

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^{ème} bac – série SVT – 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'O₂).

- **La fermentation** : voie métabolique anaérobie (se déroule sans O₂).

★ 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⁺ = déshydrogénation) et se scinde (se casse) en deux molécules d'acide pyruvique (= pyruvate : CH₃COCOOH).

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

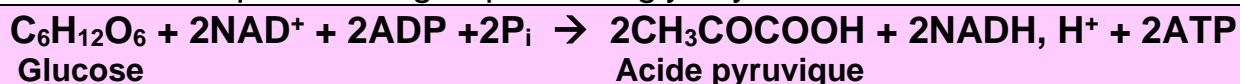


Réaction de phosphorylation

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

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⁺ à un accepteur comme NAD⁺ et FAD.

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



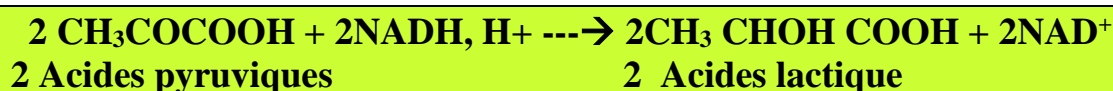
II/ La fermentation :

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

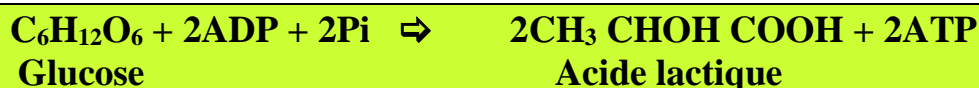
1/ La fermentation lactique

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

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 :

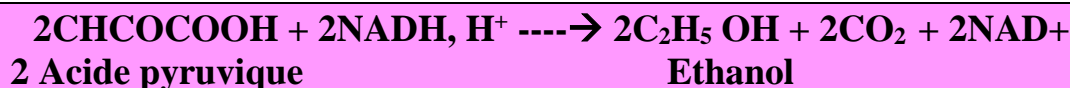


- * Parmi les cellules qui ont recours à la fermentation lactique : les cellules musculaires et les bactéries du lait de type lactobacillus.

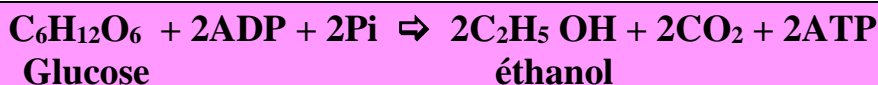
2/ La fermentation alcoolique :

- * 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 CO₂, cette réaction est couplée avec une réoxydation du NADH, H⁺ en NAD⁺.

- * 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 :



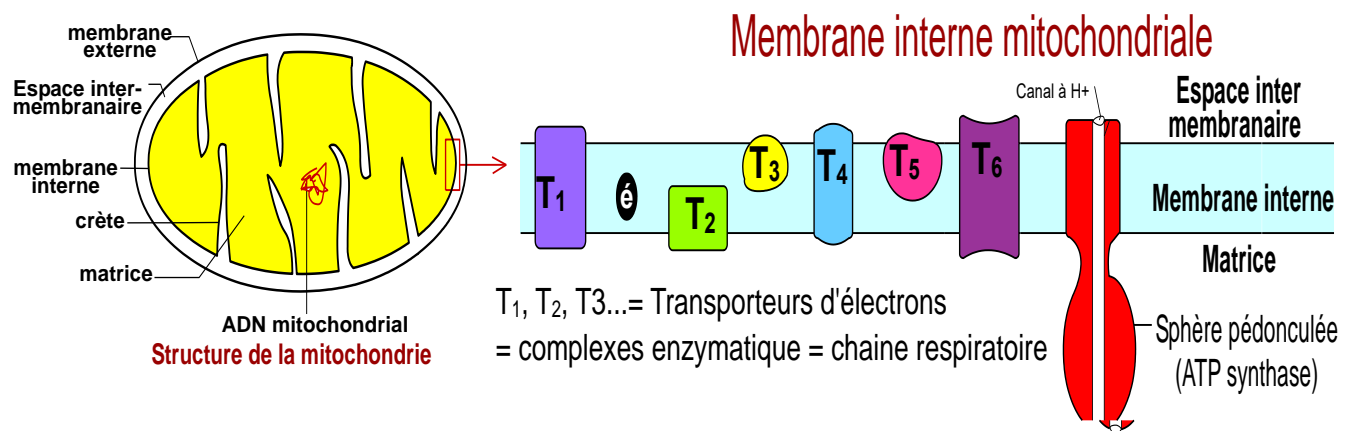
- * Parmi les cellules qui ont recours à la fermentation alcoolique : les cellules de la levure.

- * 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⁺ pour assurer la présence en permanence de NAD⁺ 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⁺ et FAD) et de composés réduits (NADH, H⁺ et FADH₂), 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 CO₂

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.

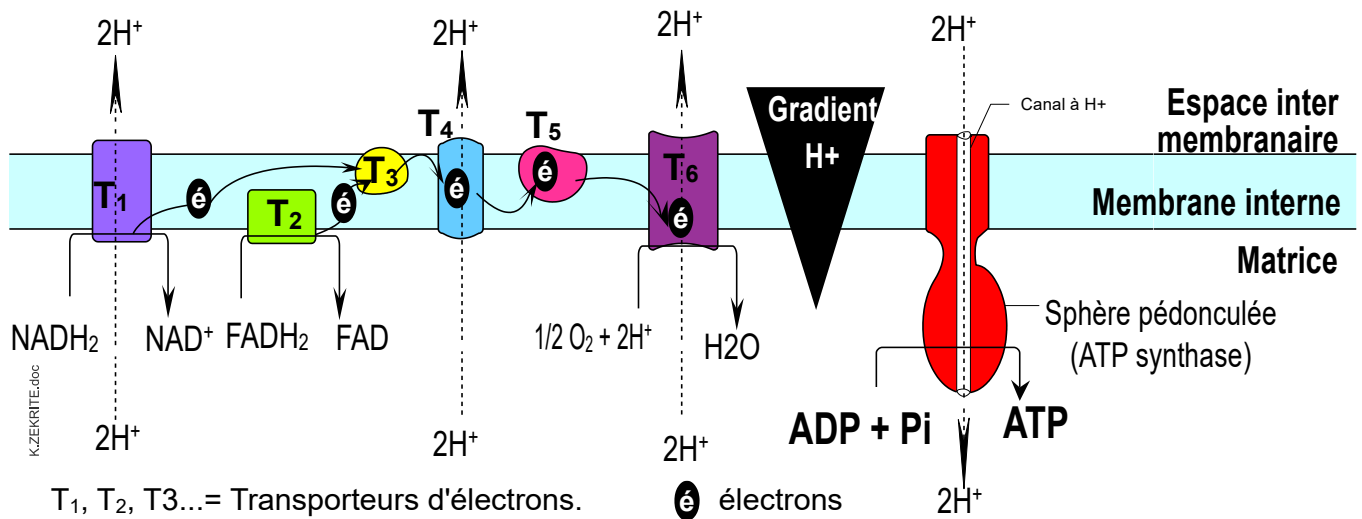
✦ Le cycle de Krebs : se déroule dans la matrice mitochondriale.

✦ La phosphorylation oxydative : se déroule dans la membrane interne mitochondriale.

a/ La formation de l'acétyl coenzyme A

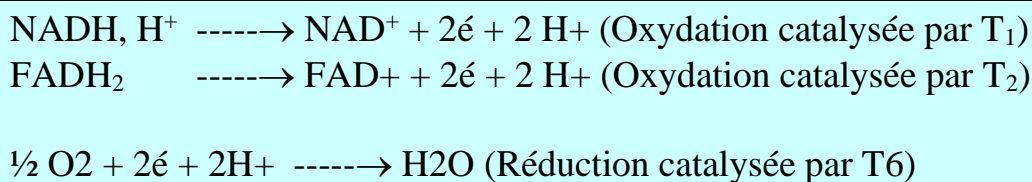
Chaque molécule de pyruvate, issue de la glycolyse pénètre dans la matrice mitochondriale et subit les transformations suivantes :

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

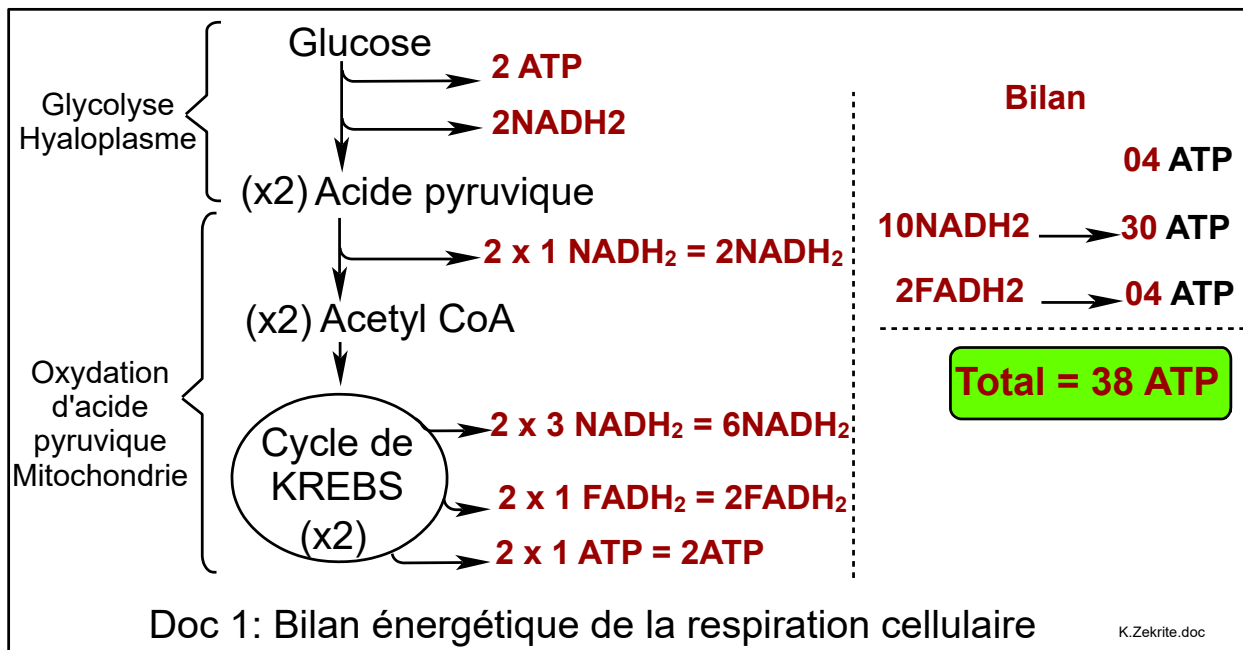
◆ Les transporteurs réduits (NADH, H⁺ et FADH₂) issus de la glycolyse et de l'étape de formation de l'acétyl CoA et du cycle de Krebs et stocké dans la matrice mitochondriale, cèdent leurs deux électrons à un système de transporteurs qui, par une cascade de réactions d'oxydo-réduction, amène ces électrons jusqu'à l'accepteur final, l'oxygène moléculaire qui se réduit en molécule d'eau.



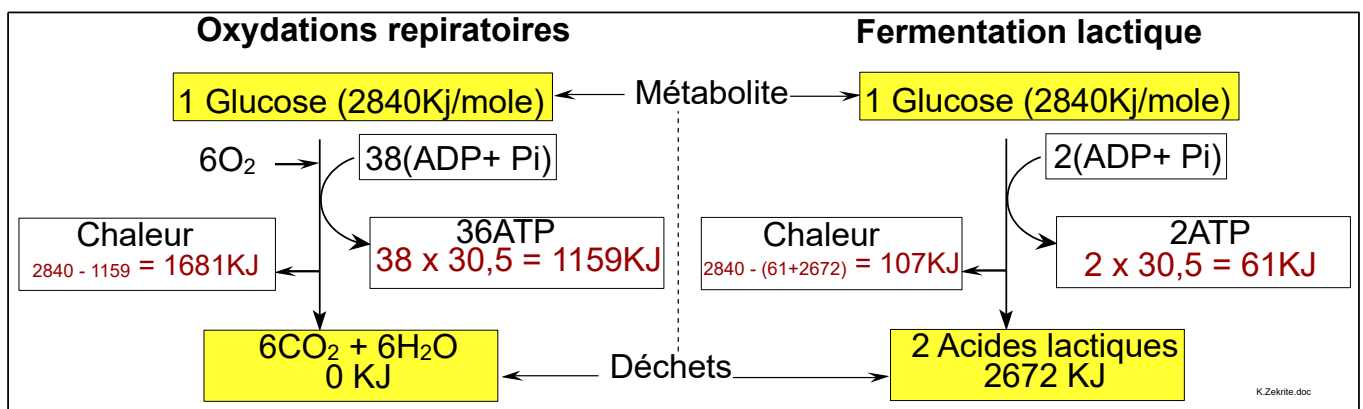
- ◆ L'énergie cédée au cours du transfert d'électrons est exploitée pour pomper les protons H⁺ de la matrice vers l'espace inter membranaire ce qui engendre un gradient de concentration de part et d'autre la membrane interne mitochondriale.
- ◆ La membrane interne est imperméable aux protons sauf au 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⁺ donne l'énergie nécessaire à la synthèse de 3 moles d'ATP.
- ◆ L'oxydation d'une mole de FADH₂ 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 (H₂O et CO₂) 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 = $1159/2840 \times 100 = 41\%$

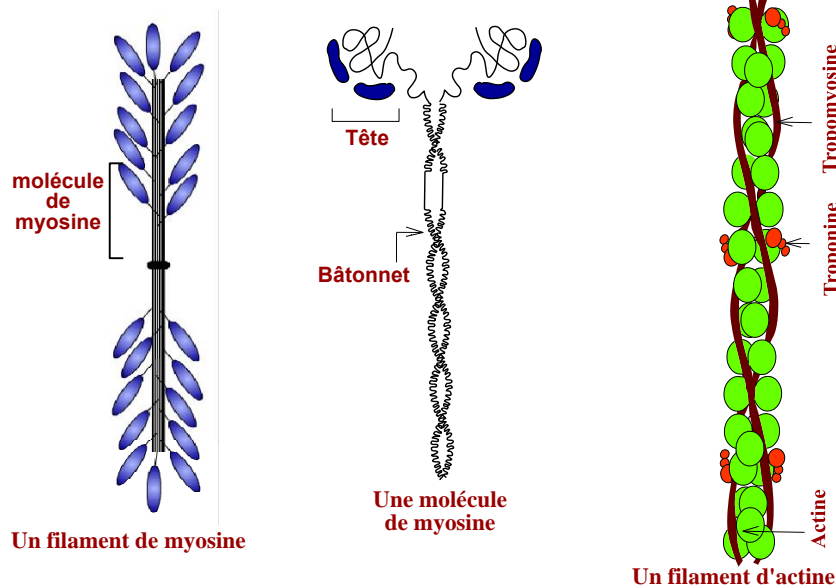
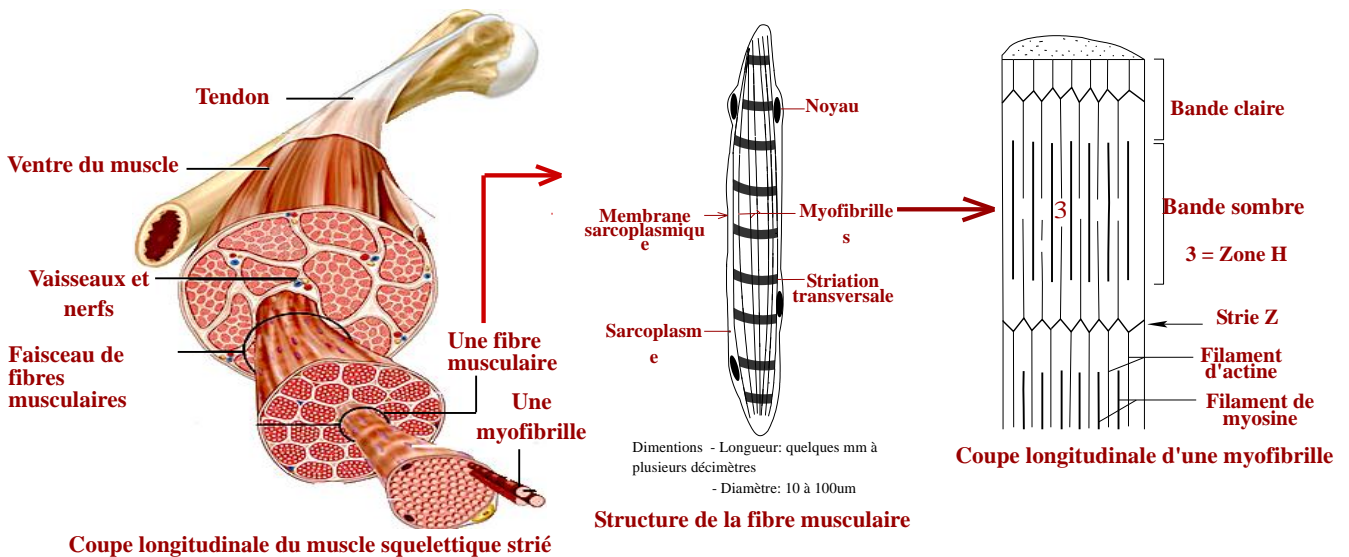
❁ Le rendement énergétique de la fermentation est beaucoup plus faible que celui de la respiration.

❁ 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.

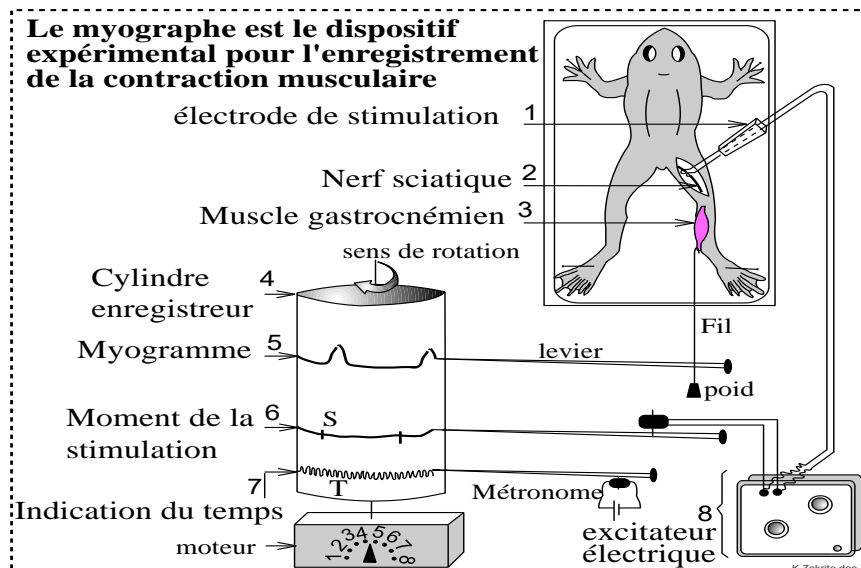
I/ La structure et l'ultrastructure du muscle strié squelettique :



- 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'O₂ 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 :



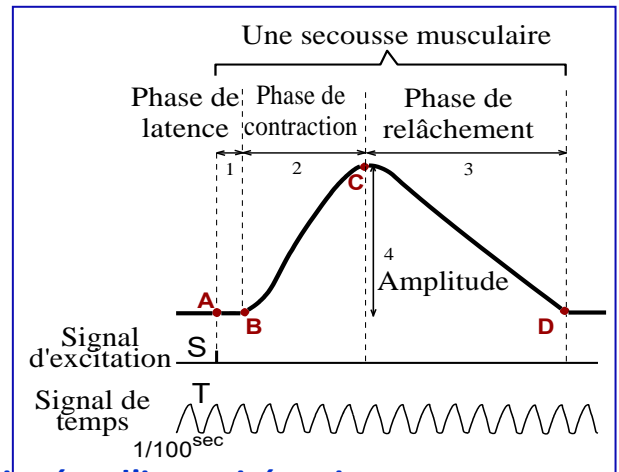
- Le phénomène mécanique de la contraction musculaire est enregistré grâce à un appareil nommé myographe.
- Si le muscle se contracte et se relâche le cylindre enregistreur dessine *une courbe* qu'on nomme myogramme = secousse musculaire.

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**



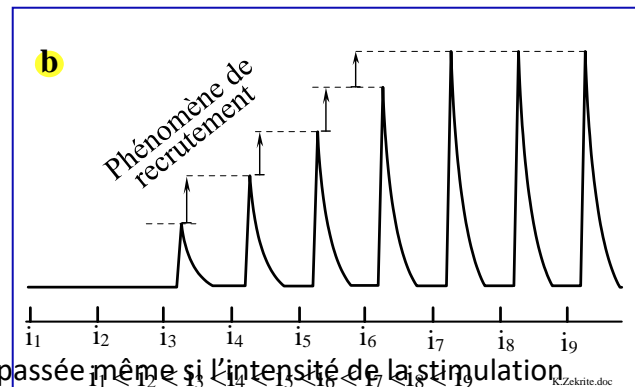
2/ Réponse du muscle à des excitations éloignées d'intensité croissante.

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

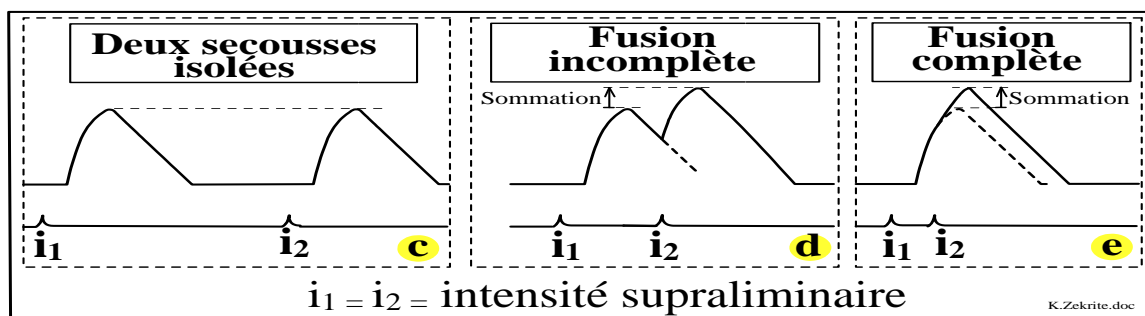
✳ Les stimulations dont l'intensité est égale ou supérieure à la rhéobase donnent une réponse, elles sont dites efficaces.

✳ 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.

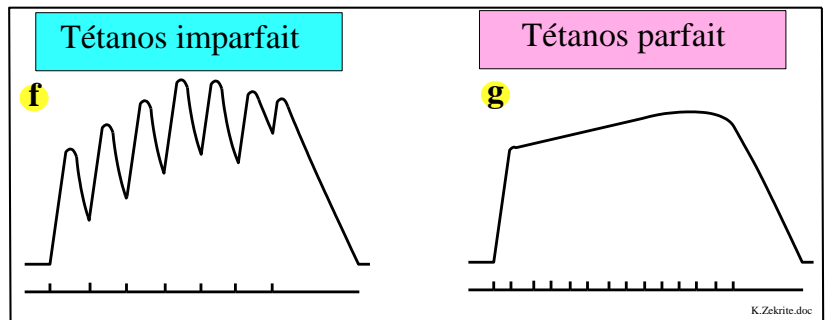
- **Une fusion complète des deux secousses en une seule** avec une sommation : Si la deuxième excitation atteint le muscle pendant la phase de contraction.
- Si la deuxième excitation atteint le muscle pendant la phase de latence, le muscle ne répond pas à la deuxième excitation

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.

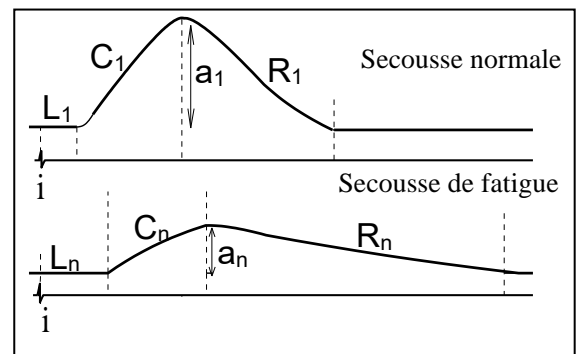


5/ Fatigue musculaire

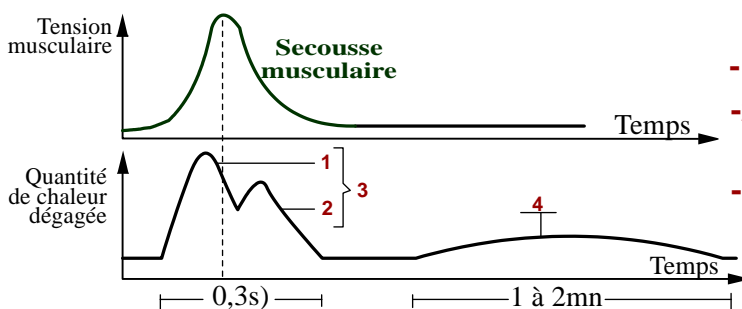
Quand un muscle subit un grand nombre d'excitations successives, il se fatigue, on dit que le muscle est **fatigable**.

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 :

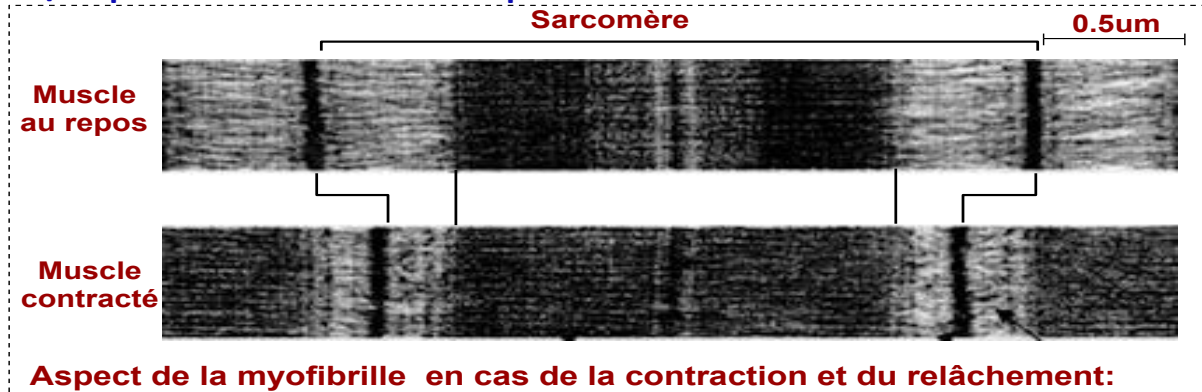
- **La chaleur initiale** : libérée au cours de la secousse musculaire pendant une courte durée mais en grande quantité, une partie est libérée au cours de la phase de contraction et l'autre partie au cours de la phase de relâchement. Cette chaleur persiste même en milieu anaérobie, elle provient des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



Aspect de la myofibrille en cas de la contraction et du relâchement:

✳ 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).

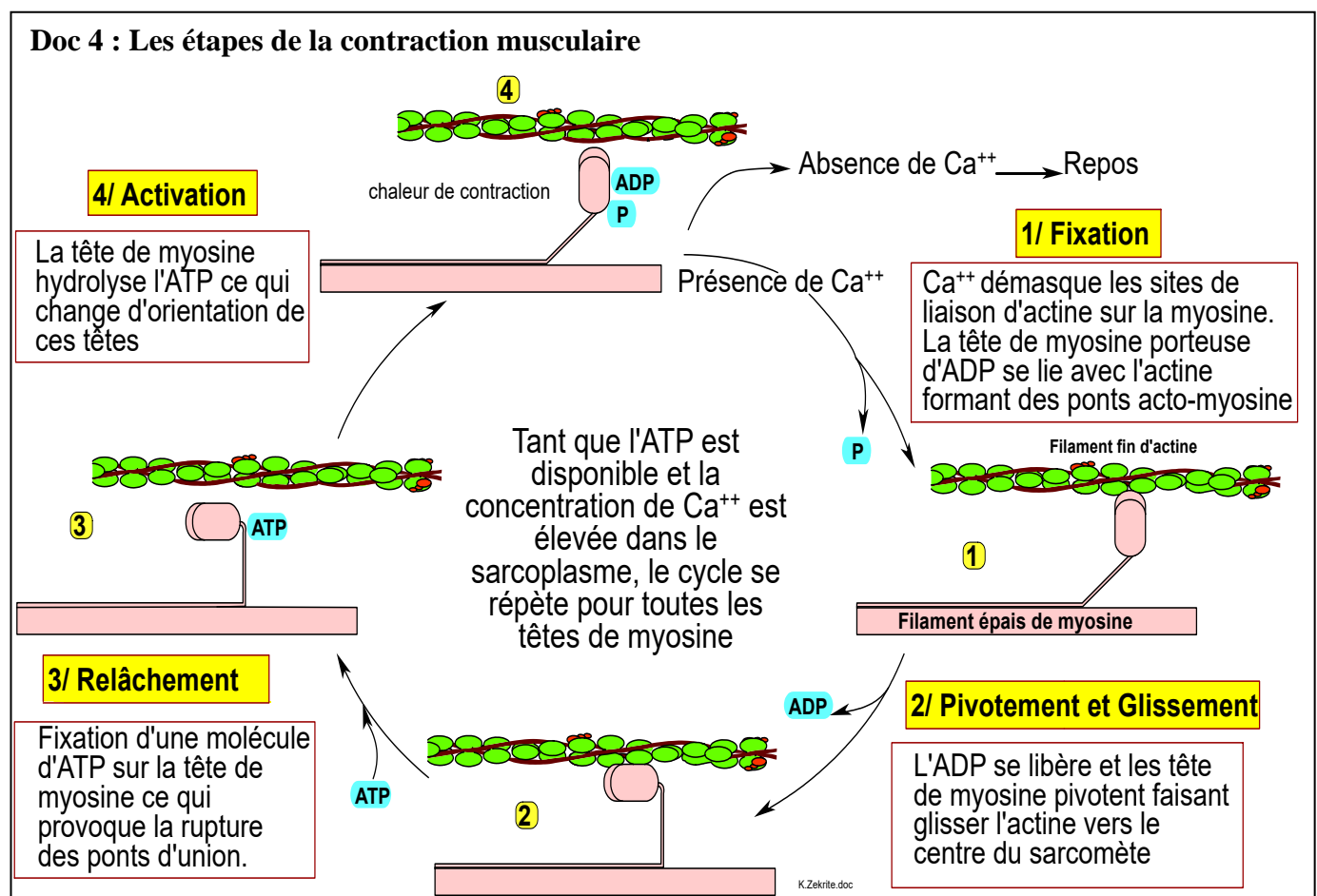
↪ Le complexe actine myosine reste stable (complexe de rigidité), et seul l'union de la tête de myosine avec une molécule d'ATP, permet la rupture de cette liaison.

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^{ase} 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 :

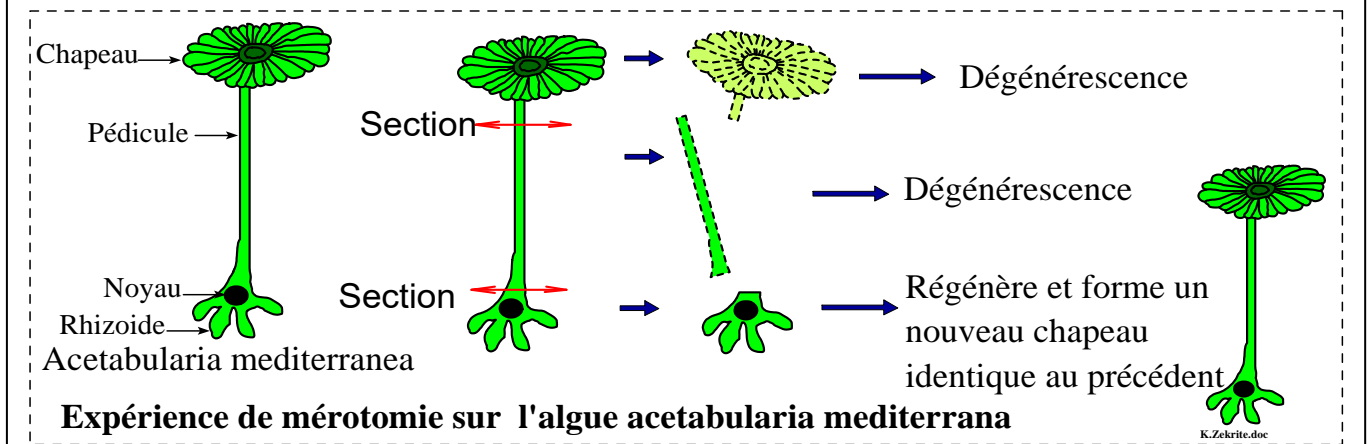
La cellule musculaire a la capacité de convertir de l'énergie chimique (ATP) en énergie mécanique (mouvement). D'autre part une partie de l'énergie issue de l'hydrolyse d'ATP ou de la synthèse de l'ATP par des voies divers (voir paragraphe suivant) est dissipée sous forme de chaleur (chaleur initiale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

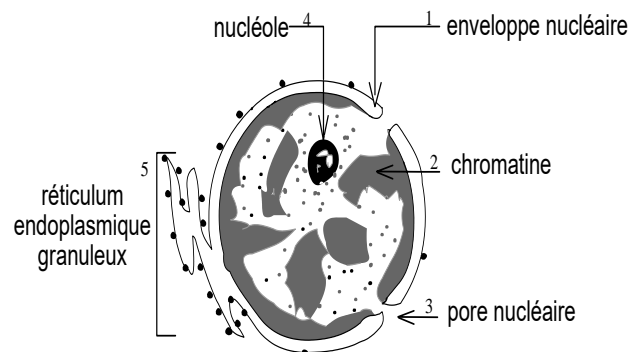
Localisation de l'information génétique dans la cellule

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.

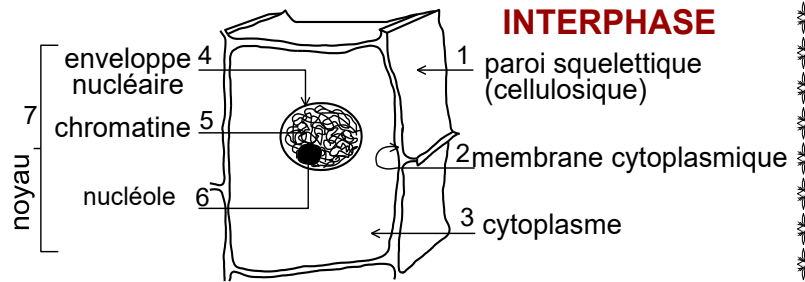
★ La mitose donne naissance à deux cellules filles identiques et semblables à la cellule mère (même nombre de chromosomes et même information génétique). On dit que la

mitose est une reproduction asexuée conforme.

1/ Les étapes de la mitose chez une cellule végétale

❖ L'interphase

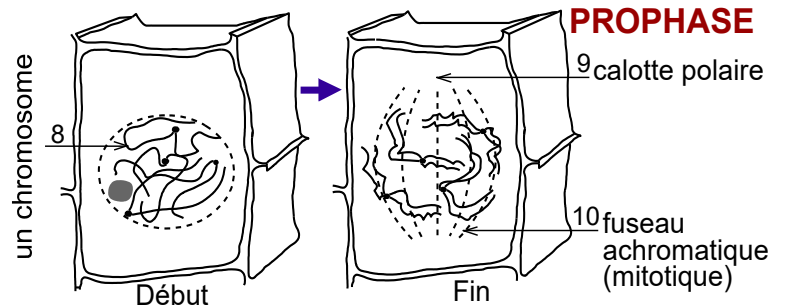
Pendant l'interphase, la cellule possède un noyau entier avec sa membrane, sa chromatine (nucléofilaments enchevêtré متشابكة) et son nucléole



❖ La prophase

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

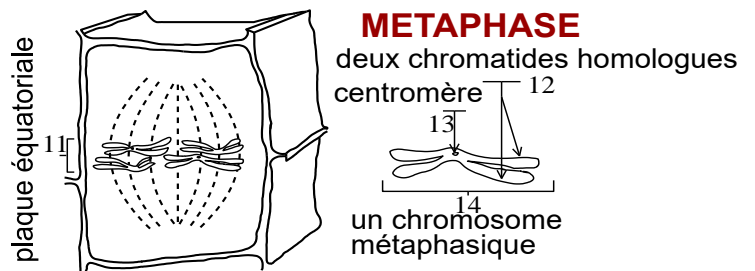
- Un gonflement du noyau et la disparition de l'enveloppe nucléaire et du nucléole.
- Une condensation de la chromatine en chromosomes, les chromosomes s'individualisent et deviennent visible.
- Chaque chromosome est fissurée longitudinalement en **deux chromatides** homologues, réunies par **un centromère**.
- 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 :

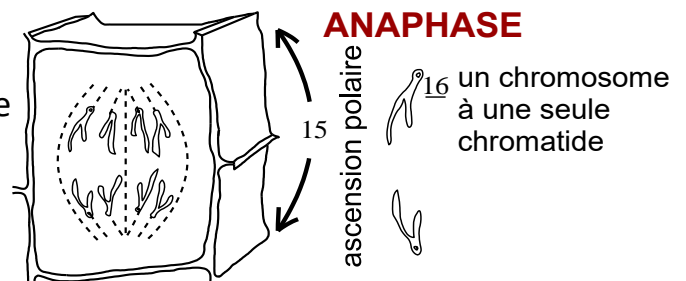
- Une condensation maximale des chromosomes clivés.
- Un regroupement des chromosomes dans le plan équatorial de la cellule formant une **plaque équatoriale**.
- Chaque chromosome métaphasique constitué de 2 chromatides est lié par son centromère aux fibres du fuseau achromatique.



❖ l'anaphase

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

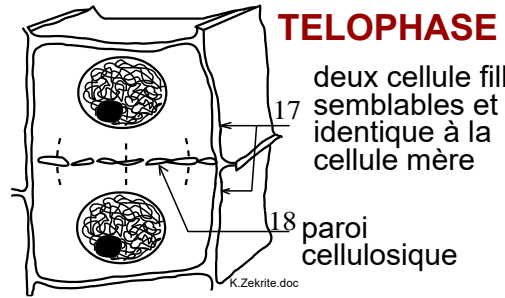
- Un regroupement et une décondensation des chromosomes en chromatine.
- L'enveloppe nucléaire entoure chacun des deux lots de chromatine, donnant naissance à deux noyaux fils.
- La disparition du fuseau mitotique.
- La division du cytoplasme (cytodiérèse) par formation d'une nouvelle membrane et d'une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



❖ la télophase

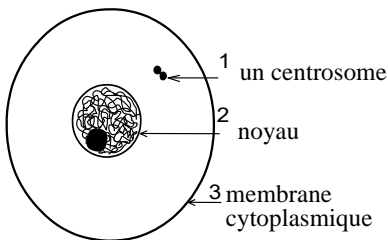
Stade très court (2 à 3 mn), se caractérise par :

- 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.

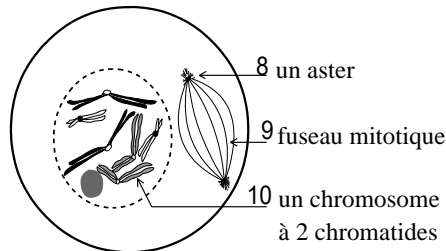


2/ La mitose chez la cellule animale

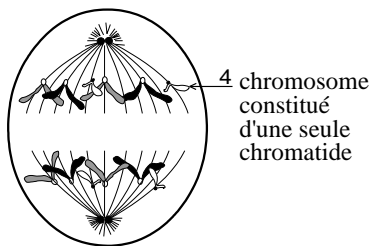
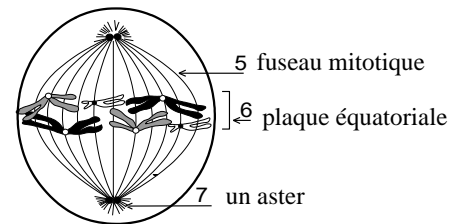
Intérphase



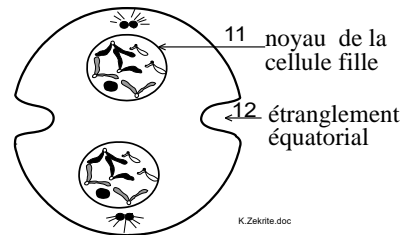
Prophase



Métaphase



Anaphase



Télophase

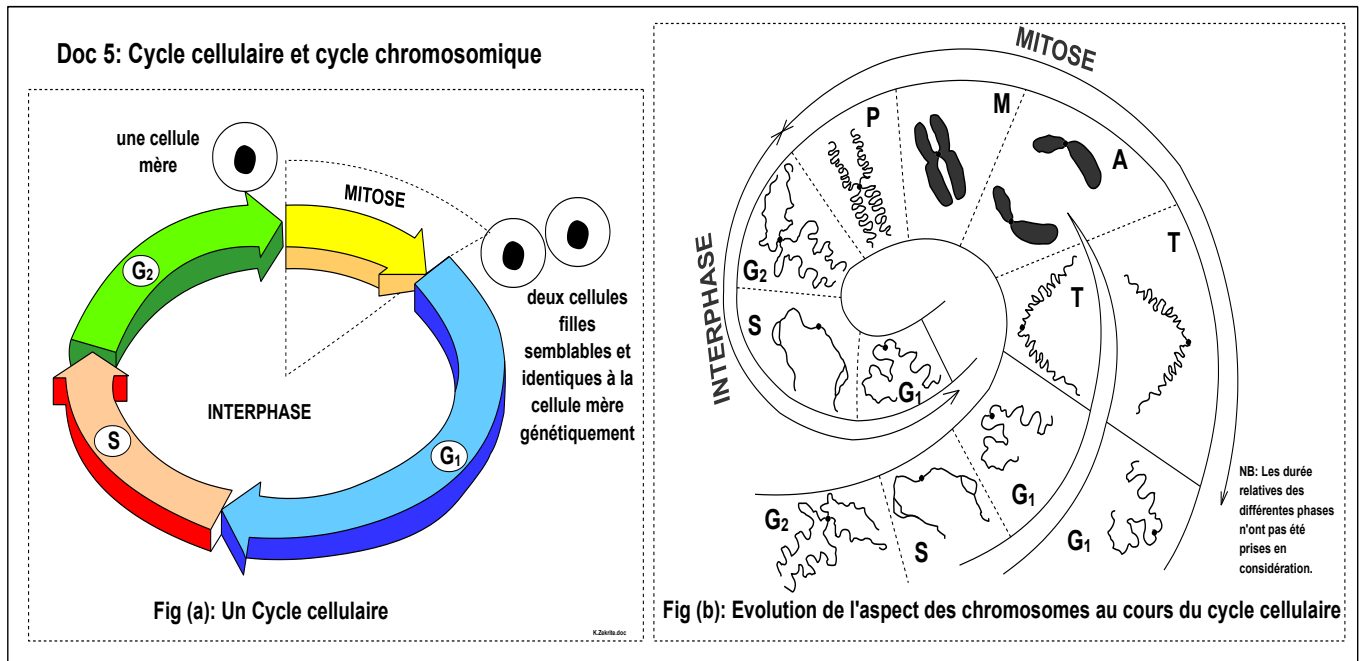
Le centrosome est un organe propre à la cellule animale, il est constitué de deux centrioles. Au cours de la prophase cet organe se divise en deux centrioles et chaque centriole formera par la suite un aster qui migre vers un pôle de la cellule

★ 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.

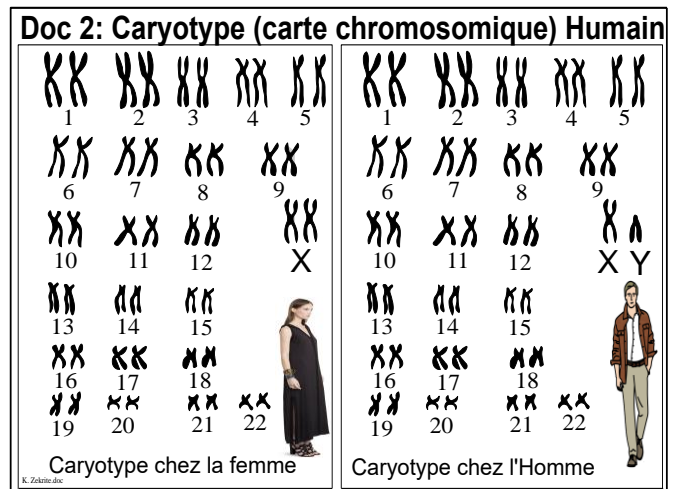
- On peut écrire la formule chromosomique développée des deux sexes comme suit :

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

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

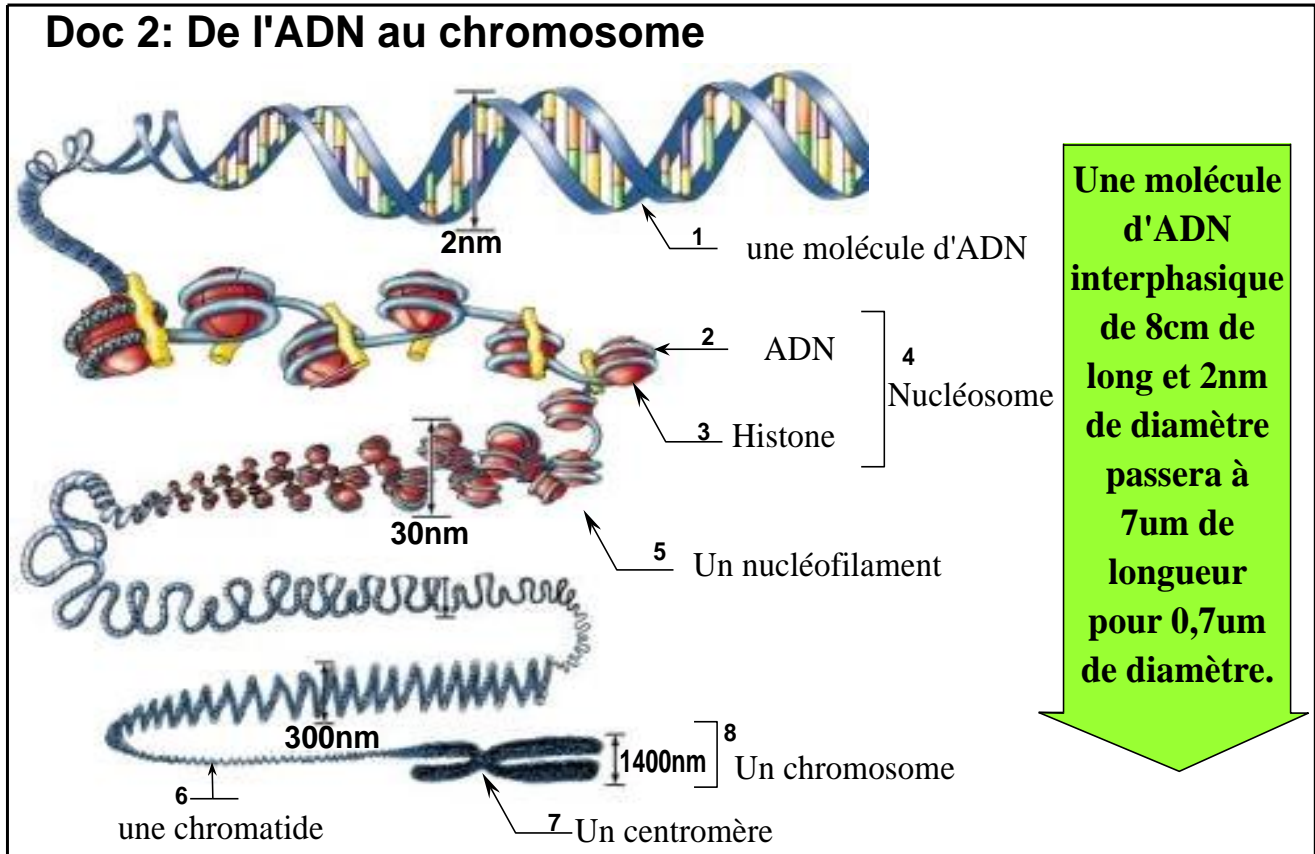
❖ La réalisation d'un caryotype passe par les techniques suivantes :

- 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

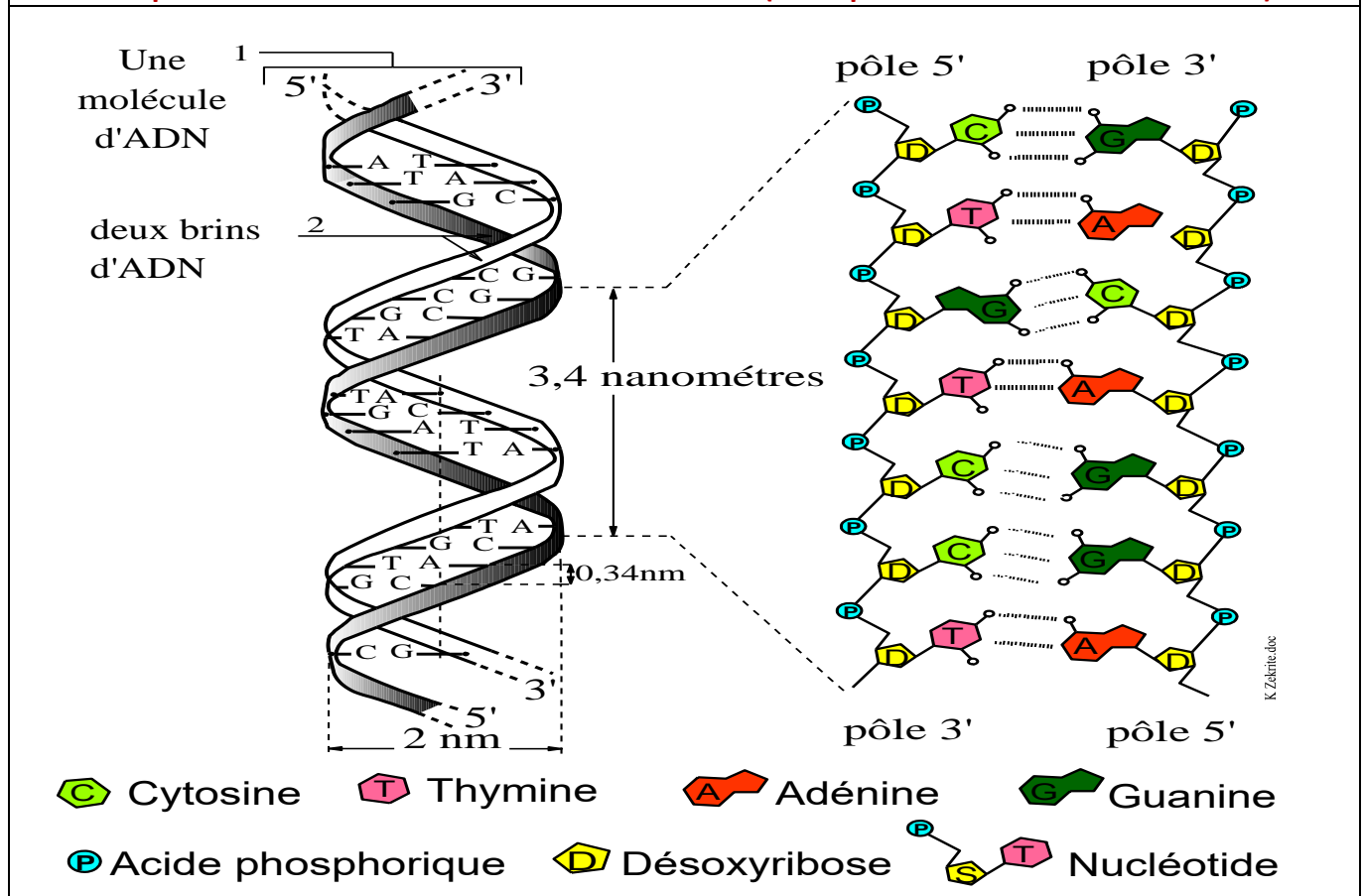


- ❖ Au cours de l'interphase la chromatine apparaît constituée d'un ensemble de **nucléofilaments** (fibres de chromatine) enchevêtrés. Chaque nucléofilament est formé d'une molécule d'**ADN (acide désoxyribonucléique)**, qui s'enroule autour de protéines appelées **histones**, ce qui donne au nucléofilament 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.

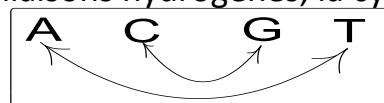
❖ Plusieurs expériences ont permis de conclure que la nature chimique de l'information génétique chez les êtres vivants est chimique, il s'agit de la molécule d'acide désoxyribonucléique : ADN, composante essentielle des chromosomes.
Remarque : Chez certains virus, comme le VIH, agent du sida, le matériel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



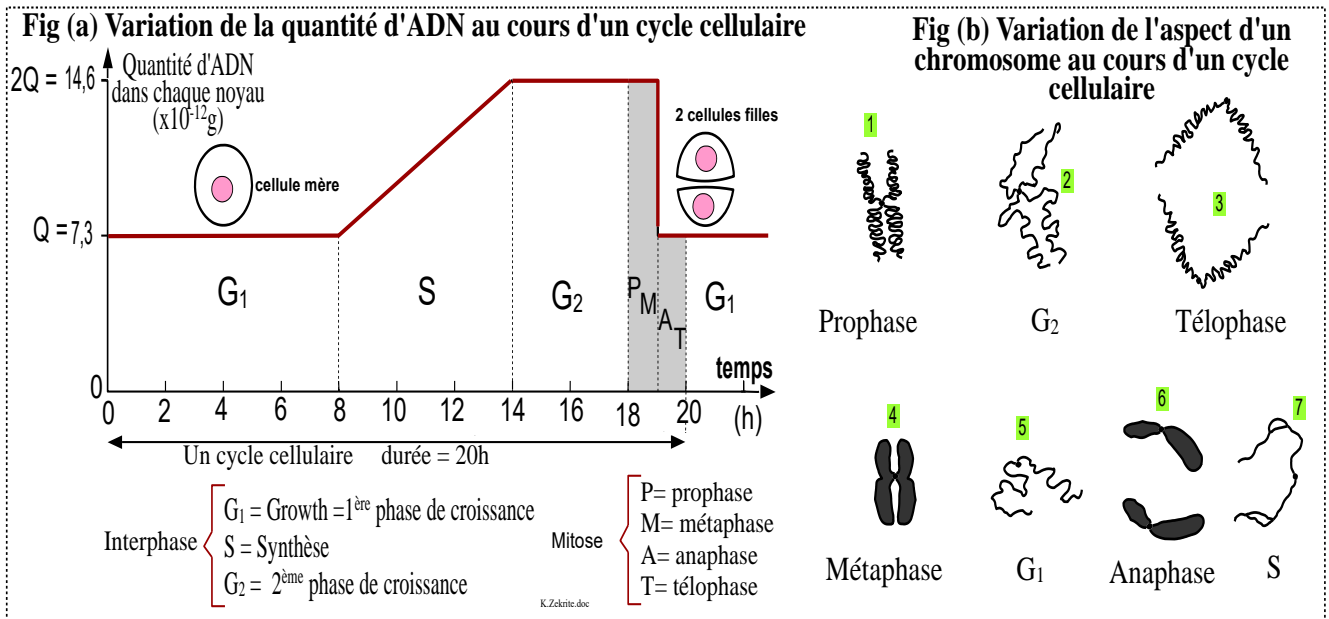
❖ Les deux brins d'ADN sont complémentaires de **polarité antagoniste** (l'un 3' → 5') et l'autre 5' → 3').

❖ 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 G₁ : 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 G₂ : 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:

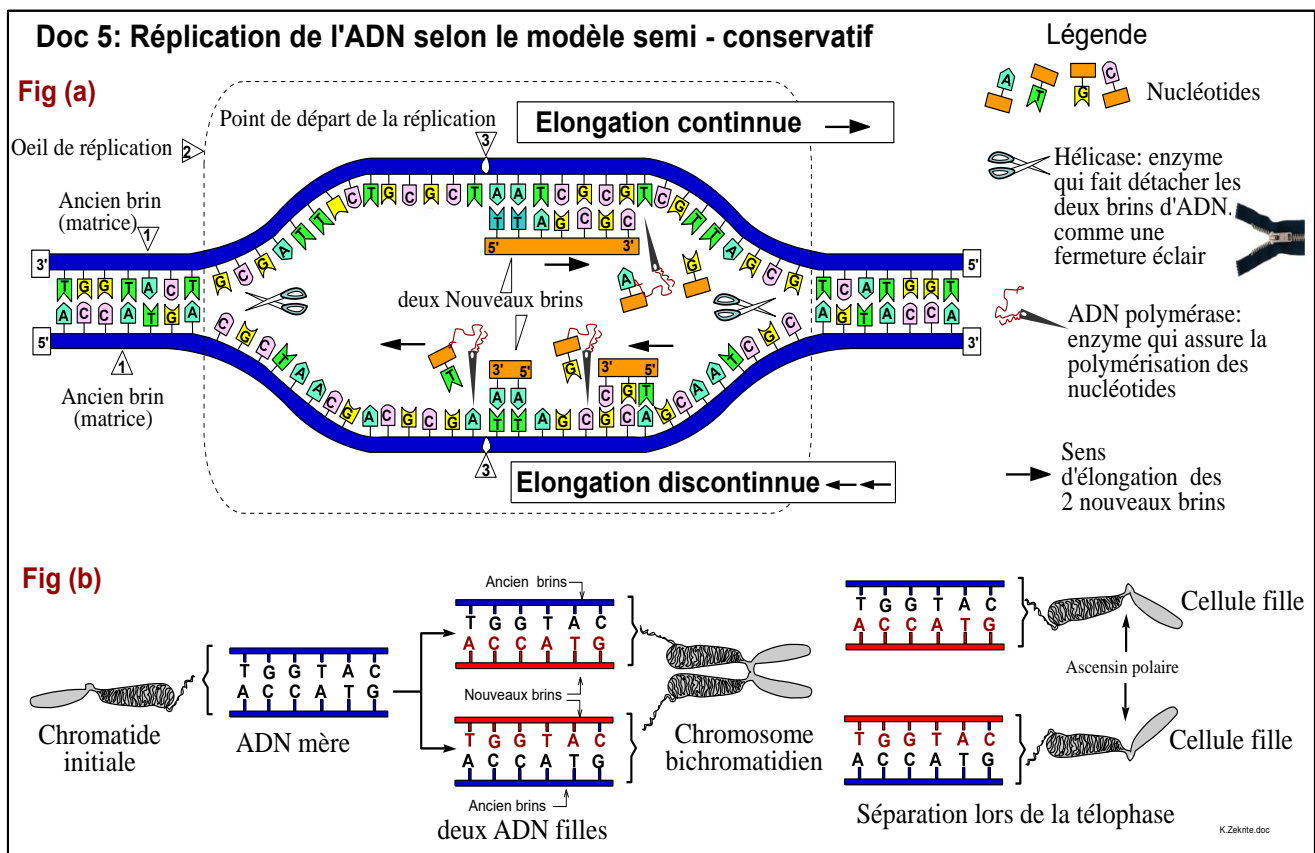
- La duplication d'ADN pendant la phase S de l'interphase, qui est la cause de la duplication du chromosome.

- 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**.

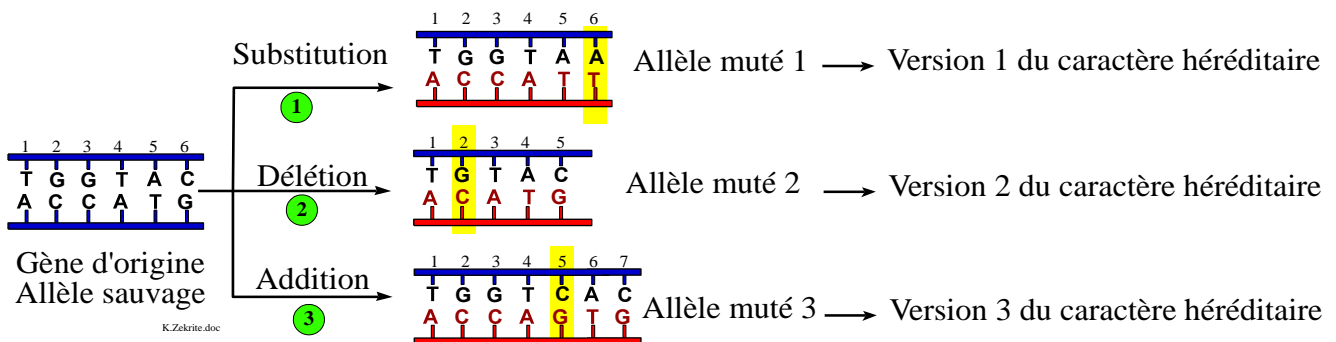
- Les deux brins parentaux jouent le rôle de matrice (قالب), en effet, Les nucléotides libres fournis par les nutriments se positionnent en face de leurs bases complémentaires : (A devant T et inversement, C devant G et inversement). **L'ADN polymérase** assure la liaison (la polymérisation) de ces nucléotides 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.

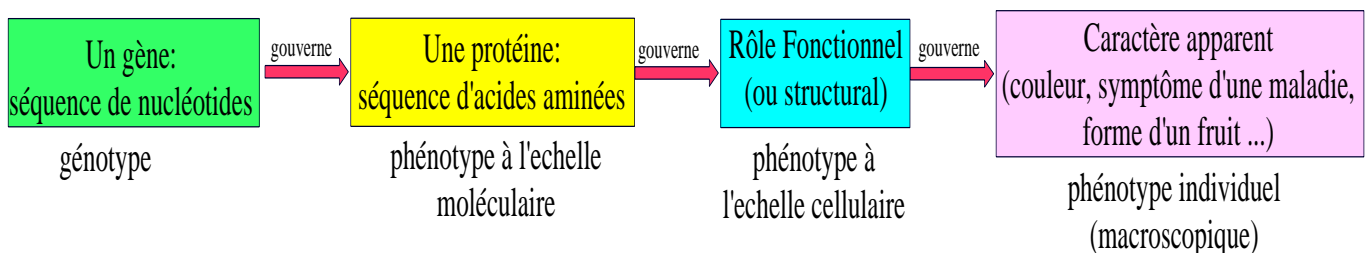
❖ **Génome** : l'ensemble des gènes d'un individu.

❖ **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.

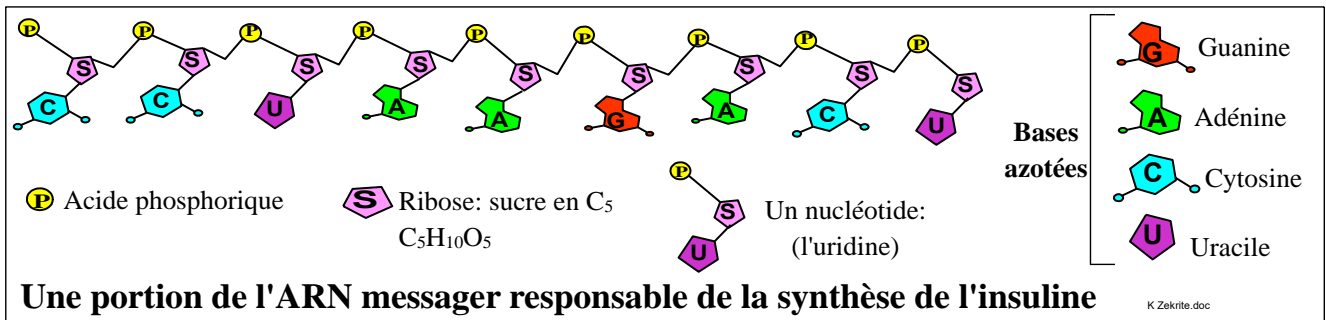


Le génotype gouverne le phénotype à différents niveaux

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.



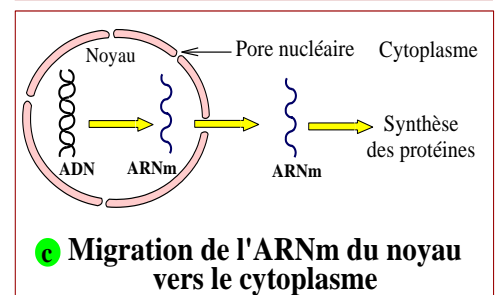
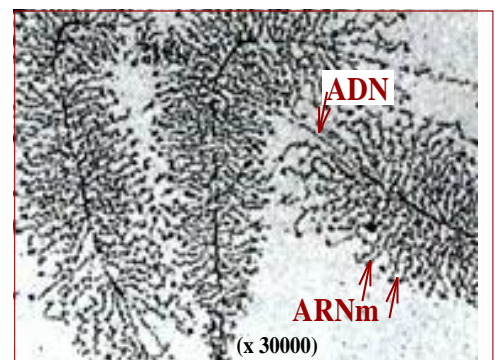
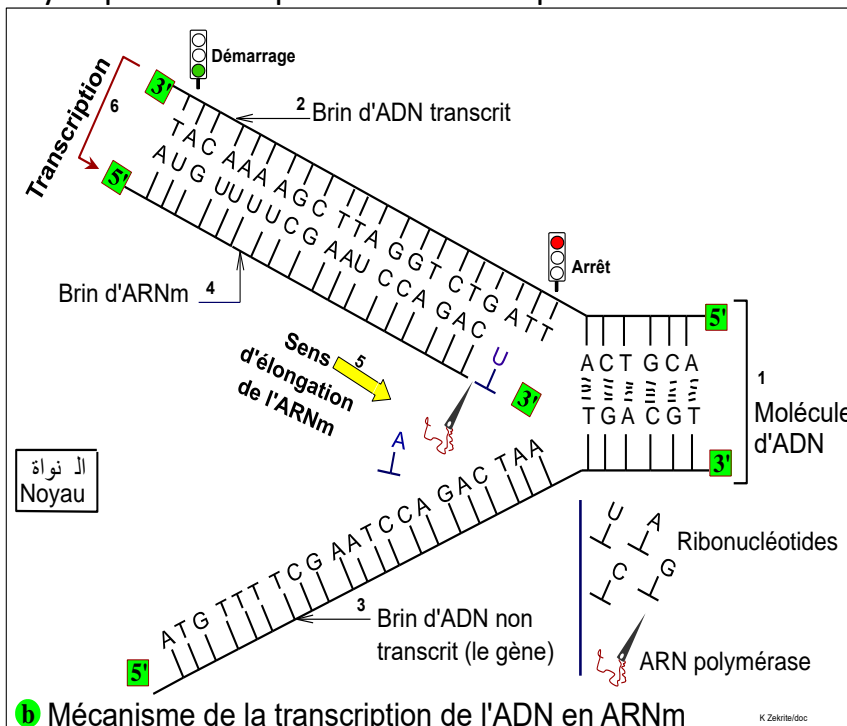
❖ La molécule d'ADN et la molécule d'ARN sont toutes les deux constituées d'une séquence de nucléotide, les différences entre les deux sont citées dans le tableau suivant :

	L'ADN	L'ARN
Le sucre	Déoxyribose : C ₅ H ₁₀ O ₄	Ribose : C ₅ H 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.



- ❖ 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 ^{ème} lettre					
		U	C	A	G		
1 ^{ère} 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 ^{ème} lettre	U C A G
	C	CUU] leucine CUC]] CUA]] CUG]]	CCU] proline CCC]] CCA]] CCG]]	CAU] histidine CAC]] CAA] glutamine CAG]]	CGU] arginine CGC]] CGA]] CGG]]		U C A G
	A	AUU] isoleucine AUC]] AUA]] AUG] méthionine	ACU] thréonine ACC]] ACA]] ACG]]	AAU] asparagine AAC]] AAA] lysine AAG]]	AGU] sérine AGC]] AGA] arginine AGG]]		U C A G
	G	GUU] valine GUC]] GUA]] GUG]]	GCU] alanine GCC]] GCA]] GCG]]	GAU] acide GAC] aspartique GAA] acide GAG] glutamique	GGU] glycine GGC]] GGA]] GGG]]		U C A G

❖ 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 :

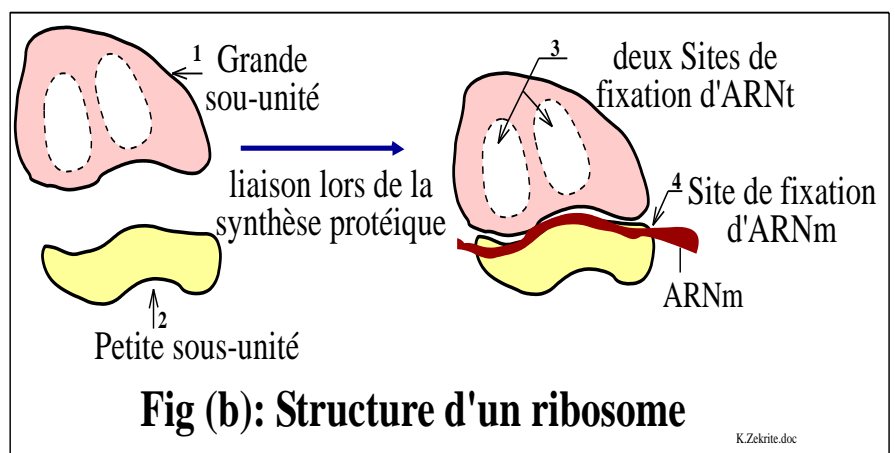
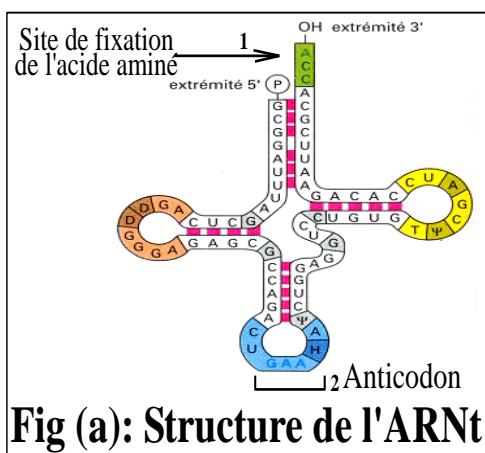
La traduction fait intervenir les éléments suivants :

- 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.

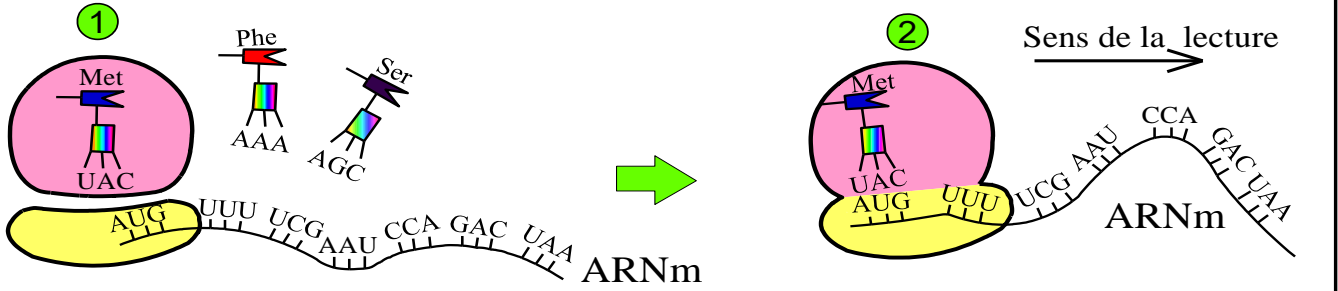
- L'ARN de transfert (ARNt) qui a pour rôle de transporter les acides aminés vers les ribosomes.

- Les acides aminés : élément de base des protéines.

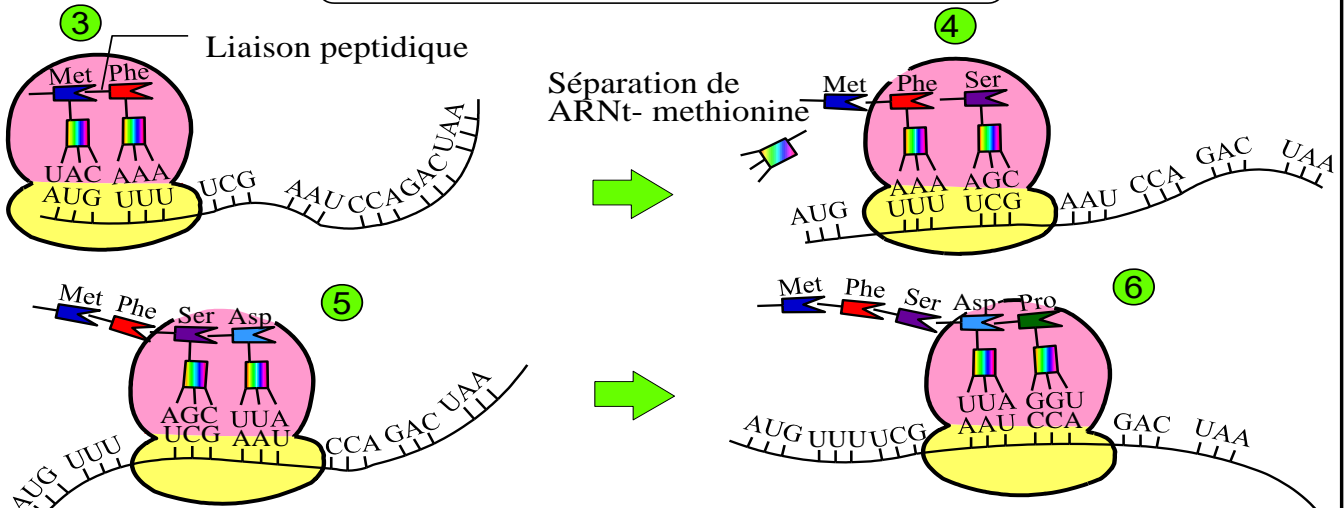


3/ Les étapes de la traduction

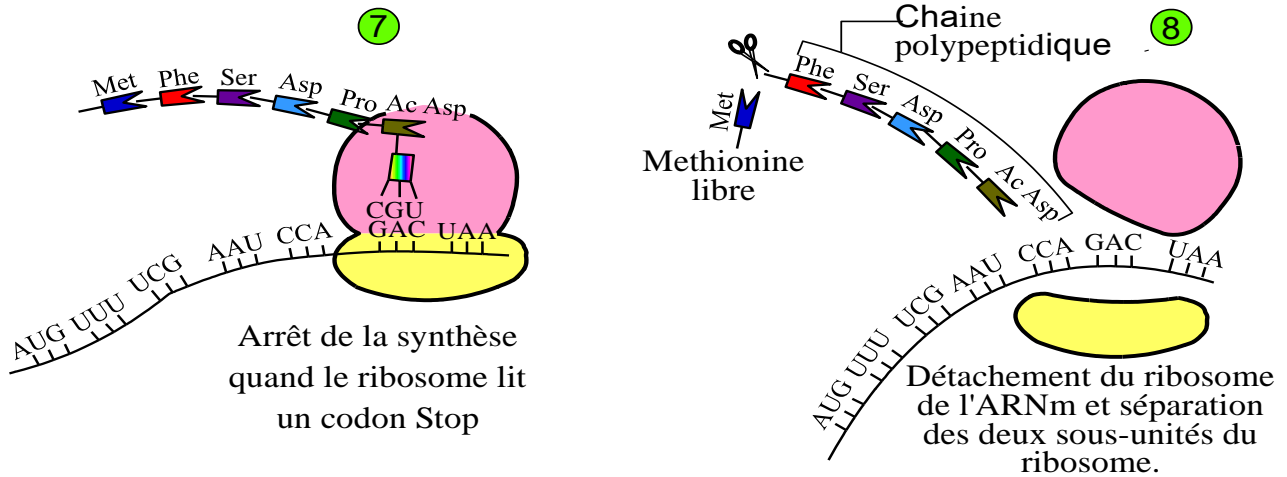
Doc 5: Les trois étapes de la traduction



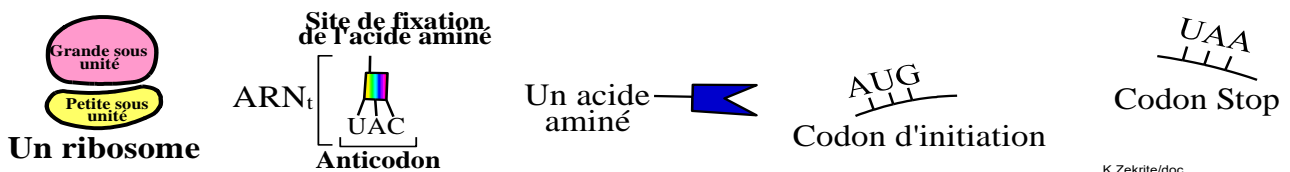
Initiation = عي ادبلا



Elongation = الاس تظالة



Terminaison = عي اهنلا



K Zekrite/doc

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^{ème} codon de l'ARNm fait venir un 2^{ème} ARNt à anticodon complémentaire et porteur d'un 2^{ème} acide aminé bien déterminé par le code génétique.
- Une *liaison peptidique* s'établit entre le 1^{er} et le 2^{ème} acide aminé.
- Le 1^{er} ARNt est libéré dans le cytoplasme.
- Le ribosome se déplace alors sur l'ARNm au niveau d'un 3^{ème} codon.
- La lecture de l'ARNm recommence : il y'a appel d'un 3^{ème} ARNt et mise en place d'un 3^{ème} 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**.

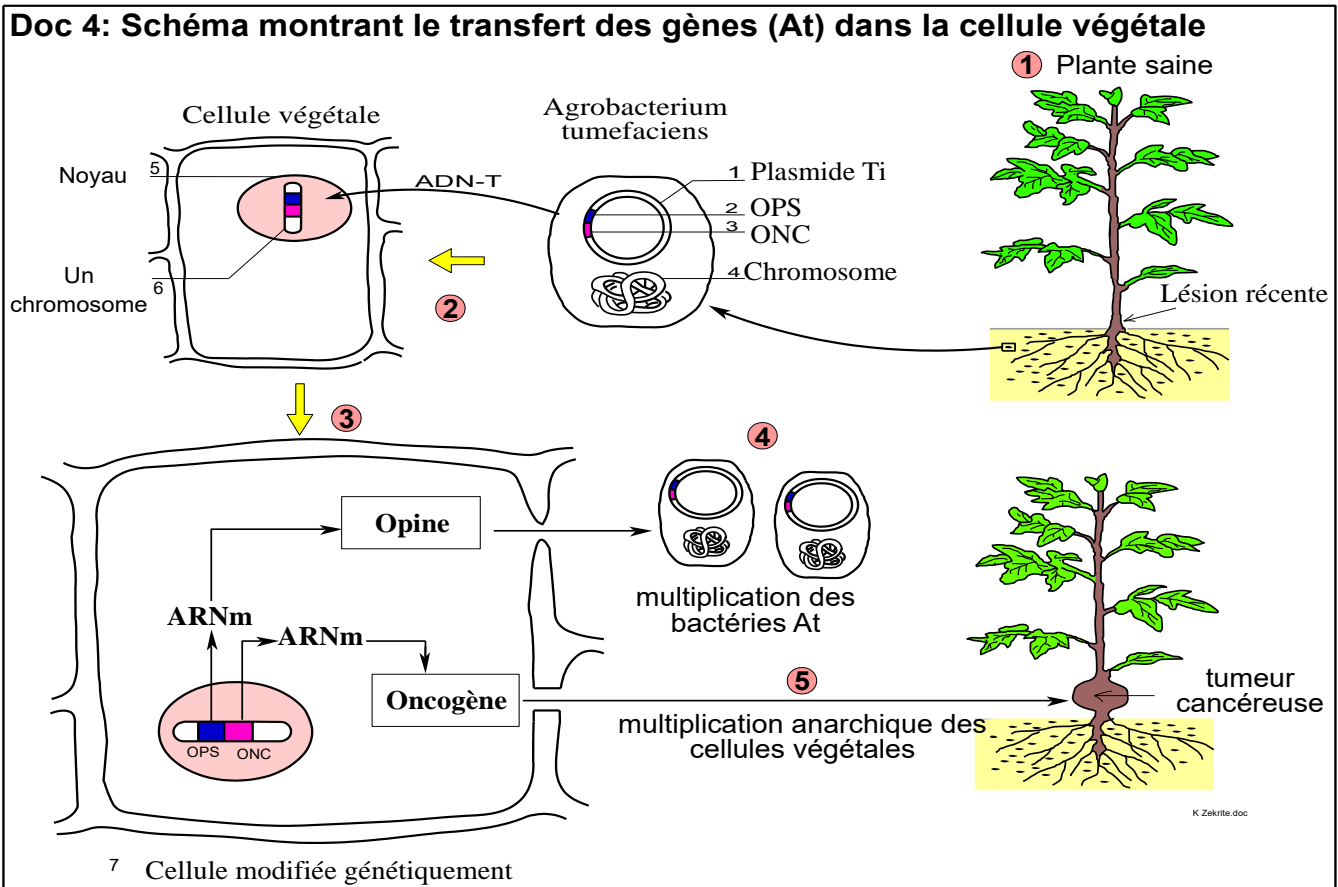
Le génie génétique

Le génie génétique repose sur la modification génétique = la transgénèse, Il fait intervenir un ensemble de techniques pour isoler et transférer un gène (des gènes) d'un être vivant à un autre, et ce dont le but de créer une modification bénéfique chez l'être vivant receveur de ce gène et qu'on nomme organisme génétiquement modifié. Ces modifications sont rendues possibles grâce à l'universalité du code génétique chez la majorité des êtres vivants.



Insuline Humaine industrielle produite par des bactéries E. coli modifiées génétiquement

I/ Un exemple de modification génétique naturelle : transfert des gènes de la bactérie Agrobacterium tumefaciens At dans la cellule végétale :



* La bactérie *Agrobacterium tumefaciens* transfère, naturellement, une partie de ses gènes dans la cellule végétale et détourne à son profit l'activité métabolique de la plante. Cette modification génétique des cellules hôtes au profit de la bactérie est rendu possible grâce à la possession de la bactérie d'un vecteur naturel : le plasmide.

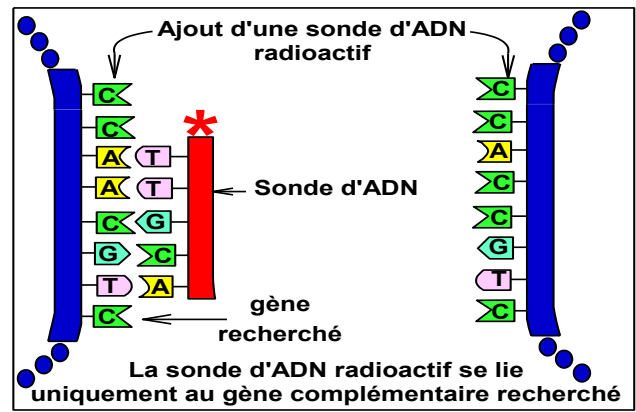
* Ayant ces propriétés, les bactéries et les plasmides seraient potentiellement utilisés dans le génie génétique afin de détourner la modification génétique au profit de

l'Homme.

II/ Les outils du génie génétique :

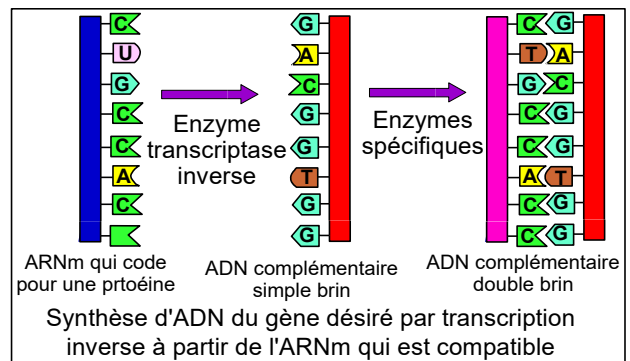
Pour pratiquer le génie génétique, on a besoin aux outils suivants :

* **Les sondes d'ADN** : les sondes à ADN permettent d'identifier le gène d'intérêt, elles sont utilisées pour détecter les cellules (les colonies) génétiquement modifiées, Ce sont des molécules d'ADN courtes monobrins radioactives, complémentaires à la séquence nucléotidique du gène recherché.



* **La transcriptase inverse = reverse** :

La transcriptase inverse est utilisée pour synthétiser le gène désiré à partir de la transcription inverse de l'ARNm correspondant à la protéine d'intérêt. C'est une enzyme qui permet de convertir l'ARNm en ADN monocaténaire. Cet ADN est transcrit, à son tour, en ADN complémentaire bicaténaire par d'autres enzymes spécifiques.



* **Une cellule hôte** : خلية عائل

Les bactéries, et notamment Escherichia coli, présentent plusieurs caractéristiques qui permettent leur utilisation comme cellules hôtes (cellules qui reçoivent le gène désiré) en génie génétique : Elles sont unicellulaires et se multiplient rapidement, leur culture in vitro est facile sur milieu minimum et elles possèdent des plasmides.

* **Les vecteurs** النواقل

Les vecteurs sont des dérivés d'ADN virale ou de plasmides utilisés pour le transfert d'un gène vers une cellule hôte. Le plasmide est une molécule d'ADN circulaire double brin présente chez certaines bactéries et levures. Les plasmides sont des outils de choix en génie génétique pour plusieurs raisons : Ils ont une petite taille et ils sont capables de la réplication autonome : se multiplient rapidement dans les cellules (10 à 200 par cellule).

* **Les enzymes de restriction** أنزيمات الفصل

Les enzymes de restriction reconnaissent et coupent la séquence d'ADN cible en des sites bien précis sur les deux brins à deux endroits légèrement décalés. La coupure donne alors des extrémités simples brins en zig-zag. Ce sont des enzymes produites par des bactéries et on les nomme par le nom de la bactérie dont elles proviennent.

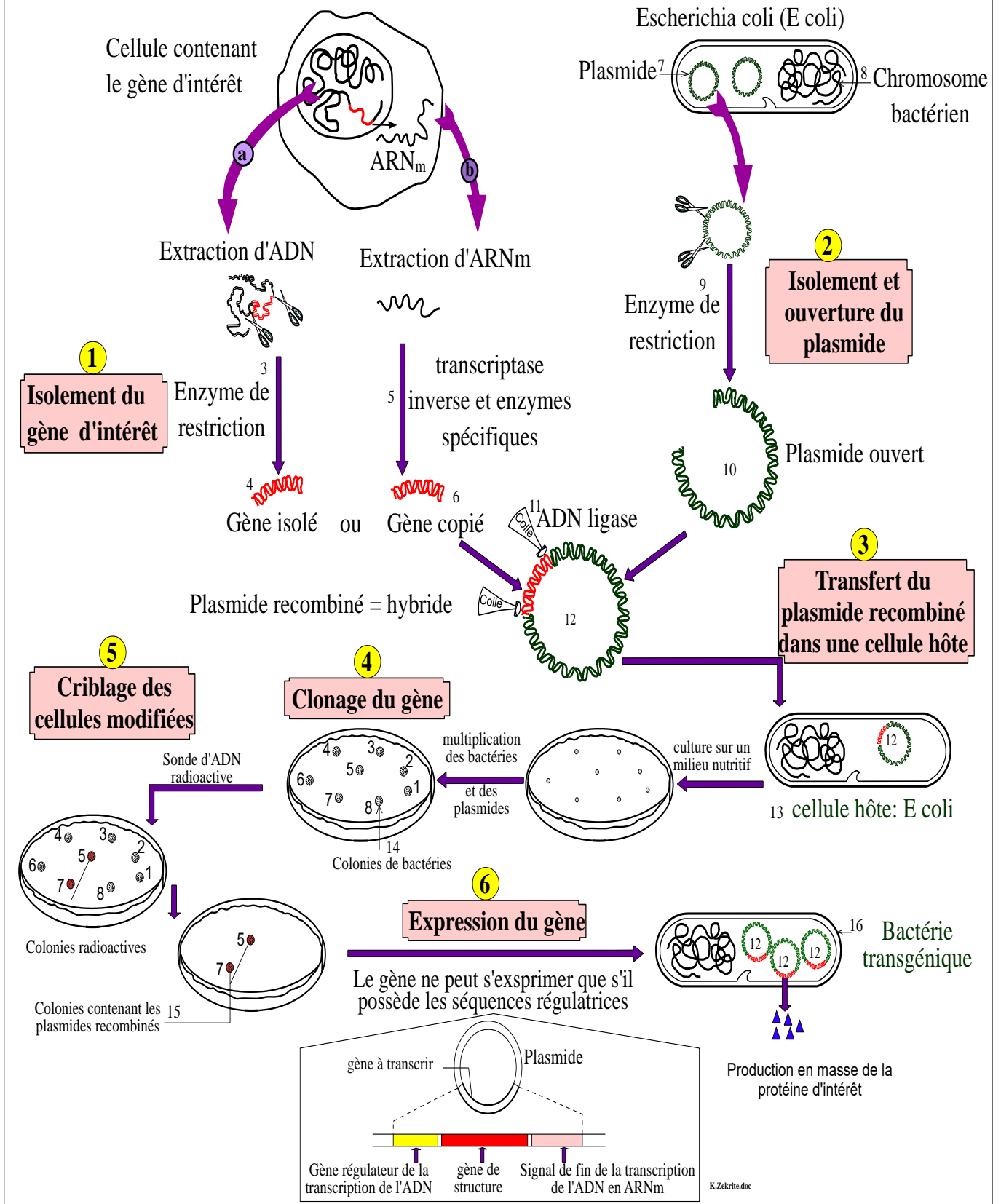
Enzymes de restriction	Séquence et site de coupure
E Cori	G AATTC
Bg III	A GATCT
Pst I	C TGCAG
Sac I	G AGCTC

a Quelques enzymes et leurs sites de restriction

* **L'ADN ligase** أنزيمات الربط est une enzyme capable d'unir par complémentarité des bases azotées avec une autre partie d'ADN (plasmide par exemple) résultant de la coupure par la même enzyme.

III/ Les étapes de la transgénèse مراحل التعديل الوراثي :

Doc 6: Les étapes de transfert d'un gène



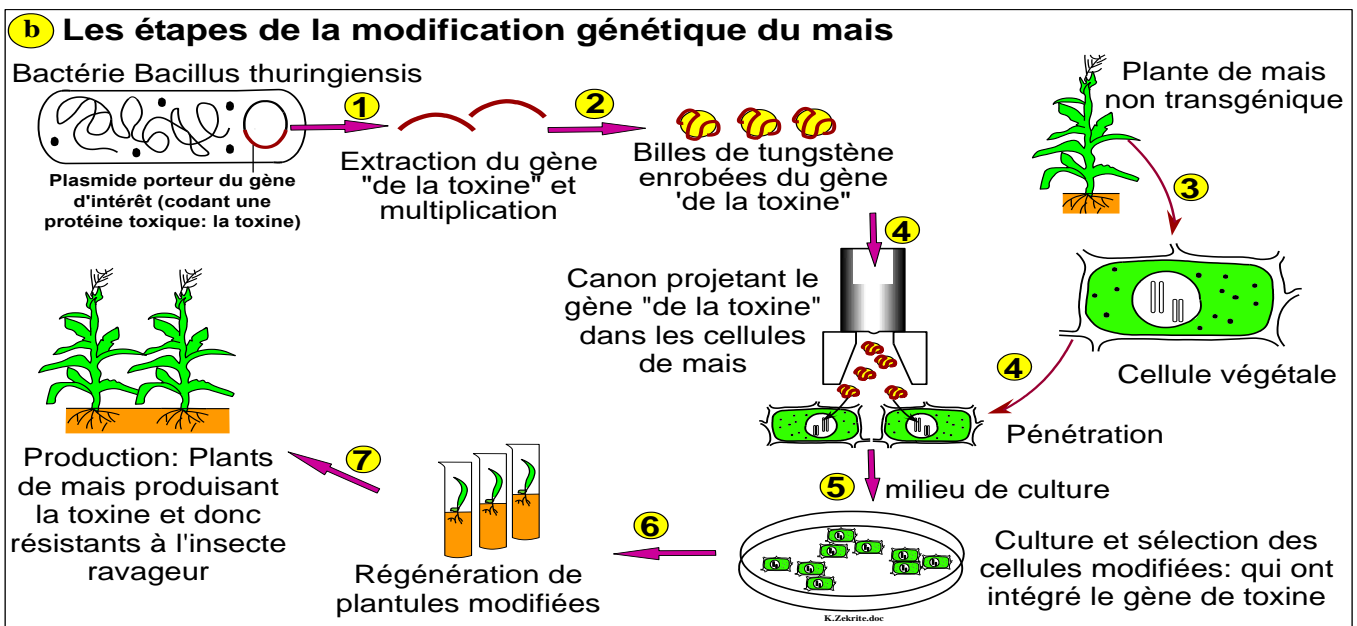
Les principales étapes utilisées en génie génétique sont :

- * **Isolement du gène d'intérêt par des enzymes de restriction**, ou sa transcription sous forme d'ADN complémentaire, à partir de l'ARNm, qui lui est compatible, par la *transcriptase inverse*.
- * **Intégration du gène isolé**, à l'aide de *ligases* dans le *plasmide* qui devient *recombiné*.
- * **Clonage du gène** porté par le plasmide recombiné dans des bactéries hôtes, dans un milieu de culture et obtention de clones de bactéries.
- * **Détection et sélection des clones bactériens portant le plasmide recombinés** et documents modifiés génétiquement en utilisant *des sondes d'ADN ou des antibiotiques*.
- * **Expression du gène** intégré en protéine

IV/ Quelques applications du génie génétique

Le génie génétique permet, de produire en quantité suffisante, des substances indispensables (hormones, médicaments ...) et de créer aussi des organismes génétiquement modifiés par transgénèse pour améliorer le rendement agricole, augmenter la production des animaux de ferme ...

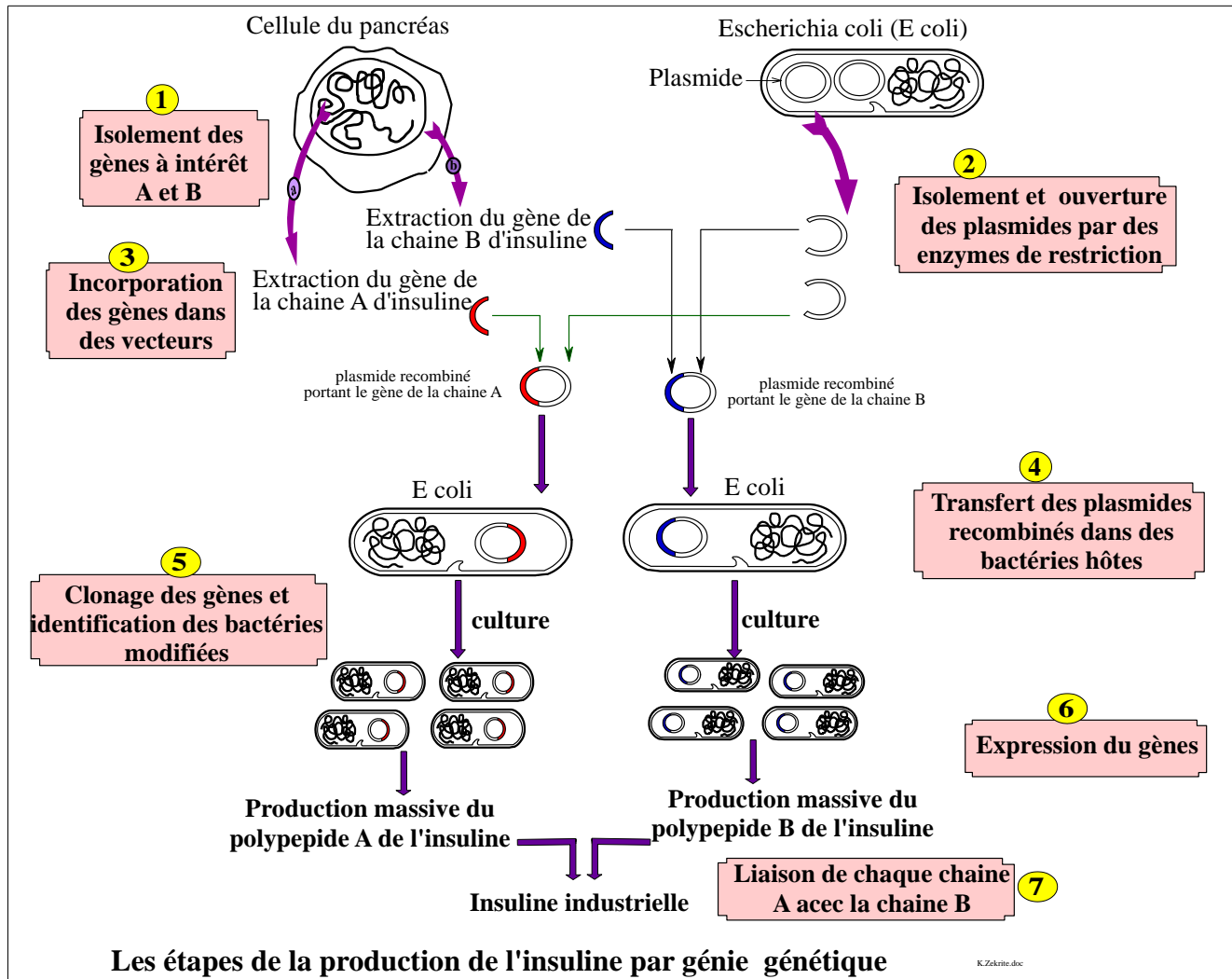
1/ Exemple de plantes génétiquement modifié : le maïs transgénique produisant un insecticide:



Pour obtenir une plante de maïs résistante à la pyrale, on isole le gène responsable de la synthèse d'une protéine toxique qui tue ses chenilles, à partir de la bactérie *Bacillus thuringiensis*. Grâce à un canon à gène, on bombarde directement les cellules de la plante du maïs par le gène à intérêt fixé à des billes. Le gène de la toxine transféré peut, alors s'insérer dans l'un des chromosomes de la cellule végétale. Ainsi, chaque cellule, génétiquement modifiée, donne naissance à une plante entière capable de produire la toxine = insecticide qui détruit les chenilles de la pyrale.

2/ La production industrielle de l'insuline Humaine par les bactéries E Coli transgénique

Les étapes de la transgénèse d'une bactérie pour la production de l'insuline :



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.

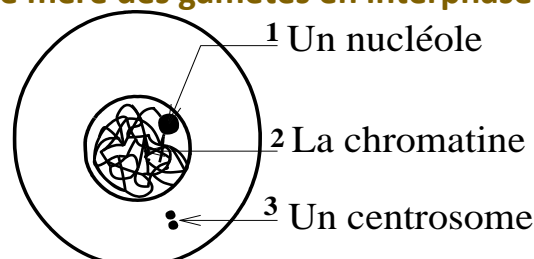
■ La deuxième division = **division équationnelle** : elle sépare les chromatides de chaque chromosome et permet la formation de 4 cellules à n chromosomes à une seule chromatide et donc réduit la quantité d'ADN.

❖ 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^{ère} 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 :

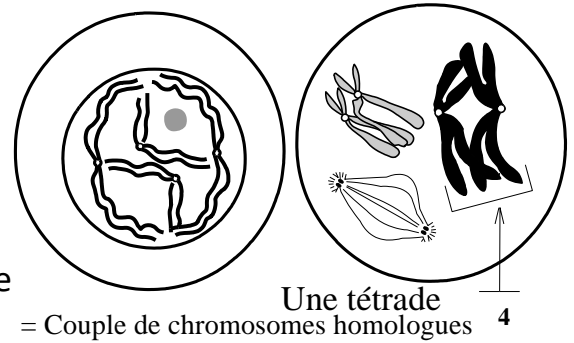
Cellule mère des gamètes en interphase (2n)



1/ Division réductionnelle

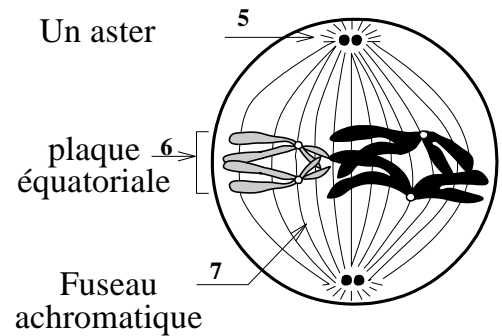
Prophase I :

- 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.



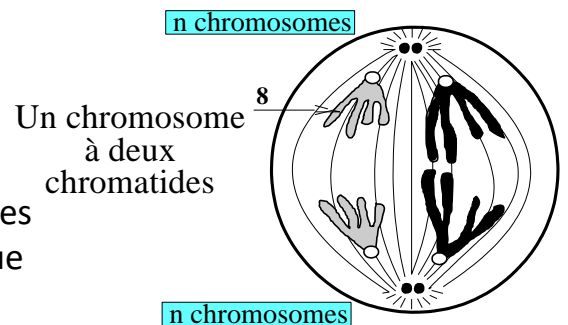
Métaphase I

- 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.



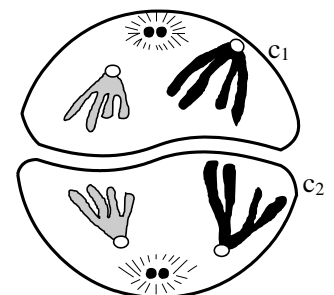
Anaphase I

- 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**.

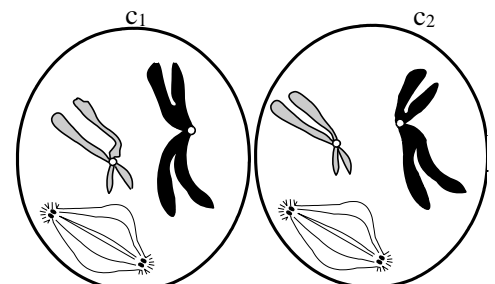


Deux cellules filles (n)

2/ Division équationnelle :

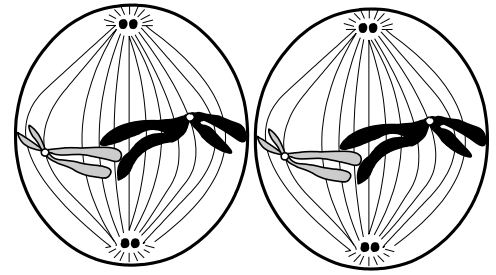
Prophase II

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



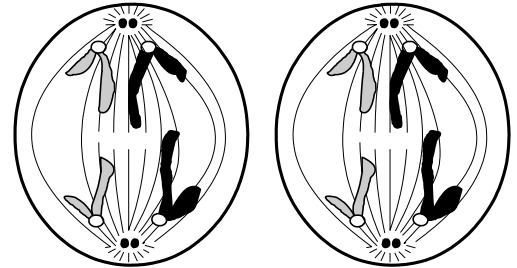
Métaphase II

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



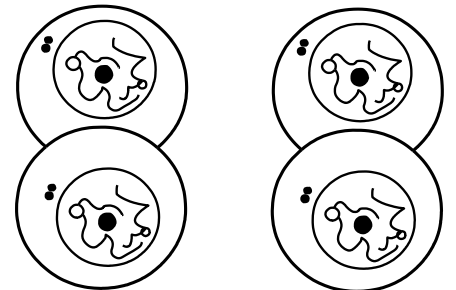
Anaphase II

- 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.

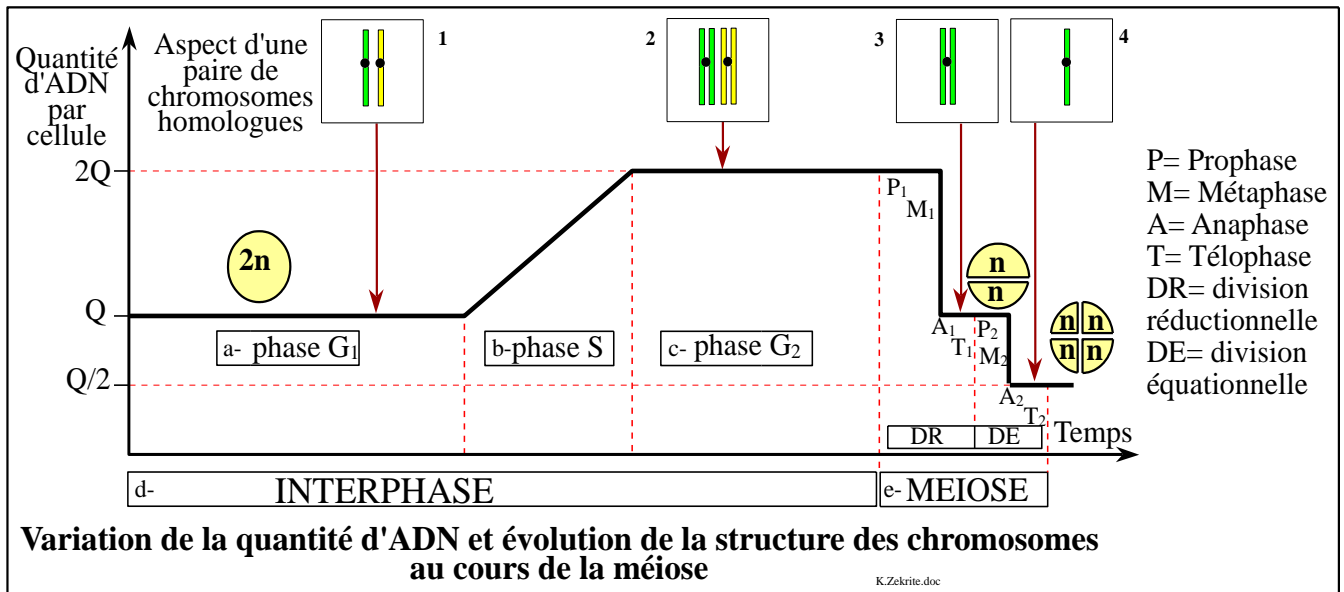


Quatre cellules filles (n)

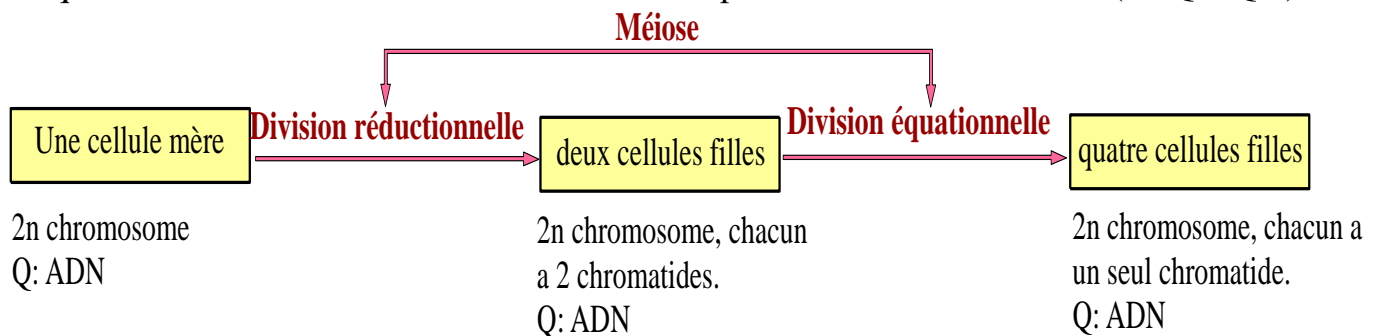
Conclusion :

- ❖ 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

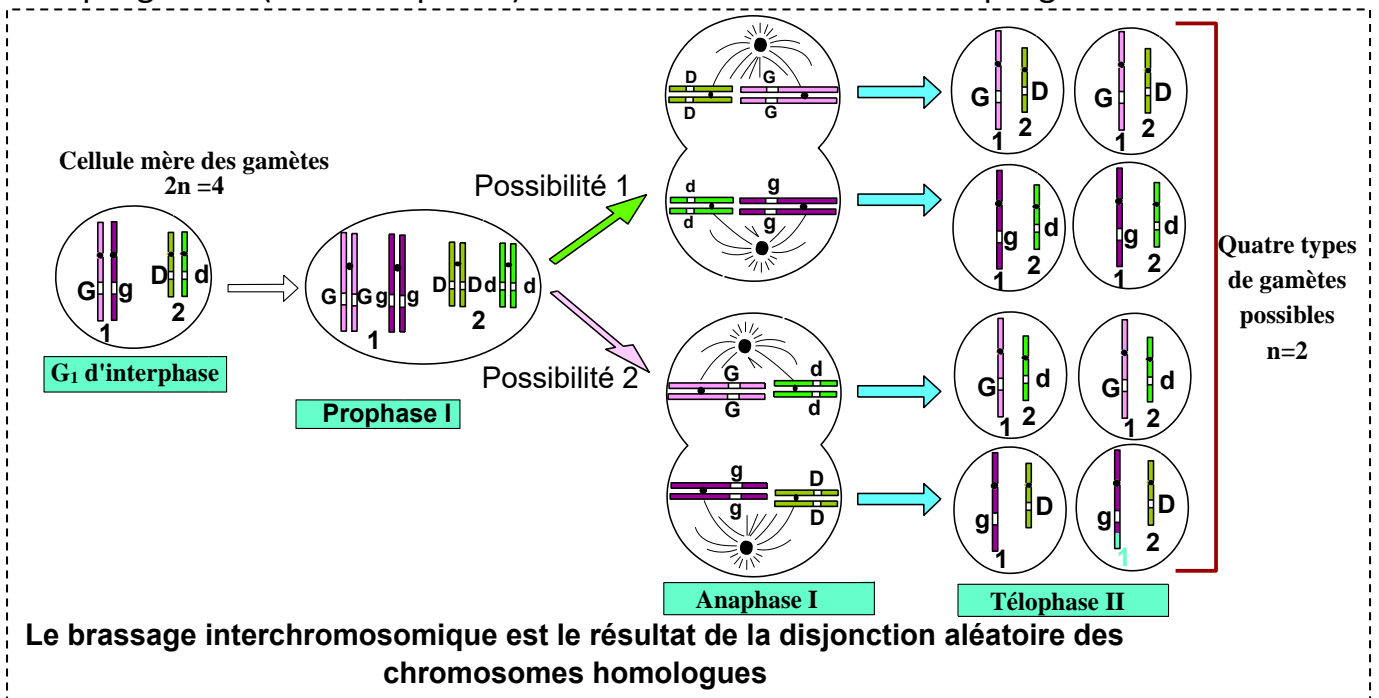
1/ Brassage interchromosomique et diversité des gamètes (voir schéma):

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

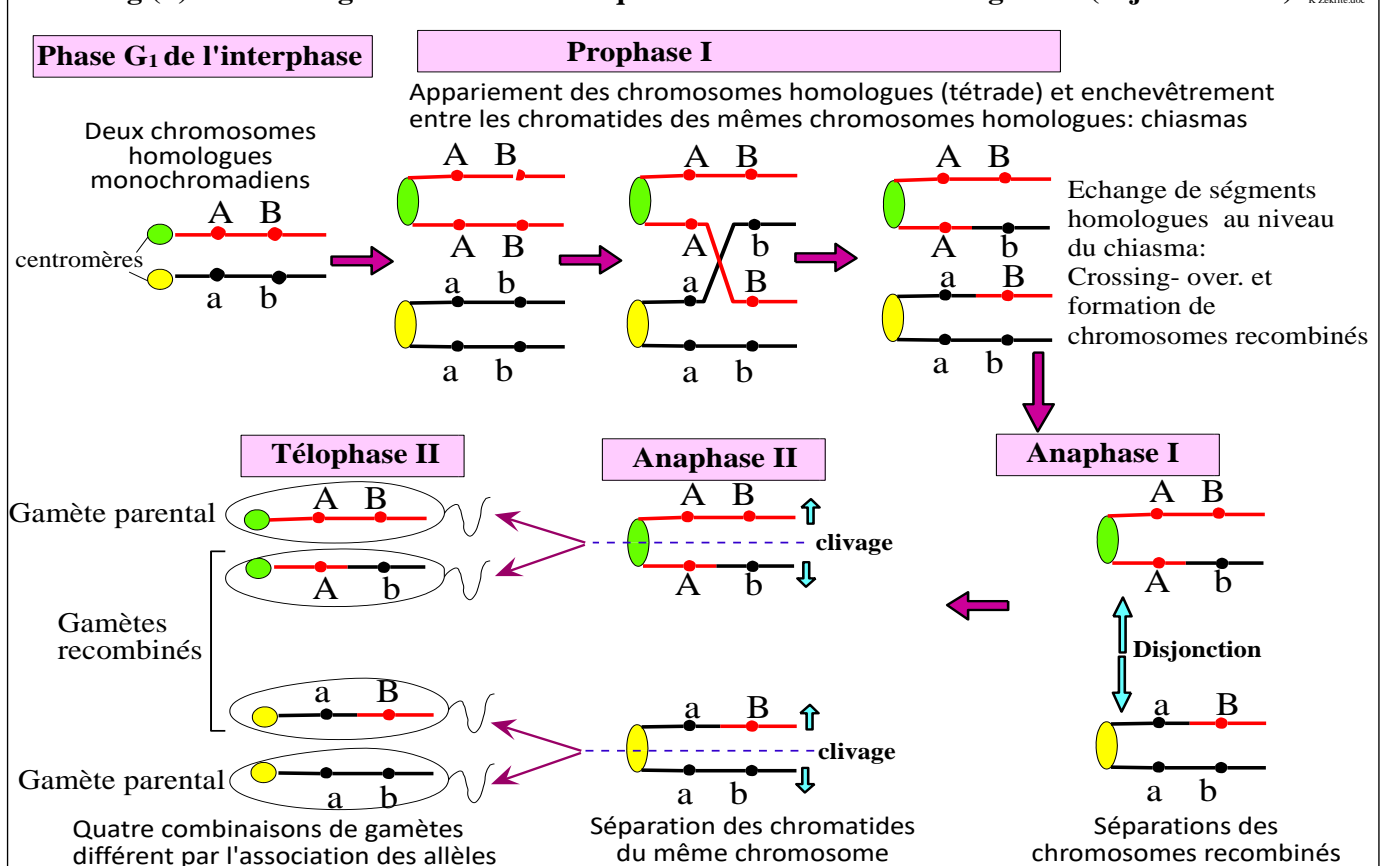
différents, leur répartition au hasard par le brassage interchromosomique entraîne un très grand nombre de combinaisons alléliques possibles dans les gamètes.

❖ **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).

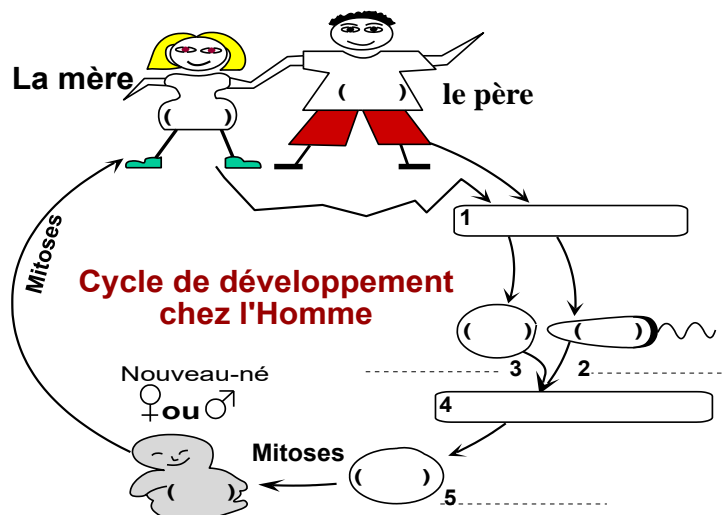
❖ La fécondation permet l'union des chromosomes homologues et le rassemblement des allèles du même gène. Le chromosome de chaque paire du caryotype d'un individu est d'origine paternel, son homologue est d'origine maternel.

❖ 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.

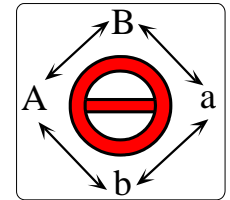
Génération hétérogène : Génération dont tous les individus n'ont pas le même phénotype.

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 parenthèses, 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^{ère}, 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 (F₁), 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^{ème} loi de Mendel. »



III/ Les types de croisements :

- ❖ **Croisement des parent 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 F₁
- ❖ **Croisement des hybrides**: F₁ x F₁, ces croisements donnent une deuxième génération de descendance symbolisée par F₂
- ❖ **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 F₁ 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 F₁ (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 transmissin des caractères :

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

a – Cas de dominance de l'un des allèles

❖ les hybrides (F₁) 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.

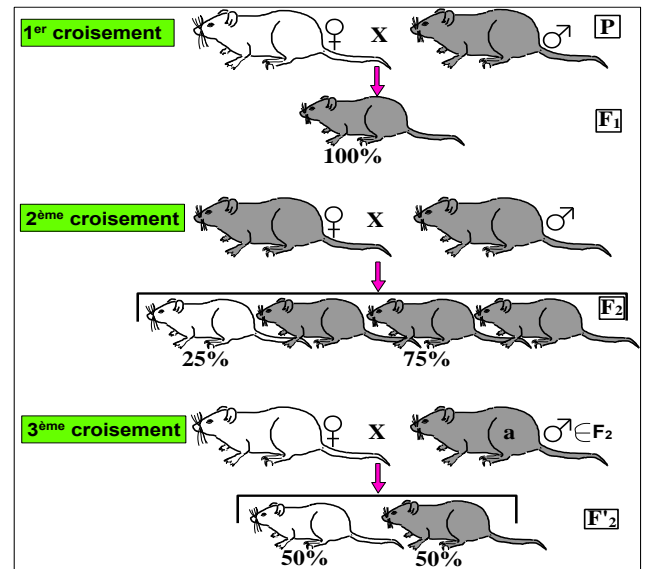
❖ Le croisement des hybrides (F₁x F₁) donne une génération F₂ constituée de :

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

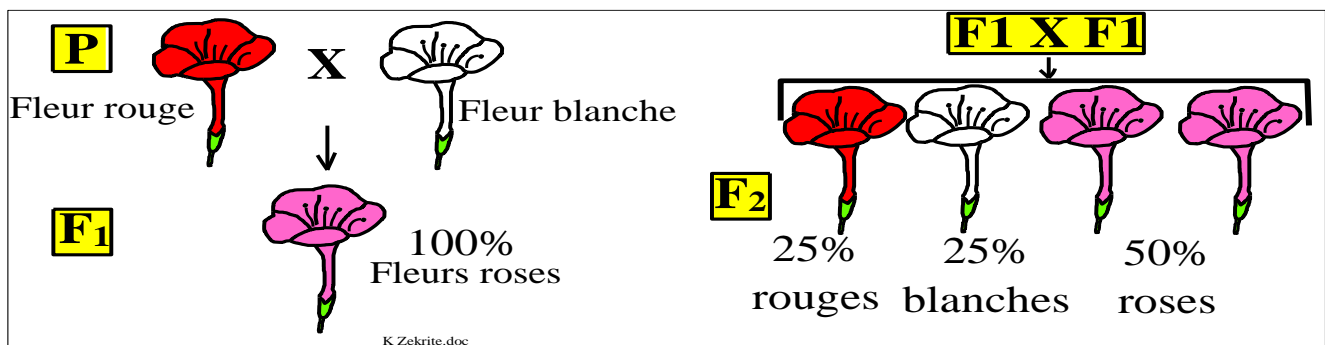
❖ Le croisement en retour (back cross) :

F₁ x P récessif donne :

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



b – Cas de codominance ou dominance intermédiaire



❖ Le croisement des lignées pures (P₁ x P₂) donne une génération F₁ hybride (hétérozygote), homogène présentant un phénotype intermédiaire entre celui des parents ou un mélange des phénotypes des parents.

❖ Le croisement des hybrides (F₁x F₁) donne une génération F₂ constituée de trois phénotypes qui se répartissent comme suit :

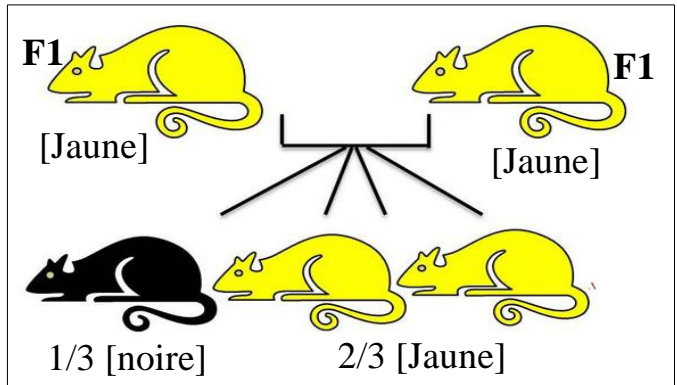
- * 25% = ¼ d'individus de lignée pure ressemblant à l'un des parents.
- * 25% = ¼ d'individus de lignée pure ressemblant à l'autre parent.
- * 50% = ½ d'individus hybrides ressemblant à F₁ (phénotype intermédiaire)

c – Cas de dominance absolue avec un gène létal :

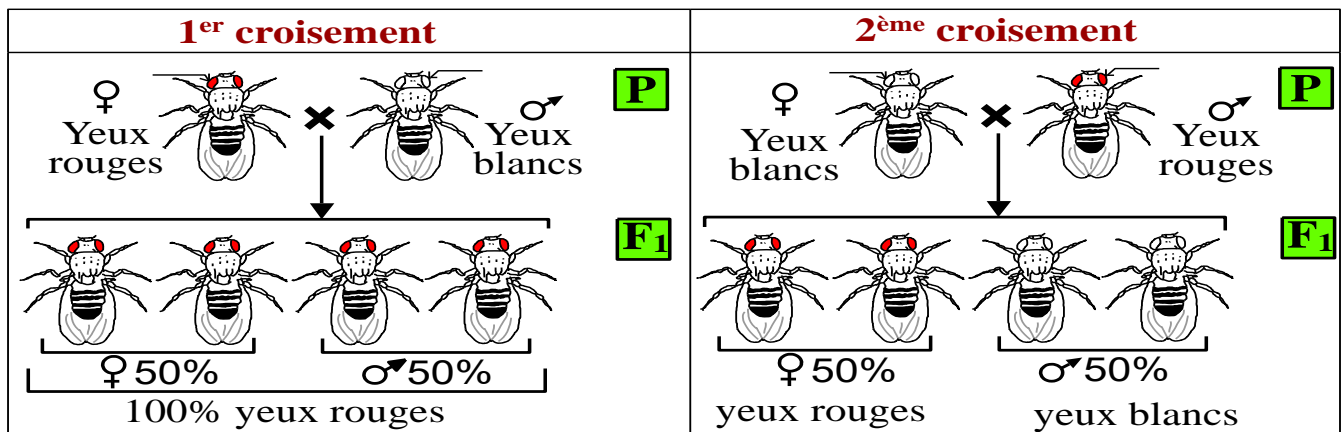
❖ Un allèle est dit létal lorsque les individus homozygotes pour le gène létal ne sont pas viables (ce génotype cause la mort des individus qui le portent).

❖ Le croisement des hybrides (F1x F1) 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 :

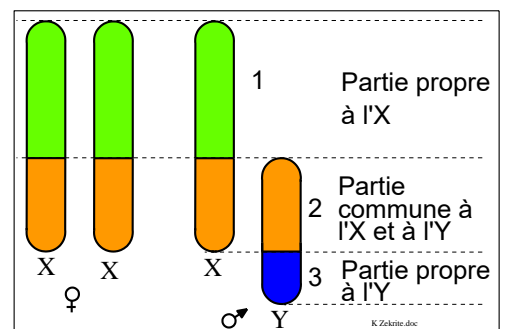


❁ On peut savoir qu'un gène est lié au sexe (porté par le gonosome sexuel X ou Y) par les critères suivants:

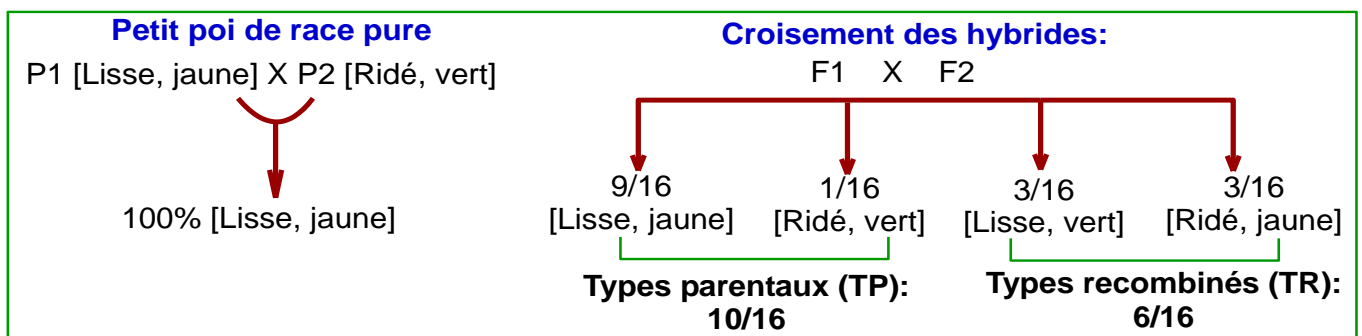
- L'exception de la 1^{ère} loi de Mendel : la génération F1 est hétérogène même si les parents sont de race pure : le phénotype des mâles diffère du phénotype des femelles.
- Les croisements réciproques donnent des résultats différents.

❁ 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

La génétique humaine

La génétique humaine est une branche de la génétique s'occupant de la transmission des caractères héréditaires chez l'être humain. La transmission des maladies héréditaires et des anomalies chromosomiques constitue le centre d'intérêt de la génétique humaine.

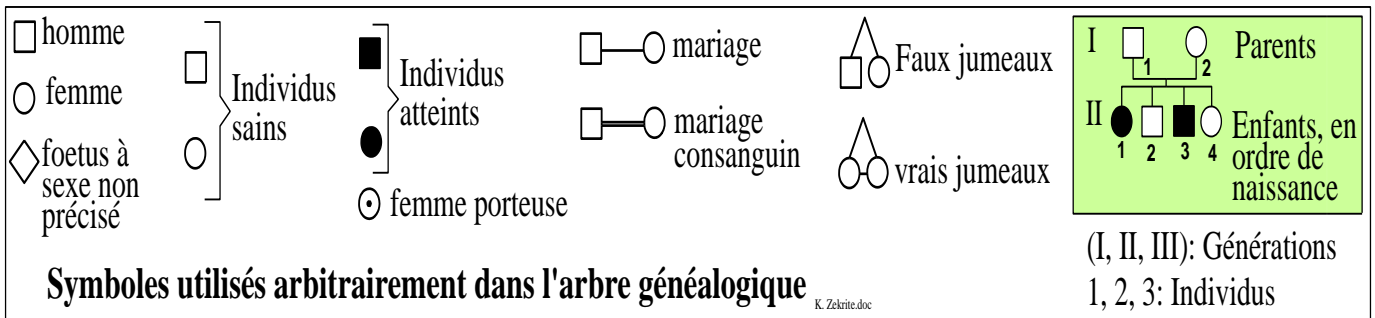
Difficultés d'étude de la génétique Humaine

On peut résumer les difficultés de la génétique humaine dans les points suivants :

- L'impossibilité de diriger à volonté les mariages (croisements).
- A chaque mise bas, le nombre d'enfants est limité, l'étude statistique est impossible.
- La durée de chaque génération est longue ce qui rend difficile le suivi d'un caractère chez plusieurs générations par un même chercheur.
- La garniture chromosomique est complexe, Ce qui complique, d'avantage la recherche.

Les méthodes employées par les généticiens pour étudier l'hérédité humaine :

- Pour étudier la transmission d'une maladie héréditaire d'une génération à une autre, on réalise *l'arbre généalogique* (ou pedigree) de la famille en question.

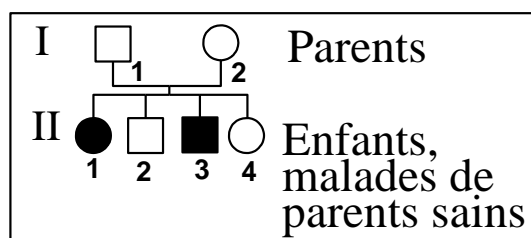


- Pour étudier les maladies associées à des anomalies chromosomiques, on réalise le caryotype du (ou des) sujet (s) en question.
- Pour mettre en évidence la présence ou l'absence de certains gènes (allèles) anormaux, les généticiens utilisent des techniques modernes : Analyse de l'ADN ou des protéines du (ou des) sujet (s) en question par la technique de l'électrophorèse (migration électrique).

Comment savoir que l'allèle d'une maladie est récessif

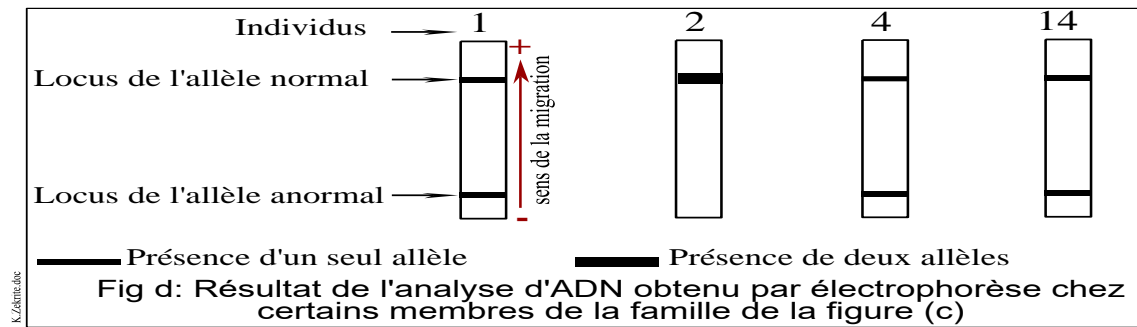
1/ A partir d'un arbre généalogique :

La présence d'un enfant malade issu d'un couple sain, indique que l'allèle de la maladie est récessif.



2/ A partir de l'analyse de l'ADN :

Lorsque le résultat de l'analyse de l'ADN d'un individu **sain révèle qu'il est hétérozygote** (hybride) pour le caractère étudié, alors l'allèle de la maladie est récessif : (Exemple l'individu malade n°4)



Comment savoir que l'allèle d'une maladie est dominant

1/ A partir d'un arbre généalogique :

- La maladie apparaît dans toutes les générations.
- Chaque personne malade provient d'un parent malade.
- Tous les enfants d'un couple sain sont sains.

2/ A partir de l'analyse de l'ADN :

Lorsque le résultat de l'analyse de l'ADN d'un individu **malade révèle qu'il est hétérozygote** (hybride) pour le caractère étudié, alors l'allèle de la maladie est dominant.

Comment savoir qu'une maladie est autosomale ou gonosomale à partir de l'analyse de l'ADN

Si l'analyse de l'ADN montre que :

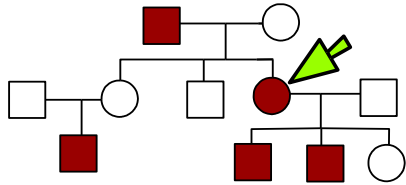
- Les filles et les garçons possèdent deux allèles, le gène est autosomal.
- Les filles possèdent deux allèles et les garçons possèdent un seul allèle pour le gène étudié, le gène est gonosomal porté par X.
- Si les filles ne possèdent aucun allèle du gène étudié et les garçons possèdent un seul allèle pour le gène étudié, le gène est gonosomal porté par Y.

Comment savoir le mode de transmission d'une maladie à partir de l'arbre généalogique

Astuces :

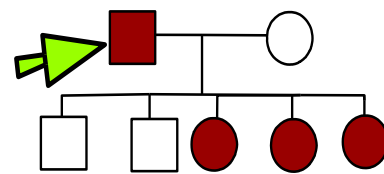
- Si l'allèle morbide est récessif, repérez chaque femme malade dans l'arbre généalogique et observez le phénotype de ses fils (♂) et de son père, puis appliquez les règles citées auparavant.
- Si l'allèle morbide est dominant, repérez chaque homme (♂) malade dans l'arbre généalogique et observez le phénotype de ses filles (♀) et de sa mère, puis appliquez les règles citées auparavant.

Maladie liée à X récessive



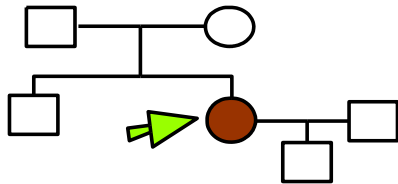
- ↳ Tous les garçons d'une mère malade sont malades (mère → fils).
- ↳ Le père de toute fille malade est malade

Maladie liée à X dominante



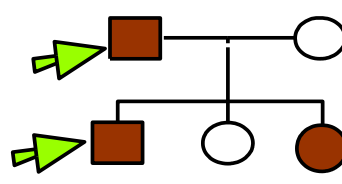
- ↳ Toutes les filles d'un père malade sont malades (père → fille).
- ↳ La mère de tout garçon sain est saines.

Maladie autosomale récessive



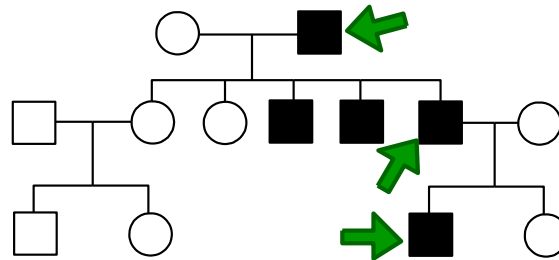
- ↳ Une mère malade donne un garçon sain
- ↳ Présence d'une fille malade issue d'un père sain.

Maladie autosomale dominante



- ↳ Un père malade donne une fille saine.
- ↳ Présence d'un garçon malade issu d'une maman saine.

Maladie gonosomale liée à Y



- ↳ La maladie apparaît chez les hommes seulement
- ↳ Tous les garçons d'un père malade sont malades (père → fils).
- ↳ Tous les garçons d'un père sain sont sains

Les anomalies chromosomiques = aberrations chromosomiques

- * Les anomalies chromosomiques ou aberrations chromosomiques sont des mutations chromosomiques qui peuvent toucher le changement du nombre de chromosomes ou leur structure.
- * Les anomalies chromosomiques changent le nombre de gènes de l'individu touché (le patrimoine génétique), ce qui entraîne un ensemble de symptômes conduisant à un syndrome donné.

I/ Quelques anomalies de nombre chez l'Homme

- * Les anomalies chromosomiques de nombre sont :
 - Des d'additions ou des pertes d'un ou de plusieurs chromosomes autosomes (Trisomie 21, Trisomie 13...).
 - Des d'additions ou des pertes d'un ou de plusieurs chromosomes sexuels (syndrome

de Turner, syndrome de Klinefelter, trisomie X...)

Nom de l'anomalie	Formule chromosomique	Symptômes
Trisomie 21 ou syndrome de Down ou « mongolisme »	$2n + 1 = 47$ $= 45A + XX$ ou $+XY$ Présence de 3 exemplaires du chromosome n° 21	Petite taille, doigts courts, nuque large, visage de forme sphérique, langue volumineuse (difficultés de prononciation et bouche souvent ouverte), malformations internes : cœur et artères, retard mental...
Syndrome de Klinefelter	$2n + 1 = 47$ $= 44A +$ XXY	Développement des glandes mammaires chez ces garçons, pilosité peu développée, atrophies des testicules causant une stérilité.
Syndrome de Turner = monosomie X	$2n - 1 = 45$ $= 44A + X$	Atrophies des ovaires causant une stérilité de ces femmes, petite taille, développement intellectuel souvent normal

✱ Les anomalies chromosomiques de nombre résultent de la non disjonction des chromosomes concernés dans l'anomalie au cours de la méiose chez l'un des parents (le père ou bien la mère): les 2 chromosomes de la même paire ne se séparent pas et migrent ensemble dans la même cellule fille. Cela peut se produire lors de la division réductionnelle (anaphase I) ou bien lors de la division équationnelle (anaphase II). Ainsi se forment des gamètes anormaux de point de vue nombre de chromosomes (22 ou 24 chromosomes au lieu du nombre normal $n=23$)

II/ Quelques anomalies de structure chez l'Homme

✱ Les anomalies chromosomiques de structure se présentent sous forme d'addition ou de délétion d'un segment de chromosome, ou bien sous forme de translocation = transfert d'un segment de chromosome ou d'un chromosome complet et sa soudure sur un autre chromosome non homologue.

Nom de l'anomalie	Formule chromosomique	Symptômes
Maladie du cri de chat	$2n = 46$ Perte (délétion) du bras court du chromosome n°5	Cries du nouveau-né ressemblant au miaulement d'un chaton, microcéphalie, retard mental et psychomoteur sévère, déficience cardiaque.
Translocation chromosomique équilibrée du chromosome 21 sur le chromosome 14	$2n = 46$ Un chromosome n°21 est associé au chromosome 14.	Le patrimoine héréditaire est complet, pas d'anomalies phénotypiques, mais l'individu concerné peut produire des gamètes anormaux et de ce fait avoir des enfants atteints d'anomalies chromosomiques

✱ Les anomalies chromosomiques de structure résultent des échanges de fragments de chromosomes non homologues lors de la méiose. Ces échanges entraînent la création de gamètes dont la structure est anormale (addition ou délétion ou translocation d'un fragment de chromosome).

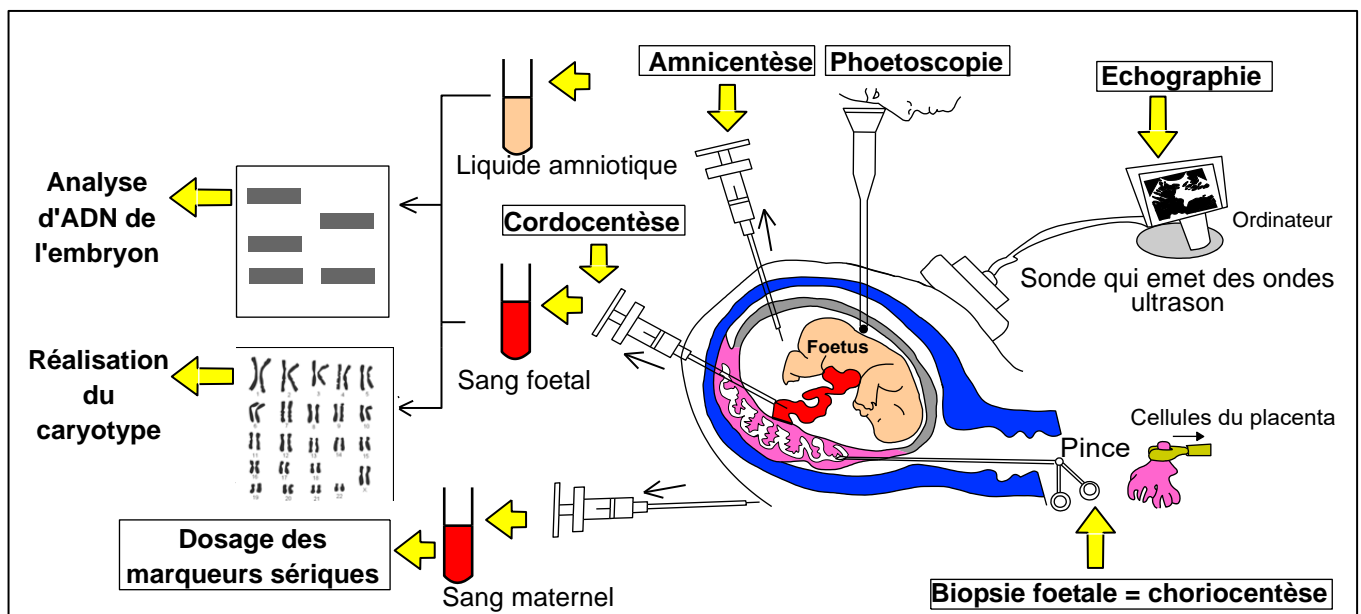
Le diagnostic prénatal التشخيص قبل وادي

Le diagnostic prénatal est l'ensemble des techniques permettant d'identifier des anomalies du fœtus pendant la grossesse. Dans certains cas, il sera possible de traiter l'enfant avant même sa naissance, in utero ; mais souvent, il n'existera pas de traitement et les couples pourront opter pour choisir entre une interruption médicale de grossesse ou pas.

Parmi ces techniques, on peut citer :

✱ L'Analyse du sang maternel :

Le dosage de quelques marqueurs sériques (du serum) maternels **est un test réalisé pendant la grossesse pour évaluer le risque d'anomalies chez le fœtus. Ces marqueurs sont des substances présentes dans le sang de la mère dont la concentration varie selon l'état de la grossesse et du fœtus.**



✱ L'échographie L'échographie est un examen intra-utérin qui consiste à envoyer des ultrasons sur le ventre de la maman enceinte, Un ordinateur convertit les différents signaux reçus en une image fixe ou animée. Cette technique permet de détecter les mouvements du fœtus in utero, de poursuivre son développement grâce à la mesure de plusieurs paramètres tels que le volume du liquide amniotique, la taille du fœtus, le volume de sa tête..... Elle permet également de mettre en évidence certaines malformations qui peuvent toucher la morphologie du fœtus....

✱ L'embryoscopie et la foetoscopie

L'embryoscopie et la phœtoscopie sont des examens foetales intra-utérin qui se basent sur l'introduction d'une caméra par le ventre de la maman (pour la phœtoscopie)

Ou par le col de l'utérus afin d'observer l'embryon dans la poche des eaux.

Cette technique permet le diagnostic visuel précoce مبكر de certaines déformations graves de la tête ou des membres principalement dues à des anomalies héréditaires.

Le prélèvement des cellules fœtales peut être réalisé par divers manières :

❖ **L'amniocentèse** استخراج عينة من السائل السلوي : Technique de prélèvement des cellules fœtales qui consiste à prélever à travers le ventre de la mère, sous contrôle échographique un échantillon du liquide amniotique. Ce liquide contient des cellules du fœtus qu'on peut utiliser pour réaliser divers examens : préparation du caryotype, examiner ces cellules sous microscope....

❖ **La Cordocentèse** استخراج عينة من دم الحبل السري : Technique de prélèvement des cellules fœtales qui consiste à prélever sous contrôle échographique un échantillon de sang fœtal à partir du cordon ombilical الحبل السري pour une analyse chimique ou une analyse génétique des cellules qu'il contient.

❖ **Biopsie fœtale ou choriocentèse** اقتطاع عينة من المشيمة : technique de prélèvement des cellules fœtales qui consiste à prélever un échantillon de villosités placentaires خملات المشيمة en vue de les analyser génétiquement (réalisation de carte chromosomique, analyse de l'ADN ...) pour rechercher des mutations ou des anomalies chromosomiques éventuelles.

Génétique des populations

I/ Génétique des populations : définition et objectifs.

La génétique des populations s'intéresse de la transmission des caractères héréditaires à partir de croisements non contrôlés, qui surgissent entre de nombreux parents au sein d'une même population.

La génétique des populations vise les objectifs suivants

- Le calcul des fréquences des allèles, des génotypes et des phénotypes pour constituer une idée claire sur la structure génétique d'une population.
- Prévoir théoriquement la structure d'une population au fil des générations.
- L'étude des facteurs susceptibles de modifier la structure génétique d'une population.

II/ Notion d'espèce et population naturelle

Espèce : Plusieurs critères sont utilisés pour définir une espèce :

- Le critère de ressemblance morphologique, mais ce critère rencontre des problèmes, en effet quelques individus présentent de grandes différences morphologiques malgré leur appartenance à la même espèce.
- Les critères écologiques : habitat, régime alimentaire...
- Le critère génétique et biochimique : Les individus de la même espèce partagent les mêmes gènes et des molécules semblables.
- Le critère d'interfécondité : deux individus de la même espèce sont capables de se reproduire entre eux et donner une descendance viable et fertile (féconde) sur plusieurs générations.

C'est la dernière définition qui est la plus admise de nos jours et qui tient compte du concept biologique, cette définition a été énoncée la première fois par le chercheur Ernst Mayr en 1942.

Une population naturelle est un ensemble d'individus appartenant à la même espèce, vivant sur un territoire plus ou moins bien limité par des barrières géographiques ou écologiques. Les individus de la même population interagissent entre eux au moment de la reproduction. La notion de population fait donc appel à des critères d'ordres spatiaux, temporels et génétiques.

La population est une structure dynamique caractérisée par :

- Un flux des individus: entrée de nouveaux individus (naissances, migration d'individus de la même espèce vers la population concernée), perte d'individus: mortalité, migration de certains individus de la population vers d'autres territoires.
- La mutations, la sélection naturelle, la dérive génétique (ou génique).

III/ Notion du pool génique et calcul des fréquences réelles alléliques et génotypiques d'une population

Pool génique : c'est l'ensemble des allèles qui se trouvent sur les locus des gènes des chromosomes de tous les individus de la population. Le pool génique se caractérise par sa continuité et son évolution au cours des générations, et aussi par sa variabilité sous l'influence de certains facteurs naturels.

Comment Calculer les fréquences observée des phénotype?

- On symbolise la fréquence par la lettre f. la valeur de f est comprise entre 0 et 1.

- On calcule la fréquence des différents phénotypes par la relation suivante :

$$f[A] = \frac{\text{Nombre d'individus porteurs du phénotype [A]}}{\text{Effectif total de la population N}}$$

f[A] : désigne la fréquence du phénotype [A]

Rappel : Si l'allèle A est dominant : nombre[A] = nombre (AA) + nombre (Aa)

$$f[A] + f[a] = 1$$

Comment Calculer les fréquences génotypiques observée ?

$$f(AA) = \frac{\text{Nombre d'individus porteurs du génotype (AA)}}{\text{Effectif total de la population N}}$$

f(AA) : désigne la fréquence du génotype AA.

On note f(AA) = D (individus homozygotes porteur du caractère dominant)

f(aa) = R (individus homozygotes porteur du caractère récessif)

f(Aa) = H (individus hétérozygotes)

$$D + H + R = 1$$

Comment Calculer les fréquences génotypiques observée ?

✳ On calcule la fréquence des allèles : par l'application du théorème des probabilités composées. La fréquence de l'allèle A peut être définie comme la probabilité de tirer cet allèle au hasard dans la population, ce qui suppose d'abord de tirer un individu, puis l'un de ses deux allèles :

$$f(A) = p = (D \times 1) + (H \times \frac{1}{2}) + (R \times 0) = D + H/2$$

$$f(a) = q = (D \times 0) + (H \times \frac{1}{2}) + (R \times 1) = R + H/2$$

avec : f(A) : fréquence de l'allèle dominant A, on note cette fréquence **p**

f(a) : fréquence de l'allèle récessif a, on note cette fréquence **q**

$$p + q = 1$$

En règle générale :

$$\text{Fréquence d'un allèle} = \frac{\text{Nombre d'individus homozygotes pour cet allèle}}{\text{Effectif total de la population}} + \frac{1}{2} \times \frac{\text{Nombre d'individus hétérozygotes pour cet allèle}}{\text{Effectif total de la population}}$$

IV/ Population idéale ou équilibrée ou théorique :

La population théorique-idéale est équilibrée, elle se définit par les caractéristiques suivantes :

- Population d'organismes diploïdes à reproduction sexuée et sans chevauchement entre les générations (pas de croisements entre individus de générations différentes).
- Effectif de la population infini (très grand nombre).
- Rencontre aléatoire entre les mâles et les femelles (**Panmixie**) et rencontre aléatoire entre les gamètes mâles et les gamètes femelles lors de la fécondation (**Pangamie**)
- Absence des facteurs d'évolution de la population : migration, sélection et mutations.

II/ La loi de Hardy-Weinberg

La théorie de la loi de Hardy – weinbeg s'applique sur les populations théoriques idéales qui n'évoluent pas. Selon cette loi :

- Les fréquences alléliques et génotypiques ne changent pas avec le temps.
- On détermine les fréquences théoriques des génotypes à partir des fréquences des allèles. Dans le cas d'un gène di-allélique, où p est la fréquence de l'allèle dominant A et q la fréquence de l'allèle récessif a,

☞ Si le gène est autosomal, on adopte une relation simple qui correspond au développement du binôme $(p+q)^2$:

$$\begin{aligned} f(AA) + f(Aa) + f(aa) &= (p+q)^2 = 1 \\ &= p^2 + 2pq + q^2 = 1 \end{aligned} \quad \rightarrow \begin{aligned} f(AA) &= p^2 \\ f(Aa) &= 2pq \\ f(aa) &= q^2 \end{aligned}$$

☞ Si le gène est lié au sexe,

➤ On adopte la même relation précédente chez les femelles

$$\begin{aligned} f(X_A X_A) + f(X_A X_a) + f(X_a X_a) &= (p+q)^2 = 1 \\ &= p^2 + 2pq + q^2 = 1 \end{aligned} \quad \rightarrow \begin{aligned} f(X_A X_A) &= p^2 \\ f(X_A X_a) &= 2pq \\ f(X_a X_a) &= q^2 \end{aligned}$$

➤ Chez les mâles, la fréquence des génotypes est égale à la fréquence des allèles :

$$\begin{aligned} f(X_A Y) &= p \\ f(X_a Y) &= q \end{aligned}$$

● L'écart entre les effectifs génotypiques théoriques et les effectifs génotypiques observés permet de juger si la population est équilibrée ou pas :

* Si cet écart est négligeable, on dit que la population est théorique équilibrée et par conséquent elle répond à la loi de Hardy- Weinberg.

* Si cet écart est important, on dit que la population n'est pas équilibrée et par conséquent elle n'obéit pas à la loi de Hardy- Weinberg.

V/ Les facteurs de variabilité des populations naturelles

La loi de Hardy Weinberg décrit une population qui n'évolue pas. Or dans la population réelle naturelle, l'action des mutations, de la sélection naturelle, de la dérive génique et de la migration provoquent le changement de la fréquence des allèles et par conséquent l'évolution de la population.

1/ Les mutations : الطفرات

● Les mutations sont des modifications qui peuvent affecter :

✎ La séquence d'un gène, on les appelle **mutations ponctuelles**, la fonction du gène est alors altérée ou modifiée (mutation faux sens ou non-sens). Ces mutations sont classées en 3 catégories : les mutations par substitution, les mutations par additions et les mutations par délétion.

✎ Les chromosomes, on les appelle **mutations chromosomiques**, elles se manifestent soit par addition, délétion ou translocation d'un fragment de chromosomes ou d'un chromosome entier, soit par duplication ou inversion d'un fragment de chromosome ou même une duplication du nombre de chromosomes.

● Les mutations sont le processus de base par lequel **des allèles nouveaux naissent par modification d'allèles préexistants**, Cette addition d'allèles provoque le changement des fréquences allélique, génotypique et celle des phénotypes. Les mutations sont donc la source de la variabilité et de l'évolution génétique des populations مصدر التنوع والتطور الوراثي للسكان

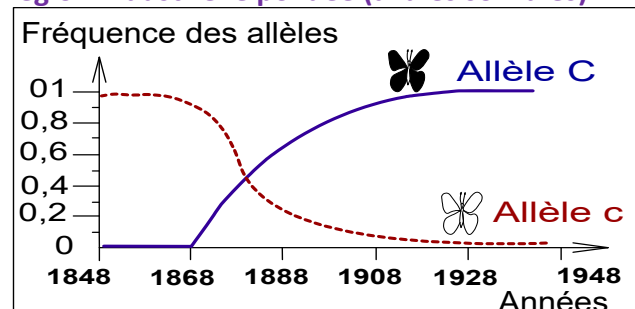
2/ La sélection naturelle : الانتقاء الطبيعي

✳ La sélection naturelle est un mécanisme qui s'applique à la population, et non pas à l'individu. Elle a lieu lorsque l'environnement (nourriture disponible, prédateurs, compétiteurs, climat, pollutions, relief, etc.) donne pour des individus portants un phénotype donné plus de chance de survie et de succès reproductif par rapport à un autre phénotype. La sélection est dite positive pour les individus les plus favorisés dans ce milieu et négative pour les individus les moins aptes à survivre ou à se reproduire.

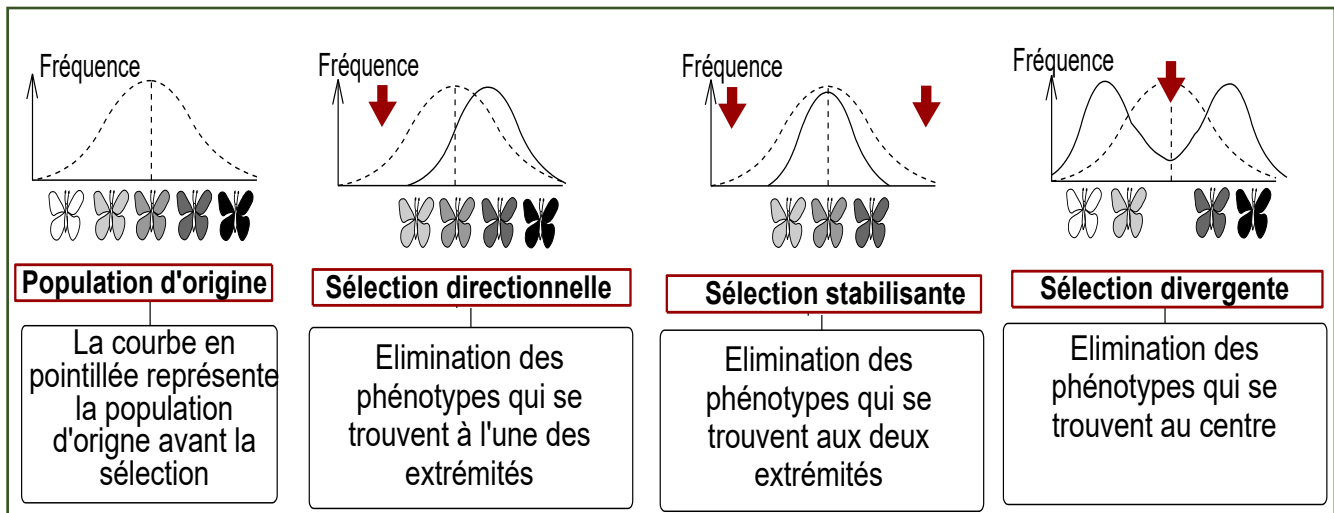
✳ Le groupe d'individus sélectionné positivement transmet ses allèles d'une manière préférentielle au fil des générations, par conséquent la fréquence de ces allèles augmente par rapport aux allèles les moins favorisés qui diminuent, par conséquent la structure génétique de la population se trouve modifiée en favorisant le maintien du phénotype le mieux adapté à l'environnement.

Exemple : Effet de la sélection naturelle dans une région industrielle polluée (arbres sombres) sur la fréquence d'un allèle dominant (C) codant pour la couleur noire d'un papillon et sur l'allèle (c) codant pour la couleur claire de ce même papillon.

Dans cette région polluée, les papillons clairs sont facilement repérables par les oiseaux prédateurs et donc plus exposés à la prédation ce qui provoque la diminution de leur effectif et donc ces allèles (c) sont moins transmis aux générations suivantes ce qui conduit à une diminution qui tend vers une extinction اندثار de ces allèles. Inversement dans l'environnement rural non pollué.



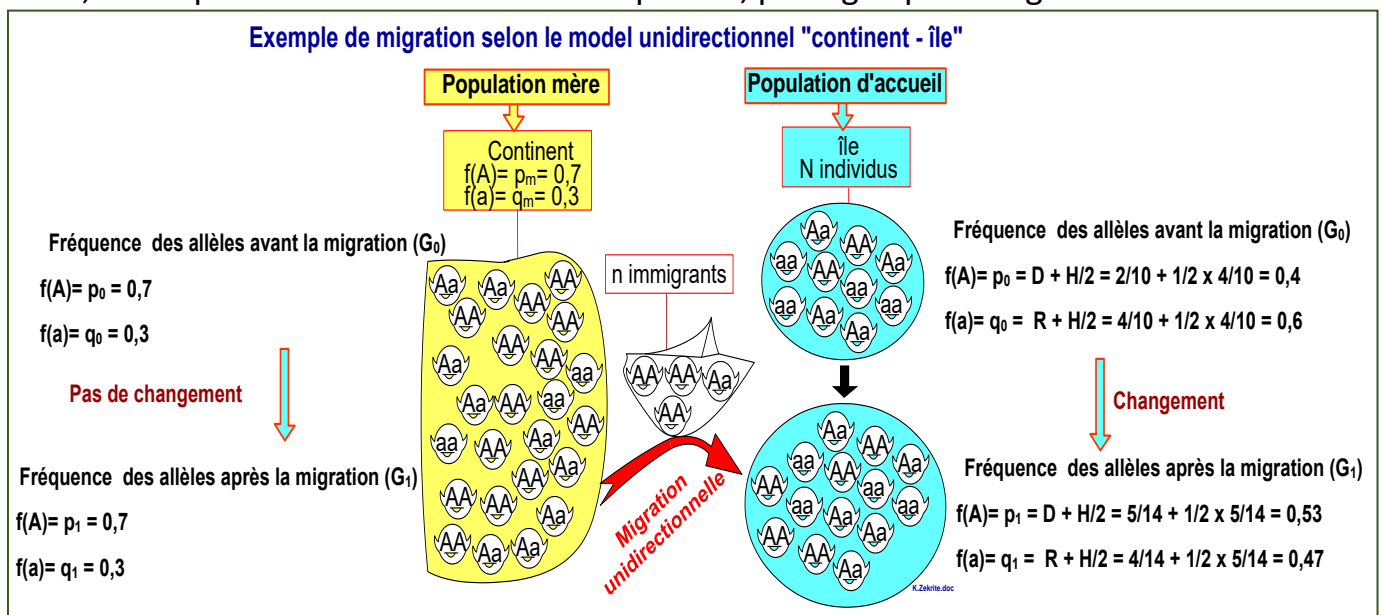
On distingue trois types de sélections naturelle selon les phénotypes favorisés dans un milieu : **directionnelle**, **stabilisante** et **divergente**.



2/ La migration : الهجرة

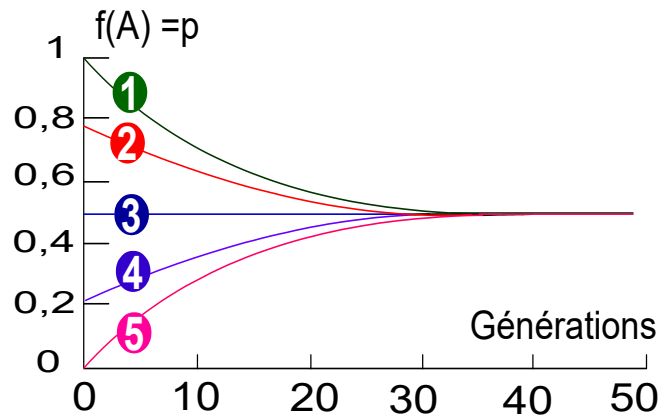
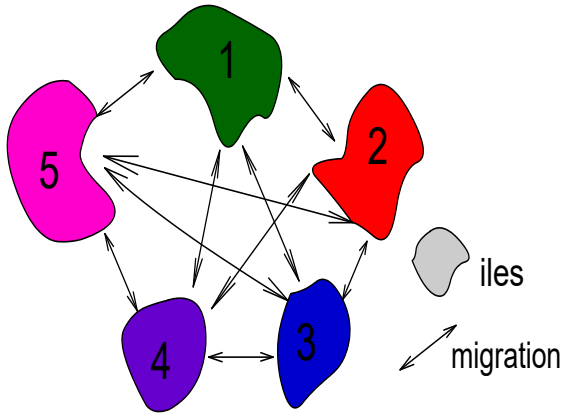
La migration d'individus entre les populations crée une **circulation et un échange d'allèles entre elles**, ce qui entraîne une modification des fréquences alléliques et par conséquent le pool génique des populations se trouve enrichi ou appauvri.

Le modèle de la **migration unidirectionnelle** conduit à la modification de la structure génique de la population d'accueil qui évolue vers la structure génétique de la population mère, alors que cette dernière reste en équilibre, protégée par son grand effectif.



Quant au modèle de la **migration multidirectionnelle**, les différences alléliques entre les populations en échange diminuent et tendent vers une structure génétique commune, le polymorphisme génique augmente et la variabilité génétique entre les populations disparaît.

Exemple de migration multidirectionnelle entre les îles d'un archipel أرخبيل



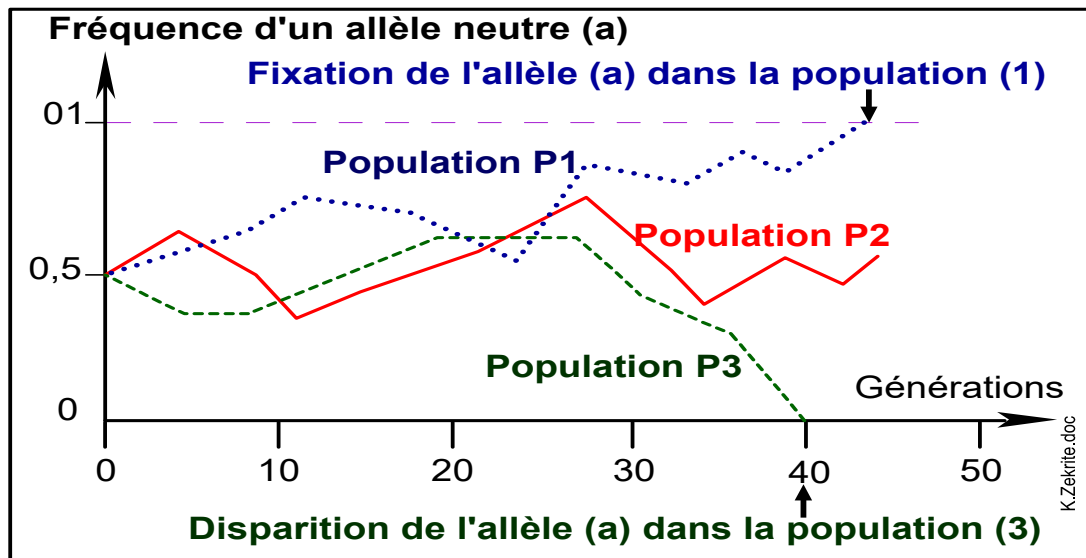
4/ La dérive génétique (ou génique) : الانحراف الجيني

* La dérive génétique correspond **aux fluctuations aléatoires عشوائية** de la fréquence d'un allèle neutre (ou un génotype ou un phénotype neutre) au fil des générations, entraînant une **diminution du polymorphisme** génétique au sein d'une population indépendamment des mutations, de la sélection naturelle et des migrations.

* En raison de son caractère aléatoire, la dérive génétique est donc un **phénomène imprévisible**.

* La dérive génétique se produit d'une façon plus marquée dans **les populations de petite taille**.

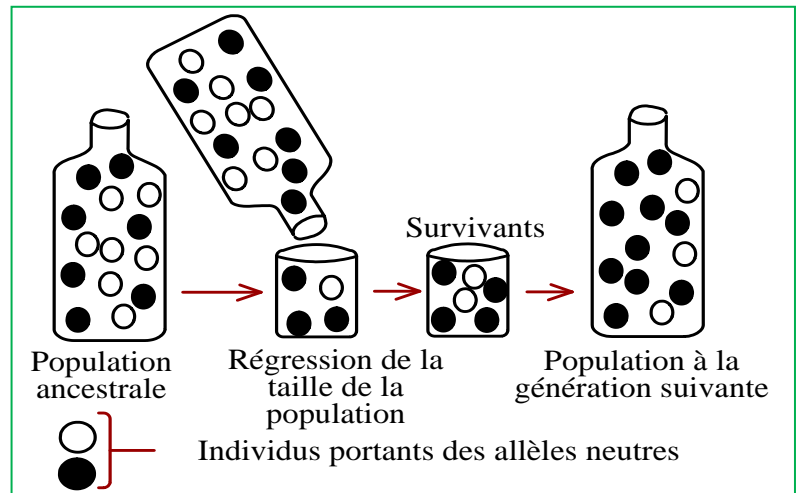
Influence de la dérive génétique sur la structure génétique des populations de petite taille.



* Les deux causes de la dérive génétique sont :

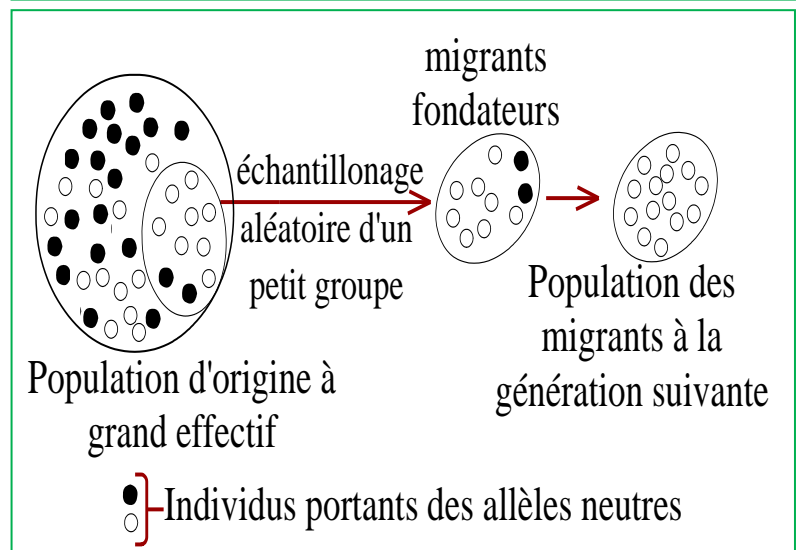
- Le goulot d'étranglement (ou goulet d'étranglement): فعل تضيق عنق الزجاجة

correspond à un épisode de réduction sévère d'une population mère (suite à une épidémie, sécheresse, catastrophe naturelle...), aléatoirement, quelques allèles neutres se trouvent moins représentés que d'autres dans la population. Les survivants se reproduisent exclusivement entre eux, ce qui conduit à une perte de ces allèles au fil des générations.

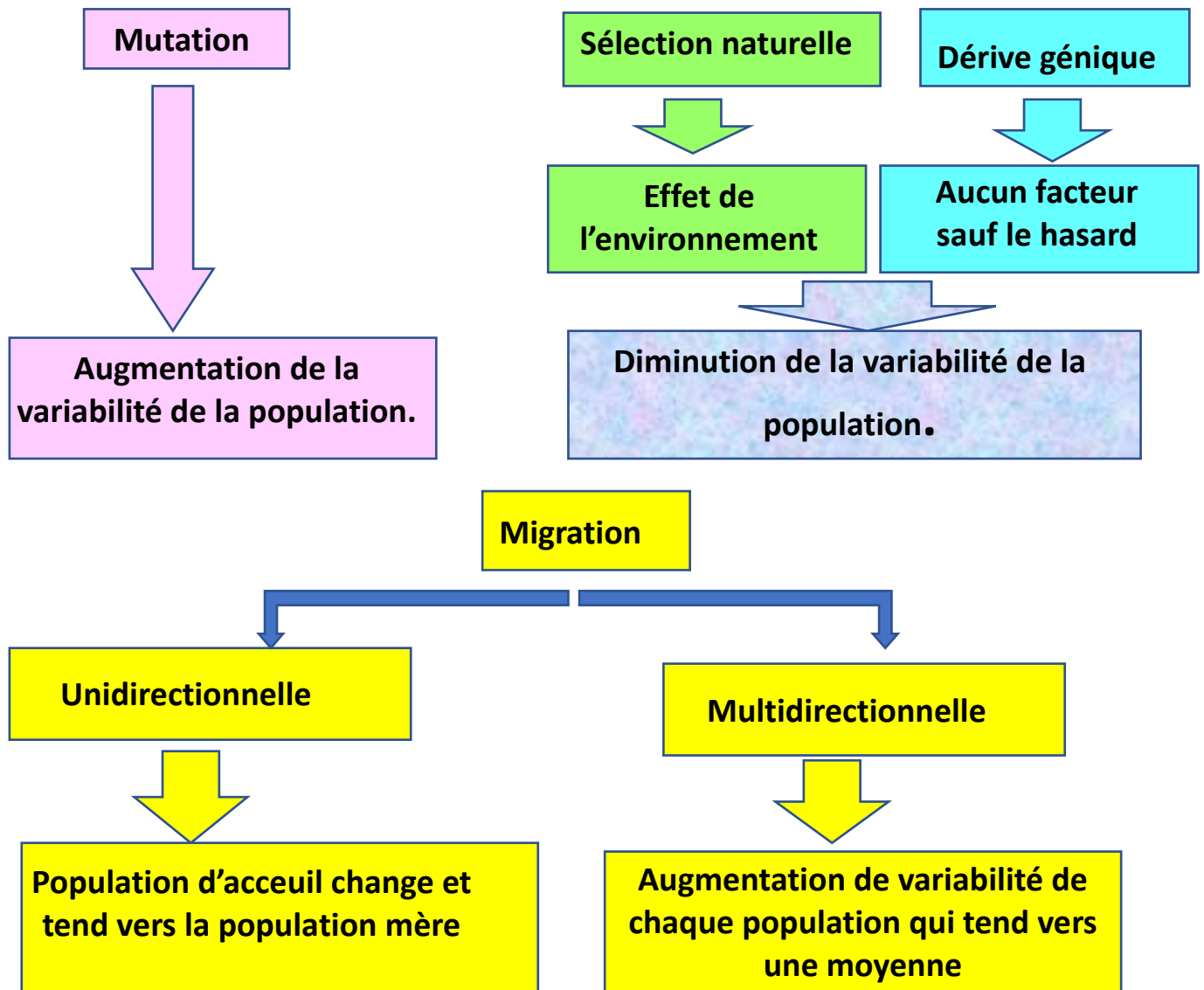


- L'effet fondateur : الفعل المؤسس

se produit lorsqu'un sous-groupe d'une population s'isole d'une manière aléatoire du groupe principal et fonde une nouvelle population. L'effet fondateur se traduit également par une faible diversité génétique de départ.



5/ Résumé des facteurs de variation de la population



Immunologie et système immunitaire

Le système immunitaire est l'ensemble des organes, tissus, cellules et molécules assurant la défense de l'organisme contre les agressions.

Quelle est l'organisation de ce système ?

Organisation du système immunitaire

Le système immunitaire est formé de cellules immunitaires et d'organes lymphoïdes et de molécules.

I/ Les organes lymphoïdes:

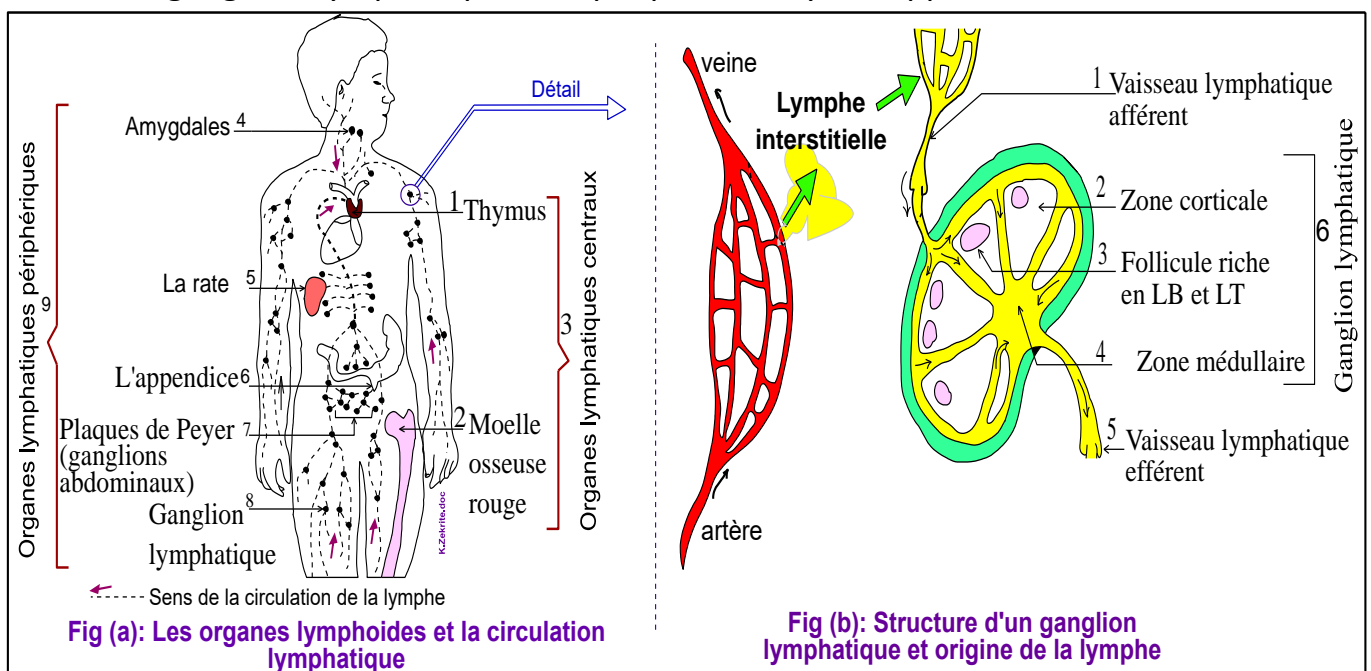
C'est l'ensemble des organes au niveau desquels se forment ou se stockent les cellules immunitaires. On en distingue deux types :

1/ Les organes lymphoïdes centraux : au niveau desquels se déroule la production et la maturation des cellules immunitaires, notamment des lymphocytes, ces organes sont :

- **La moelle osseuse rouge** qui assure la production de tous les leucocytes (globules blancs) et notamment les lymphocytes T et B, cet organe assure aussi la maturation des lymphocytes B.

- **Le thymus** : assure la maturation des lymphocytes T.

2/ Les organes lymphoïdes périphériques : c'est le lieu de stockage des cellules immunitaires, dans ces endroits se déroule la rencontre des cellules de l'immunité avec les agents pathogènes. Parmi ces organes périphériques, on peut citer : Les amygdales, la rate, les ganglions lymphatiques, les plaques de Peyer, l'appendice...



II/ Le sang et la lymphe:

✱ Le sang et la lymphe permettent d'amener les cellules immunitaires dans tout l'organisme .

✱ La circulation sanguine est un réseau de vaisseaux où circule le sang, elle est liée aux

différents organes et elle circule dans deux sens : les veines transportent le sang des **organes vers le cœur et les artères transportent le sang du cœur vers les organes.**

✱ La circulation lymphatique est un réseau de vaisseaux où circule la lymphe, elle est liée aux différents organes lymphoïdes et elle circule dans un seul sens : des organes vers le cœur.

✱ La lymphe = Sang sans globules rouges = plasma + globules blancs.

✱ Le sérum المصل est le liquide sanguin débarrassé de ses cellules et des protéines de la coagulation.

Sérum = Sang coagulé sans cellules (caillot) المصل = دم مختر بدون خلايا (جلطة)

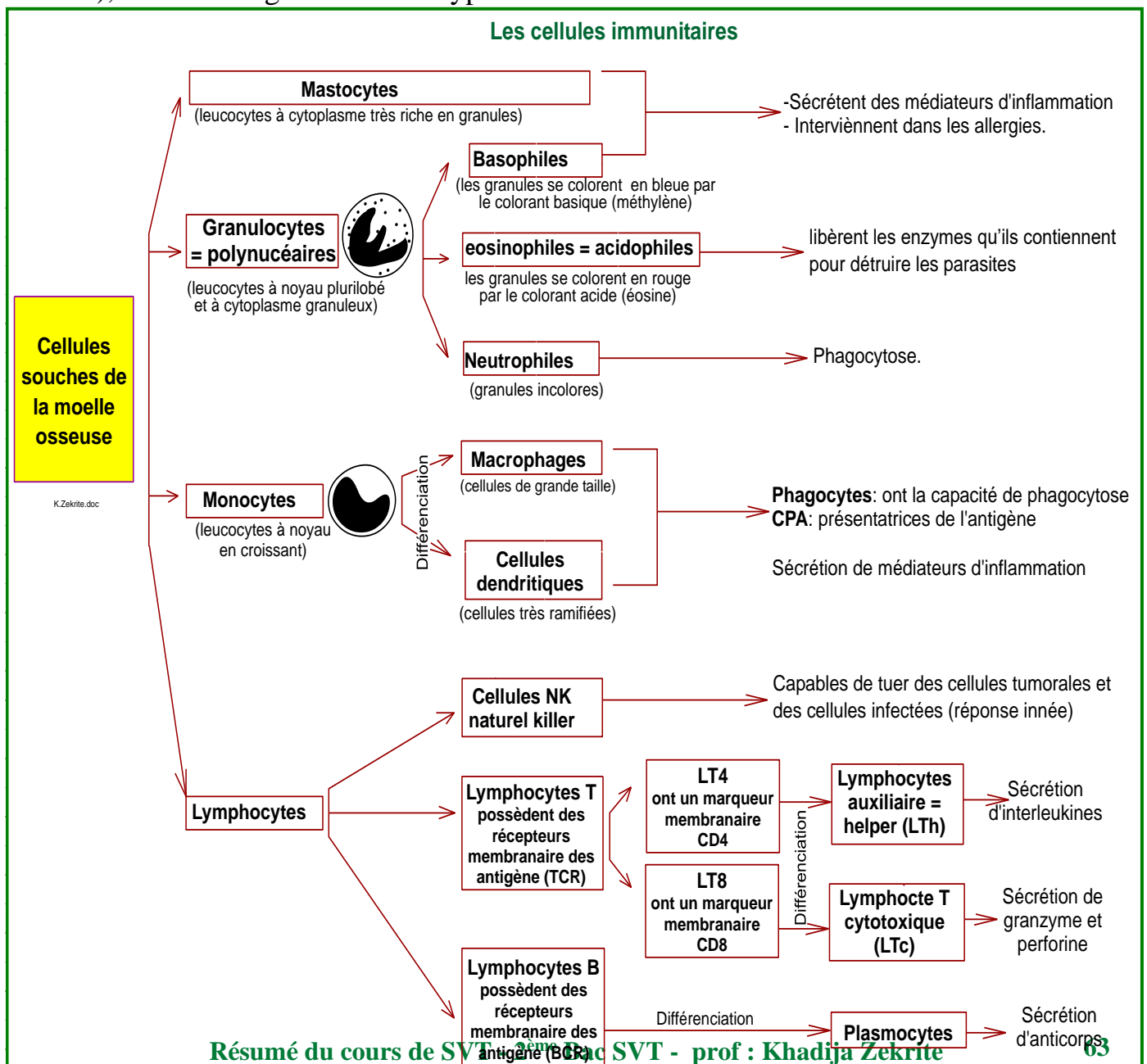
✱ Le plasma البلازما, est obtenu par simple centrifugation sans coagulation préalable.

Plasma = sang non coagulé sans cellules البلازما = دم طري بدون خلايا

I/ Les cellules immunitaires :

Toutes les cellules sanguines sont issues de la moelle rouge contenue dans les os plats ou à l'extrémité des os longs.

Les cellules intervenant dans les réactions immunitaires sont **les leucocytes** (globules blancs), on en distingue différents types:



Notion du soi et du non soi

Le système immunitaire est capable de distinguer le non soi غير الذاتي, encore appelé antigènes pour l'attaquer, du soi pour le préserver للمحافظة عليه.

Comment se fait cette distinction du non soi ?

Le soi : الذاتي: Le soi d'un individu est représenté par l'ensemble des molécules résultant de l'expression de son génome : molécules extracellulaires, membranaires ou bien intracellulaires.

Le non soi : غير الذاتي

❁ Le non soi encore appelé **antigènes** مولد المضاد est l'ensemble des molécules qui ne sont pas codées par le génome de l'organisme considéré, qui, présentes dans l'organisme, vont déclencher des réactions immunitaires non spécifiques ou spécifiques.

❁ L'origine du non soi peut être :

- exogène (extérieur): il s'agit d'éléments étrangers à l'organisme, pathogènes ou non (exemple : bactéries, virus, champignons microscopiques, protozoaires unicellulaires, globules rouges transfusés, organes greffés, toxines, poils de chat, pollens...).

- endogène : il s'agit des moléculaires du soi modifiées = **soi modifié** ذاتي مغير (exemple: cellules cancéreuses, globules rouges âgés, cellules infectées ...).

❁ Seules certaines parties de l'antigène peuvent déclencher une réaction immunitaire, ces parties sont appelées **déterminants antigéniques ou épitopes ou sites antigéniques ou motifs antigéniques**.

Les déterminants moléculaires du soi= les marqueurs de l'identité

المحددات الجزيئية للذاتي = واسمات الذاتي

Les cellules de l'organisme portent, sur leur membrane plasmique, des molécules glycoprotéiques qui diffèrent d'une personne à une autre. Ces molécules constituent des « **marqueur du soi** », grâce à ces molécules les cellules ou les tissus étrangers sont identifiés comme non soi. On distingue deux types de marqueurs du soi :

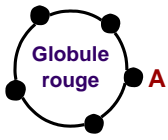







- Les marqueurs mineurs du soi.
- Les marqueurs majeurs du soi.

I/ Les marqueurs mineurs du soi : marqueurs des groupes sanguins ABO

❁ La membrane cytoplasmique des globules rouges sanguins (les hématies) porte des glycoprotéines responsables des réactions d'agglutination التكد lors de certaines transfusions entre donneurs et receveurs incompatibles ; ces molécules sont appelées pour cette raison **agglutinogènes** مولدات اللكد ou **antigènes**.

❁ Il y'a de deux types de ces molécules :

- Agglutinogène de type A = antigène A : présent sur les globules rouges des personnes du groupe A et AB.
- Agglutinogène de type B = antigène B: présent sur les globules rouges des personnes du groupe B et AB.

Groupes sanguins	A	B	AB	O
Agglutinogènes (antigènes à la surface des globules rouges)				
Agglutinines (Anticorps plasmatiques anti-agglutinogène)	 anti B	 ani A	Rien	 ani A  anti B

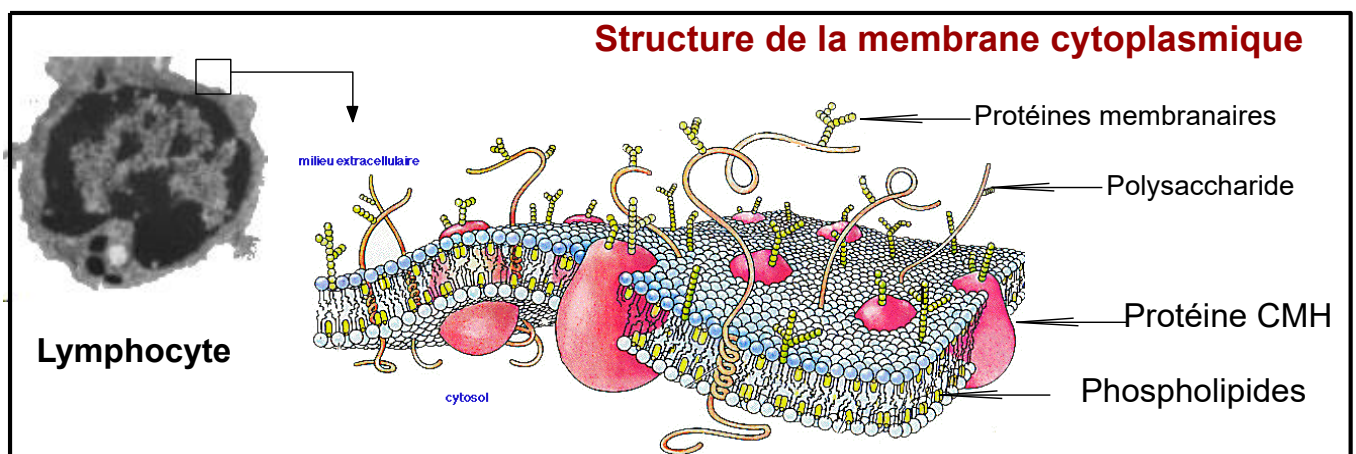
✦ Ces molécules jouent un rôle dans la détermination des groupes sanguins dans le système A.B.O. Lors des transfusions non conformes, le corps peut réagir contre ces molécules par des anticorps plasmatiques spécifiques nommés agglutinines. On qualifie alors ces glycoprotéines par **marqueurs mineurs du soi**.

II/ Les marqueurs majeurs du soi : Complexe majeur d'histocompatibilité CMH

Des expériences de greffe de peau ont montré les résultats suivants :

Type de greffe	Résultat
① Autogreffe : le donneur de greffon est lui-même le receveur	Greffe réussie
② Isogreffe : donneur et receveur génétiquement identiques	
③ Allogreffe : donneur et receveur appartiennent à la même espèce mais génétiquement différents	Rejet du greffon
④ Xénogreffe : donneur et receveur appartiennent à 2 espèces différentes	

✦ Ces expériences de greffe parmi d'autre ont permis de conclure que toute cellule nucléé du corps porte des molécules membranaires qui distinguent le soi du non soi, ces molécules sont appelés **Complexe Majeur d'Histocompatibilité (CMH)** ou molécules HLA (Human Leucocyt Antigen), ces molécules sont de nature glycoprotéique.



On distingue deux types de CMH :

- **les molécules CMH de classe I** sont présentes sur toutes les cellules de l'organisme qui sont nucléées. Ils comportent un site pour fixer le déterminant antigénique et un autre pour fixer les marqueurs CD8.

- **les molécules CMH de classe II**, présentes uniquement sur les cellules impliqués dans les réaction immunitaire (cellules de Langerhans de la peau, cellules dendritiques, quelques cellules du tissu endothélial, phagocytes, monocytes, lymphocytes B et T...). Ils comportent un site pour fixer le déterminant antigénique et un autre pour fixer les marqueurs CD4.

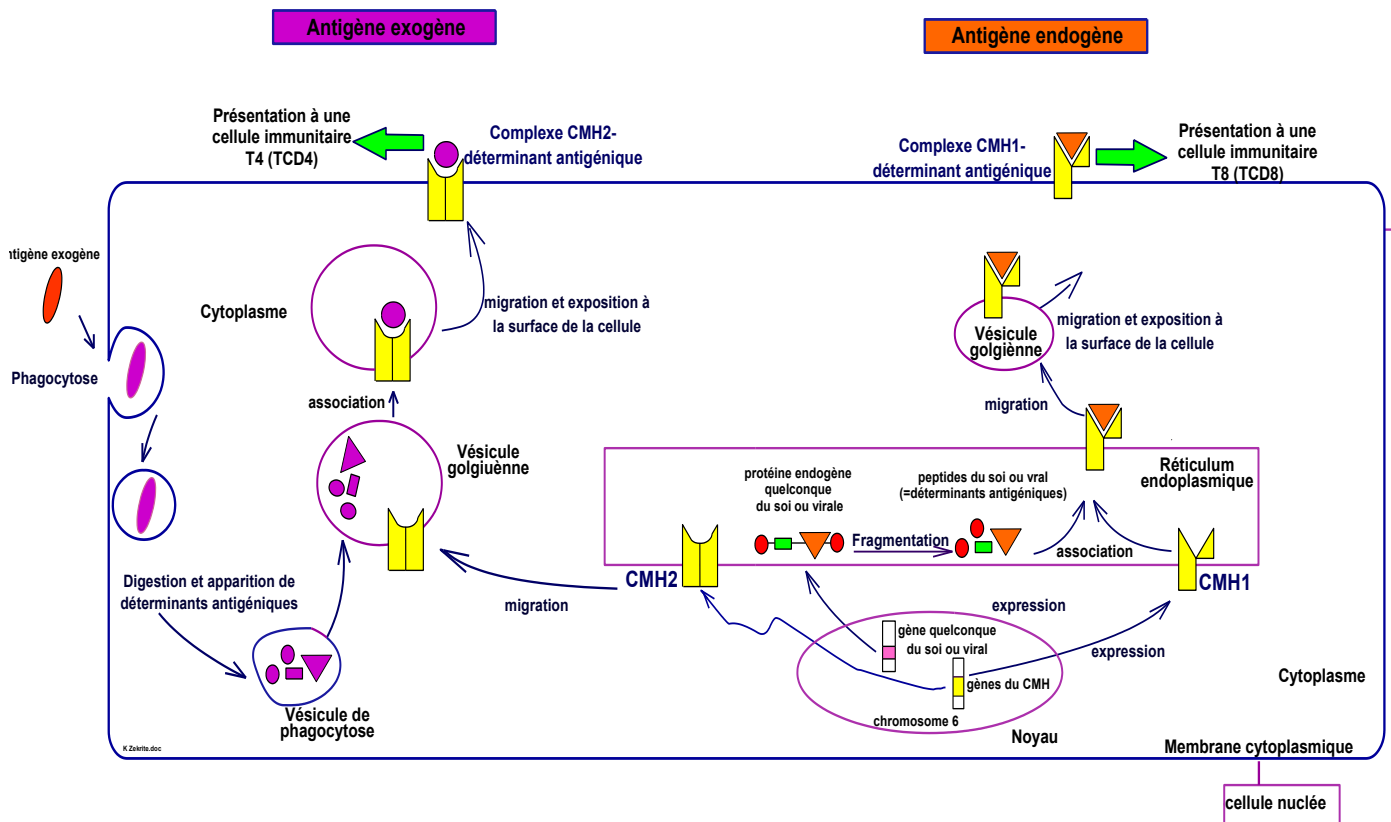
Les molécules de CMH sont codées par un groupe de gènes, localisés sur le brin court de la paire du chromosomes n° 6 chez l'Homme.

Ces gènes sont

- Liés et très proches l'un de l'autre (liaison absolue)
- Polyalléliques : contiennent plusieurs allèles.
- Les allèles de chaque gène sont codominants.

La multitude des allèles de ces gènes explique l'immense diversification des molécules CMH: ces molécules sont spécifiques et propres à chaque individu (à l'exception des vrais jumeaux).

Rôle des molécules de CMH



Rôles du CMH dans l'exposition et la présentation des déterminants antigéniques

Dans chaque cellule, un échantillon des protéines endogènes ou exogène subit une fragmentation عملية تجزيء.

Les fragments obtenus (peptides = déterminant antigéniques) s'associent aux molécules de CMH qui sont en cours de synthèse au niveau du réticulum endoplasmique

(les molécules endogènes s'associent au CMH1 et les molécules exogènes s'associent au CMH2).

• Ces complexes, ainsi formés, seront expédiés **ترسل** et exposés à la surface de la membrane cytoplasmique de la cellule.

• Cette présentation des déterminants antigéniques, permet à une cellule qui réalise une synthèse protéique anormale ou qui a été infecté par un élément étranger d'être correctement repérée et attaquée par les lymphocytes T8 ou T4, mais une cellule saine voisine ne risque pas d'être attaquée.

Les moyens de défenses du soi

• L'ensemble des réactions de défense émises par le système immunitaire contre un antigène est appelé réaction immunitaire.

• On distingue deux types de réactions immunitaires :

1/ La réponse immunitaire innée ou non spécifique الاستجابة المناعية الفطرية أو غير النوعية : cette immunité est :

- Immédiate : intervient quelques secondes après la contamination.
- Naturelle : elle est liée aux caractéristiques génétiques de l'individu et apparaît dès la naissance ou dès la maturation du système immunitaire.
- Non adaptative : c'est-à-dire qu'elle est la même quelle que soit la nature de l'antigène, ce qui permet à certains germes d'échapper à l'effet de ces moyens.
- Fait intervenir les granulocytes, les mastocytes, les macrophages, les cellules dendritiques, les cellules NK et des médiateurs non spécifiques : histamine, prostaglandine, système de kinine, facteur du complément, la prostaglandine

2/ La réponse immunitaire adaptative (ou acquise ou spécifique) الاستجابة المناعية التكيفية أو المكتسبة : Cette réponse immunitaire adaptative :

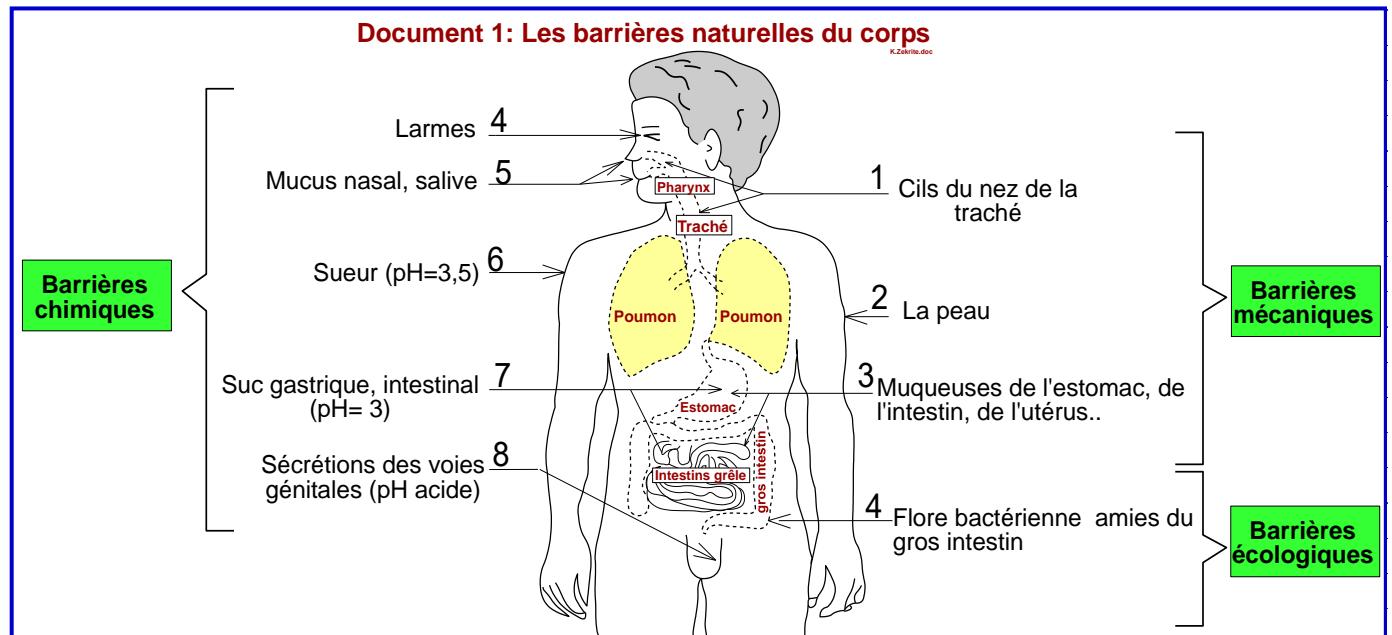
- est spécifique : dirigée contre un antigène précis.
- est acquise : apparait après une infection par l'antigène donné.
- est doté d'une mémoire : la réponse secondaire est plus efficace et plus rapide que la réponse primaire.
- Fait intervenir les lymphocytes T et B immunocompétents et des médiateurs tel les interleukines.
 - est marquée par une coopération entre les différentes cellules immunitaires (LB, LT8, LT4 et les cellules présentatrices de l'antigène) par des contacts directs et par des médiateurs chimiques comme les interleukines.
 - est lente, n'apparait qu'après une quinzaine de jours après l'infection, vu son déroulement en trois étapes : la phase d'induction, la phase d'amplification (prolifération et différenciation) et la phase effectrice.

Immunité non spécifique :

I/ Les barrières naturelles de l'organisme

On peut classer les barrières naturelles en 3 types :

- **Barrières mécaniques** : comme la peau, les muqueuses, les cils...
- **Barrières biochimiques** : comme la salive, la sueur, les larmes, le mucus...
- **Barrières écologiques** : représentées la flore intestinale et vaginale, ainsi que les microorganismes utiles de la peau. (voir doc)



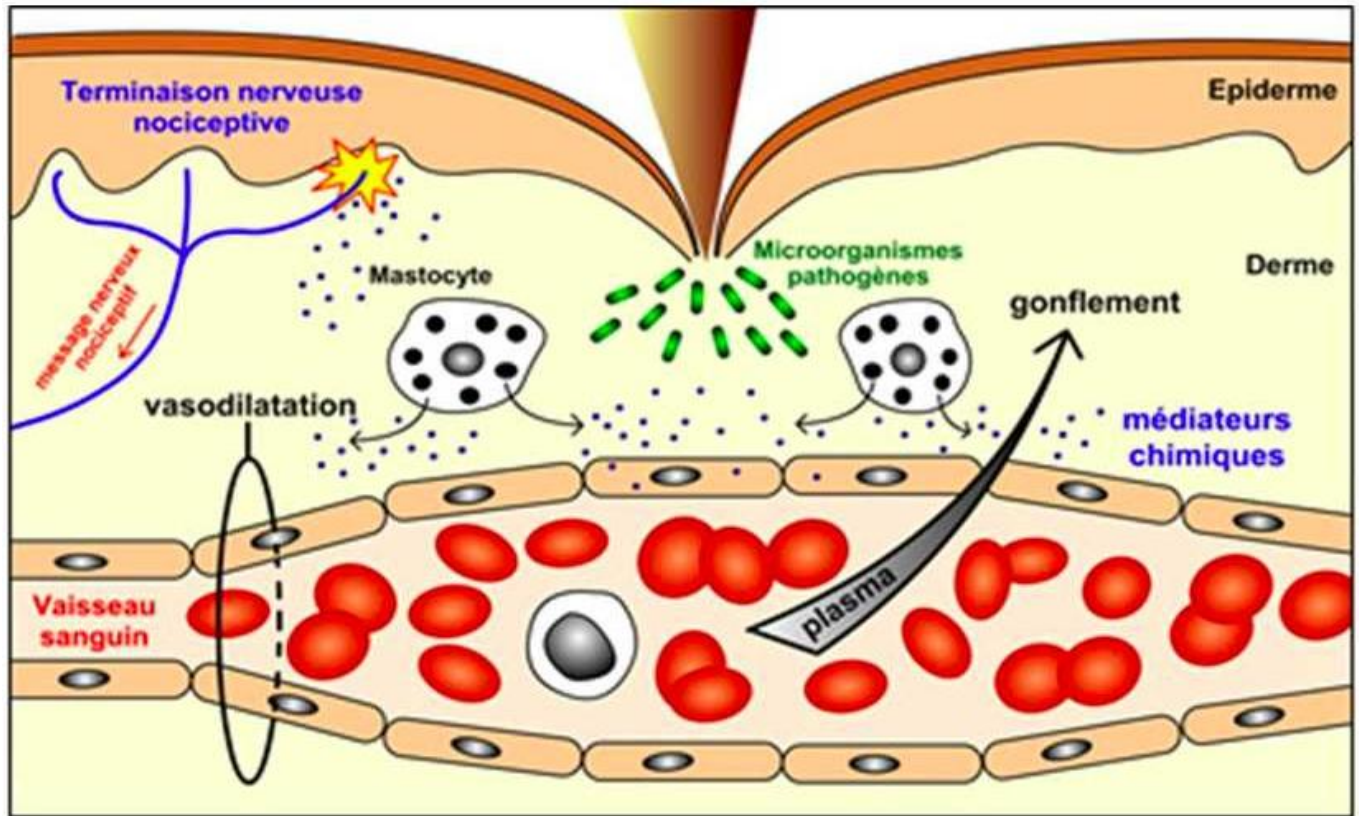
Les réponses immunitaires non spécifiques

I/ L'inflammation = التهاب

1/ Symptômes de l'inflammation (voir schéma dans la page suivante)

L'inflammation apparait suite à une infection, elle se manifeste toujours par les mêmes symptômes :

- * Une rougeur dû à une vasodilatation locale (=dilatation des vaisseaux sanguins تمدد العروق الدموية).
- * Une chaleur : augmentation de la température.
- * Un gonflement (œdème), due à un passage du plasma sanguin (exsudation) vers le site de l'infection ou de la lésion, ce passage est facilité par la vasodilatation.
- * Des douleurs, dues à la stimulation nerfs sensitifs par les prostaglandines ou par des signaux de danger libérés par les tissus lésés.
- * Une attraction انجذاب des cellules immunitaires, et notamment les granulocytes basophiles et les macrophages vers le site de l'infection.



▲ Schéma des symptômes d'une réaction inflammatoire

2/ Les causes de l'inflammation : les médiateurs chimiques de l'inflammation

- ★ Les tissus susceptibles de laisser entrer les antigènes comme la peau et les muqueuses, contiennent beaucoup de cellules dendritiques et de mastocytes, de macrophages, qui jouent le rôle de cellules sentinelles (des gardiens حارسة).
- ★ Lorsque les antigènes pénètrent dans ces tissus, ils activent les cellule sentinelles
- ★ Les cellules sentinelles activées secrètent dans le tissu des **médiateurs chimiques de l'inflammation**. وسائط التهاب كيميائية.
- ★ Parmi ces médiateurs on peut citer :

Médiateur chimique	Cellules sécrétrices et caractéristiques	Rôle
L'histamine	secrété par les mastocytes, les granulocytes basophiles et les plaquettes sanguines	- Vasodilatation → augmentation de la perméabilité des parois des vaisseaux sanguins → symptômes de l'inflammation
La prostaglandine		
Le système kinine	Protéines plasmatiques activées par l'antigène.	- Attraction des granulocytes vers le lieu infecté

Le système du complément

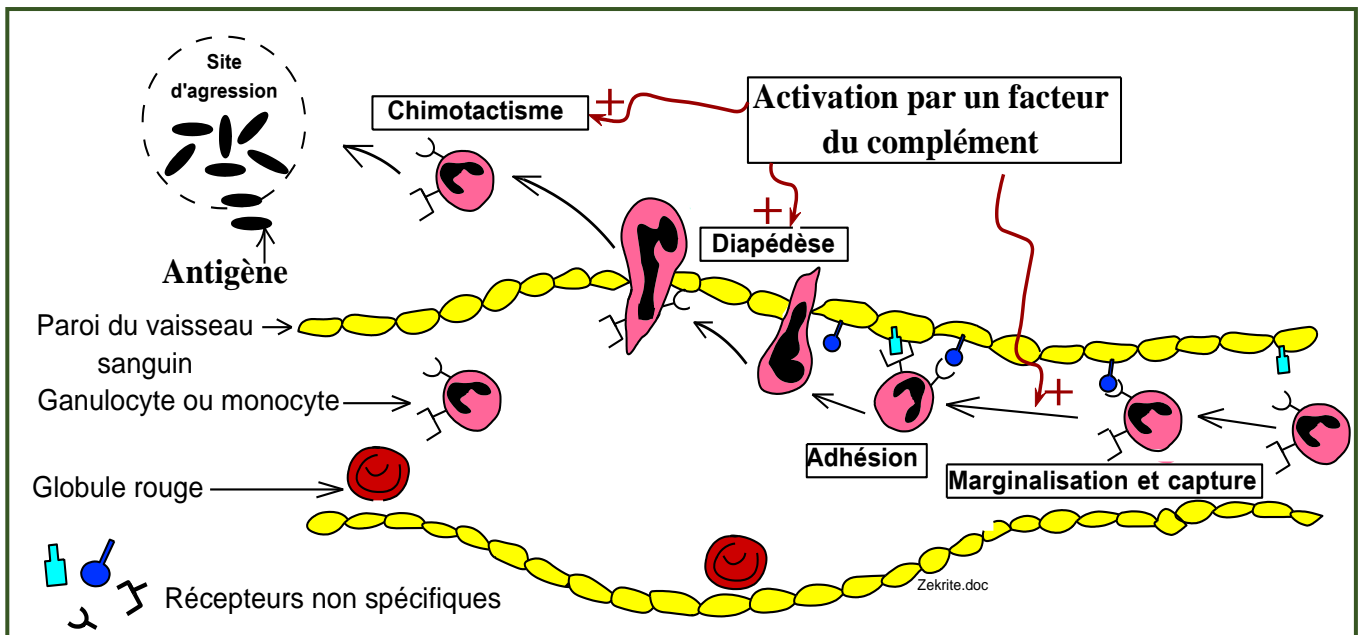
Une vingtaine de protéines plasmatiques synthétisées par divers cellules et surtout celles du foie, ces protéines s'activent par l'antigène.

* Formation du complexe d'attaque membranaire (CAM) : une sorte de pores construits sur la membrane cytoplasmique des cellule cibles ce qui entraîne leur lyse انحلال par entrée massive d'eau, c'est ce qu'on appelle **une action cytolitique**.

* L'attraction انجذاب des granulocytes (diapédèse et chimiotactisme) vers le site de l'agression.

* Facilitation de la phagocytose par **opsonisation** (par recouvrement) : Des éléments du facteur du complément se fixent sur la surface de l'antigène, ce qui facilite la phagocytose de l'antigène.

II/ La diapédèse الانسلاخ et le chimiotactisme



▲ Diapédèse et chimiotactisme des leucocytes

❁ La diapédèse est le mécanisme par lequel un leucocyte s'insinue ينسل entre les cellules de la paroi d'un capillaire sanguin شريان en réponse à des signaux chimiques inflammatoires pour passer vers différents tissus cibles.

❁ La diapédèse intéresse d'abord les granulocytes (pendant les 6 à 24 premières heures), puis un peu plus tard les monocytes et les lymphocytes.

❁ La diapédèse se déroule en plusieurs étapes :

- Marginalisation التهميش : les leucocytes s'approchent des parois internes des vaisseaux sanguins, ce rapprochement est facilité par le ralentissement du courant circulatoire provoqué par la vasodilatation.

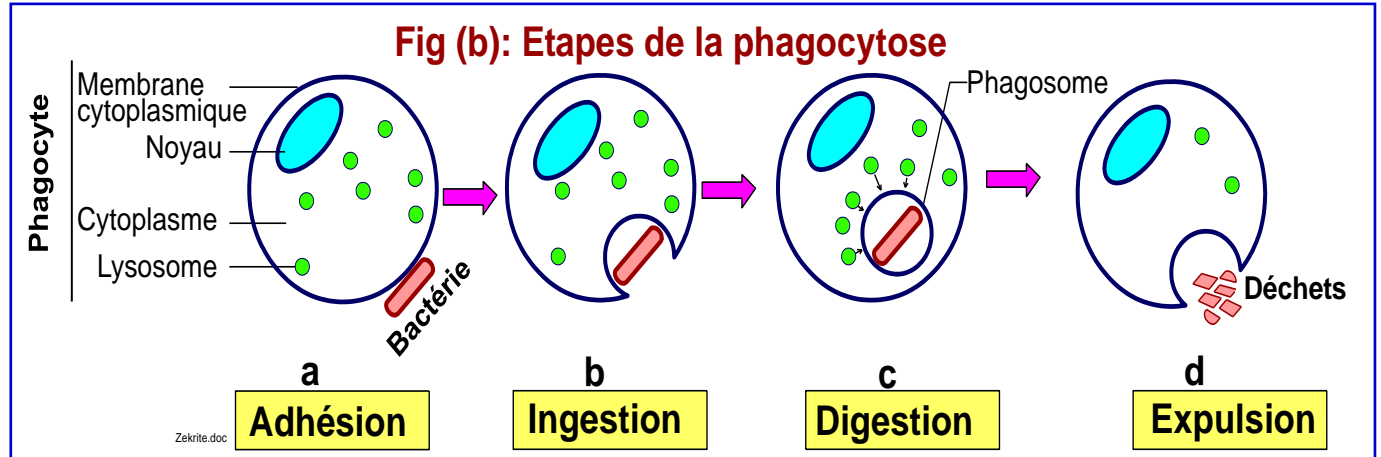
- Adhésion (fixation) : les leucocytes s'attachent aux cellules de la paroi des vaisseaux sanguins.

- Passage des leucocytes, à travers les cellules de la paroi des vaisseaux sanguins. Les leucocytes émettent des prolongements cytoplasmiques appelés pseudopodes أرجل كاذبة qui s'insinuent entre les jonctions intercellulaires des cellules de la paroi des vaisseaux sanguins, puis quittent la circulation sanguine.

III/ La phagocytose البلعمة

★ La phagocytose est un phénomène cellulaire par lequel certaines cellules appelées **phagocytes**, peuvent ingérer et détruire un antigène (des particules, des cellules étrangères ou modifiés ...).

★ Les phagocytes spécialisés sont **les granulocytes neutrophiles et les macrophages, et les cellules dendritiques**.

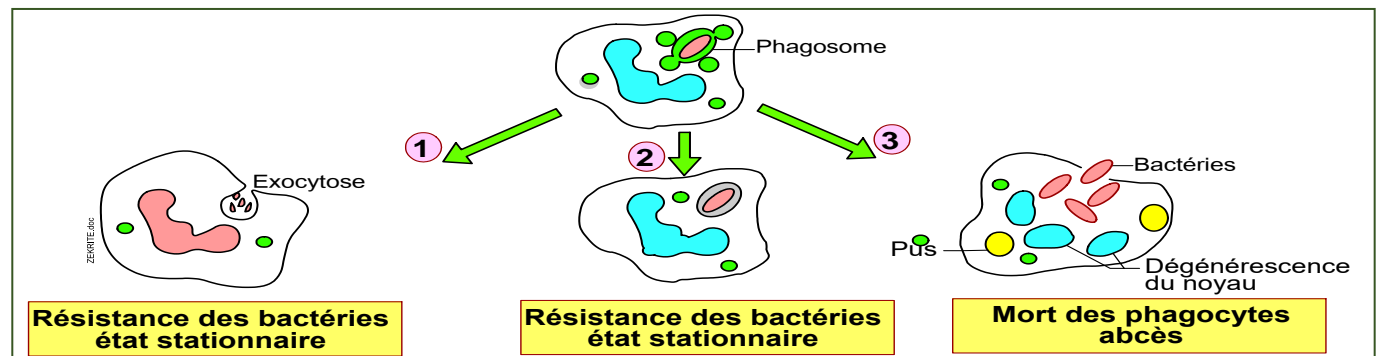


★ La phagocytose se déroule dans les étapes suivantes :

- **L'adhésion (fixation)** : le phagocyte, par des récepteurs non spécifiques adhère à un antigène.
- **Ingestion = endocytose** الابتلاع: le phagocyte envoie des prolongements cytoplasmiques appelés **pseudopodes** كأرجل كاذبة et entoure le corps étranger, puis il l'enveloppe dans une vésicule de phagocytose appelé phagosome.
- **Digestion** الهضم : une fois entrée dans le cytoplasme du phagocyte, la vésicule de phagocytose emprisonnant l'antigène, fusionne avec des lysosomes (vésicules remplies d'enzymes lytiques), ce qui entraîne la digestion (la lyse) du corps étranger.
- **Rejet = exocytose** طرح الحطام des résidus de l'antigène et régression de l'infection.

Remarque : Dans la plupart des cas, la phagocytose se termine avec succès en éliminant le corps étranger (cas 1 du schéma du doc ci dessous), mais elle peut échouer pour plusieurs raisons comme :

- La résistance des bactéries qui restent en vie dans le phagosome, elles pourront reprendre leur division (cas 2 du doc 4).
- Formation d'un abcès (poche pleine de pus قيج), ou diffusion de l'infection en attaquant d'autres tissus (cas 3 du doc 4). Le pus est un mélange de phagocytes morts et d'antigènes



▲ Evolution de la phagocytose

Bilan de la réponse immunitaire non spécifique :

* La réponse inflammatoire semble être un phénomène nécessaire à l'organisme, car les médiateurs inflammatoires tels que le système de kinine, l'histamine et les prostaglandines provoquent :

♦ Une vasodilatation, il en résulte une diminution du débit sanguin local, ce qui facilite le phénomène de marginalisation et la diapédèse, ainsi, les phagocytes quittent la circulation sanguine pour participer au phénomène de phagocytose.

♦ L'augmentation de la perméabilité capillaire ; cela permet à certaines protéines plasmatiques comme le facteur du complément d'arriver au site de l'inflammation. Ce facteur contribue dans la formation du complexe d'attaque membranaire, facilite l'attraction des phagocytes pour atteindre le site d'infection et participer dans le phénomène de phagocytose.

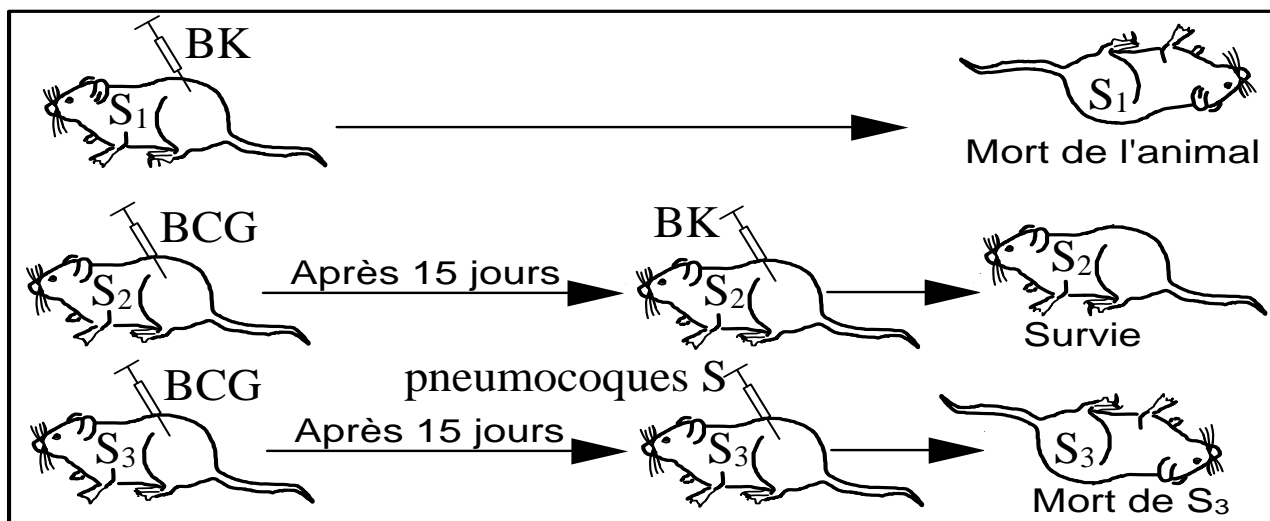
* La phagocytose est l'événement principal lors de la réponse non spécifique, car les phénomènes qui l'accompagnent ne visent qu'à fournir les conditions favorables à l'exercice de cette fonction.

La réponse immunitaire adaptative ou spécifiques ou acquise

I/ La réponse adaptative est spécifique et acquise :

Document 1 :

* Les bactéries nommées **bacille de koch (BK)** provoquent la tuberculose, ils sont mortelles. On peut obtenir une forme non virulente de BK de la vache, cette souche de bactérie est appelée **Bacille de Calmette et Guérin (BCG)**, cause une tuberculose légère. On injecte ces bactéries à des souris saines dans les conditions représentées dans le document suivant.



Expérience 1 : la souris témoin (S1) meurt après son injection par BK : on conclut que BK est mortel pour la souris et que la réponse immunitaire contre cet antigène n'est pas naturelle.

Expérience 2 : La souris S2 reste vivante après son injection par BK: le BCG a immunisé la

souris contre le bacille de Koch. On conclut de cette expérience que la réponse contre BK est **une réponse immunitaire acquise** **مناعة مكتسبة**, en effet, l'animal acquiert cette immunité après avoir rencontré l'antigène.

Expérience 3: La souris immunisée contre BK meurt après son injection par les pneumocoques S : Le BCG n'a pas immunisé la souris contre les pneumocoques S.

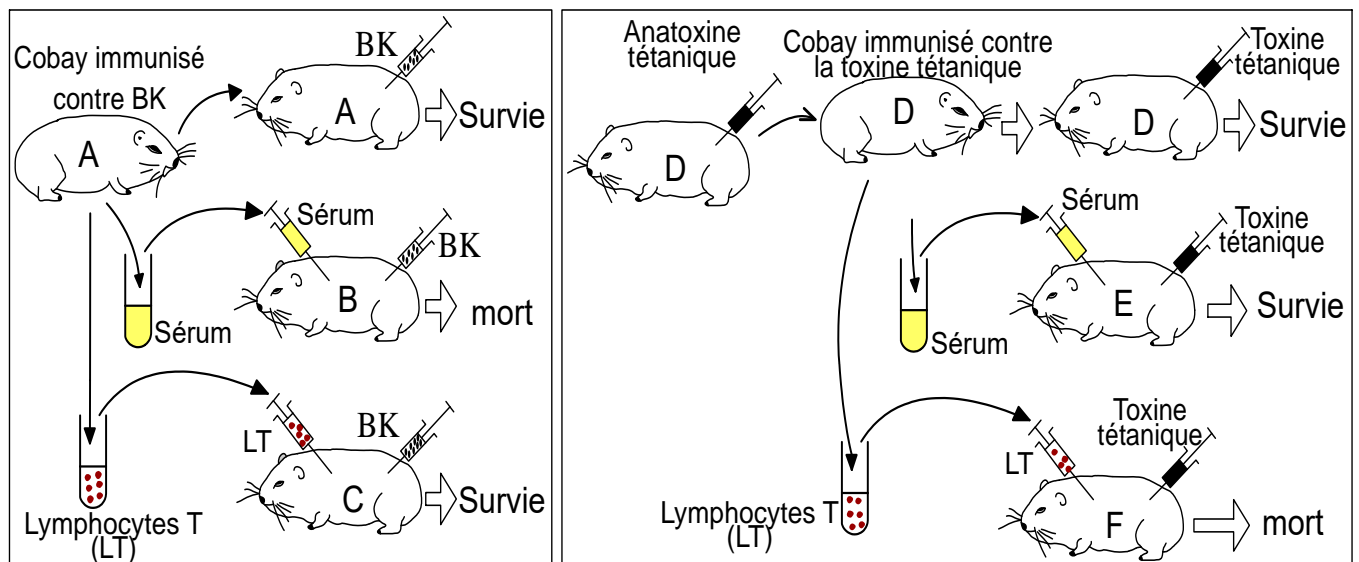
On conclut de cette expérience que la réponse contre BK est une **réponse immunitaire spécifique** **مناعة نوعية**, elle est dirigée contre un antigène précis.

II/ la réponse immunitaire adaptative se fait par deux voie : voie cellulaire et voie humorale

Document 2 :

* Le bacille tétanique et le bacille diphtérique **عصيات الكزاز والديفتيريا** sont morbides à cause des substances appelées : **toxines** **السمينات** qu'elles secrètent dans le milieu intérieur. Sous l'effet de certains facteurs comme la température et le formol, ces toxines perdent leur pouvoir virulent sans perdre leur capacité de déclencher une réponse immunitaire spécifique, ces toxines atténuées sont appelées **anatoxines** **الذوفان**

* Le document suivant résume les résultats d'expériences réalisées sur des cobayes:



Sérothérapie : Injection de sérum riche en anticorps spécifiques à l'antigène agresseur.

La réponse adaptative (spécifique et acquise) se réalise par deux voie :

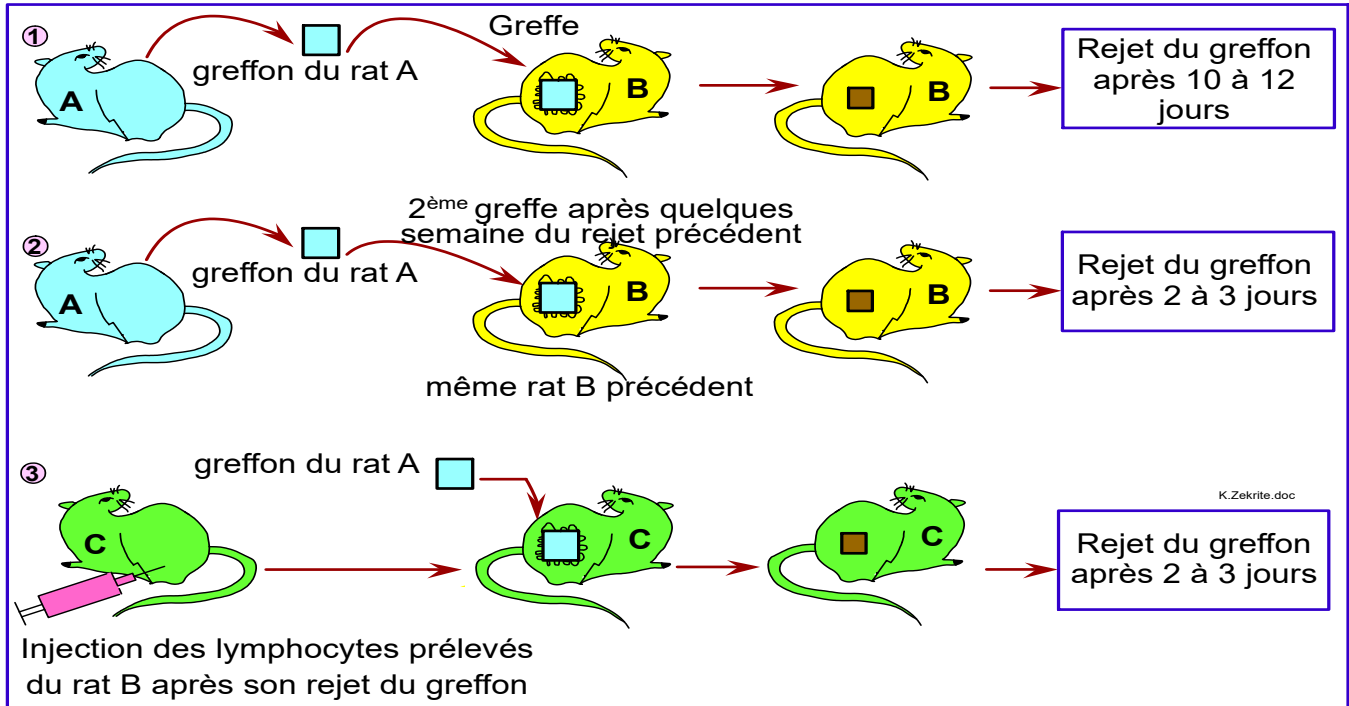
* **Une voie cellulaire** faisant intervenir les lymphocytes T : exemple la réponse contre BK (le cobaye C, non immunisé contre BK a échappé à la mort grâce au LT qui lui ont été transmise à partir de l'animal A immunisé contre cet antigène).

* **Une voie humorale** grâce à des substances véhiculées par le sérum appelées anticorps **مضادات الأجسام** (le cobaye E, non immunisé contre la toxine tétanique a échappé à la mort grâce au sérum qui lui a été transmis à partir de l'animal D immunisé contre cet antigène).

III/ La réponse immunitaire adaptative se caractérise par une mémoire

Document 1 : Mémoire immunitaire de l'immunité à voie cellulaire

On propose les expériences suivantes réalisées sur des rats A, B et C. Les rats B et C sont de la même lignée (ont des CMH identiques) alors que le rat A appartient à une souche différente à celle de B et C.



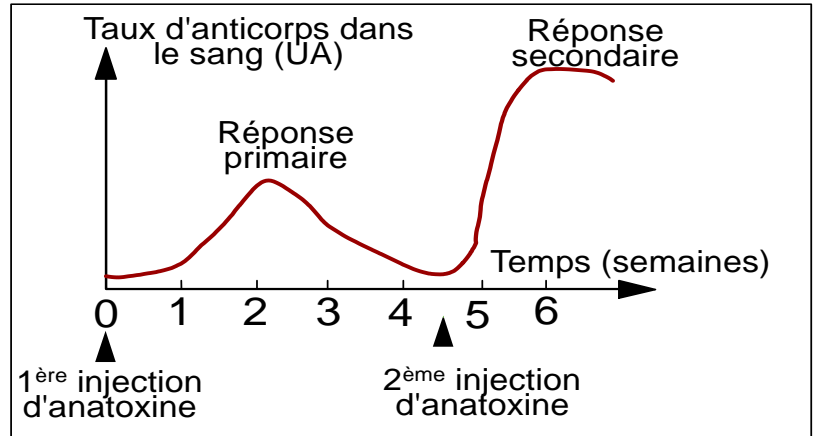
Expérience 1 : L'allogreffe cutanée du rat A au rat B a été rejetée, il s'agit d'une réponse immunitaire, en effet les cellules immunitaires du rat B reconnaissent le greffon issu du rat A comme élément du non soi puisque son CMH est différent et elles le détruisent. Le mécanisme de reconnaissance et d'exécution du rejet de l'antigène demande une durée relativement longue (12 jours).

Expérience 2 : La durée du rejet lors de la 2^{ème} greffe (réponse secondaire) est plus courte que la durée du rejet lors de la première greffe (réponse primaire), on conclut que le système immunitaire conserve en mémoire le premier contact avec l'antigène (il n'oublie pas ce contact), on parle d'une **mémoire immunitaire**. ذاكرة مناعية.

Expérience 3 : Les lymphocytes du rat C sont devenus capables de reconnaître directement l'antigène (greffon du rat A donneur) qu'ils ont déjà reconnu auparavant, on conclut que la réponse et la mémoire contre les cellules du greffon est une immunité adaptative à voie cellulaire.

Document 2 : Mémoire immunitaire de l'immunité à voie humorale

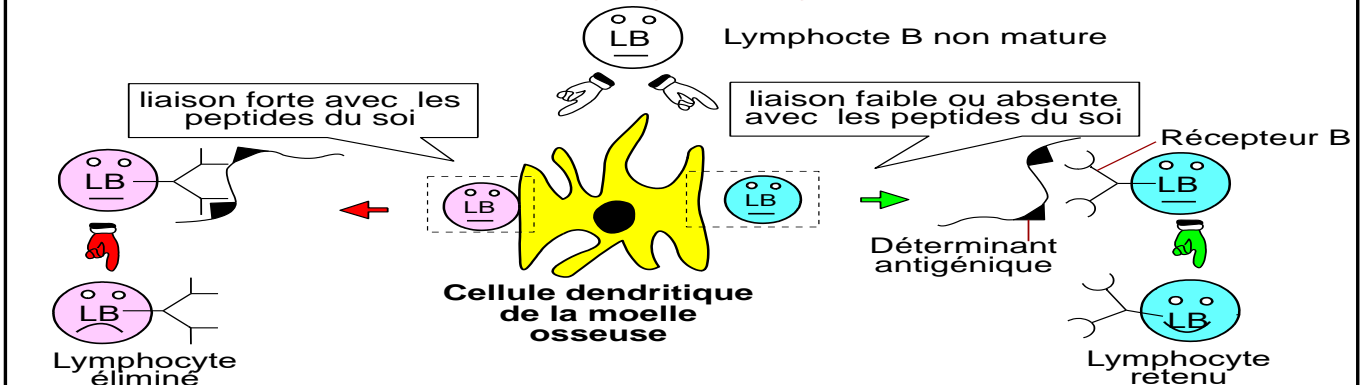
On injecte deux fois un cheval par des petites doses d'anatoxine tétanique, puis on prélève régulièrement son sang pour évaluer la concentration des anticorps antitétaniques; Le graphique ci-contre représente les résultats obtenus.



- * La réponse immunitaire humorale secondaire est immédiate (très rapide) et plus forte que la réponse primaire. On conclut que la réponse à voie humorale est aussi caractérisée par **une mémoire immunitaire**.
- * On conclut des expériences précédentes que les cellules de l'immunité adaptative (LT et LB) sont dotées d'une mémoire immunitaire faisant de la réponse immunitaire secondaire une réponse plus rapide et plus efficace.
- * La propriété de la mémoire immunitaire est exploitée médicalement pour aider le système immunitaire à faire face aux antigènes pathogènes, en effet, **le principe de la vaccination est basé sur la mémoire immunitaire**.

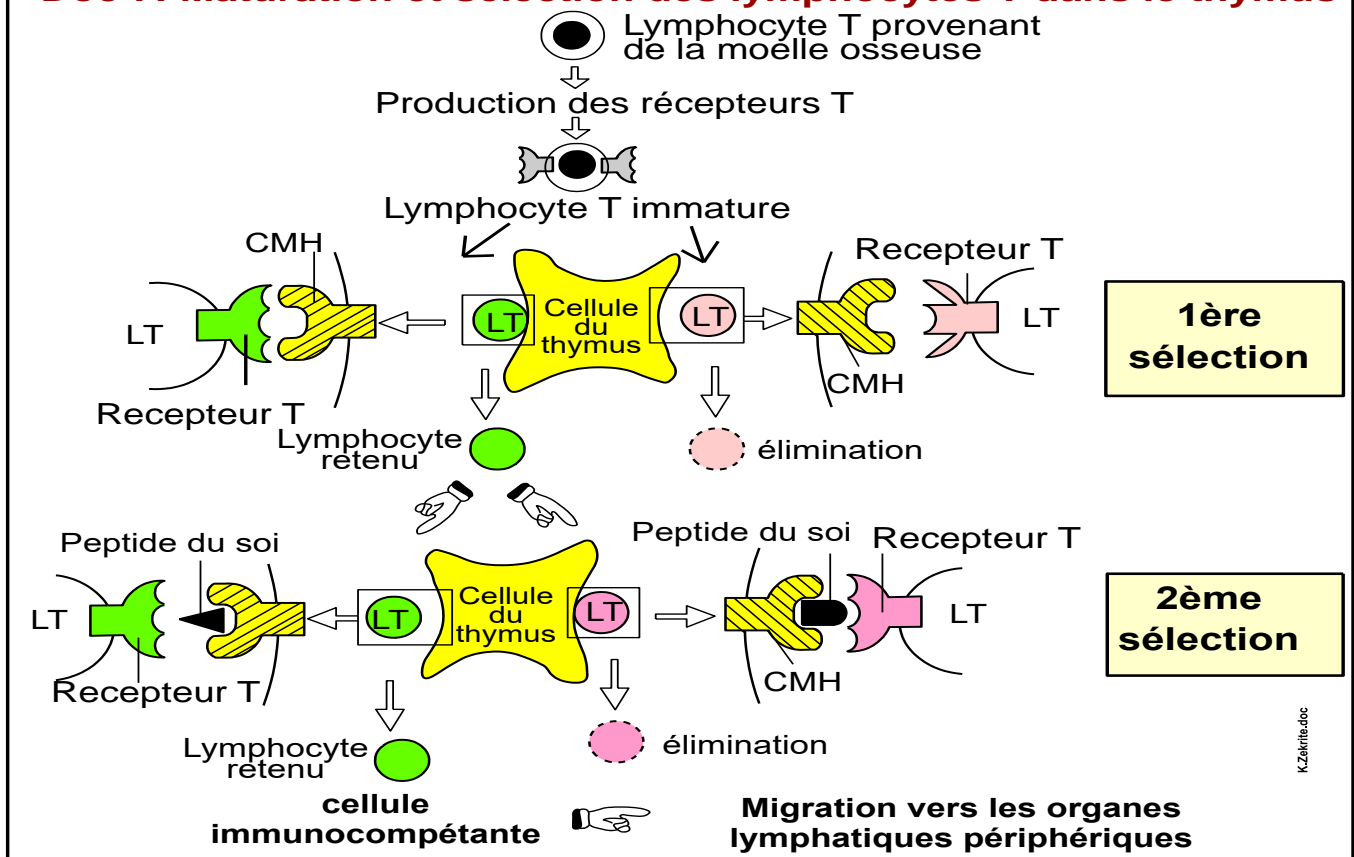
V/ Immunocompétence ou maturation des lymphocytes B et T.

Doc 6: Maturation et sélection des lymphocytes B dans la moelle osseuse



- * Dans la moelle osseuse rouge, les lymphocytes B subissent une sélection négative qui consiste à éliminer ceux dont les récepteurs se fixent fortement avec les peptides du soi présentés par les cellules dendritiques de la moelle osseuse, alors que les LB qui ne se fixent pas fortement avec les peptides du soi sont retenus. Les lymphocytes retenus sont qualifiés de **lymphocytes B immunocompétents** خلايا ذات كفاءة مناعية. Ils migrent vers les organes lymphoïdes périphériques où ils s'accumulent.

Doc 7: Maturation et sélection des lymphocytes T dans le thymus



* Les lymphocytes T acquièrent leur immunocompétence au niveau du thymus. En effet après la production des récepteurs membranaires des lymphocytes T, ces derniers subissent :

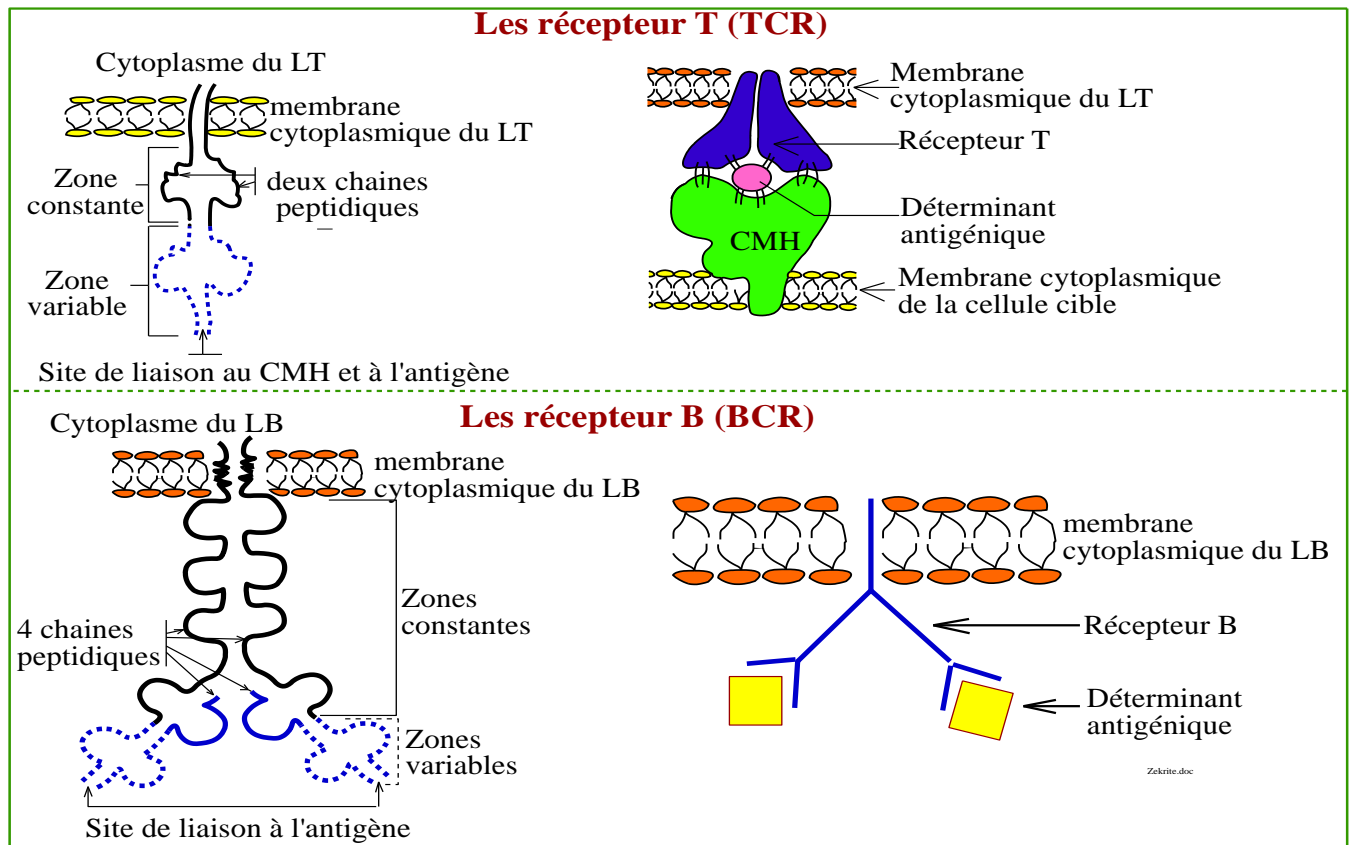
★ Une première sélection, dans la partie corticale du thymus, elle consiste à leur présenter les molécules du CMH du soi par les cellules thymoïdes, ainsi :

- Les lymphocytes T qui se lient spécifiquement au CMH II ne produisent que les molécules CD4 et constitueront les lymphocytes T4.
- Les lymphocytes T qui se lient spécifiquement au CMH I ne produisent que les molécules CD8 constitueront les lymphocytes T8.
- Les lymphocytes qui ne montrent aucune affinité au CMH du soi seront détruits.

★ Une deuxième sélection : dans zone médullaire du thymus, les lymphocytes T possédants des récepteurs T capables de reconnaître le soi présenté par les molécules de CMH sont éliminés, les autres sont conservés et seront considérés des LT immunocompétents. Ils migrent vers les organes lymphoïdes périphériques où ils se stockent.

IV/ Les récepteurs des lymphocytes B et T

★ Les lymphocytes portent sur leur membrane plasmique des récepteurs responsables de la reconnaissance spécifique d'un antigène étranger : voir fig ci-dessous.



★ Les récepteurs T sont des molécules protéiques formées de deux chaînes peptidiques α et β .

★ Les récepteurs B (ce sont des types d'anticorps) sont des molécules protéiques formées de 4 chaînes peptidiques.

★ Chacune des chaînes des récepteurs B et T possède :

- Une partie constante (C) semblable chez toutes les cellules T ou B de l'organisme.
- Une partie variable (V) qui diffère d'un clone de lymphocytes à une autre.

★ Les récepteurs T présentant deux sites de fixation situés au niveau de la partie variable:

- ◆ Un site de fixation du déterminant antigénique.
- ◆ Un site de fixation du CMH de la cellule présentatrice du déterminant antigénique.

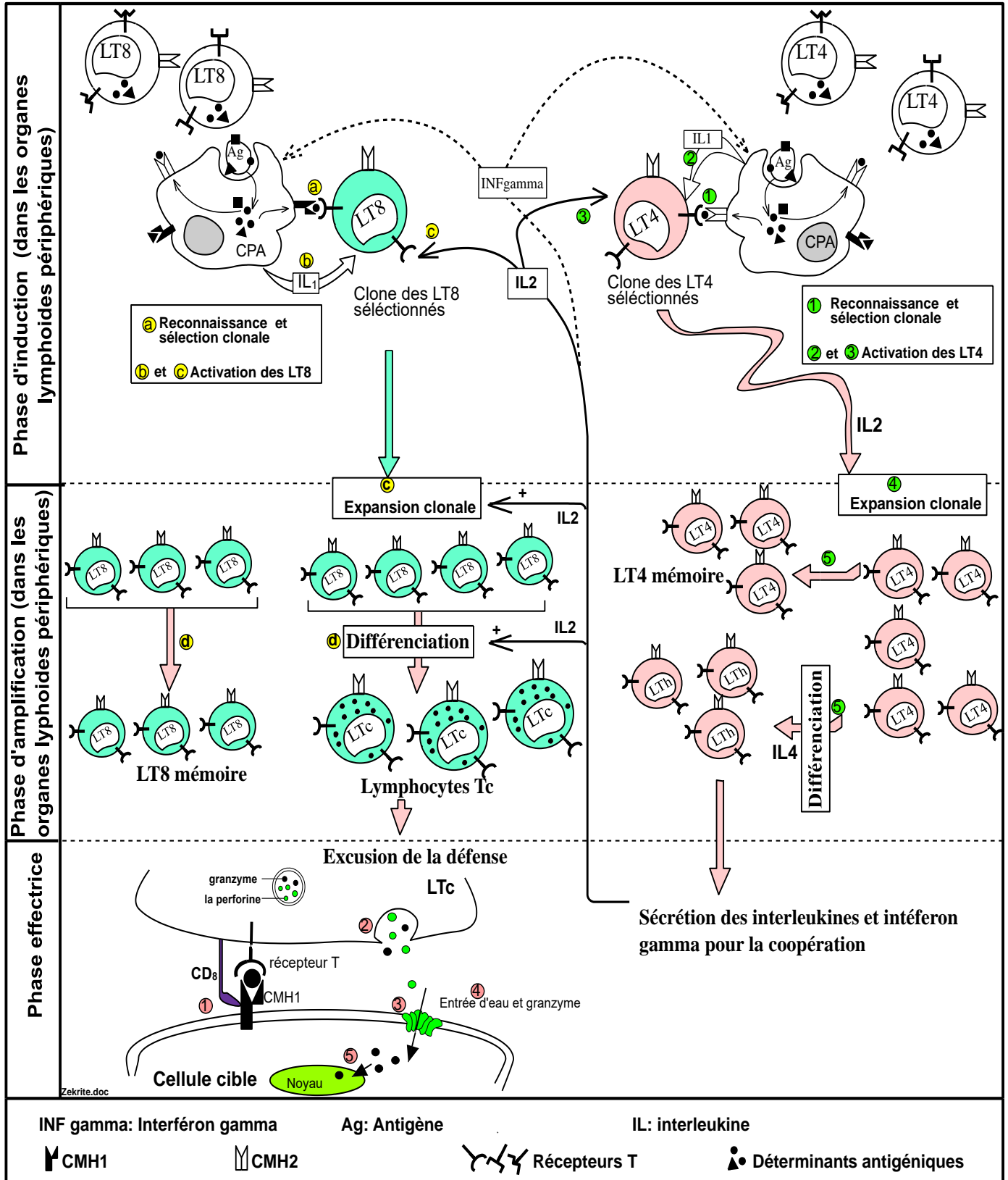
De ce fait, les cellule T ne reconnaissent un antigène que s'il est présenté par le CMH ; on parle d'une double reconnaissance.

★ Au niveau de la partie variable, les récepteurs B présentent un site de fixation spécifique au déterminant antigénique. Ainsi les lymphocytes B reconnaissent et se fixent directement sur l'antigène sans intermédiaire du CMH.

Clone de lymphocytes : désigne l'ensemble des lymphocytes qui ont des récepteurs semblables. On note une grande diversité des clones, en effet chez l'Homme on dénombre plus de 10^8 clones de lymphocytes T et plus de 10^{12} clones de lymphocytes B.

Etapes de la réponse immunitaire adaptative à voie cellulaire

➤ Schéma explicatif des étapes de la réponse à médiation cellulaire



Les interleukines et les interférons sont des cytokines de différents types, ce sont des petites protéines qui agissent à distance sur d'autres cellules pour réguler leur activité et fonction.

La réponse adaptative à médiation cellulaire se déroule dans les phases suivantes.

● **Phase d'induction** مرحلة التحسيس:

- Lorsque l'antigène pénètre dans les tissus, il est phagocyté par les cellules présentatrices de l'antigène (CPA) qui peuvent être des macrophages ou des cellules dendritiques.
- Ces cellules exposent à leur surface, les déterminants antigéniques de l'antigène fixés sur leurs protéines CMH (I et II) et se déplacent vers le ganglion lymphatique le plus proche de la zone d'infection.
- A cet endroit, se fait la reconnaissance des lymphocytes spécifiques aux déterminants antigéniques présentés par les CPA, en effet :
 - ♦ Les lymphocytes T8 se fixent aux épitopes présentés par le CMH I.
 - ♦ Les lymphocytes T4 se fixent aux épitopes présentés par le CMH II.
- Cette double liaison permet la sélection des lymphocytes spécifiques à l'antigène, on parle de sélection clonale.
- L'activation des lymphocytes T4 et T8 sélectionnés, nécessite :
 - ♦ Une coopération directe par contact physique entre la CPA et les LT8 et entre CPA et les LT4.
 - ♦ Une coopération indirecte par des interleukines (IL1 et IL2).
- L'IL1 est secrété par les CPA et active les LT4 et les LT8.
- L'IL2 est secrété par les LT4 activés, ce médiateur permet une auto activation des LT4 et une activation des LT8.

● **Phase d'amplification** مرحلة التضخم :

Cette phase est formée de deux étapes :

- **Etape de multiplication ou expansion clonale** : Durant cette étape, les lymphocytes T8 et T4 sélectionnés et activés se multiplient sous le contrôle de l'interleukine 2 qui provient des LT4 (plutôt LTh). Ils forment des clones (groupe de cellules identiques). Chaque clone provient de la prolifération d'un seul lymphocyte. On parle donc d'une expansion clonale.
 - **Etape de différenciation** مرحلة التفرق: Au cours de cette étape,
 - ♦ Les lymphocytes T8 se transforment en lymphocytes cytotoxique LTc. Contenant des vésicules golgiennes riches en particules protéiques appelées : **la perforine et granzymes**.
 - ♦ Les lymphocytes T4 se différencient en cellules auxiliaires (LTh = helper) capables de synthétiser les interleukines (2 et 4 et 5....) et les interférons gamma (IFN γ).
- Remarque** : l'interféron γ (IFN γ) secrété par les LTh stimule les macrophages et les LB, il donne aussi un signal aux différents cellules pour qu'elles résistent aux virus.

● **Phase effectrice** مرحلة التنفيذ: Pendant cette phase

- ♦ Les lymphocytes cytotoxiques (LTc) quittent les ganglions lymphatiques et se répartissent dans tout l'organisme à la recherche des cellules cibles présentant les épitopes de l'antigène grâce à leur CMH I.
- ♦ Suite à la double reconnaissance du lymphocyte Tc et des cellules cibles (récepteur T – CMH I et récepteur T – épitope), les lymphocytes cytotoxiques libèrent la perforine et le granzyme (enzyme).

♦ En présence du calcium, les particules de perforine se fixent sur la membrane cytoplasmique de la cellule cible et y provoquent des pores.

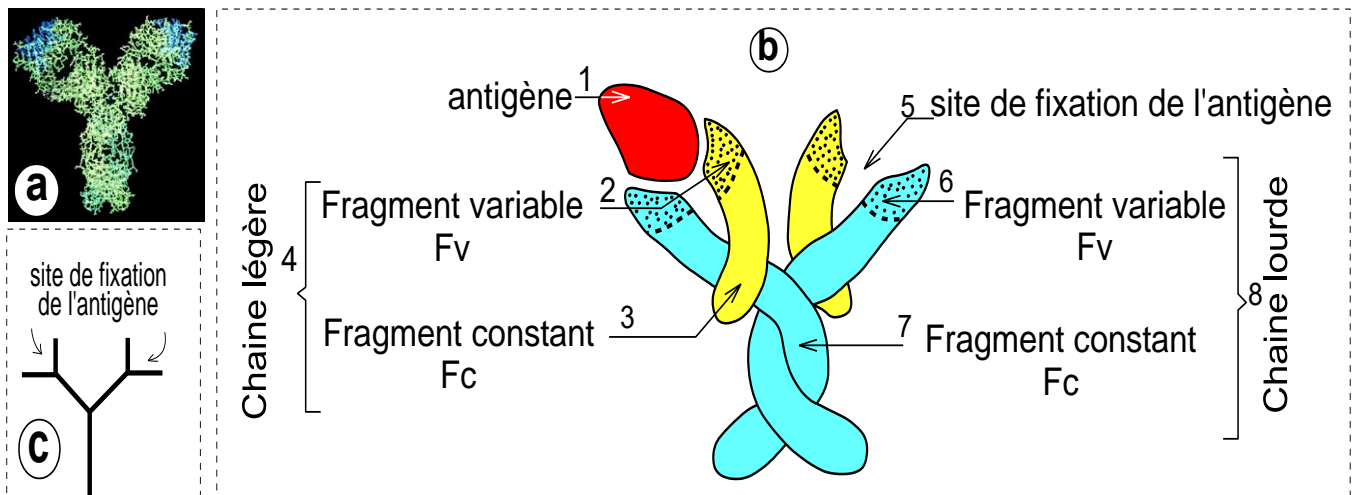
♦ A travers ces pores, il y'a entrée massive d'eau, ce qui éclate la cellule, d'autre part, le granzyme entre dans la cellule cible à travers ces pores et active des enzymes ADN^{ases} qui détruisent l'ADN de la cellule et induisent sa mort. Ce phénomène est appelé **cytotoxicité ou apoptose** السمية الخلوية .

La réponse immunitaire adaptative à voie humorale

La réponse immunitaire à médiation humorale est une réponse acquise dont les effecteurs sont les anticorps véhiculés par le plasma et qui déclenchent une attaque contre l'antigène qui a provoqué leur synthèse.

I/ Nature et structure des anticorps

★ Les anticorps sont des protéines plasmatiques de type **γ globulines**, on les appelle pour cette raison **immunoglobulines**, on les symbolise par **Ig**.



▲ Structure moléculaire de l'anticorps

★ Chaque anticorps comprend :

- Deux chaînes peptidiques identiques légères désignées chaînes L (light)
- Deux chaînes peptidiques identiques lourdes désignées par chaînes H (Heavy)

★ Ces quatre chaînes sont liées entre elles par des liaisons chimiques et présentent une structure tordue ملتوية en forme de « Y ».

★ Chacune des quatre chaînes de l'anticorps comporte 2 zones :

- Une zone constante (C) semblable chez tous les anticorps du même type.
- Une zone variable (V) différente d'un anticorps à l'autre. Cette zone comporte le site de fixation de l'antigène, elle définit donc la spécificité de l'anticorps envers son antigène.

★ Chaque anticorps comporte **deux sites** de fixation de l'antigène.

★ La zone variable d'un anticorps détermine sa spécificité vis-à-vis du déterminant antigénique.

★ La zone constante d'un anticorps détermine la classe à laquelle il appartient. Ainsi, on distingue 5 classes d'anticorps : Ig G, Ig A, Ig M, Ig D et Ig E (voir fig au-dessous)

★ Les Immunoglobulines de type M (Ig M) sont les récepteurs membranaires des lymphocytes B.

Les différentes classes d'anticorps

Types d'anticorps	IgG	IgM	IgA	IgE	IgD
% par rapport au total des Ig	70 à 75%	10%	15 à 20%	Traces	Traces
Principales propriétés	Traversent le placenta	Ne traversent pas le placenta	- Se trouvent principalement dans les sécrétions. - Ils assurent une immunisation locale	- Se fixent sur les mastocytes. - Rôle dans l'allergie.	Fixées sur les LB mobiles
	- Ils sont libres ou fixes - Ils activent le facteur du complément et les macrophages				

II/ Qui synthétise les anticorps ?

Les plasmocytes sont les cellules productrices des anticorps.

La synthèse des anticorps nécessite :

- La différenciation des lymphocyte B en plasmocytes : cellules riches en organites favorisant la synthèse des protéines.
- Une collaboration تعاون entre les cellules immunitaires : lymphocyte B, lymphocytes T4 (auxiliaires) et les macrophages qui jouent le rôle de CPA.

Lymphocyte B

Différenciation

Plasmocyte

(x6500)

Anticorps

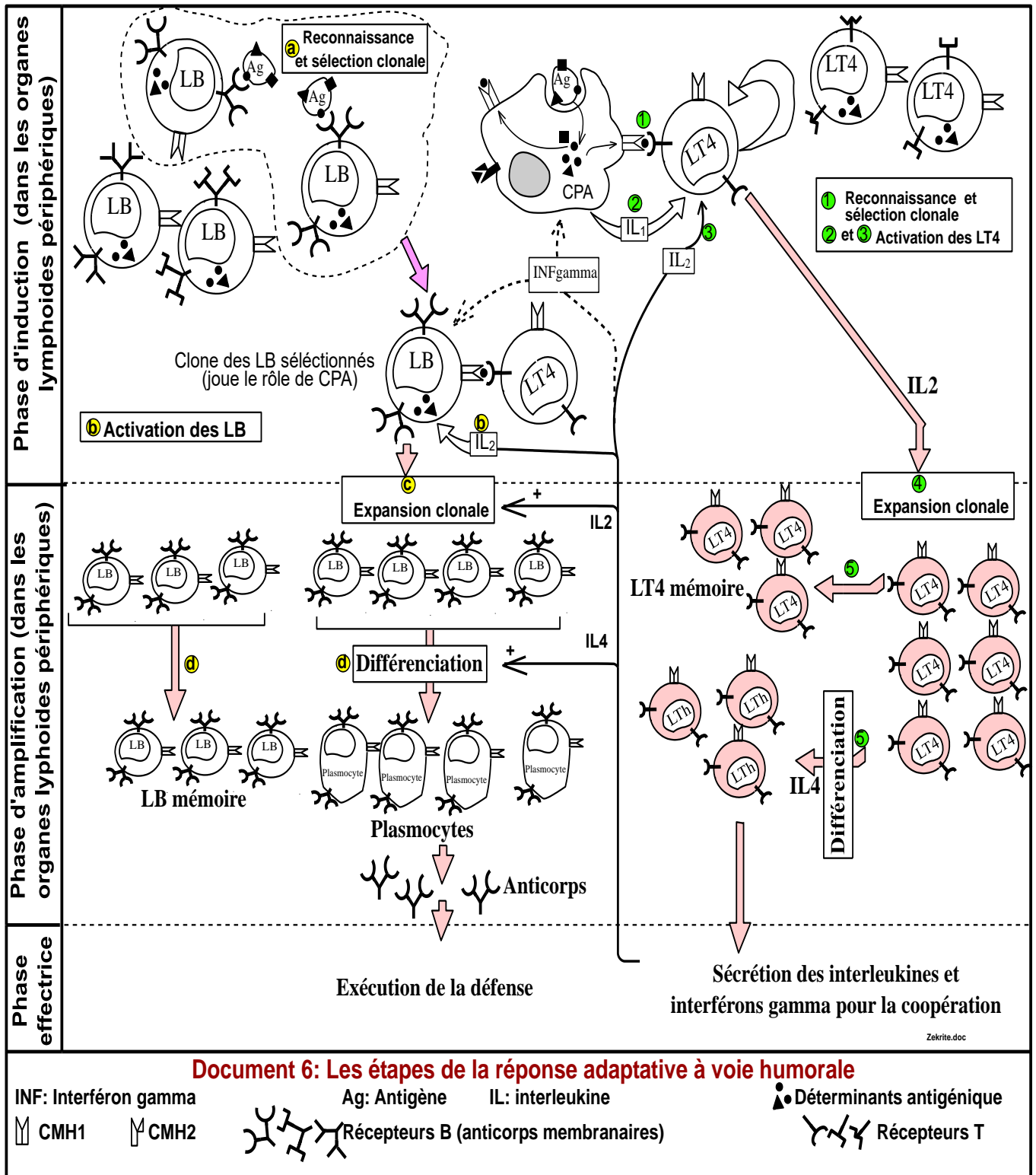
1 mitochondrie

2 réticulum endoplasmique rugueux

3 appareil de golgi

Différenciation des lymphocytes B en plasmocytes capables de produire les anticorps

III/ Les étapes de la réponse immunitaire adaptative à voie humorale



La réponse adaptative à médiation cellulaire se déroule dans les phases suivantes.

① Phase d'induction *مرحلة التحسيس:*

🌱 Lorsque l'antigène pénètre dans les tissus, il est phagocyté par les CPA. Ces cellules vont présenter les déterminants antigéniques par leurs CMH et se déplacent vers le ganglion lymphatique le plus proche de la zone d'infection. A cet endroit, les lymphocytes T4 spécifiques vont être sélectionné et activée de la même manière décrite dans les étapes de l'immunité cellulaire

❁ D'autre part, les lymphocytes B fixent et **reconnaissent directement** les déterminants antigéniques qui sont complémentaires à leurs récepteurs B, ce contact permet la sélection clonale des lymphocytes B spécifiques à l'antigène, ces derniers exposent des déterminants antigéniques par leurs molécules CMH (ils jouent alors le rôle de cellules CPA). Ces lymphocytes B présentatrices se lient avec les lymphocytes T4 déjà activés par le même antigène, ce contact physique ainsi que l'effet de l'interleukine 2 sont nécessaires pour déclencher l'activation des lymphocytes B sélectionnés au paravent.

② Phase d'amplification **مرحلة التضخم** :

Cette phase est formée de deux étapes :

- **Etape de la multiplication ou expansion clonale** : Durant cette étape, les lymphocytes B activés se multiplient sous l'effet des interleukines 2 pour former des clones (groupe de cellules identiques), les lymphocytes T4 subissent la même évolution. On parle donc d'une expansion clonale.

- **Etape de différenciation** **مرحلة التفرق**: Au cours de cette étape, les lymphocytes B se transforment en plasmocytes capables de produire les anticorps sous le contrôle de l'IL4. Les lymphocytes T4 se différencient en cellules auxiliaires (LTh = helper). Un certain nombre des cellules T4 et B ne se différencie pas et constitue ce qu'on appelle des cellules mémoires (voir plus loin cette notion).

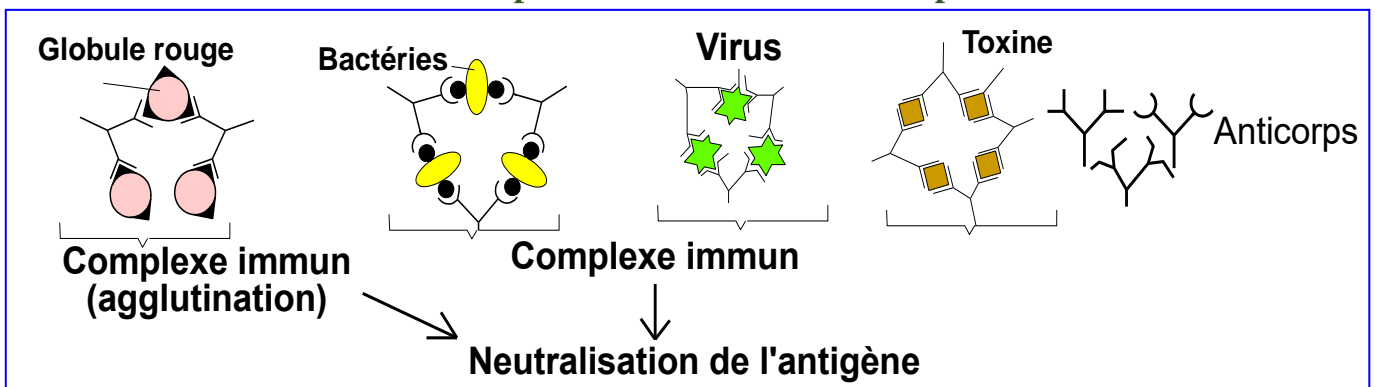
③ Phase effectrice **مرحلة التنفيذ**:

✦ Pendant cette phase les plasmocytes produisent les anticorps, ces derniers sont distribués par la lymphe et le sang sur tout le corps à la recherche des antigènes cibles présentant les épitopes qui ont induit cette réponse immunitaire.

✦ Les anticorps synthétisés favorisent la neutralisation de l'antigène par diverses manières :

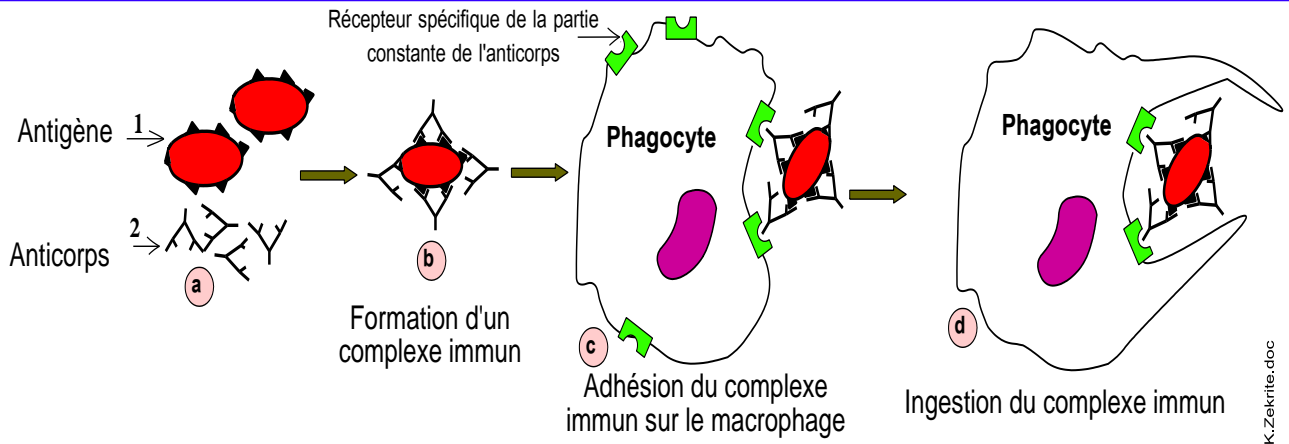
✦ La formation de **complexes immuns** : les anticorps se fixent sur les antigènes ce qui conduit à la neutralisation **إبطال مفعول** de l'effet de l'antigène, c'est-à-dire le rendre inactif (biologiquement inerte).

✓ Rôle des anticorps dans la formation du complexe immunitaire

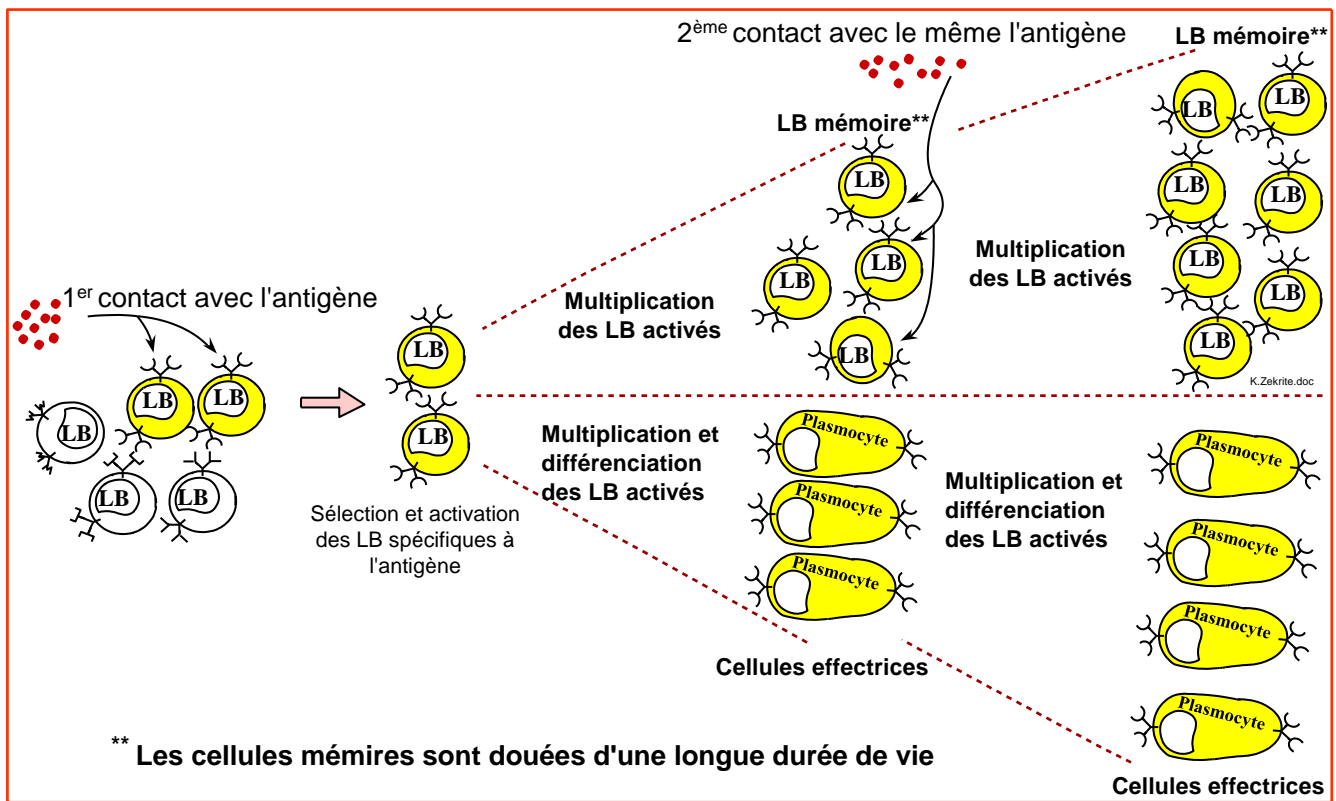


✦ Les complexes immuns ainsi formés activent le facteur du complément, celui-ci crée les complexes d'attaque membranaire à la surface des cellules cibles, ce qui provoque la lyse de ces cellules.

✦ Les complexes immuns ainsi formés favorisent **l'opsonisation** (recouvrement) de l'antigène, ce qui facilite la phagocytose de ces complexes par les phagocytes (fig ci-dessous).



Mécanisme de la mémoire immunitaire



- Lors de la phase d'amplification de la première réponse immunitaire, une partie des lymphocytes (qui ont déjà eu contact avec un antigène donné) ne se différencient pas et donnent des **lymphocytes mémoires** caractérisés par **une longue durée de vie**.
- Ainsi, se forme une réserve importante de cellules capables de reconnaître l'antigène déjà rencontré directement et rapidement après avoir franchi des barrières naturelles de l'organisme.
- De ce fait la réponse immunitaire secondaire est plus rapide et plus efficace. On signale que ce stock de cellules mémoire s'amplifie en fonction des contacts répétés avec le même antigène, une réponse immunitaire tertiaire est plus efficace que la réponse

secondaire.

Dysfonctionnements du système immunitaire

Le système immunitaire peut connaître des dérèglements de fonctionnement. Parmi ces dysfonctionnements on peut citer :

- ✿ L'allergie ou l'hypersensibilité :
- ✿ Le déficit immunitaire = immunodéficience : exemple le SIDA .

Les allergies

I/ Définitions :

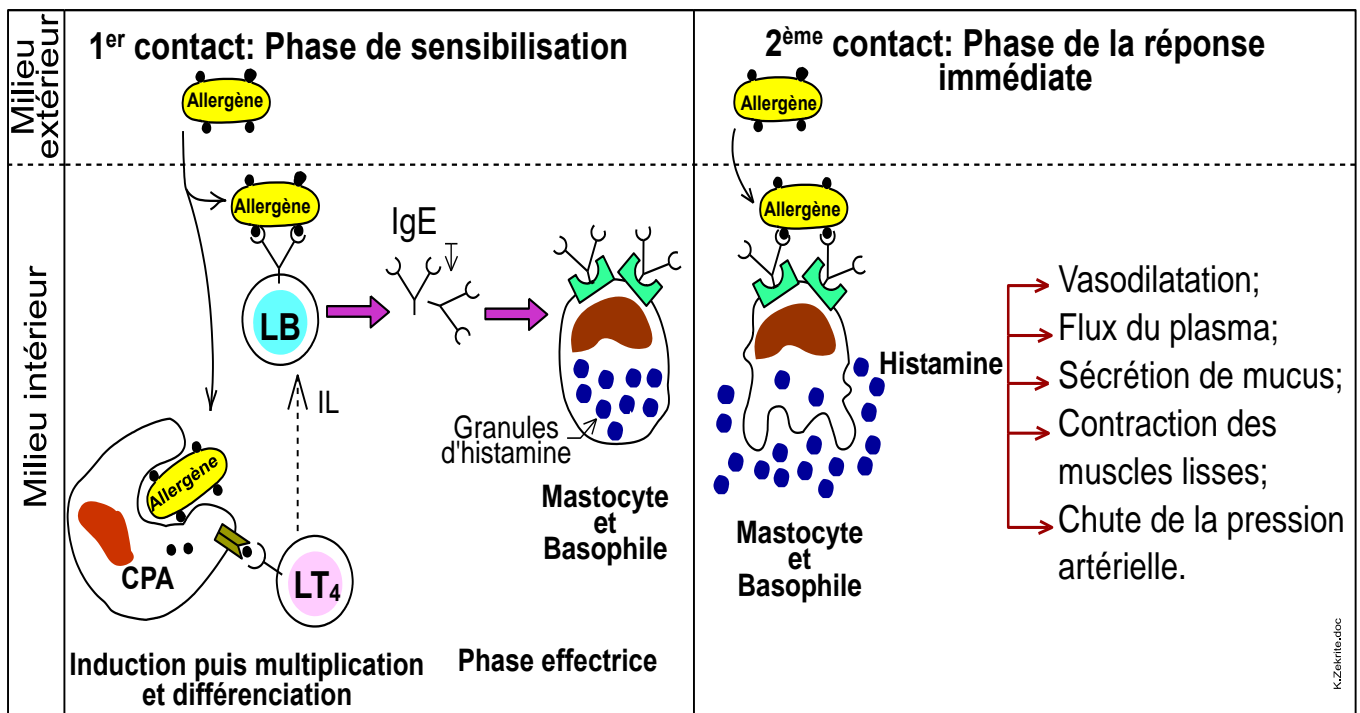
- ✿ L'allergie est une hypersensibilité c a d une réponse exagérée de l'organisme contre des substances, généralement non pathogènes appelées **allergènes**.
- ✿ L'allergie provoque des symptômes variés, mais la plus part ont en communs des caractéristiques de l'inflammation :
 - Gonflement, rougeur, démangeaison et douleurs au niveau des tissus qui sont en contact avec l'allergène.
 - Sécrétion de mucus par les tissus muqueux (écoulement nasal).
 - Eternuements عطس
 - Contraction des muscles lisses (des bronches, de l'estomac, des intestins...).
- ✿ On distingue plusieurs types de maladies allergiques : l'asthme, le rhume des foins (rhinite الزكام الأنفي الدائم), la conjonctivite, l'eczéma, l'urticaire, le choc anaphylactique...
- ✿ Un allergène est une substance capable de provoquer une réaction allergique chez un sujet préalablement sensibilisé lorsqu'il est à son contact (le plus souvent par contact avec la peau, inhalation استنشاق, ou ingestion). Les allergènes sont présents dans l'environnement (dans l'air, l'alimentation, les médicaments...) et ils sont variés : acariens, grains de pollen, poils des chats, venin d'insectes, produits chimiques, aliments (ex le gluten) ...
- ✿ Un choc anaphylactique : est une réaction allergique grave, immédiate et généralisée : il y a risque de mort si on n'intervient pas rapidement. Les causes peuvent être diverses : allergies alimentaires, médicamenteuses (pénicilline par ex), piqûres de guêpes, d'abeilles... Le choc anaphylactique présente plusieurs symptômes associés : urticaire (حكة شديدة), œdème, vomissements, baisse de la pression artérielle dans le cerveau, asphyxie اختناق.

II/ les effecteurs de la réaction allergique :

- Mastocytes et granulocytes basophiles.
- Histamine.
- Les anticorps de type IgE : le sérum des personnes allergiques contient des concentrations très élevées de IgE

III/ Les étapes de la réponse allergique

▼ Schéma résumant les étapes de la réponse allergique



La réaction allergique se déroule en 2 temps :

★ **Une phase de sensibilisation :** lors du 1^{er} contact avec l'allergène, les lymphocytes B reconnaissent l'allergène, s'activent, se multiplient et se différencient en plasmocytes qui sécrètent une grande quantité d'IgE spécifiques à l'allergène. Ces anticorps se fixent sur les mastocytes et les basophiles (granulocytes)

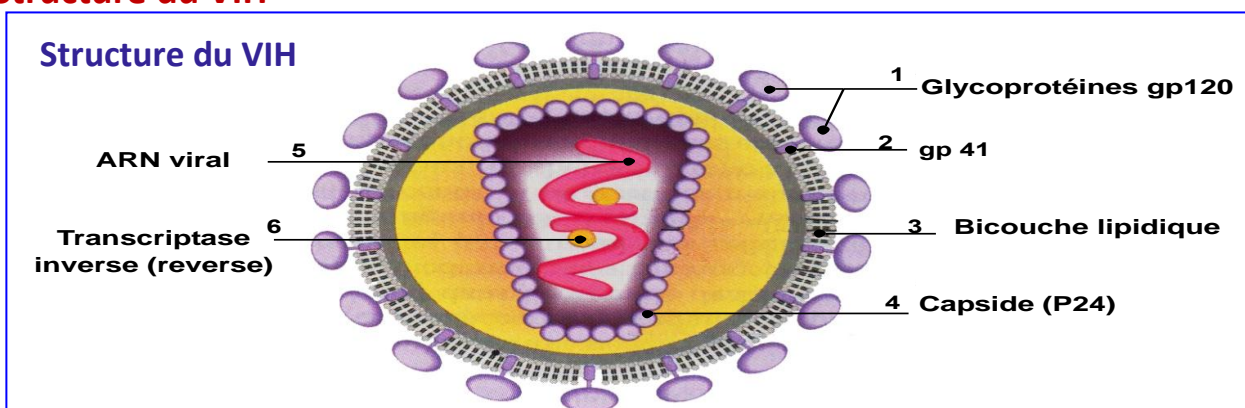
★ **Une phase de réaction allergique immédiate :** au cours d'un 2^{ème} contact avec le même allergène, celui-ci se fixe sur les IgE portés par les mastocytes et les basophiles, ce qui les active et ils sécrètent leurs médiateurs chimiques de l'inflammation comme l'histamine.

Remarque : Après quelques heures, on peut observer parfois la manifestation de ce qu'on appelle **une hypersensibilité retardée**.

Le syndrome d'immunodéficience acquise (SIDA)

Le SIDA est un effondrement grave du système immunitaire dû à une infection par le **Virus d'ImmunoDéficience Humaine (VIH)**

I/ Structure du VIH

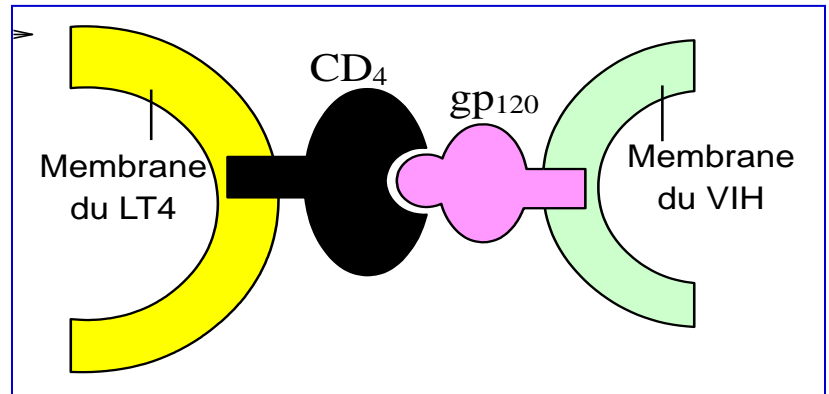


★ Le VIH est une très petite particule limitée par une enveloppe lipidique à laquelle sont fixées des protéines parmi lesquelles on trouve les glycoprotéines **gp 120**. Le VIH renferme une capside centrale contenant deux molécules d'ARN accompagnée chacune d'une molécule enzymatique : la transcriptase inverse (=reverse).

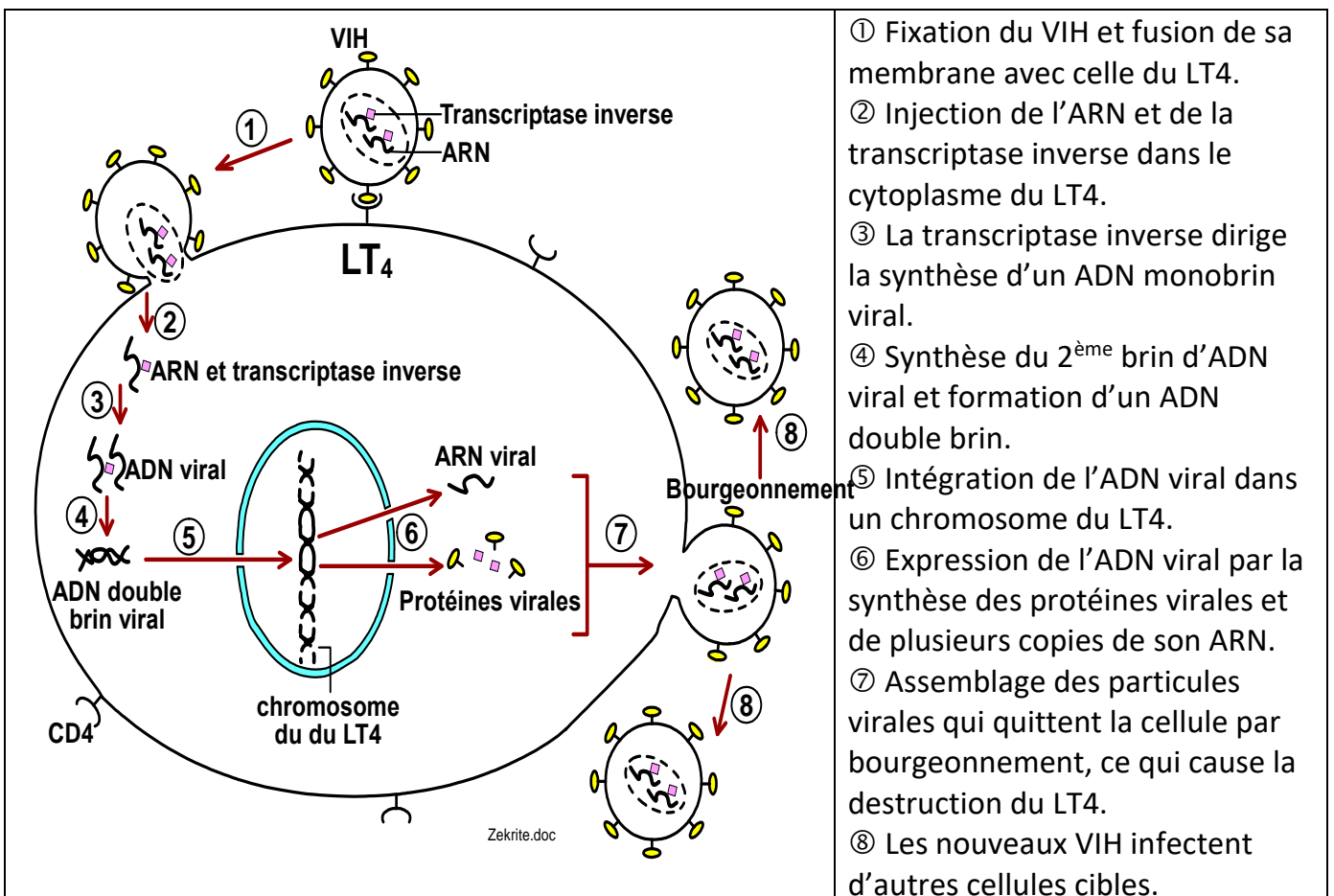
★ Le VIH est un **rétrovirus** car son matériel génétique est formé d'ARN (et non d'ADN).

II/ Pourquoi le VIH s'attaque-t-il spécifiquement aux lymphocytes T4

La fixation du VIH sur la surface de la cellule hôte est assurée par la complémentarité entre sa glycoprotéine gp120 et le marqueur CD4 présent à la surface des macrophages et des cellules dendritiques, mais surtout à la surface des LT4, c'est ce qui explique la grande affinité du VIH aux LT4



III/ Cycle de vie du VIH au sein d'un lymphocyte T4



Un lymphocyte T4 infecté produit environ 1000 nouveaux virus avant de mourir. En phase finale de la maladie, l'ensemble des cellules infectées de l'organisme peut produire jusqu'à dix mille milliards de virus en 24 heures.

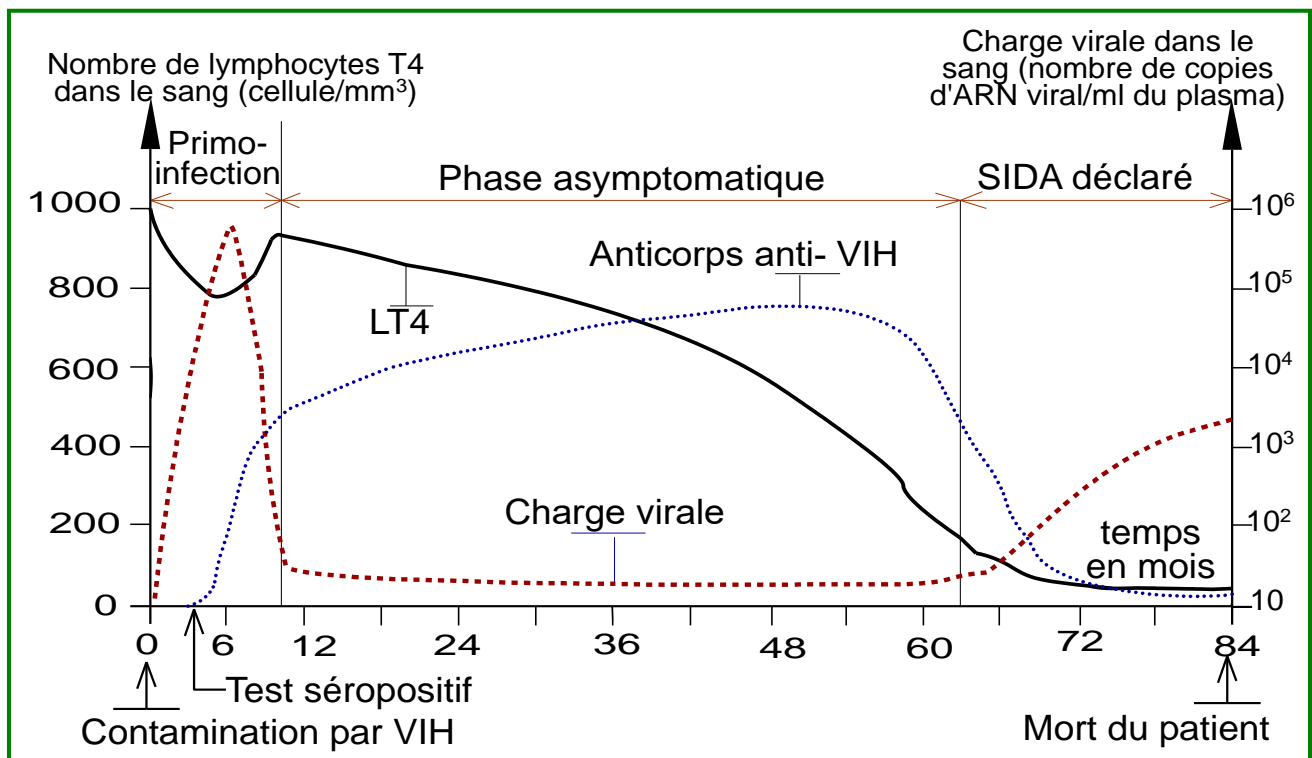
★ Le VIH, comme tout virus, est un parasite obligatoire ; il infecte de préférence les

lymphocytes T4. Le cycle de vie du VIH commence par l'injection de son génome et la fusion de ce matériel dans la cellule hôte.

★ Le cycle de vie du VIH peut s'arrêter à ce stade de fusion, le virus peut rester à cet état latent pendant plusieurs années, dans ce cas le sujet est contagieux (معدِي), et séropositif, c.-à-d. que son sang contient des anticorps anti-VIH.

★ Lorsque le génome du VIH commence à s'exprimer, le virus se multiplie dans le LT4 au détriment de la machinerie cellulaire de cette cellule hôte, ainsi commence la destruction progressive de ces cellules immunitaires.

IV/ Les étapes d'évolution du SIDA



En l'absence de traitement, et suite à une contamination par le VIH, la maladie évolue selon les trois phases suivantes :

Première phase : primo-infection مرحلة الإصابة الأولية

★ C'est une phase aiguë (حادة) qui suit l'infection, caractérisée :

- Au début par une grande prolifération du virus dans les LT4, entraînant une baisse significative du nombre de ces cellules immunitaires cibles.

- Le système immunitaire activé, commence à synthétiser des anticorps anti-VIH; à partir de ce moment, le sujet est dit **séropositif**. Les anticorps produits se chargent de la neutralisation des VIH circulants, c'est ce qui explique la diminution de la charge virale après le 6^{ème} mois et l'augmentation à nouveau des lymphocytes T4.

★ Au cours de cette phase **le sujet ne présente pas de signes caractéristiques du SIDA** à part les symptômes d'une grippe légère.

2^{ème} phase : phase asymptomatique مرحلة بدون أعراض

★ Les anticorps continuent leur phase effectrice contre les virus circulants, c'est ce qui explique une sorte de stabilité de la charge virale plasmatique.

Les virus intracellulaires continuent leur multiplication dans les LT4, mais à une vitesse

lente, c'est ce qui explique la diminution progressive du nombre des LT4.

★ Pendant cette phase, le sujet ne présente pas de symptômes particuliers : **c'est un porteur asymptomatique**. Cette phase peut durer de quelques mois à plusieurs années.

Remarque : Les changements rapides des déterminants antigéniques (mutations) du VIH réduit l'efficacité des anticorps.

3^{ème} phase : Phase du SIDA déclaré مرحلة السيدا المعلنة

★ C'est une phase chronique, le nombre des LT4 descend **au-dessous d'un seuil de 200 cellules/mm³ de sang**. Cette chute marquée des LT4, prive le système immunitaire de la coopération cellulaire indispensable à toutes réponses immunitaires adaptative.

★ Des **maladies opportunistes** أمراض انتهازية se déclarent alors profitants de l'affaiblissement du système immunitaire. Parmi les maladies opportunistes de cette phase on peut citer : la tuberculose, le sarcome de Kaposi (cancer de la peau), un muguet de la bouche (blancheur et inflammation) ...

V/ Les tests de dépistage du VIH اختبارات الكشف عن الفيروس

Pour savoir si une personne est porteuse du VIH ou pas, on se base sur deux test :

★ **L'examen ELISA** : est basé sur la recherche des anticorps anti-VIH dans le sang de l'individu, si ces anticorps sont présents, l'individu est séropositif donc il est contaminé par le VIH. Si ces anticorps sont absents, l'individu est séronégatif donc il est sain.

★ **L'examen Westen-blot** : c'est un examen plus précis puisqu'on procède à la recherche direct de plusieurs protéines virales : Gp160, Gp120, P68, P52, Gp41 dans le sang de la personne.

correspond à une protéine virale.

VI/ Traitement du SIDA

Malheureusement, à l'heure actuelle, il n'y a aucun traitement qui permet de guérir du SIDA. Cependant, il existe des traitements qui empêchent la prolifération du virus en bloquant une des étapes de son cycle de vie et permettent ainsi de lutter contre l'apparition des symptômes :

- des inhibiteurs de la fixation du virus.
- des inhibiteurs de la transcriptase inverse (par le médicament AZT).
- des inhibiteurs de l'intégrase, enzyme qui assure la fusion de l'ADN viral dans l'ADN de la cellule T4.

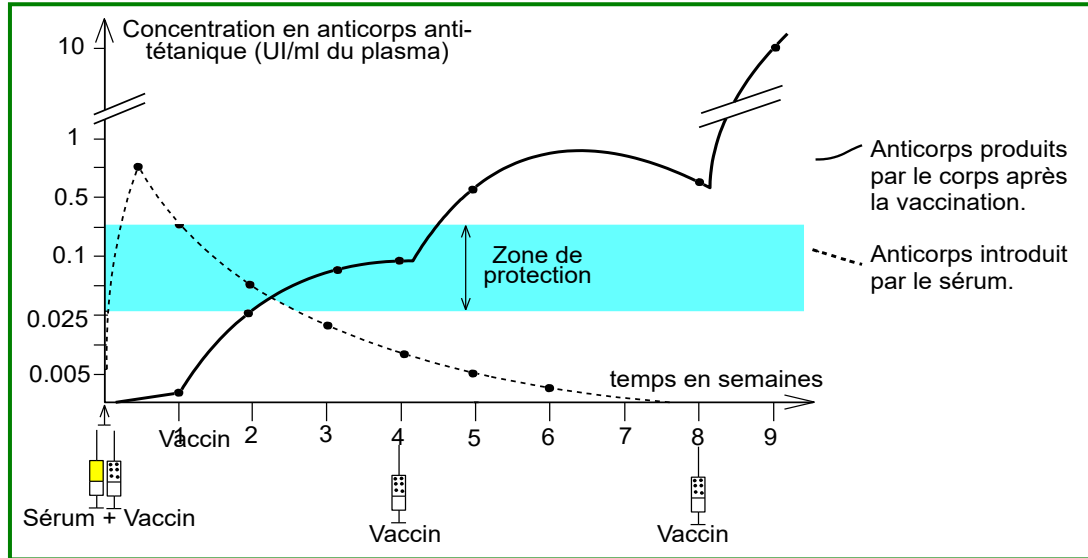
La trithérapie est un traitement basé sur l'utilisation simultanée de trois médicaments anti-VIH agissant sur différentes étapes du cycle de vie du virus.

Les moyens d'aide du système immunitaire

La vaccination, la sérothérapie et la greffe de la moelle osseuse sont des procédés de grande utilisation de nos jours pour aider le système immunitaire à défendre les antigènes pathogènes.

I/ La vaccination et la sérothérapie :

▼ Efficacité respective de la sérothérapie et de la vaccination



Principe de la vaccination :

La vaccination est une pratique médicale préventive وقائية وتقنية, elle se base sur la mémoire immunitaire. Elle consiste à injecter (une fois ou plus) une personne par une forme non pathogène de l'agent responsable d'une maladie, qu'on appelle vaccin (microbe vivant atténué ou inactivé ou une molécule du microbe ou bien une anatoxine). En réponse à cette injection du vaccin, l'organisme développe une réponse immunitaire normale, et grâce au développement de la mémoire immunitaire, l'organisme devient capable d'affronter avec succès un éventuel contact avec le même agent de la maladie sous sa forme sévère.

Principe de la sérothérapie :

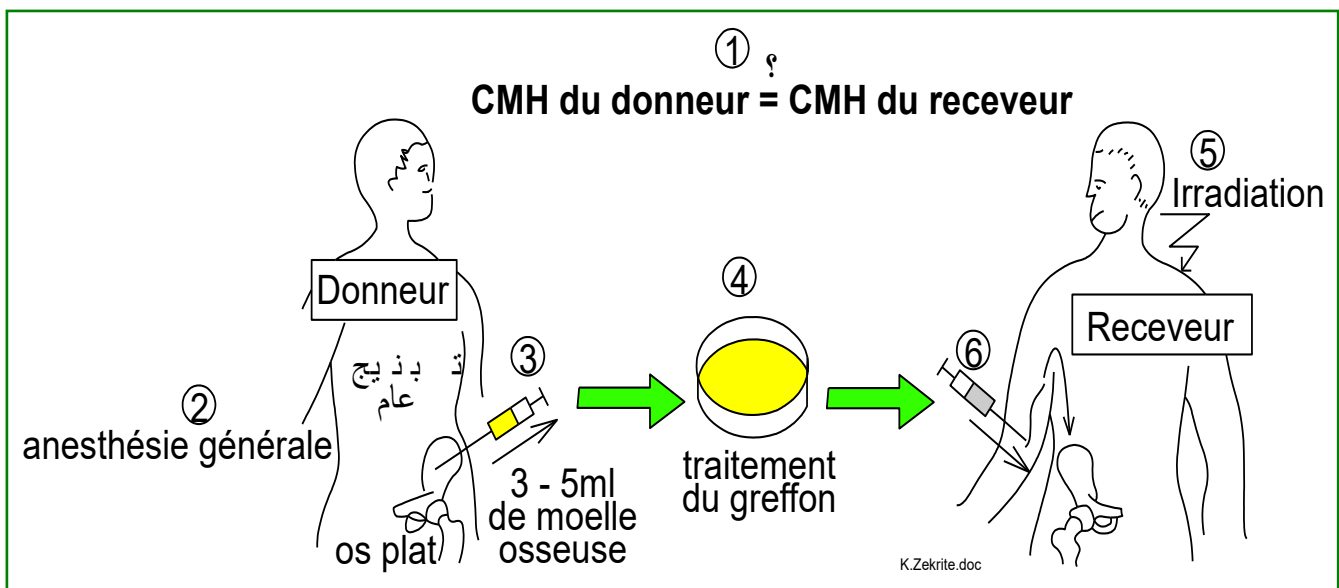
La sérothérapie est une pratique médicale thérapeutique (pour guérir) Elle consiste à injecter un patient contaminé par un agent pathogène (bactérie, virus, toxine ou même un venin) par un sérum sanguin très riche en anticorps spécifiques de l'antigène concerné. Le sérum sanguin provient d'un animale ou d'une personne immunisé contre l'agent pathogène.

Comparaison entre la vaccination et la sérothérapie :

Vaccination	Sérothérapie
Injection d'un antigène atténué.	Injection d'un sérum riche en anticorps
Effet spécifique	Effet spécifique
Moyen de prévention للوقاية	Moyen de traitement للعلاج
Immunité acquise : système immunitaire actif.	Immunité transférée, le système immunitaire est passif.
Acquière une immunité lente mais dure longtemps (des mois et même des années).	Transmet une immunité immédiate mais dure peu de temps (quelques jours à quelques semaines).

Remarque : Les mutations nombreuses du VIH ont causé des difficultés pour la production d'un vaccin contre le SIDA.

II/ La greffe de la moelle osseuse زرع النخاع العظمي:



La greffe de la moelle osseuse se déroule dans les étapes essentielles suivantes :

- ✳ Choix du donneur : taux suffisamment élevé d'histocompatibilité.
- ✳ Test d'histocompatibilité in vitro : on vérifie que les lymphocytes du donneur et du receveur ne réagissent pas entre eux.
- ✳ Prélèvement sous anesthésie générale du donneur, de quelques mm³ de moelle rouge des os plats.
- ✳ Traitement de cet échantillon : élimination des lymphocyte immunocompétents, élimination des globules rouge si le donneur porte un groupe sanguin ABO non compatible avec le receveur.
- ✳ Irradiation du receveur et son traitement par chimiothérapie pour détruire sa moelle malade. Le patient doit être mis dans une chambre stérile pour le protéger des infections.
- ✳ Injection de l'échantillon de moelle osseuse au receveur par voie veineuse, les cellules de la moelle prennent place automatiquement et progressivement au niveau des os.

Unité 6 : 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 :

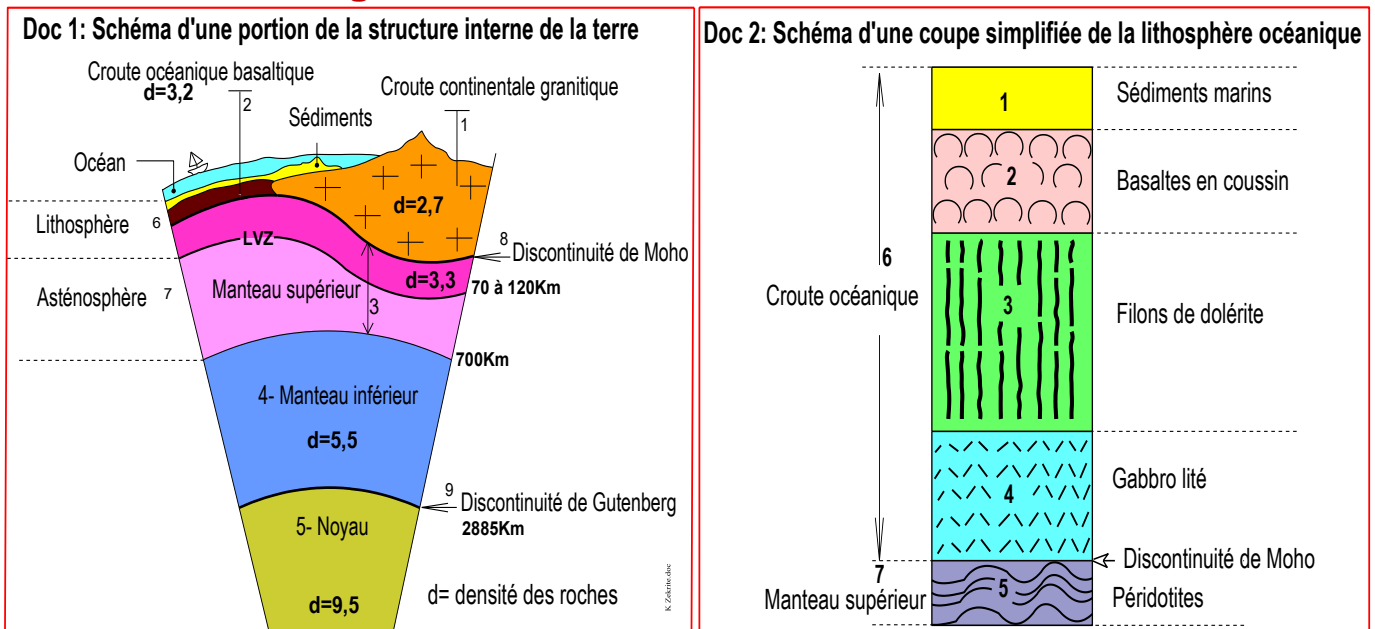
Les roches terrestres se classent en trois grandes catégories selon leur mode de formation :

- **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:



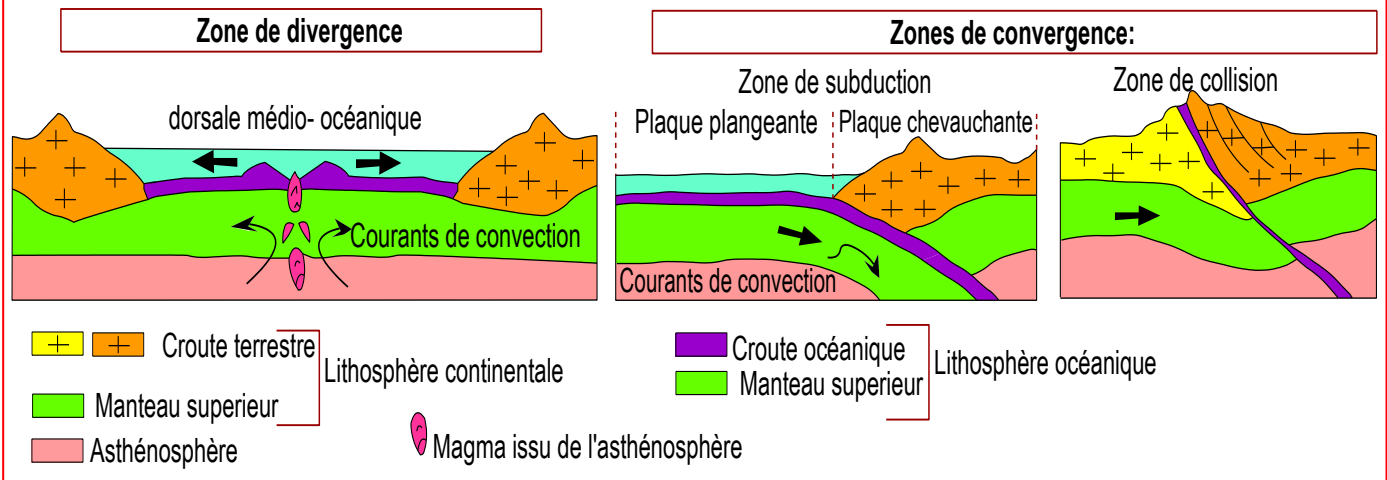
La Terre est formée de plusieurs couches rocheuses de densités différentes, généralement rigides, sauf le noyau externe qui est liquide et l'asthénosphère qui est souple.

- **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.

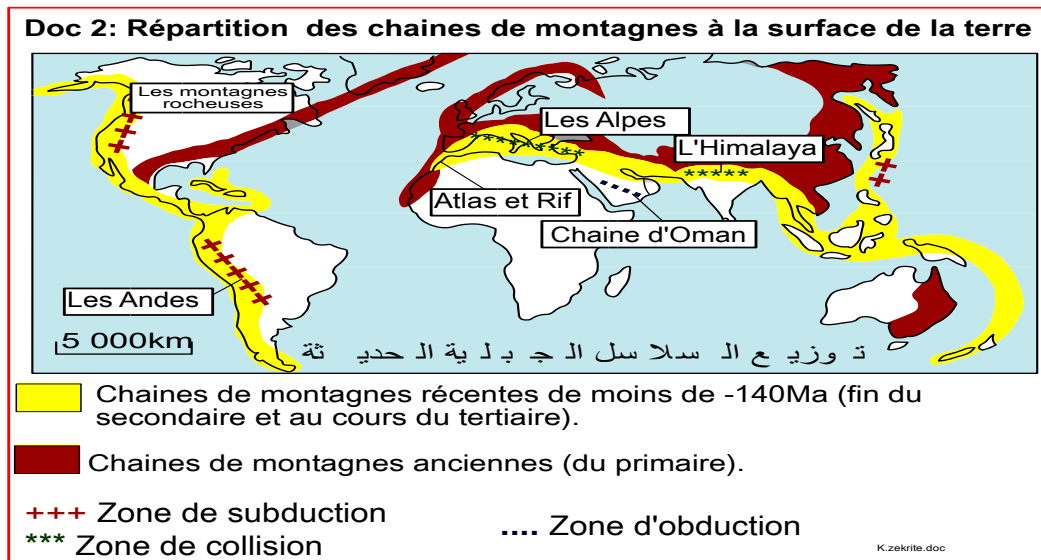
III/ Notion de plaque tectonique et théorie des plaques :

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.

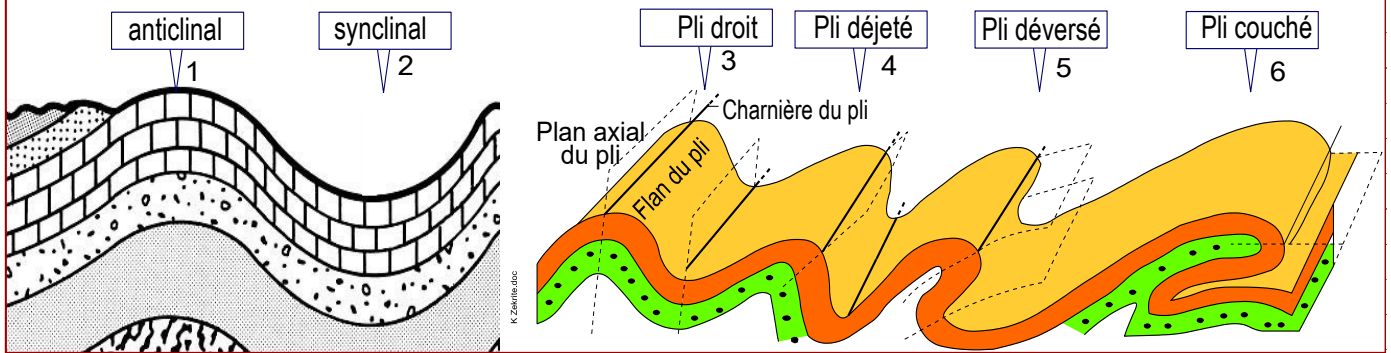
On peut classer les déformations rencontrées dans les chaînes de montagnes en :

- 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

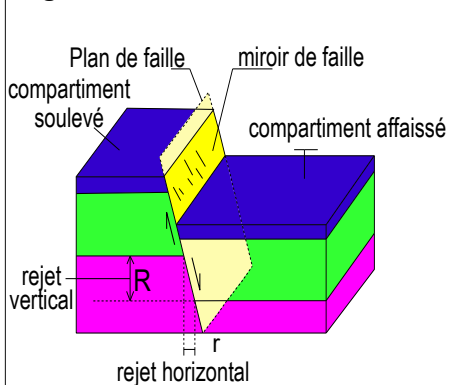


Fig c: les regroupements de failles

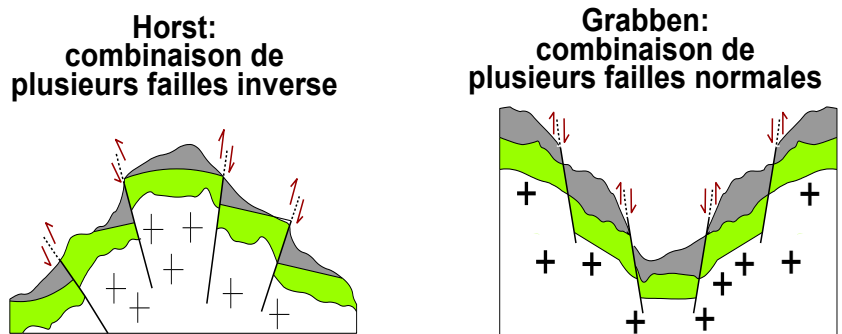
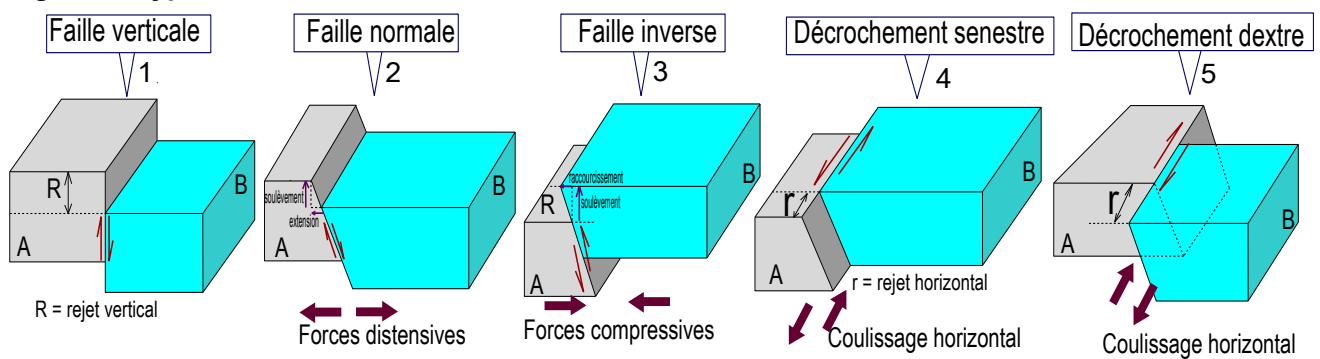


Fig b: les types de failles



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.

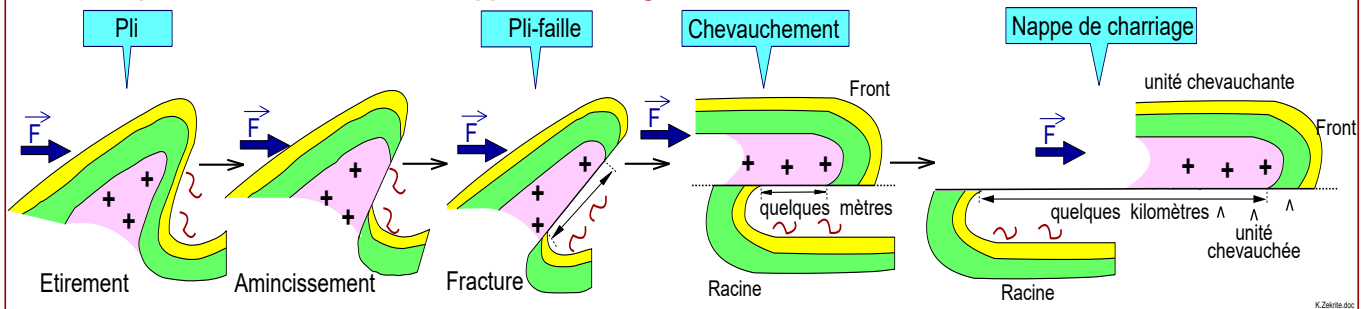
- **une faille normale** : faille le long de laquelle les roches au-dessus du plan de faille se déplacent vers le bas par rapport aux roches sous le plan de faille. Les failles normales se forment lorsque deux blocs de roches s'éloignent l'un de l'autre (écartement), en raison d'une distension **تباعد**.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

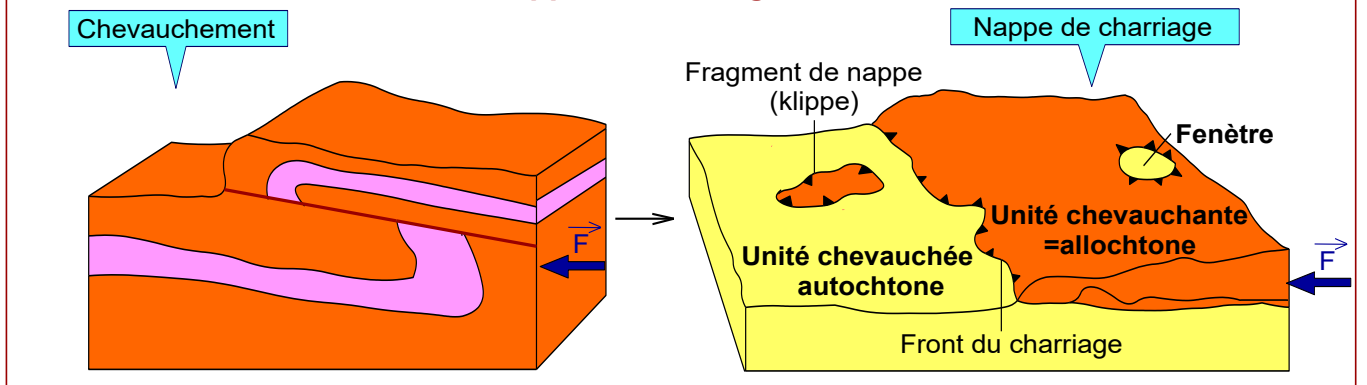
■ **un décrochement ou faille transformante** انقلاع correspondent à un coulissage horizontal انزلاق أفقي des deux bloc sans déplacement vertical.

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



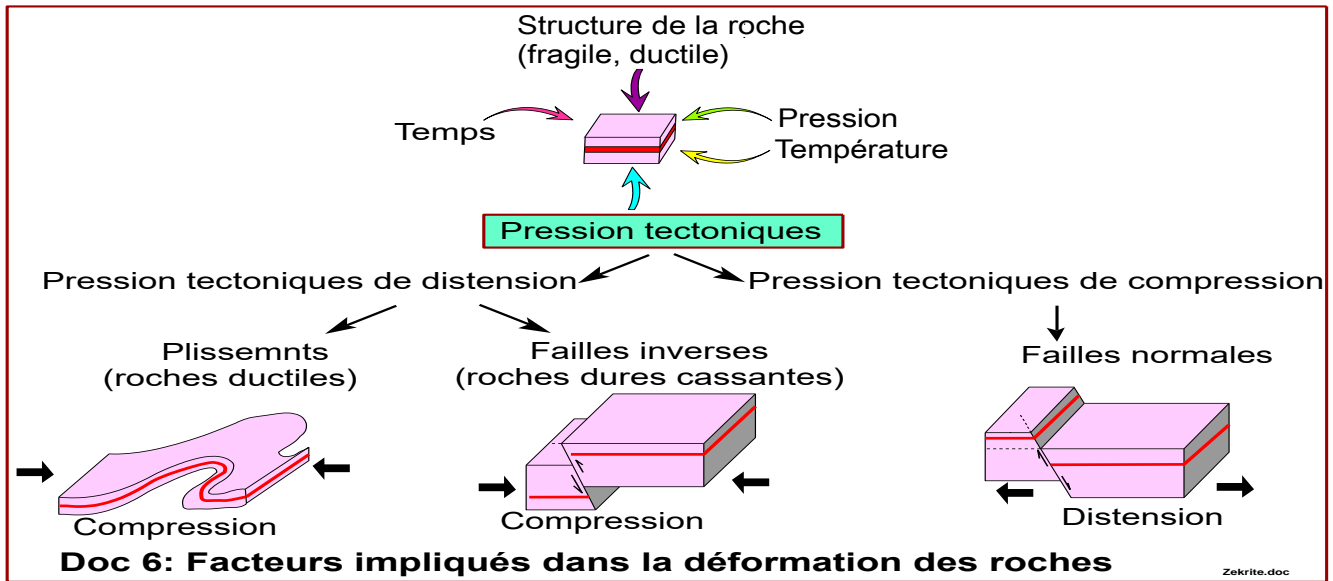
- Sous l'effet de fortes compressions, un pli peut se casser et évoluer en pli-faille, puis se déplacer.
- Si le déplacement est faible, on parle de **chevauchement** (quelques mètres) ; s'il est très important, on parle de **nappe de charriage** (sur des kilomètres).
- Dans ces cas, une couche rocheuse (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

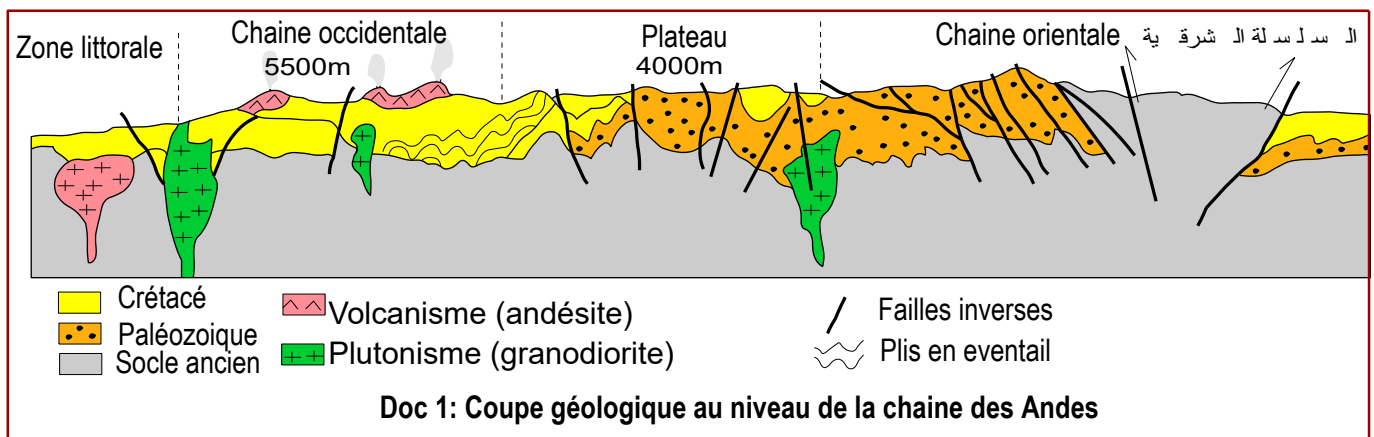
- Les déformations des roches aux limites des plaques dépendent de plusieurs facteurs : la nature de la roche (cassante ou plastique), la pression et la température (faibles en surface → failles, élevées en profondeur → plis), et le temps d'action des forces (rapide → cassure, lent → déformation plastique).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

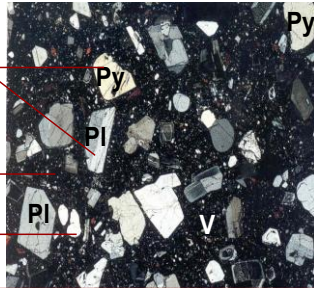
- La granodiorite est une roche **plutonique** à gros cristaux soudés, sans pâte vitreuse: **structure grenue**, formée par le refroidissement lent du magma en profondeur.

Doc 2: Roches caractéristiques des chaînes de subduction

Fig a: Andésite

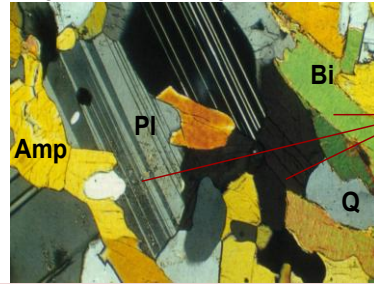


Fig b: Lame mince d'andésite



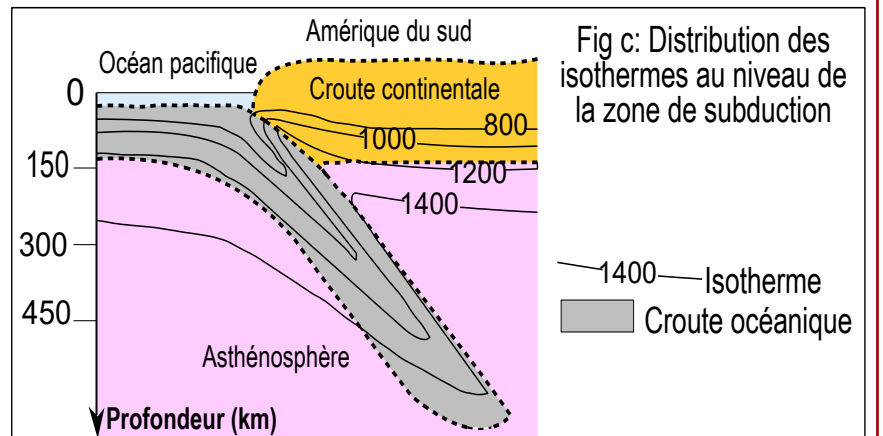
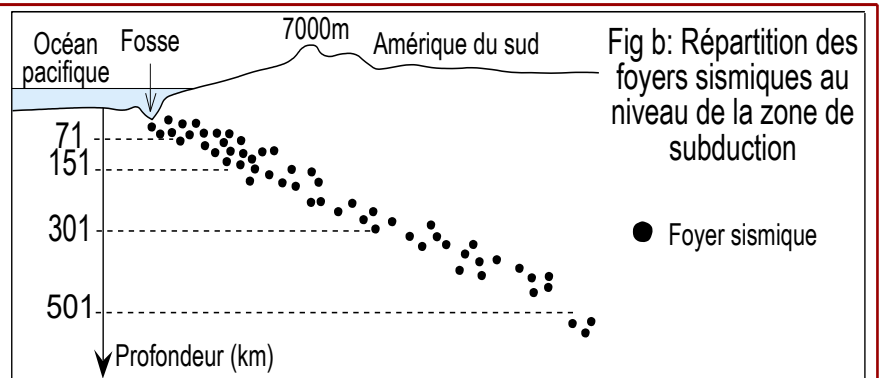
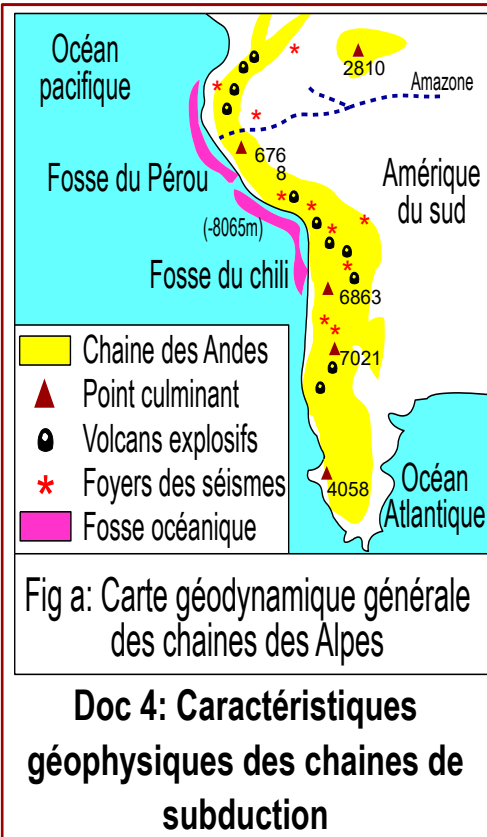
Phénocristaux
(pyroxène et plagioclase)
Verre
microlites

Fig c: Lame mince de granodiorite



Phénocristaux soudés:
plagioclase: Pl
Amphibole: Amp
Biotite: Bi
Quartz: Q

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 سلبی**. 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 rabout **منجر** qui fait accumuler les sédiments meubles (**غير متماسكة**) sous formes d'écaillés **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)

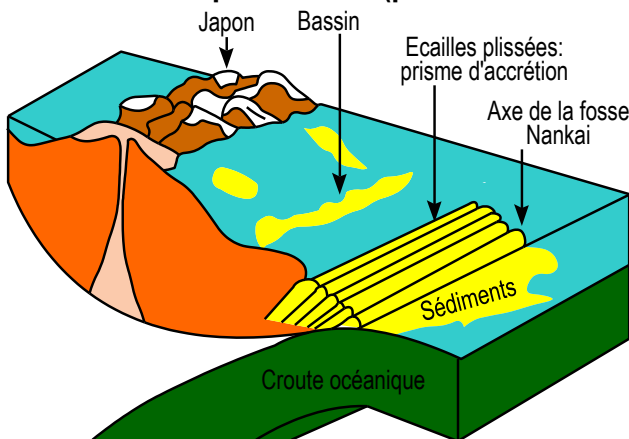
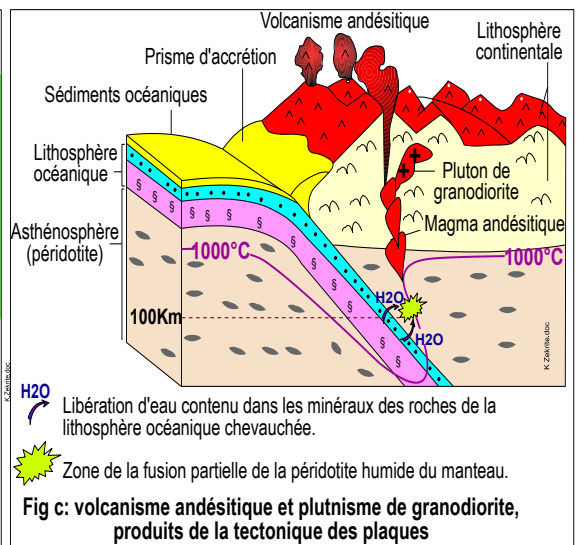
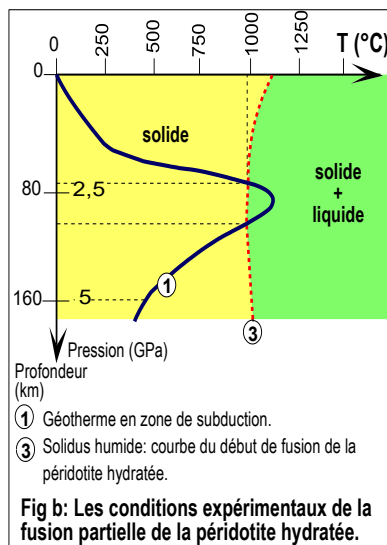
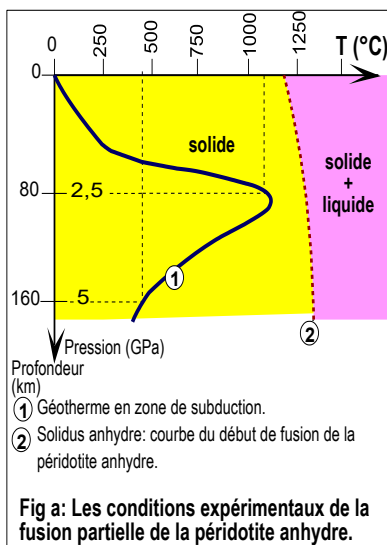


Fig a: Prisme d'accrétion récent dans la fosse Nankai au Japon



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.

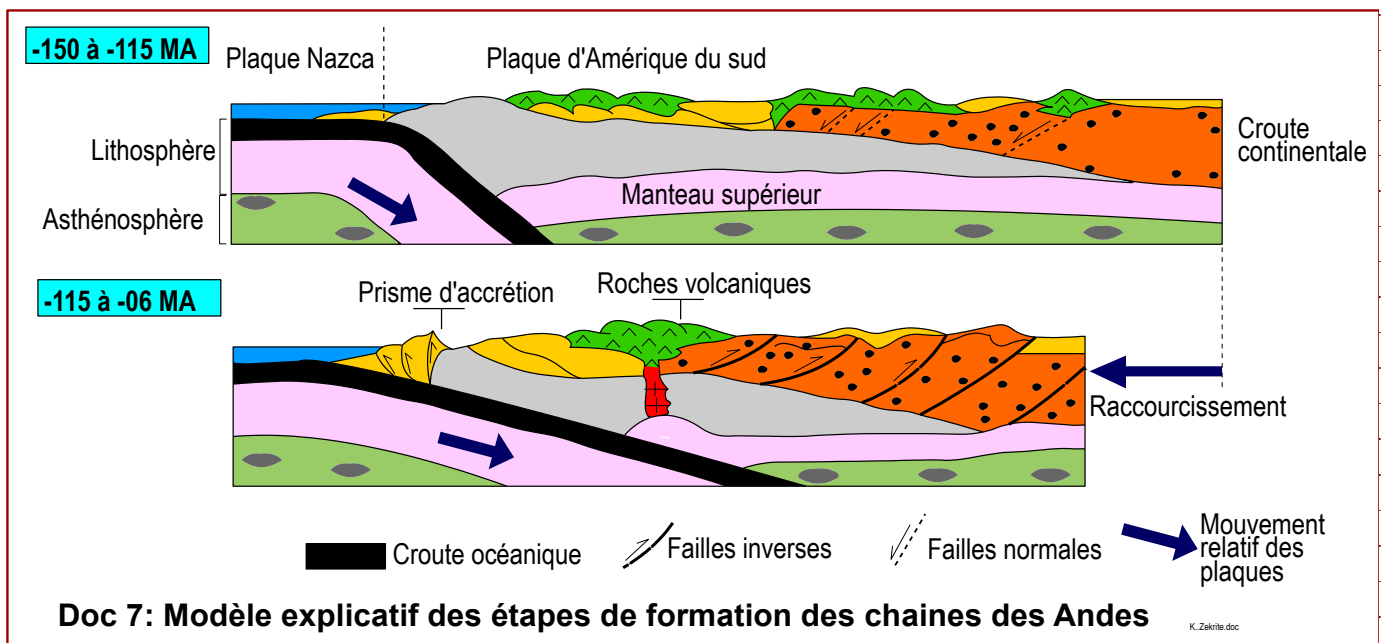
Quelles sont les conditions expérimentales de formation du magma andésitique ?

● 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'établie 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 chaines de subduction



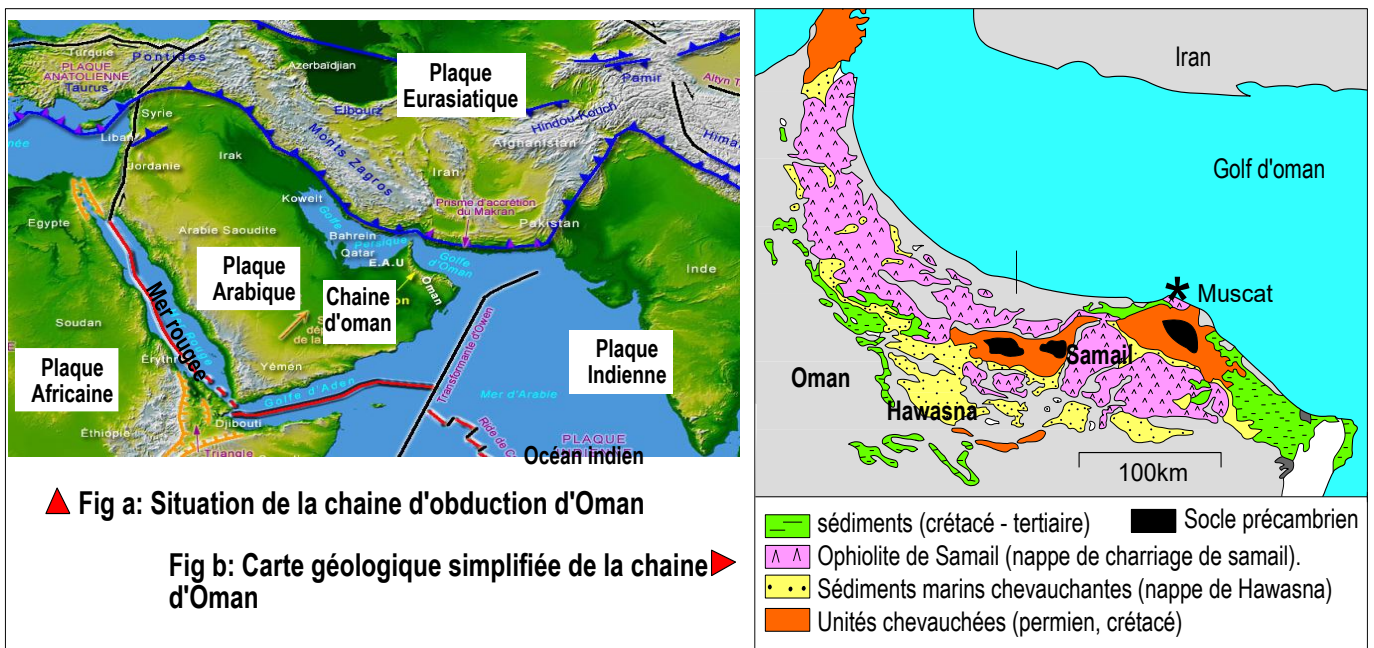
La formation des Andes commence il y a environ 150 millions d'années avec la convergence entre la plaque Nazca et la plaque sud-américaine. La plaque Nazca, plus dense, subducte sous la plaque continentale, provoquant une fosse océanique, un prisme d'accrétion et un volcanisme intense.

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



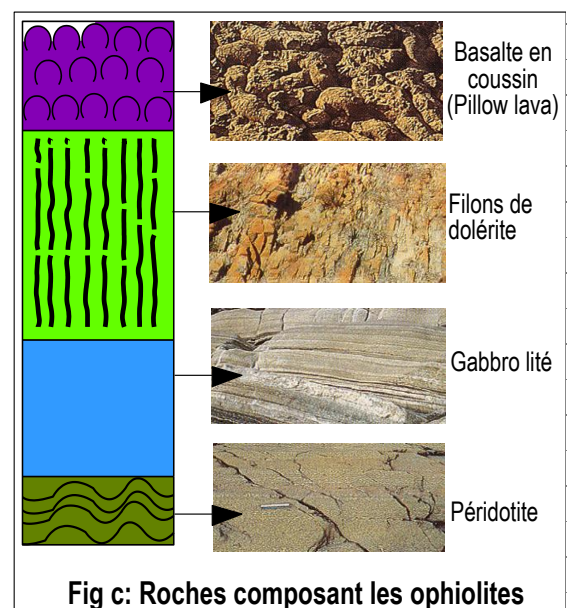
La chaîne d'Oman est située au sud-est de la péninsule arabique (شبه الجزيرة العربية) au nord de Sultanat Oman, elle s'étend sur les bordures du golf Oman. Elle présente :

- 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.

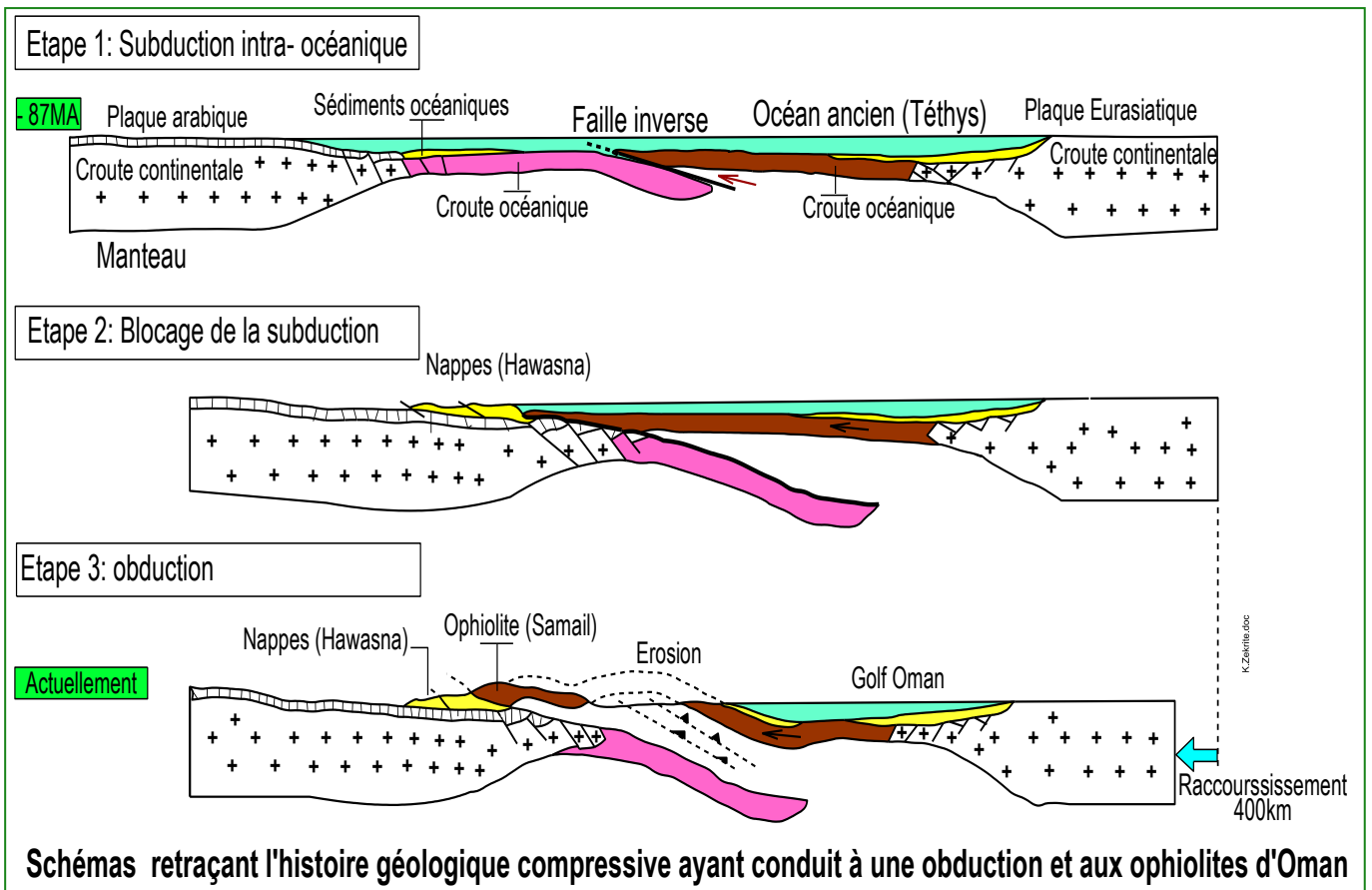
- L'ophiolite est un complexe constitué des mêmes roches de la lithosphère océanique qui sont : le basalte, la dolérite, le gabbro et la péridotite. L'ophiolite d'Oman est donc une lithosphère océanique ancienne.

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



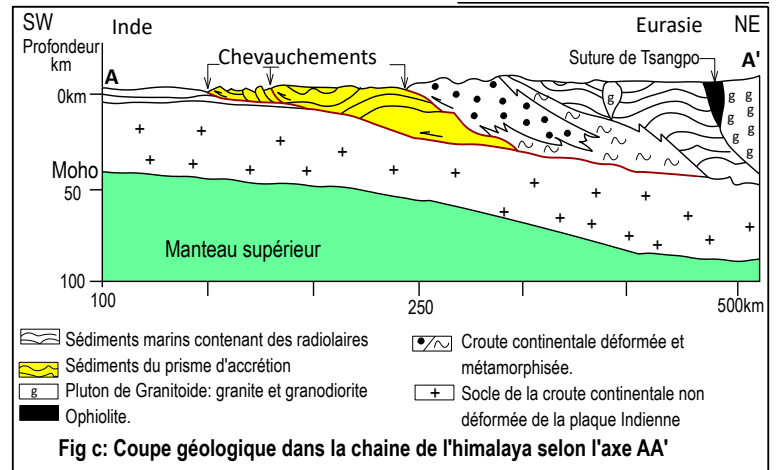
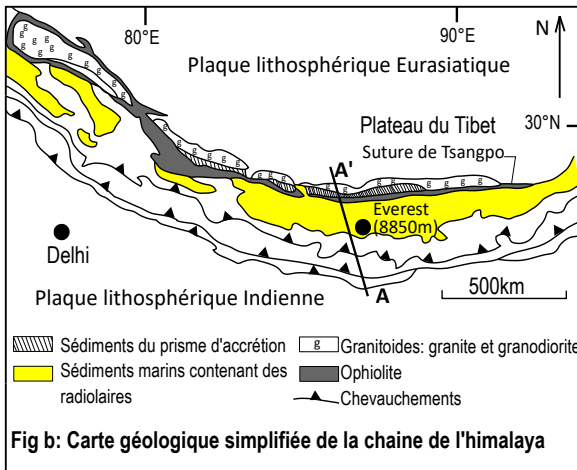
La chaîne d'Oman s'est formée en plusieurs étapes liées à la tectonique des plaques :

- **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.

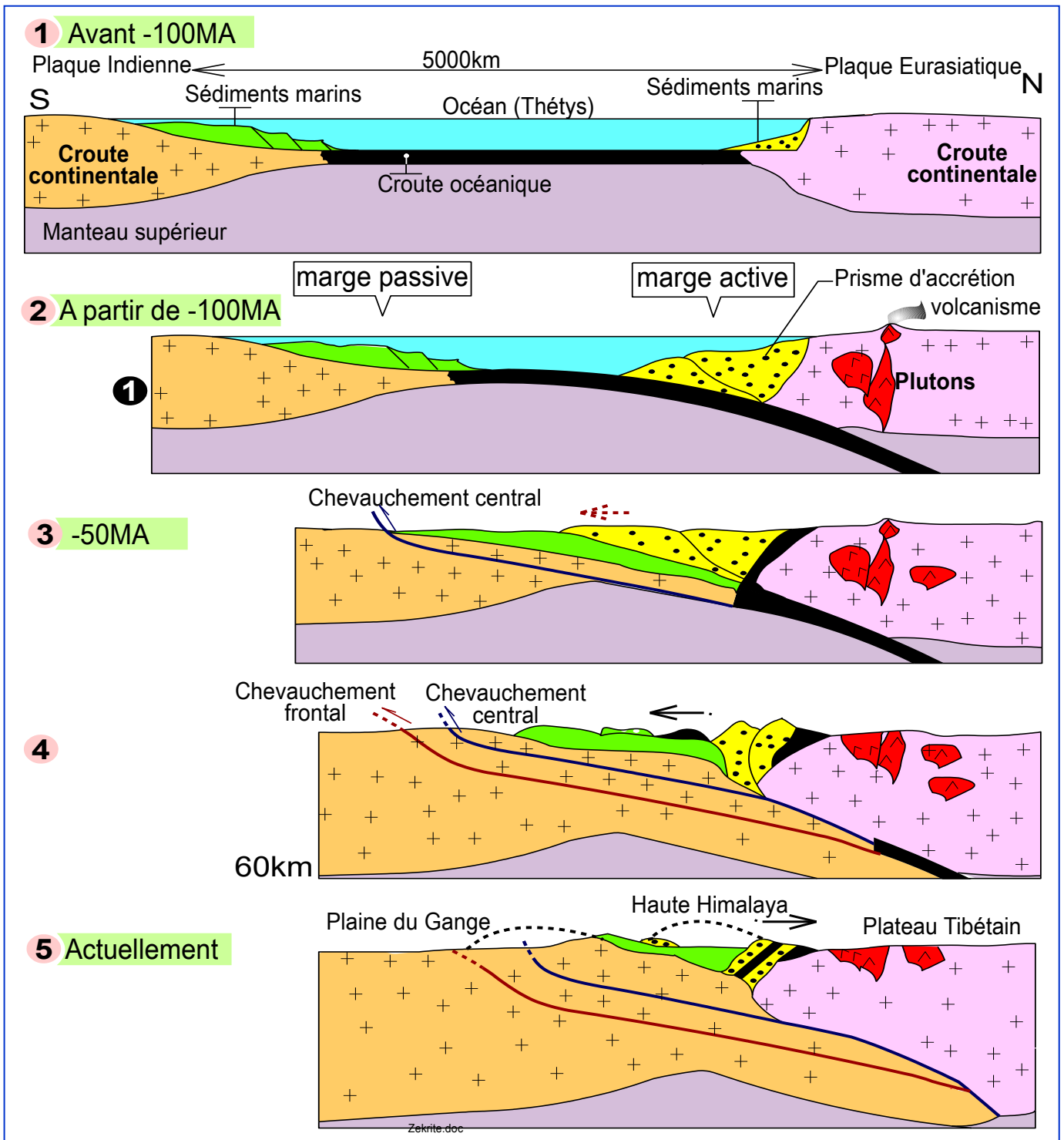
Ces éléments montrent qu'il y a eu une subduction suivie d'une collision continentale, entraînant le chevauchement des deux plaques et la formation de la chaîne himalayenne.

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



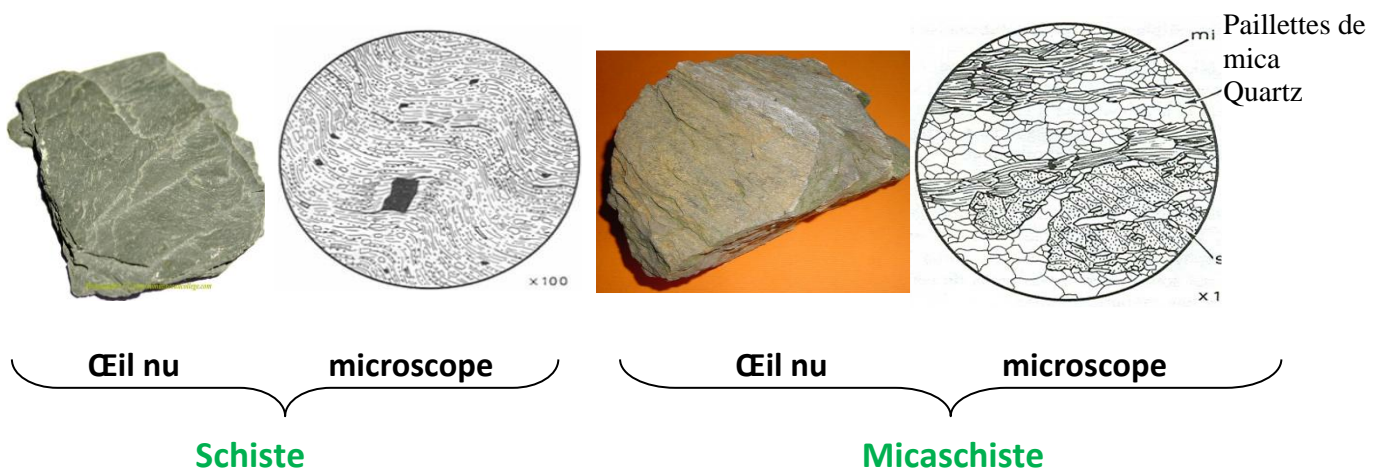
Chapitre 2 : Le métamorphisme et sa relation avec la tectonique des plaques

- 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.

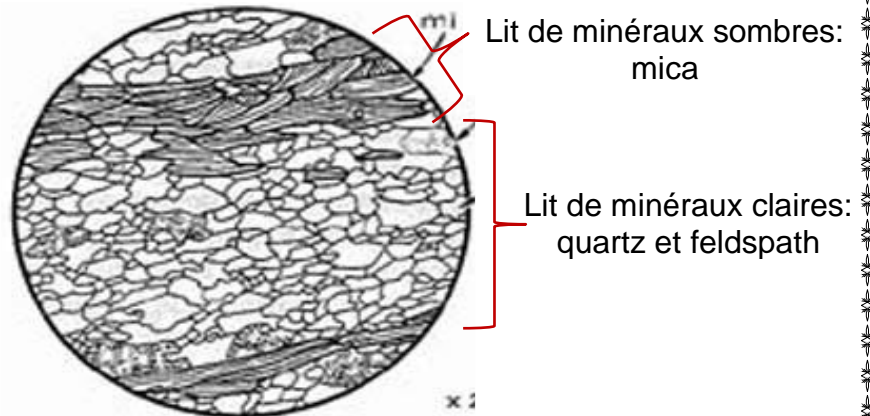


- **Le gneiss** se caractérise par **la foliation** : structure des roches métamorphiques caractérisée par :
 - À l'œil nu : un aspect rubané, avec alternance de bandes claires et sombres, sans clivage facile.

- 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

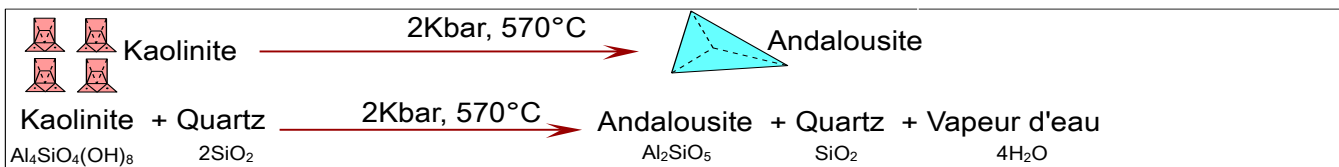
Comment explique-t-on la transformation minéralogique et structurale des roches métamorphiques ??:

■ 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 :



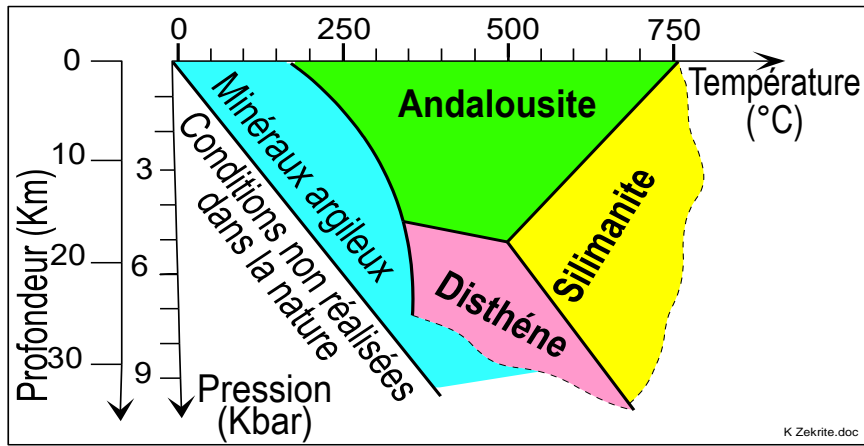
■ La différence minéralogique observée lorsqu'on passe d'une roche métamorphique à une autre s'explique par le fait que chaque roche a subi des conditions de températures et de pression qui lui sont propres et qui ont permis l'apparition de minéraux bien déterminés stables dans ces conditions.

■ 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 :

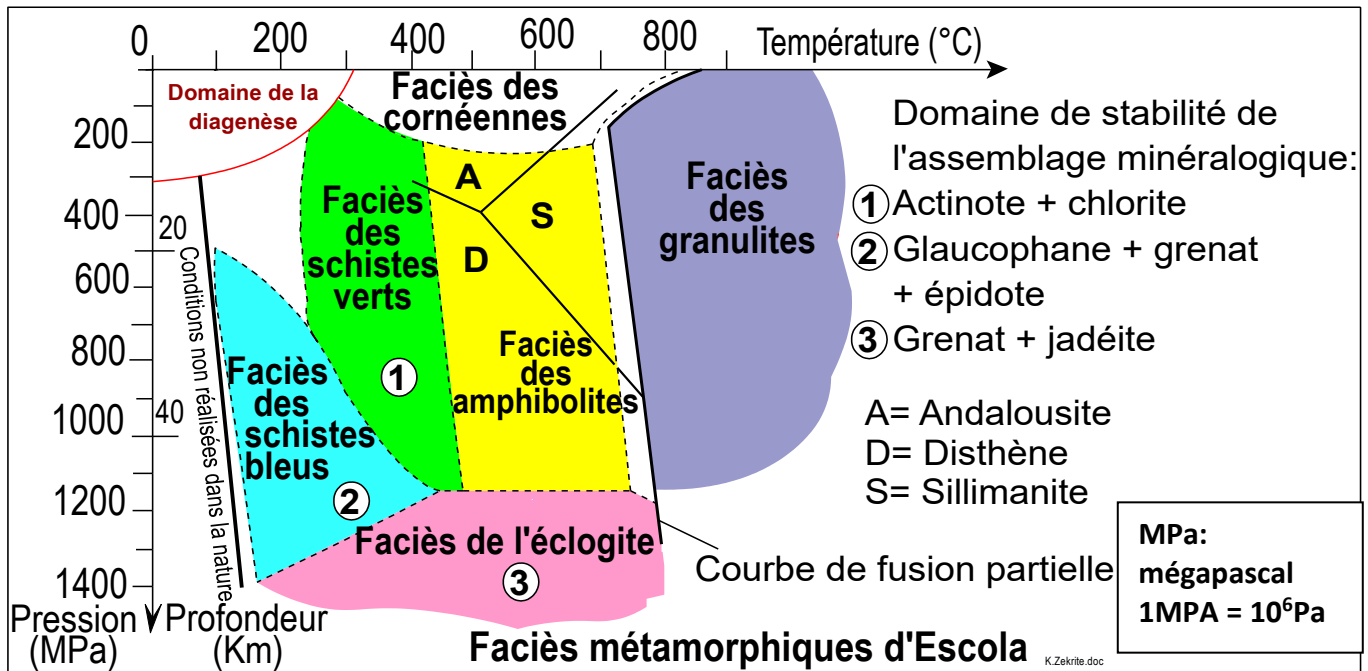
- La profondeur : la température et la pression augmentent en fonction de la profondeur ; les roches vont subir donc des degrés croissants de métamorphisme en s'enfonçant en profondeur.
- Le cadre géodynamique de la lithosphère : une roche située dans une zone de subduction va subir des conditions de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

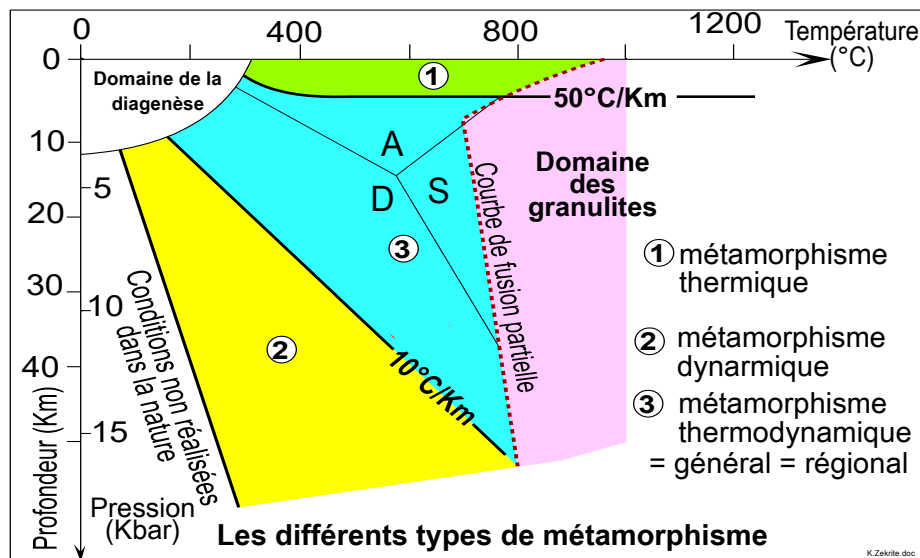


- **Un faciès métamorphique** regroupe des roches (ou des minéraux) formées dans les mêmes conditions de pression et de température, caractérisées par des minéraux

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.

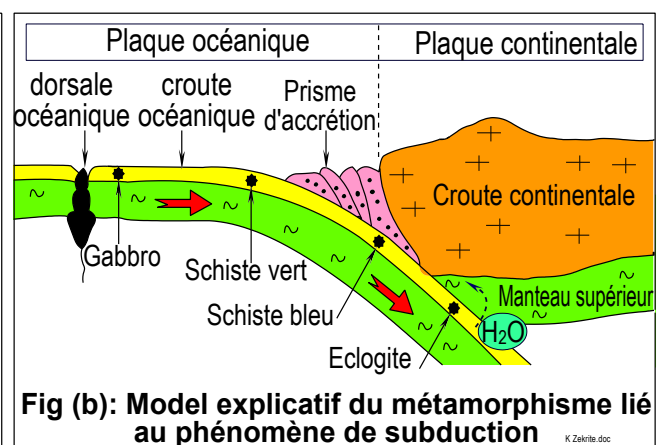
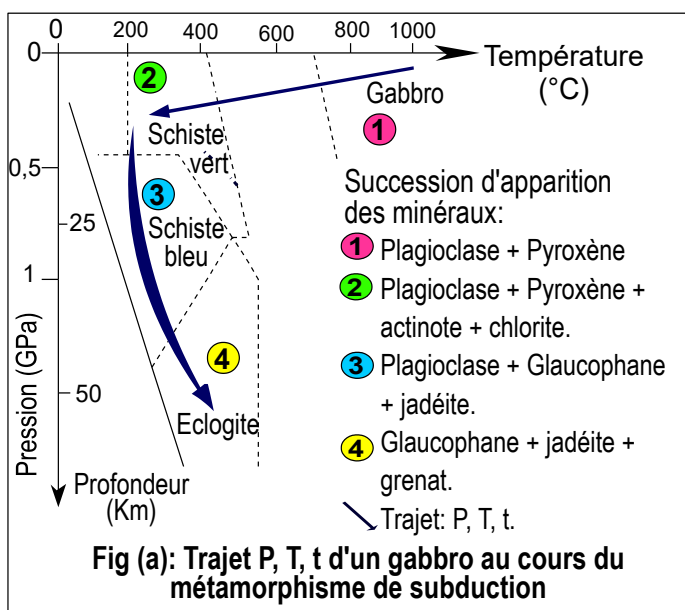


Fig (b): Model explicatif du métamorphisme lié au phénomène de subduction

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

Plagioclase + Chlorite + Actinote → Glaucophane + eau
 Plagioclase + Glaucophane → Grenat + Jadéite + eau

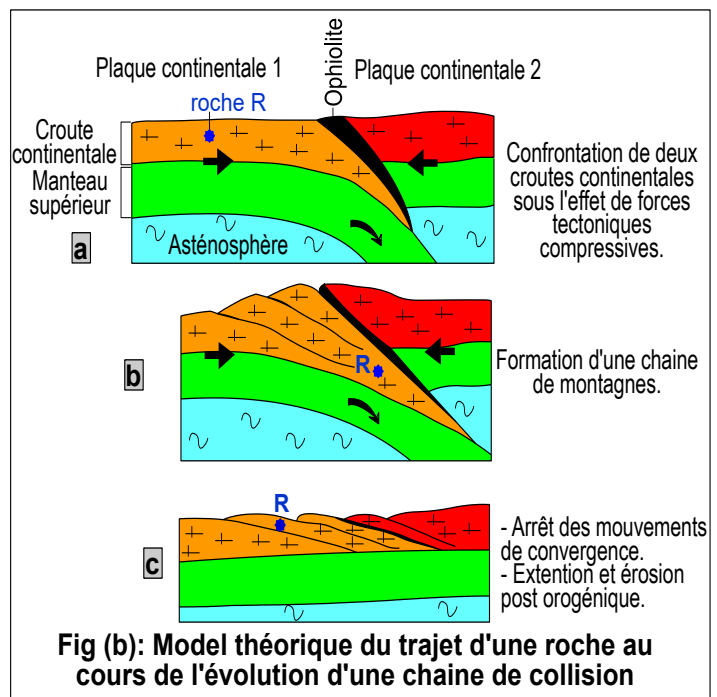
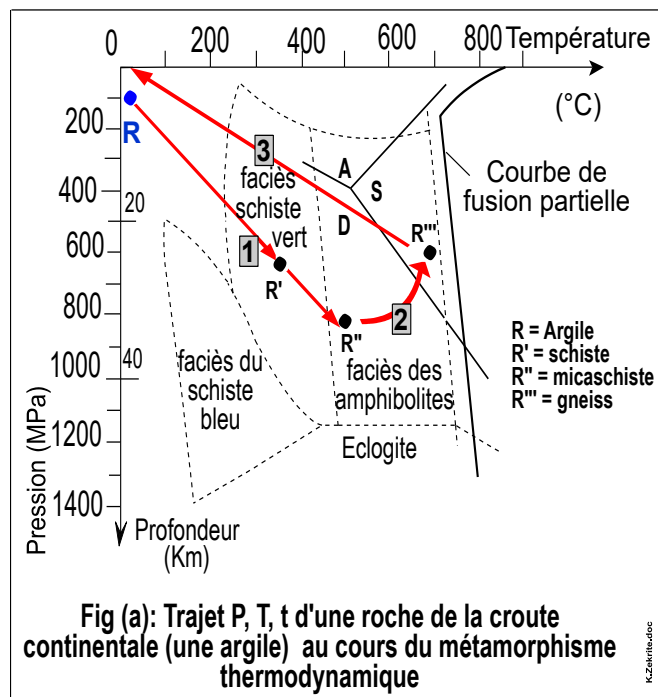
- Dans les zones de subduction, le gabbro ou le basalte, formé à haute température à la dorsale, se refroidit en s'éloignant et devient un schiste vert. Lors de la subduction, il subit une forte pression et se transforme successivement en schiste bleu puis en éclogite. Cette évolution constitue une série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



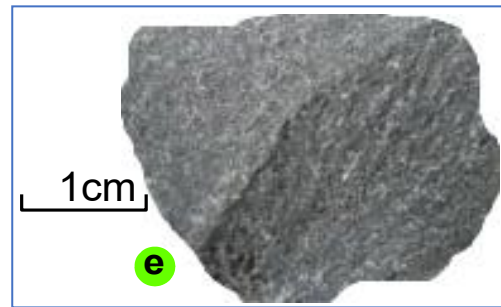
3/ Le métamorphisme thermique = métamorphisme de contact :

- 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.

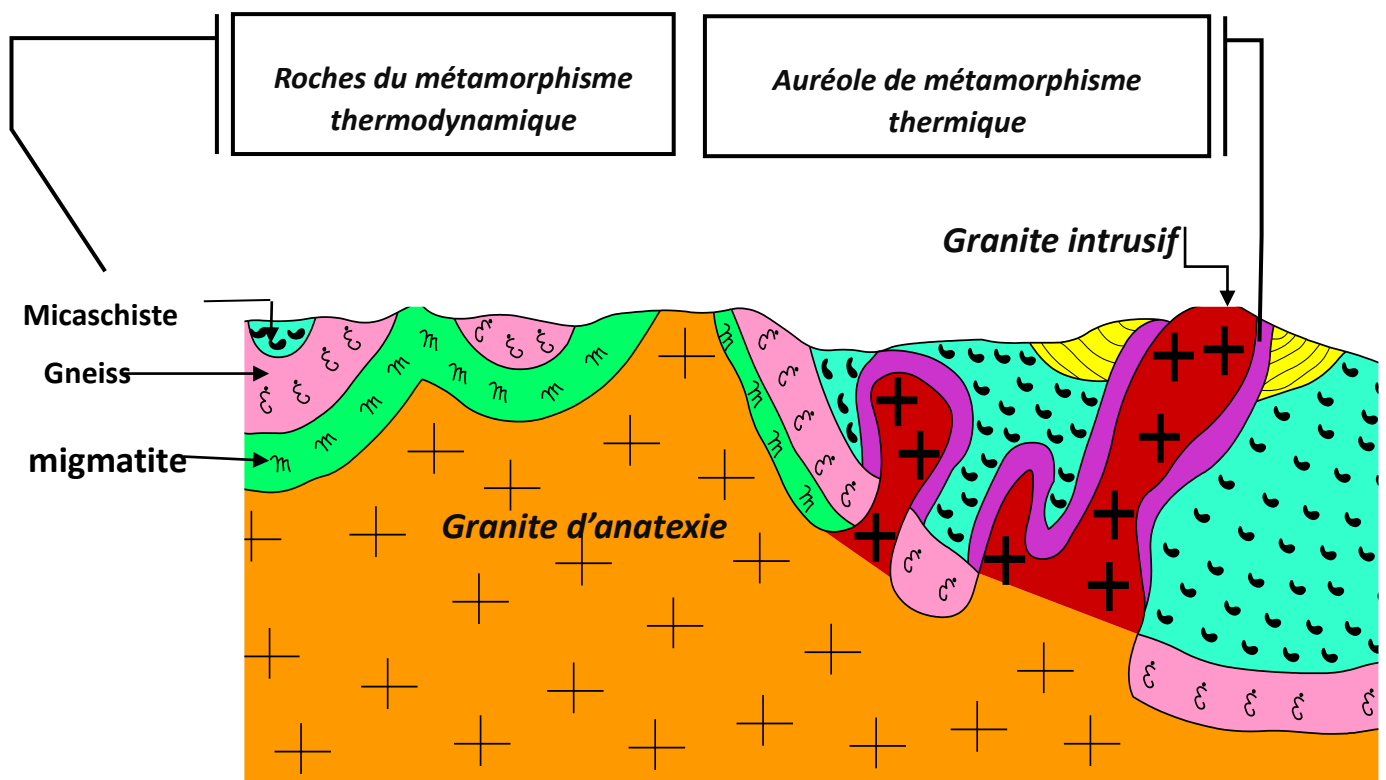
- Les minéraux des roches métamorphiques ne sont pas orientés (parce que la pression est faible) mais il se caractérise par la cornéenne : roche de faible pression et haute température

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

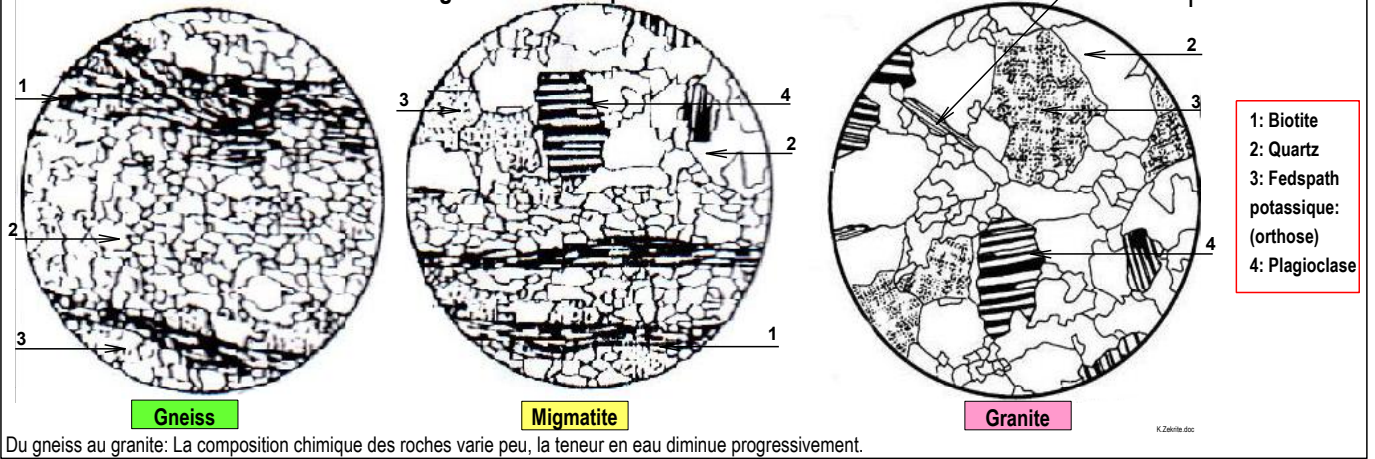
On identifie deux types de granites : **le granite d'anatexie et le granite intrusif**, tous les deux sont liés aux chaînes de montagnes et sont proches des roches métamorphiques.



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.



- 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

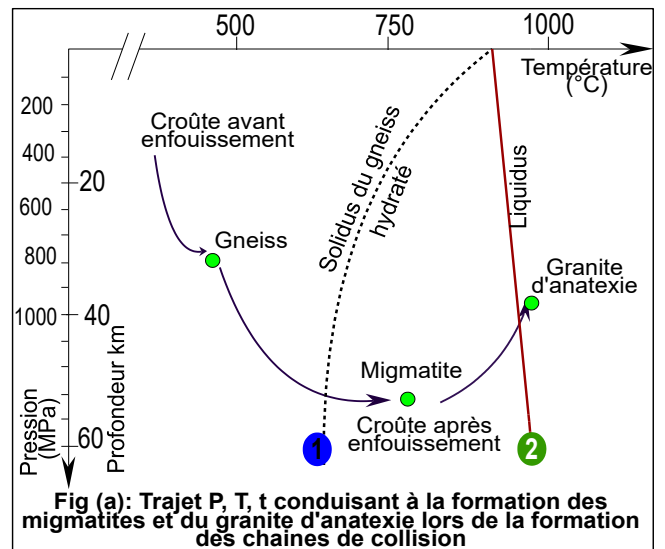


IV/ Comparaison entre le granite intrusif le granite d’anatexie :

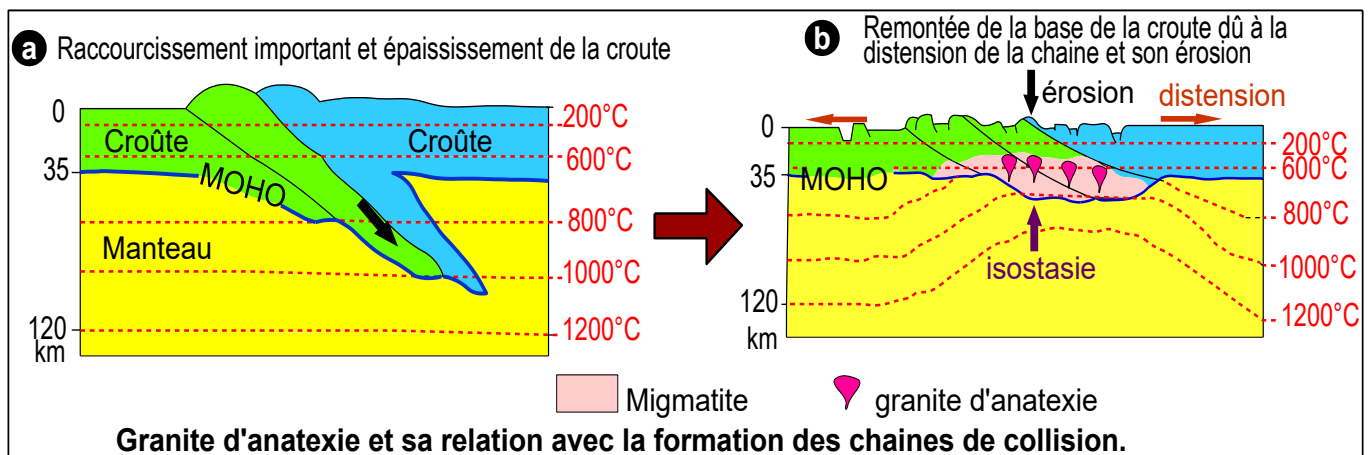
	Granite d’anatexie	Granite intrusif
L’étendue	Large surface (peu dépasser 25 km ²)	Très limitée (moins de 10km ²)
Les limites	floues	Nettes
Roches avoisinantes	Migmatites et roches métamorphiques du métamorphisme régional	Enclaves et auréole de métamorphisme
Relation avec le métamorphisme	Le granite 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

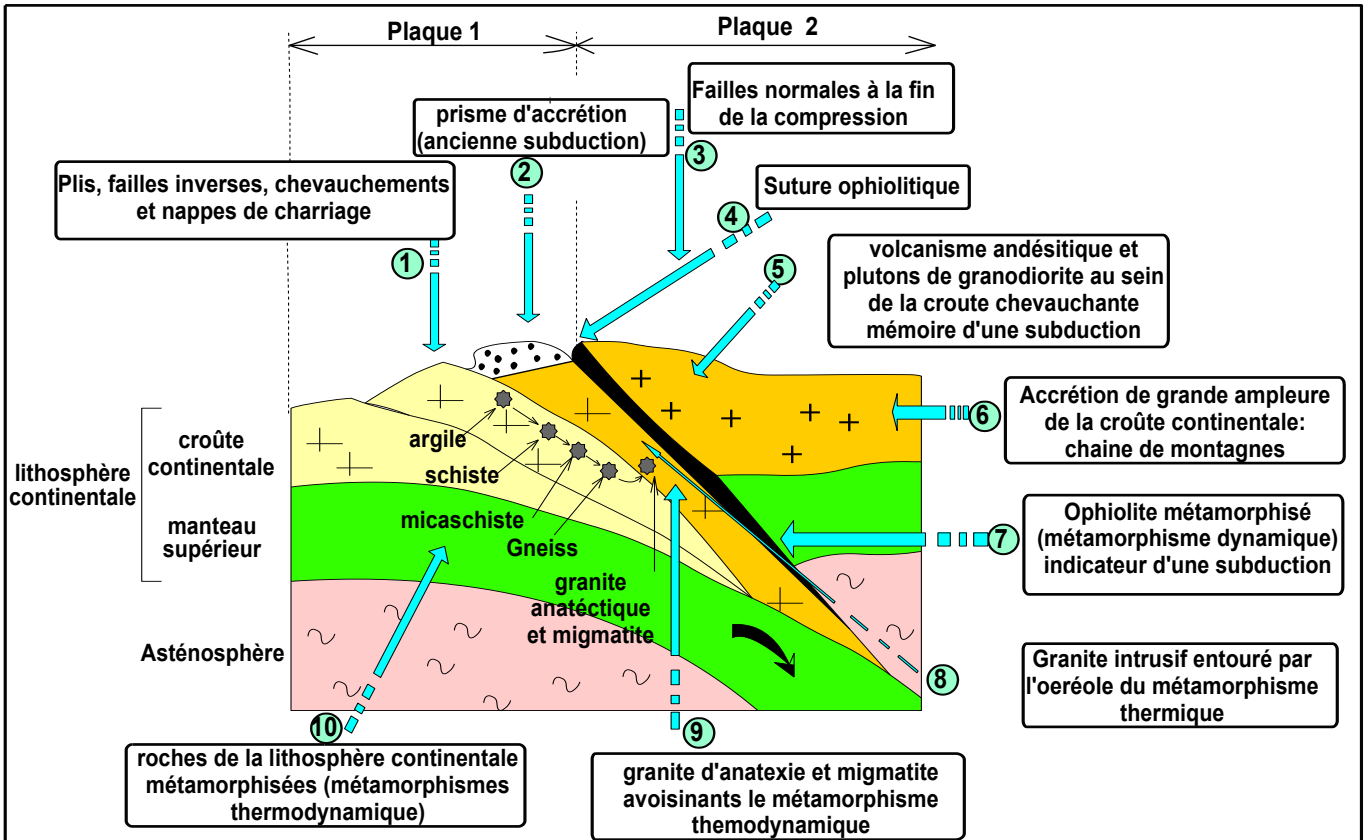


Schéma récapitulatif résumant les phénomènes géologiques résultants de la tectonique des plaques dans les zones de collision. Zekrite.doc

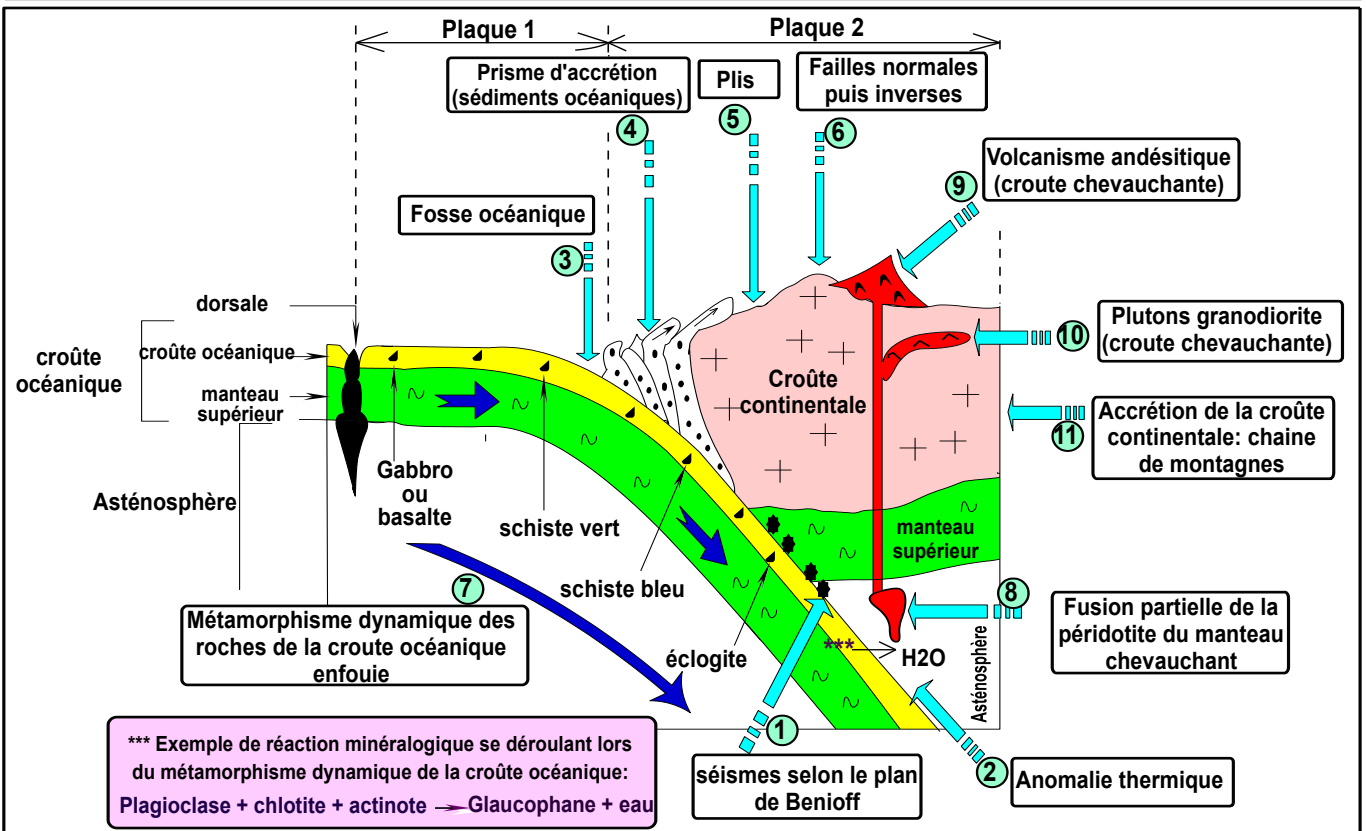


Schéma récapitulatif résumant les phénomènes géologiques résultants de la tectonique des plaques dans les zones de subduction. Zekrite.doc