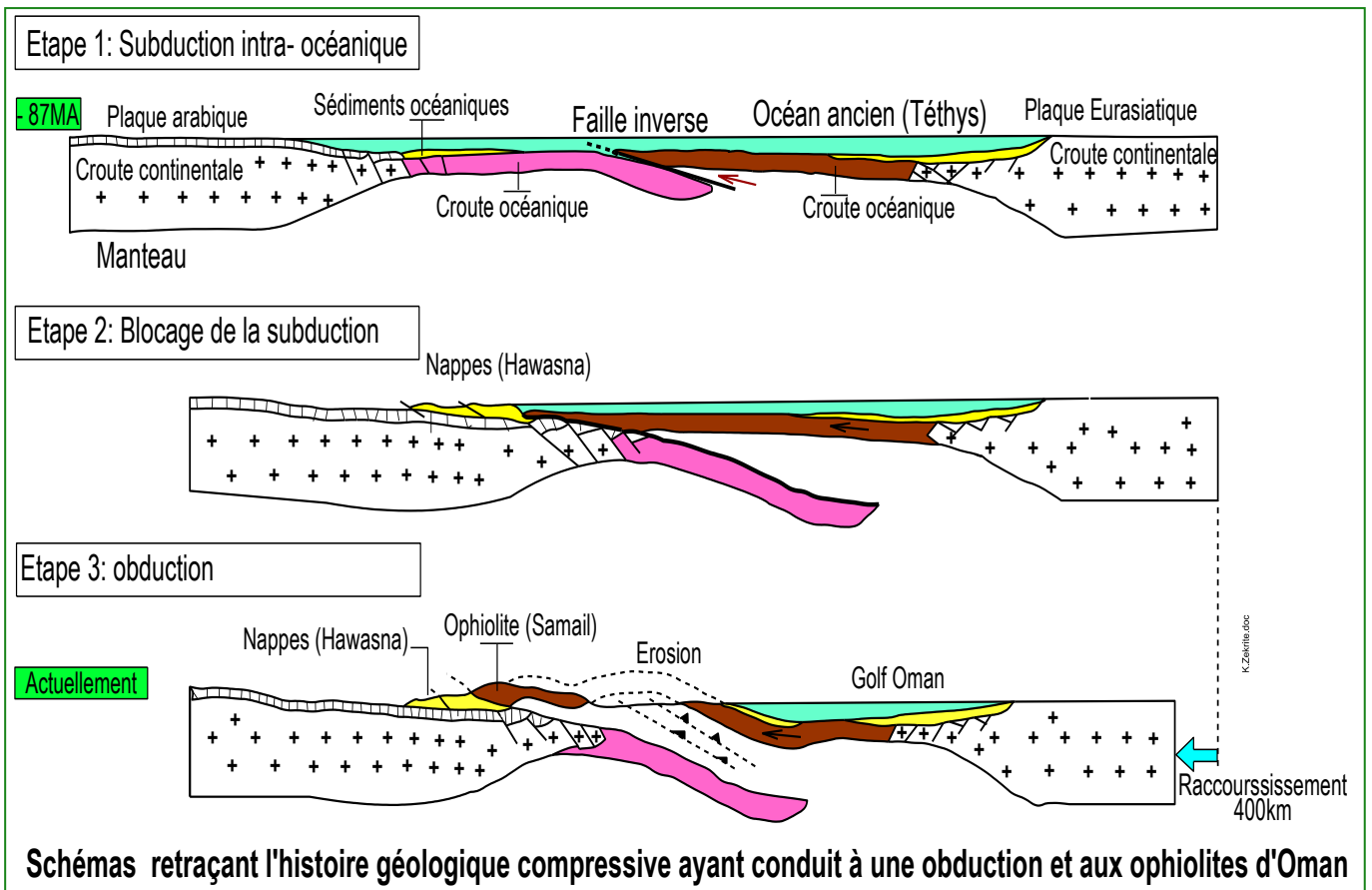
- L'ophiolite est un complexe constitué des mêmes roches de la lithosphère océanique qui sont : le basalte, la dolérite, le gabbro et la péridotite. L'ophiolite d'Oman est donc une lithosphère océanique ancienne.

La présence d'ophiolite dans la chaîne d'Oman indique la présence d'un océan ancien (exocéan) entre la plaque arabique et la plaque eurasiatique et que la croûte océanique a remontée sur le



continent arabe. Il s'agit du phénomène d'obduction. La chaîne d'Oman est donc une chaîne d'obduction.

## II/ Etapes de formation de la chaîne d'Oman



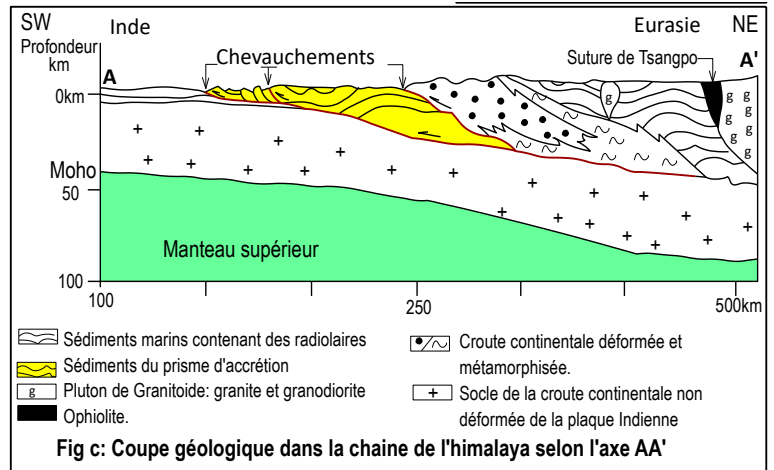
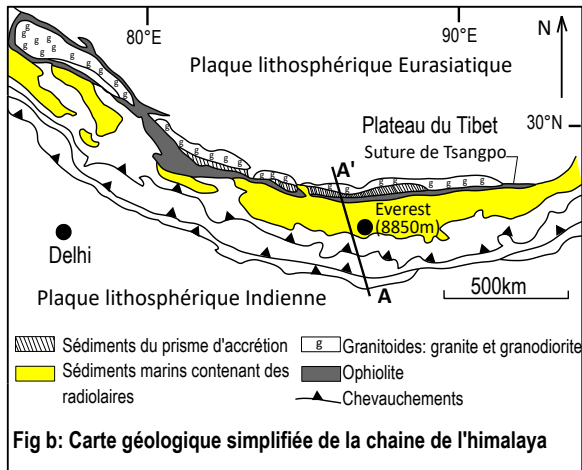
La chaîne d'Oman s'est formée en plusieurs étapes liées à la tectonique des plaques :

- **Une subduction intra-océanique** dans l'océan Téthys a entraîné la fermeture progressive du domaine marin.
- **Blocage de la subduction** : la subduction s'est bloquée car la croûte continentale, moins dense, ne pouvait pas s'enfoncer davantage.
- **Obduction** : Sous la poursuite des compressions, un phénomène d'obduction a eu lieu : la lithosphère océanique a été charriée sur la croûte continentale, formant des nappes ophiolitiques et un prisme d'accrétion. L'accumulation de ces matériaux a épaissi la croûte et provoqué l'élévation du relief, donnant naissance à la chaîne d'Oman.

## Les chaînes de collision et leur relation avec la tectonique des plaques

### I/ Caractéristiques structurales et pétrographiques des chaînes de collision

## Doc 1 : Caractéristiques de la chaîne de l'Himalaya : exemple de chaînes de collision



L'Himalaya est une chaîne de montagnes intracontinentale formée par la collision entre la plaque indienne et la plaque eurasiatique, et elle abrite le mont Everest.

Elle présente :

- De fortes déformations (plis, failles, chevauchements).
- Une croûte continentale très épaisse.
- Des roches ophiolitiques, des sédiments marins profonds, des roches métamorphiques et des roches plutoniques, témoignant de la fermeture d'un ancien océan par subduction.

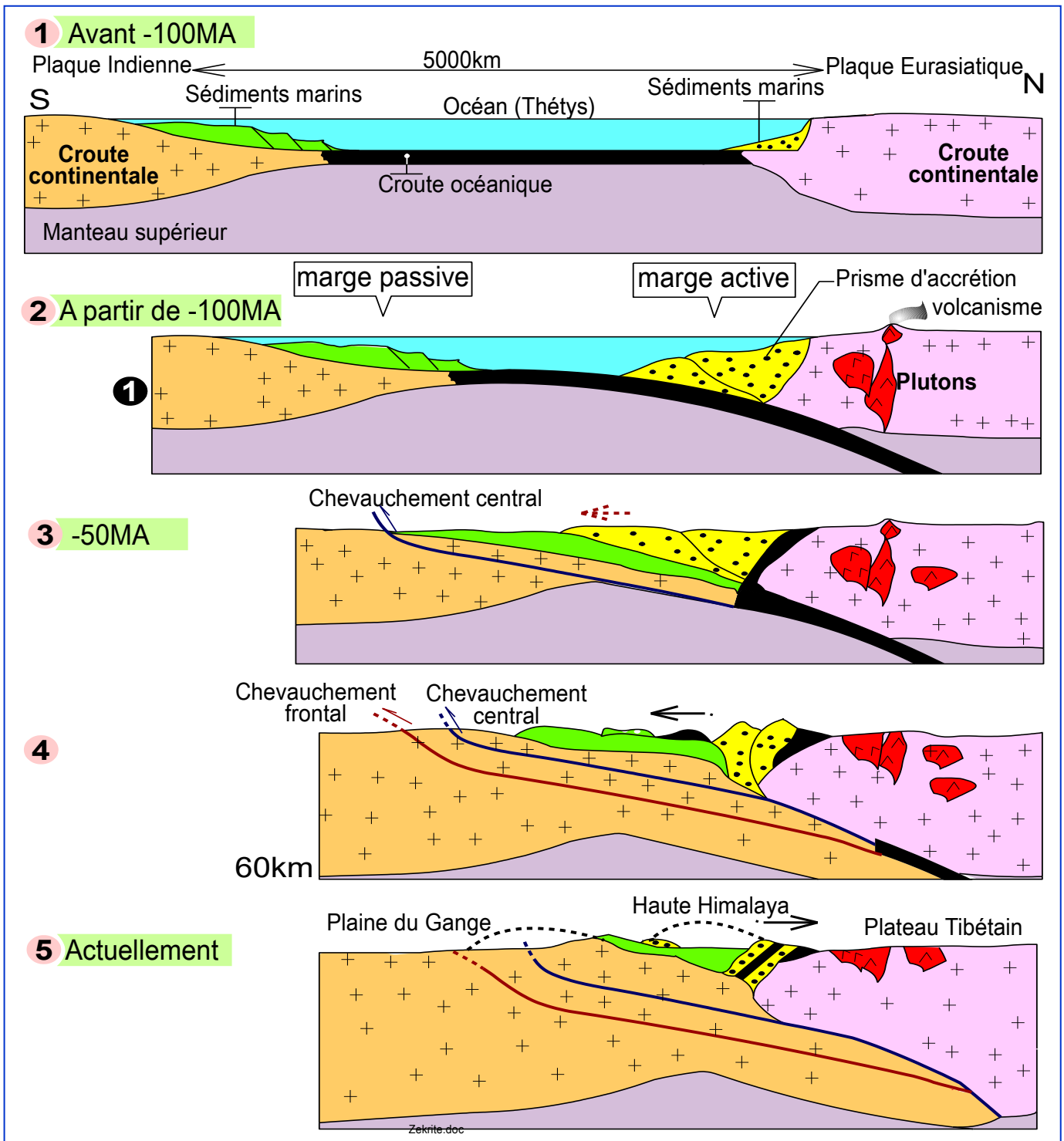
Ces éléments montrent qu'il y a eu une subduction suivie d'une collision continentale, entraînant le chevauchement des deux plaques et la formation de la chaîne himalayenne.

### II/ Etapes de la formation de la chaîne de l'Himalaya doc 3

La chaîne de l'Himalaya s'est formée en trois étapes liées à la tectonique des plaques :

- La subduction de la Téthys sous la plaque eurasiatique a accompagné le déplacement de la plaque indienne vers le nord.
- La collision des deux continents a bloqué la subduction et a laissé une suture ophiolitique entre les deux continents.
- La poursuite de la collision a provoqué de fortes compressions, formant des plis, des failles et des chevauchements, ce qui a épaissi la croûte et donné naissance à la haute chaîne de l'Himalaya

## Doc 3 : Model explicatif de formation de la chaine de l'Himalaya



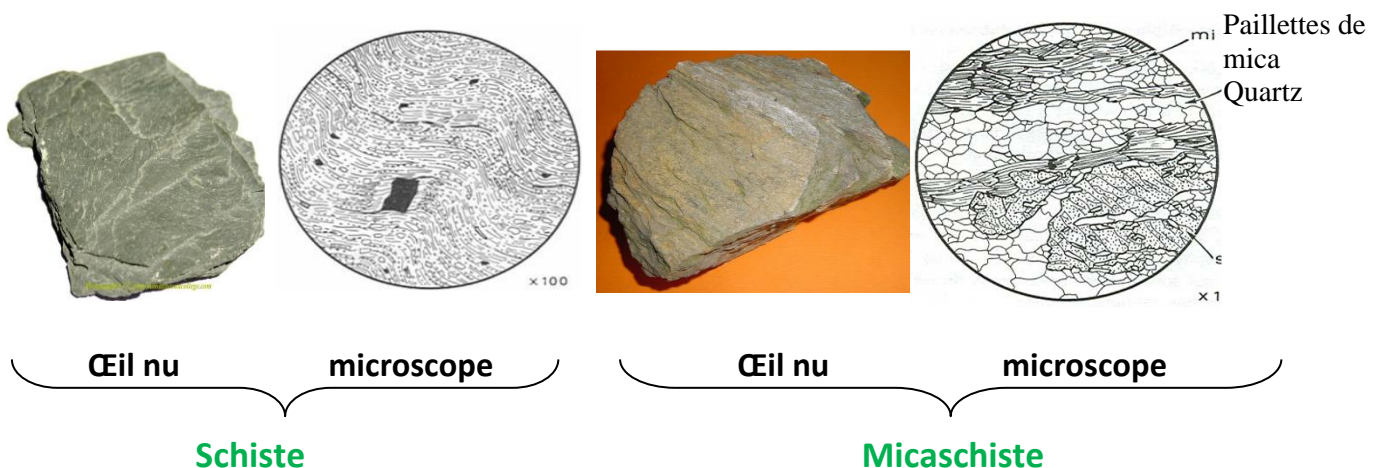
## Chapitre 2 : Le métamorphisme et sa relation avec la tectonique des plaques

- 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 : la pression et la température.
- Les roches métamorphiques apparaissent à la surface dans les chaînes de montagnes, anciennes ou récentes : chaînes de collision et chaînes de subduction.

### I/ Caractéristiques structurales et minéralogiques des roches métamorphiques dans les zones de collision et de subduction

#### 1/ dans les zones de collision

- Les roches métamorphiques les plus rencontrées dans les chaînes de collision sont : les schistes, les micaschistes et les gneiss.
- Ces roches métamorphiques sont liées à des roches magmatiques (le granite) et à une intense déformation cassante (failles), ce qui impose que ces roches dérivent des roches magmatiques (de la croûte continentale).
- **L'argile** se caractérise par **le litage** : aspect de succession en couches, généralement horizontales, Le litage est une caractéristique des roches sédimentaires
- **Le schiste vert** et **le micaschiste** se caractérisent par **la schistosité**, elle est plus marquée dans le micaschiste. La schistosité est une structure des roches métamorphiques caractérisée par :
  - À l'œil nu : des plans parallèles qui permettent à la roche de se diviser facilement en fines couches (feuilletés comme millfeuille).
  - Au microscope (lame mince) : une organisation orientée des minéraux, qui sont étirés et alignés dans la même direction.

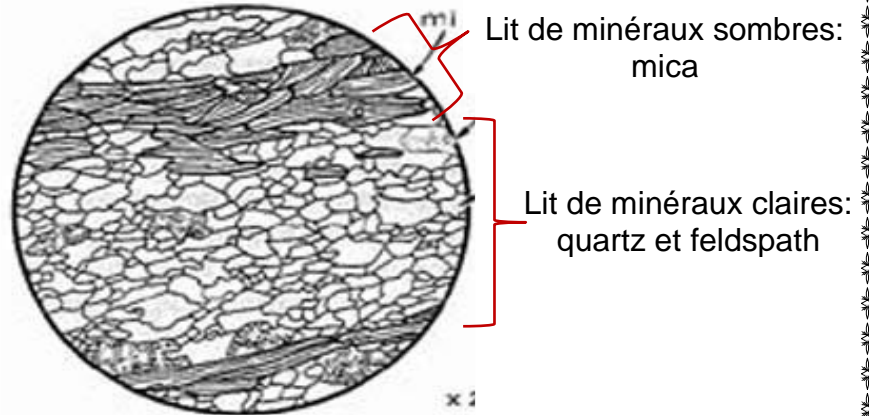


- **Le gneiss** se caractérise par **la foliation** : structure des roches métamorphiques caractérisée par :
  - À l'œil nu : un aspect rubané, avec alternance de bandes claires et sombres, sans clivage facile.

- Au microscope : une alternance de feuillets de compositions minéralogiques différentes (minéraux clairs et sombres).



**Gneiss à l'œil nu**



**Gneiss au microscope**

- Comparaison structurale et minéralogique de ces roches: en passant de l'argile au gneiss (argile → schiste → micaschiste → gneiss), le litage disparaît, puis apparaissent la schistosité et la foliation. Les minéraux argileux disparaissent au profit de nouveaux minéraux, et leur taille augmente progressivement.
- Comparaison chimique : ces roches gardent presque la même composition chimique que l'argile, avec une diminution de la teneur en eau.

● Conclusion : les schistes, micaschistes et gneiss des zones de collision proviennent tous de l'argile (transformation de la croûte continentale) Leurs différences s'expliquent par le degré de métamorphisme subi.

## 2/ dans les zones de subduction

- Les roches métamorphiques caractéristiques des zones de subduction sont les schistes verts, les schistes bleus et l'éclogite. Ces roches métamorphiques affleurent au voisinage des roches ophiolitiques (roches magmatiques de la croûte océanique ancienne).
- La composition minéralogique et structurale de ces trois roches est différente.
  - Le gabbro est constitué de plagioclase et de pyroxène, sa structure est grenue.
  - Le schiste bleu est constitué de glaucophane et d'épidote, il présente une structure orientée : la schistosité.
  - L'éclogite est caractérisée par les grenats et l'épidote, sans structure particulière.
- La composition chimique du schiste bleu et de l'éclogite est très proche de celle du gabbro et du basalte.

● Conclusion : Le schiste vert, le schiste bleu et l'éclogite des zones de subduction sont des roches métamorphiques qui dérivent des roches magmatiques de la croûte océanique (le basalte ou le gabbro), ils ont subi une transformation dans leur composition minéralogique et leur structure, sans modification de la composition chimique.

## II/ Les facteurs qui interviennent dans le phénomène du métamorphisme

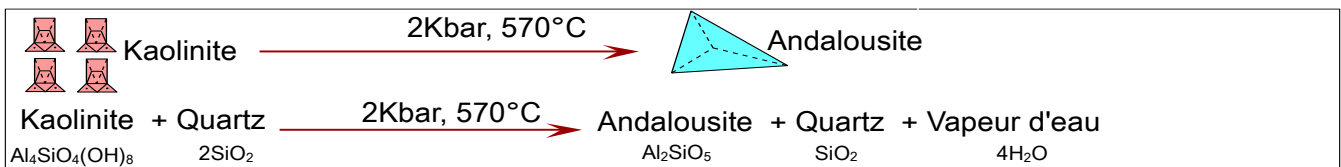
Comment explique-t-on la transformation minéralogique et structurale des roches métamorphiques ??:

■ La pression provoque l'étirement et l'orientation des minéraux, la température provoque la déshydratation des minéraux et leur transformation.

■ Lorsque les minéraux d'une roche sont portés à l'action combinée de la température et de la pression, ils deviennent instables dans les nouvelles conditions,

ainsi ils se déshydratent et subissent une modification à l'état solide pour devenir plus denses, les minéraux anciens se transforment en de nouveaux minéraux plus en équilibre avec les nouveaux facteurs : on parle de réactions minéralogiques.

**Exemple de réaction minéralogique :**



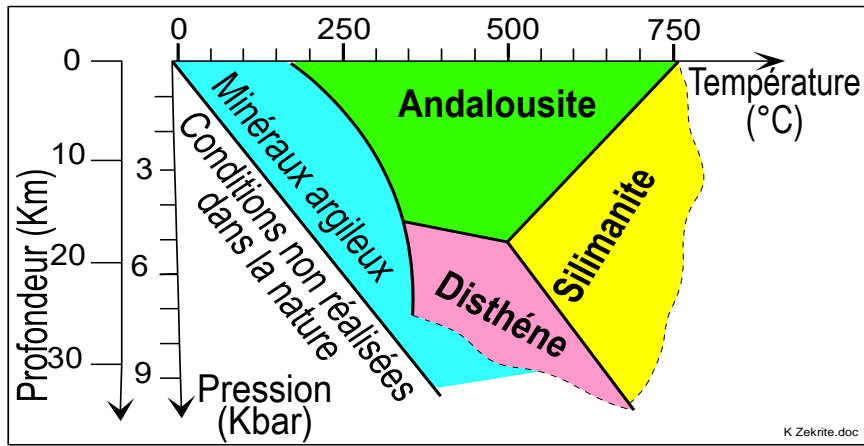
■ La différence minéralogique observée lorsqu'on passe d'une roche métamorphique à une autre s'explique par le fait que chaque roche a subi des conditions de températures et de pression qui lui sont propres et qui ont permis l'apparition de minéraux bien déterminés stables dans ces conditions.

■ La pression et la température sont les deux facteurs essentiels qui contrôlent le type et le degré de métamorphisme dans la nature, ces deux facteurs varient selon :

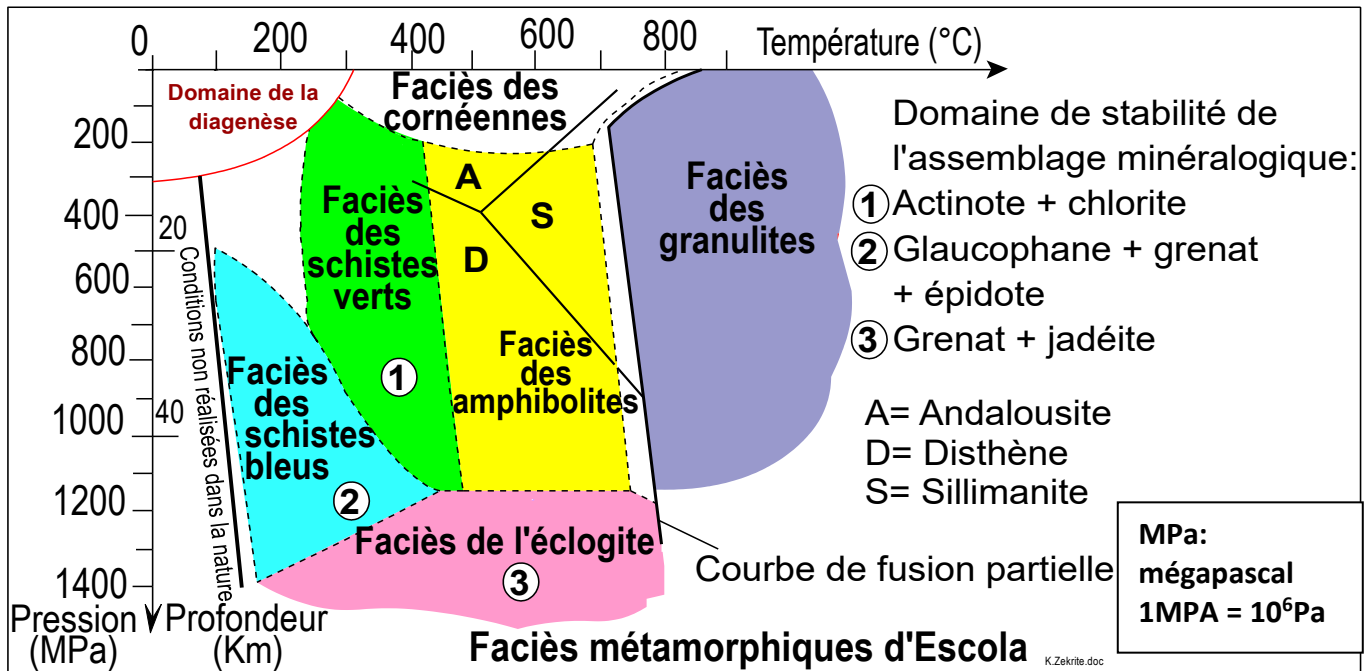
- La profondeur : la température et la pression augmentent en fonction de la profondeur ; les roches vont subir donc des degrés croissants de métamorphisme en s'enfonçant en profondeur.
- Le cadre géodynamique de la lithosphère : une roche située dans une zone de subduction va subir des conditions de métamorphisme propres différentes des conditions d'une autre roche soumise à une collision.

**III/ Notion de minéral indicateur, domaine de stabilité, séquence métamorphique et faciès métamorphique :**

## Domaine de stabilité des silicates d'alumine



- **Le champ de stabilité** d'un minéral correspond aux conditions de pression et de température où il peut se former et rester stable.
- **Un minéral indicateur = index** est un minéral qui a un champ de stabilité limité, et qui n'apparaît que dans des conditions précises. Sa présence dans une roche métamorphique permet de déterminer les conditions de pression et de température qu'a subies la roche, car il en garde la trace.
- **Une séquence métamorphique** est un ensemble de roches métamorphiques provenant d'une même roche initiale, ayant la même composition chimique, mais des structures et des minéraux différents en raison de degrés de métamorphisme variés. Exemple :
  - La séquence qui provient de l'argile : Schiste → micaschiste → gneiss → leptynite.
  - La séquence qui provient du basalte ou du gabbro : Schiste vert → schiste bleu → éclogite.
  - La séquence qui provient du calcaire : Calcschiste → marbre (الرخام) → cipolin

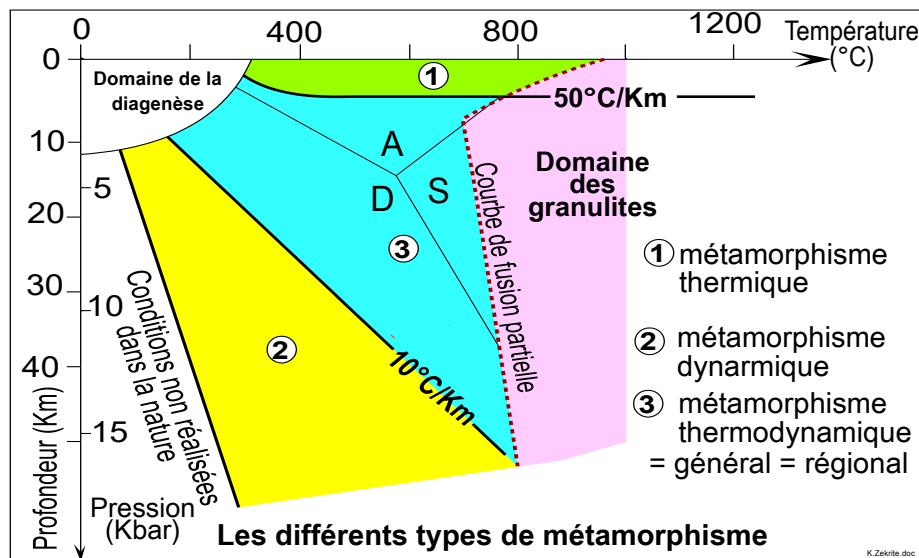


- **Un faciès métamorphique** regroupe des roches (ou des minéraux) formées dans les mêmes conditions de pression et de température, caractérisées par des minéraux

indicateurs spécifiques (ex : éclogite = jadéite + grenat). Le faciès rassemble des roches d'origines différentes mais ayant subi les mêmes conditions, indépendamment de leur composition chimique (ex : faciès du schiste vert : comprend le schiste vert provenant du basalte, le schiste provenant de l'argile, le quartzite provenant du grès, le marbre provenant du calcaire)

#### IV/ Les types de métamorphismes en relation avec les types de chaînes de montagnes

Selon l'importance de la température et de la pression, on distingue trois types de métamorphismes : (voir le document)



#### 1/ Le métamorphisme dynamique :

• Il est caractérisé par une basse température et une haute pression. Ce type de métamorphisme se développe dans les zones de subduction. En effet, dans ces zones le facteur pression est plus dominant, en lien avec la profondeur, alors que le gradient thermique est faible.

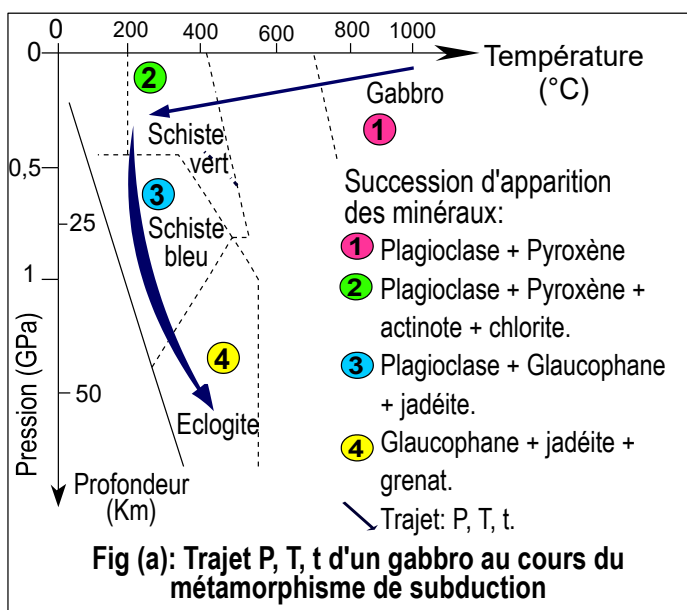


Fig (a) : Trajet P, T, t d'un gabbro au cours du métamorphisme de subduction

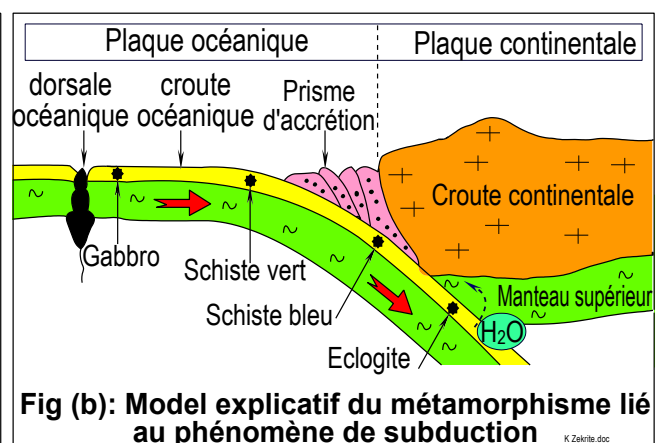
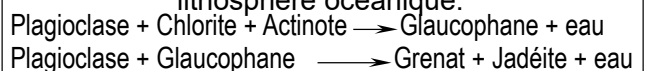


Fig (b) : Model explicatif du métamorphisme lié au phénomène de subduction

Fig (c) : Deux réactions minéralogiques au cours du métamorphisme dynamique des roches de la lithosphère océanique:



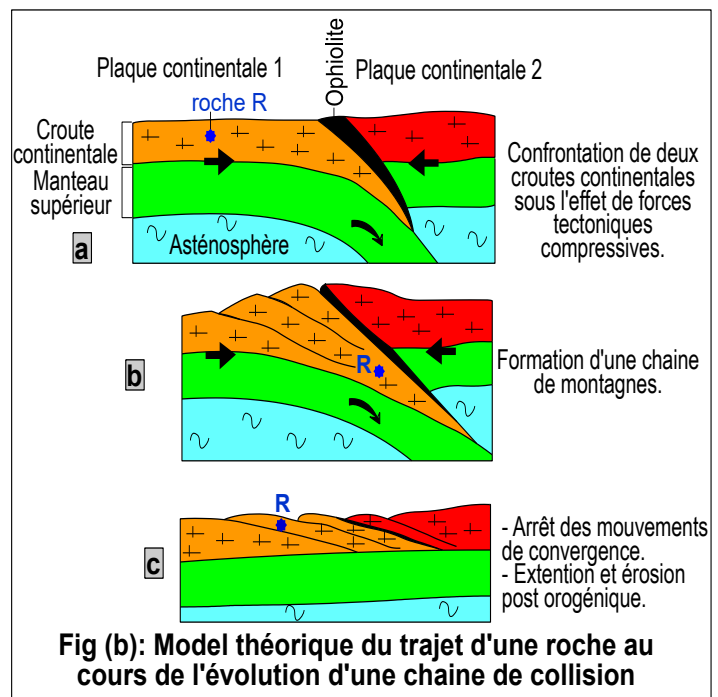
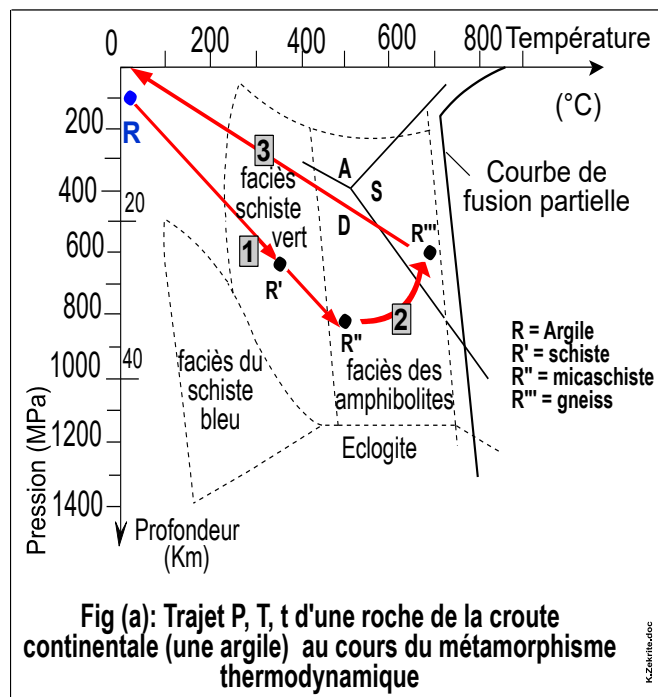
- Dans les zones de subduction, le gabbro ou le basalte, formé à haute température à la dorsale, se refroidit en s'éloignant et devient un schiste vert. Lors de la subduction, il subit une forte pression et se transforme successivement en schiste bleu puis en éclogite. Cette évolution constitue une série métamorphique typique : gabbro → schiste vert → schiste bleu → éclogite.

En parallèle, les transformations libèrent de l'eau, qui hydrate le manteau et provoque une fusion partielle à l'origine de magmas andésitiques.

Conclusion : la subduction relie métamorphisme dynamique et magmatisme, tous deux liés à la tectonique des plaques.

## 2/ Le métamorphisme thermodynamique = métamorphisme général = régional :

- Il est caractérisé par une haute température et une haute pression. Ce type de métamorphisme se développe dans les racines des chaînes de collision et affecte les roches de la lithosphère continentale soumise à l'effet combiné de la pression et de la température dû à la collision.
- Dans une zone de collision continentale, la compression enfouit les roches, augmentant la pression et la température, ce qui provoque un métamorphisme prograde (schiste vert → amphibolite, jusqu'au gneiss). Après la compression, l'extension et l'érosion amincissent la croûte, entraînant la remontée des roches profondes avec un métamorphisme rétrograde.



## 3/ Le métamorphisme thermique = métamorphisme de contact :

- Il est caractérisé par une haute température et une basse pression. Ce type de métamorphisme se développe au contact d'un granite intrusif. C'est principalement la température qui intervient, c'est la chaleur du magma qui est responsable de la transformation des roches qui l'entourent formant une auréole (هالة = تاج) de

métamorphisme.

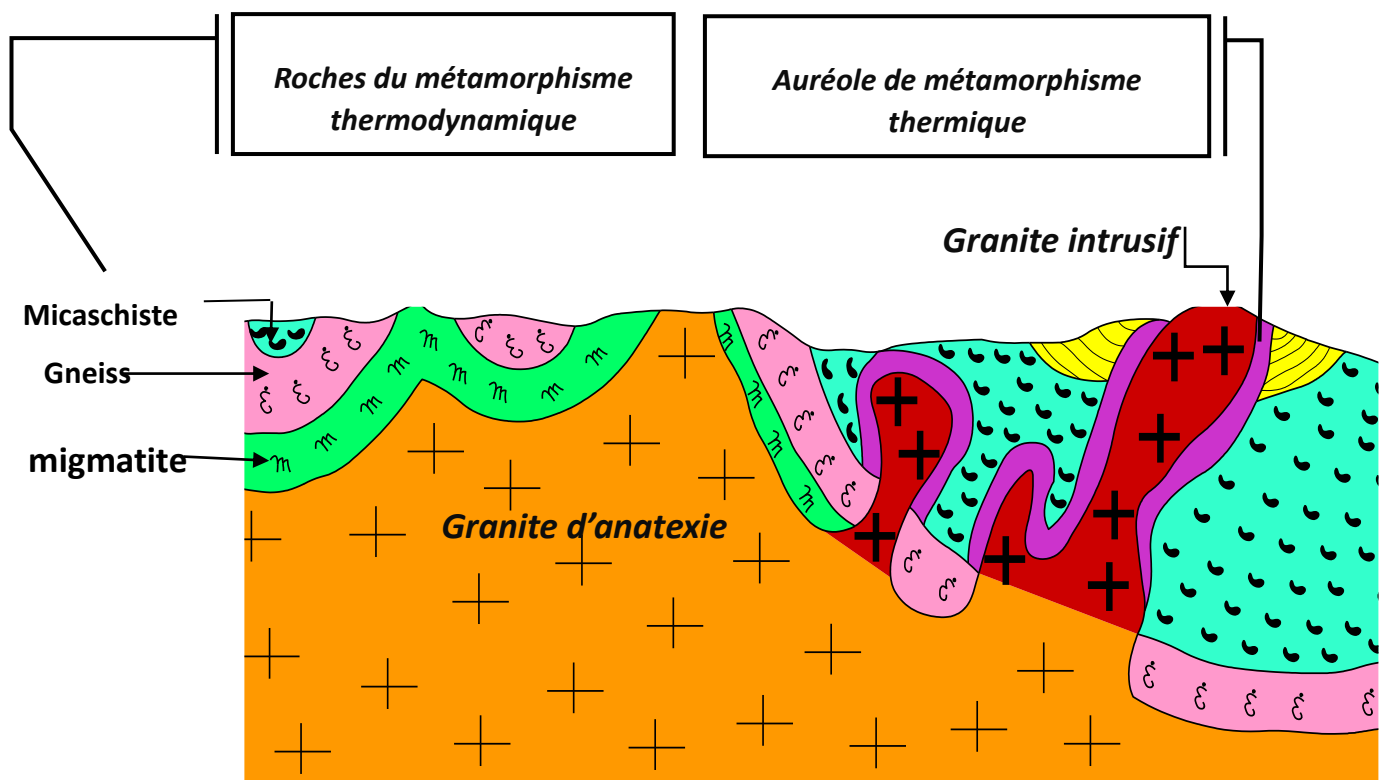
- Les minéraux des roches métamorphiques ne sont pas orientés (parce que la pression est faible) mais il se caractérise par la cornéenne : roche de faible pression et haute température

**La cornéenne, une roche métamorphique qui provient de la transformation de l'argile lorsqu'elle est soumise à une grande température.**



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

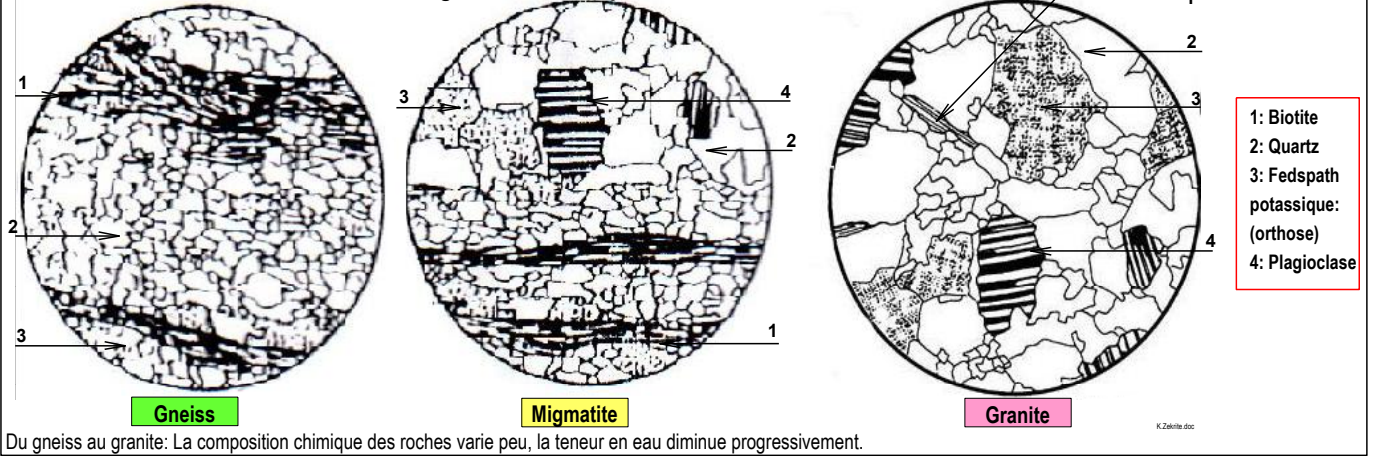
On identifie deux types de granites : **le granite d'anatexie et le granite intrusif**, tous les deux sont liés aux chaînes de montagnes et sont proches des roches métamorphiques.



### **II/ Le granite d'anatexie et sa relation avec le métamorphisme thermodynamique :**

- Le granite d'anatexie forme des massifs associés aux roches métamorphiques thermodynamiques (schistes, gneiss), avec un contact progressif via la migmatite, roche mixte (magmatique et métamorphique).

Document 2: Lames minces du granite anatectique et des roches avoisinantes.



Du gneiss au granite: La composition chimique des roches varie peu, la teneur en eau diminue progressivement.

- Le granite a une structure **grenue** (refroidissement lent), le gneiss est **folié** (métamorphique), et la migmatite présente une **structure intermédiaire**.

Conclusion : granite, migmatite et gneiss ont une origine commune ; le granite d’anatexie résulte de la fusion partielle à totale du gneiss, représentant le stade final du métamorphisme.

**III/ Le granite intrusif et sa relation avec le métamorphisme thermique :**

- Le granite intrusif forme un petit massif elliptique à limites nettes, intrusif et discordant, recoupant les roches plissées. Il est entouré d’une auréole de métamorphisme de contact, sans zone de transition comme la migmatite.
- Au voisinage du granite intrusif, les roches montrent un métamorphisme plus intense : apparition de nouveaux minéraux, augmentation de leur taille, disparition de leur orientation, et présence **d’enclaves de cornéennes** dans le granite. La cornéenne est une roche métamorphique de haute température et basse pression.

**Une enclave de cornéenne (cor) dans une masse granitique**

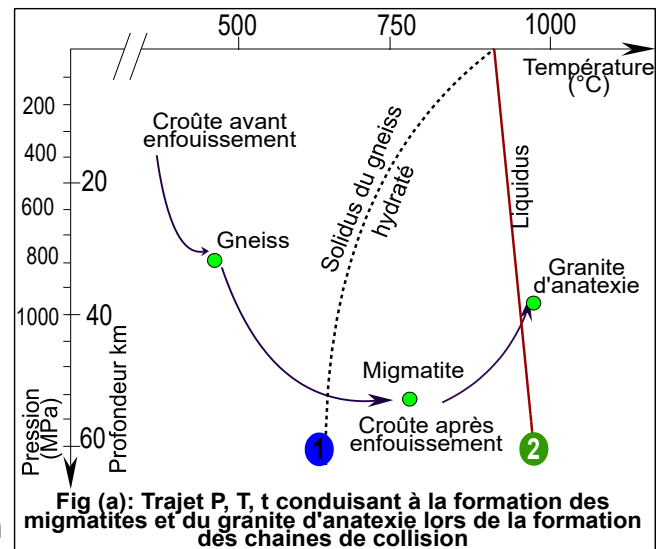


**IV/ Comparaison entre le granite intrusif le granite d’anatexie :**

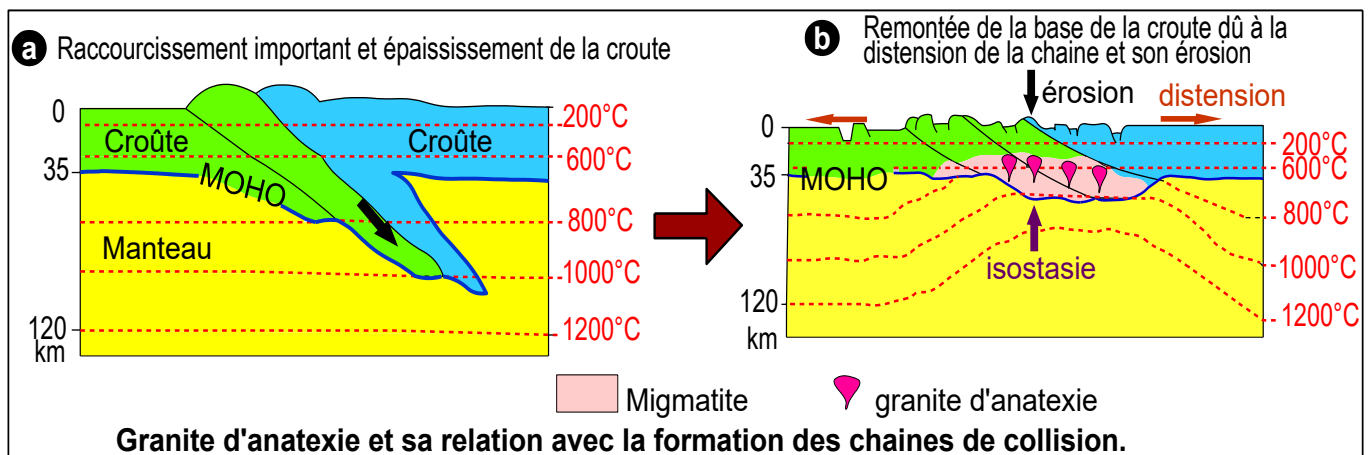
	<b>Granite d’anatexie</b>	<b>Granite intrusif</b>
<b>L’étendue</b>	Large surface (peu dépasser 25 km <sup>2</sup> )	Très limitée (moins de 10km <sup>2</sup> )
<b>Les limites</b>	floues	Nettes
<b>Roches avoisinantes</b>	Migmatites et roches métamorphiques du métamorphisme régional	Enclaves et auréole de métamorphisme
<b>Relation avec le métamorphisme</b>	Le granite s’inscrit dans le cadre du métamorphisme thermodynamique avoisinant.	Le granite provoque le métamorphisme de contact avoisinant.

## V/ Comment se fait la formation du magma granitique ?

- Les granites sont très fréquents dans les cœurs des chaînes de collision.
- Lors d'une collision continentale, les roches sont enfouies en profondeur et subissent un métamorphisme régional intense, formant notamment du gneiss.
- Lors de la remontée, la baisse de pression et la forte température provoquent l'anatexie : une fusion partielle du gneiss.
  - Si la fusion est faible → formation de migmatite (mélange gneiss + granite).
  - Si la fusion est importante → formation d'un magma granitique.
- Ce magma peut soit se solidifier sur place (granite d'anatexie), soit remonter et former un granite intrusif.



Le granite intrusif s'insère dans des roches préexistantes, le flux de la chaleur « cuit » ces roches et y provoquent un métamorphisme thermique = de contact.



**Anatexie** : Processus de la fusion partielle (origine de la migmatite), ou totale des roches (origine du granite d'anatexie) suite à l'élévation très importante de la température ou à un enfouissement profond

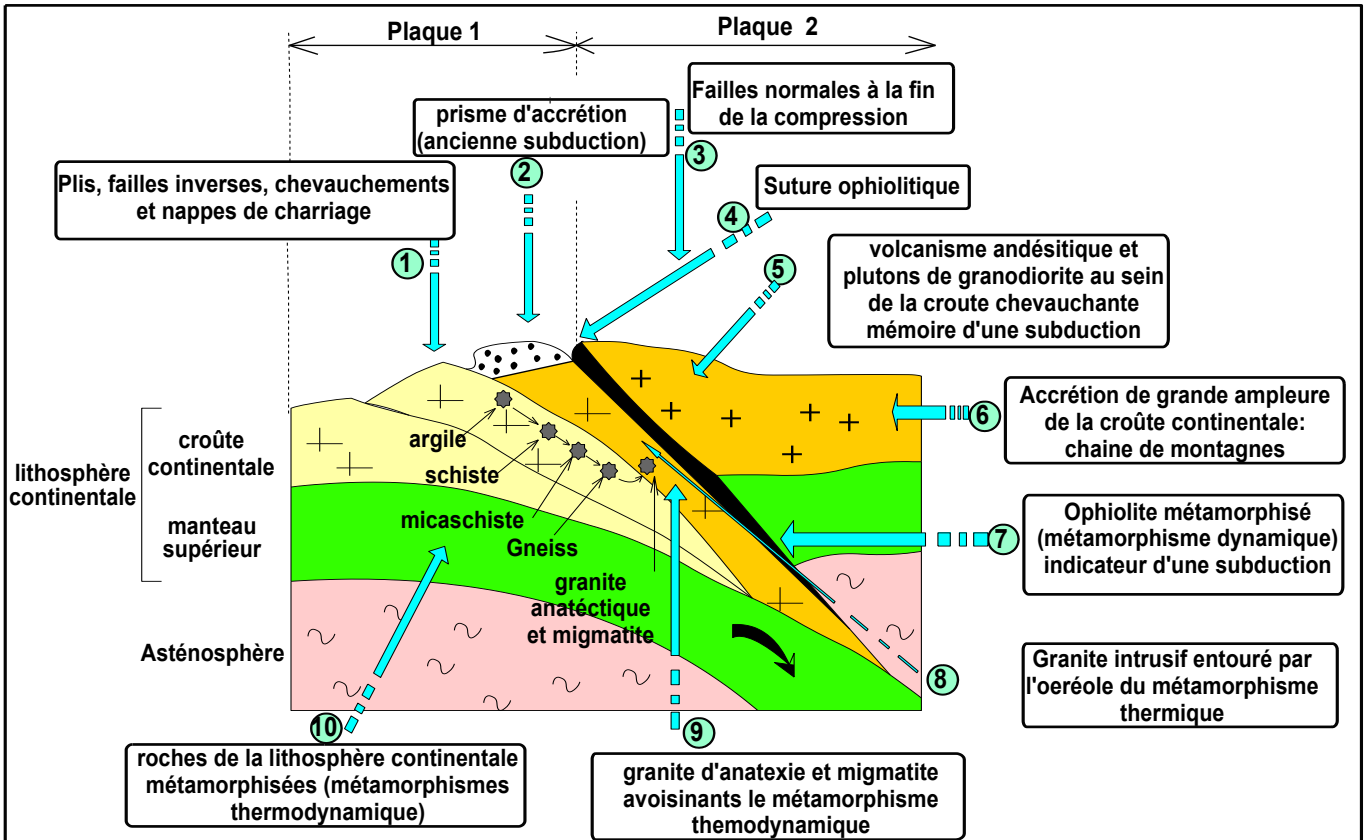
**Liquide anatectique** : liquide primaire issu de la fusion des roches sédimentaires, caractérisé par une composition chimique stable, quelle que soit la roche mère d'origine.

**Température anatectique** : température qui correspond au début de la fusion partielle de roches sédimentaires, elle est d'environ 700°C.

فضلا لا تنسوني من صالح الدعاء

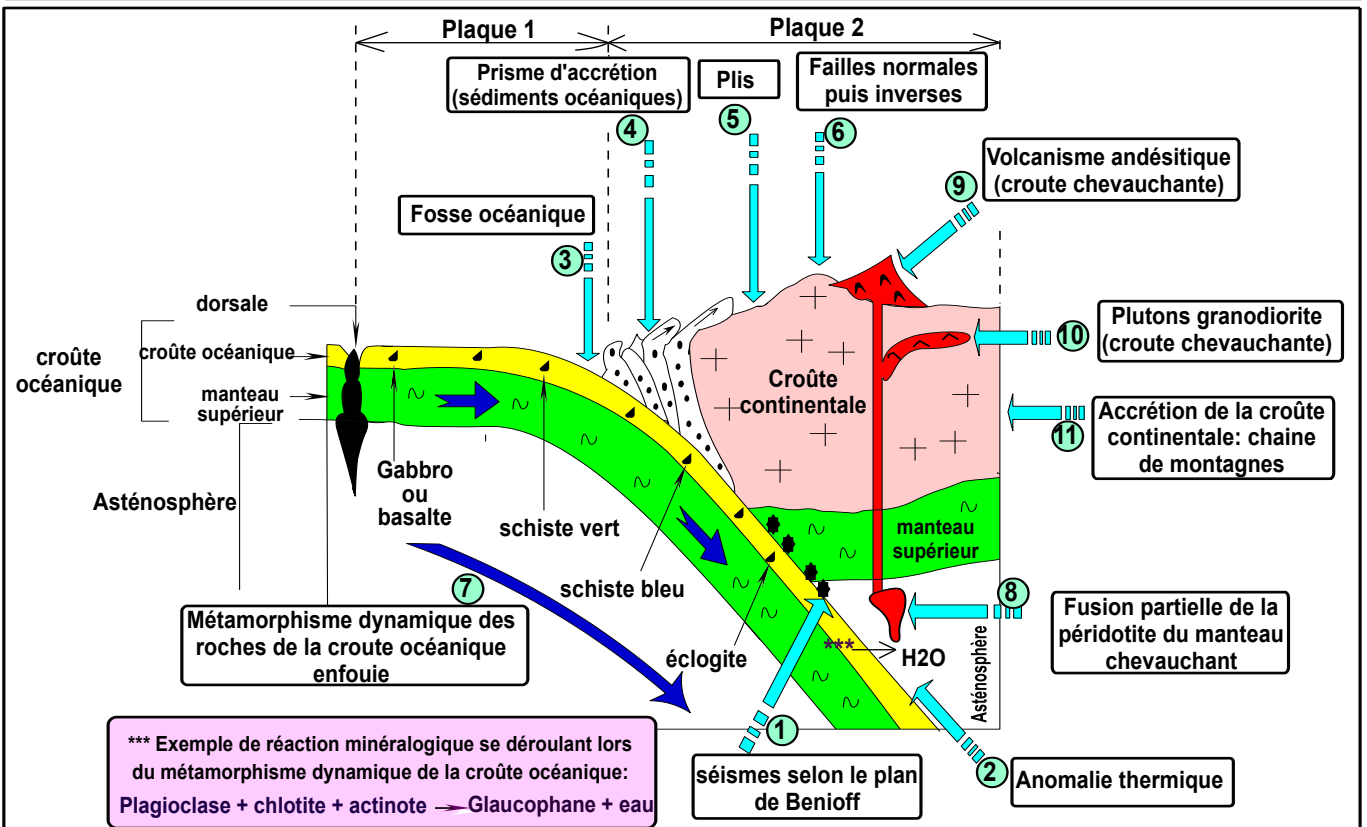


# Schéma récapitulatif



**Schéma récapitulatif résumant les phénomènes géologiques résultants de la tectonique des plaques dans les zones de collision.**

Zekrite.doc



**Schéma récapitulatif résumant les phénomènes géologiques résultants de la tectonique des plaques dans les zones de subduction.**

Zekrite.doc