

TUTORAT SANTÉ STRASBOURG



CAHIER DE REMISE À NIVEAU PREMIÈRE ET TERMINALE

Sciences de la vie

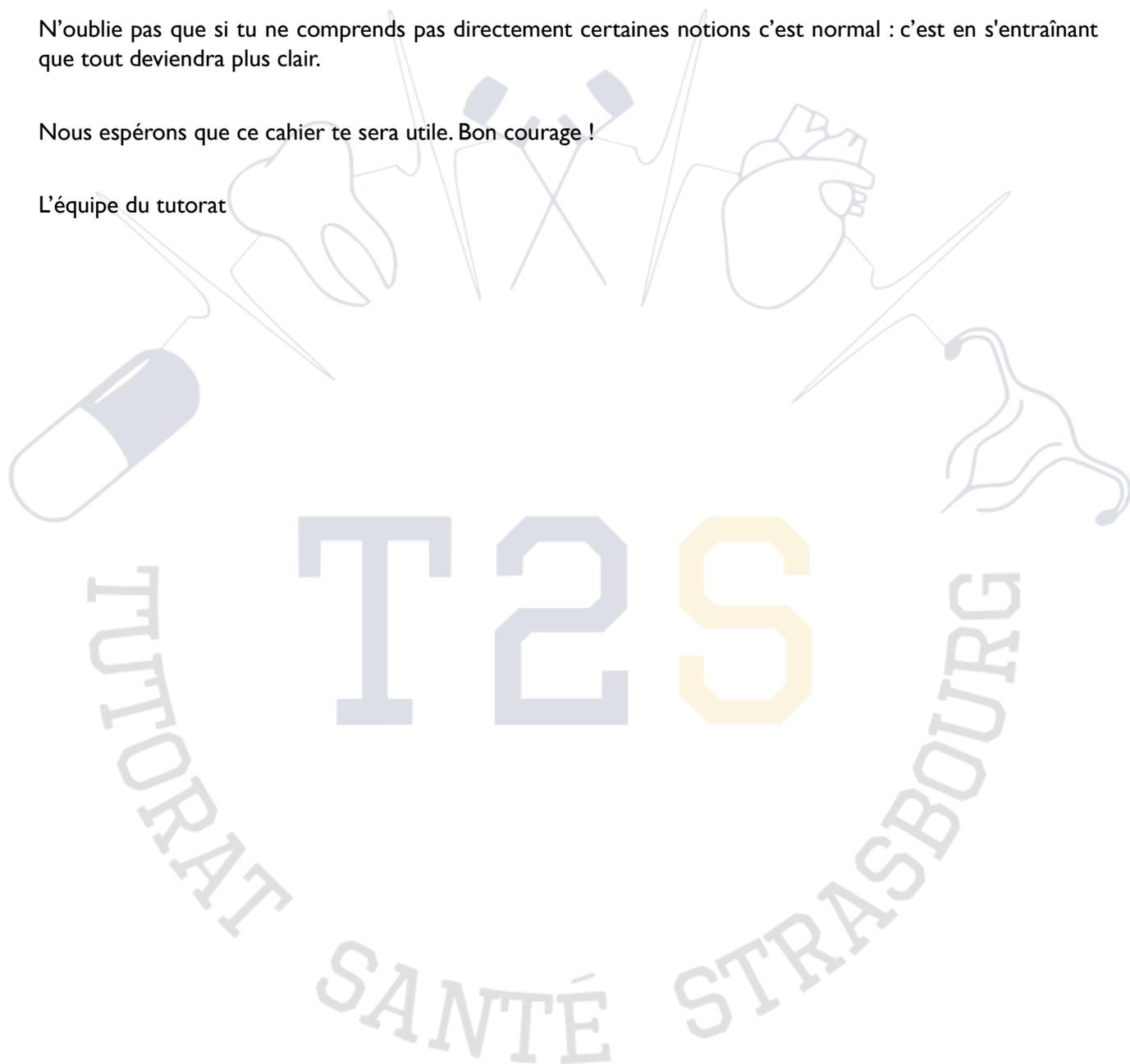
PRÉAMBULE

Dans ce cahier de remise à niveau, tu trouveras deux parties : une partie sur les notions enseignées en première et une partie sur les notions de terminale. Chaque cours est composé de vidéos explicatives, d'un texte explicatif ainsi que d'exercices corrigés (*réalisés par tes tuteurs.trices*) qui te permettront de t'exercer et de voir si tu as compris les notions abordées dans le cours.

N'oublie pas que si tu ne comprends pas directement certaines notions c'est normal : c'est en s'entraînant que tout deviendra plus clair.

Nous espérons que ce cahier te sera utile. Bon courage !

L'équipe du tutorat



SOMMAIRE

PREMIERE

Division cellulaire des eucaryotes.....	1
Accidents genetiques de la méiose.....	15
Transcription de l'ADN.....	20
Les enzymes et les protéines.....	27

TERMINALE

Le brassage génétique de l'ADN.....	36
Contrôle des flux de la glucose.....	41
Métabolisme.....	49
Cellules musculaires.....	56
Systeme nerveux et réflexe myotatique.....	61





SCIENCES DE LA VIE

REMISE À NIVEAU

PREMIÈRE



DIVISION CELLULAIRE DES EUCARYOTE

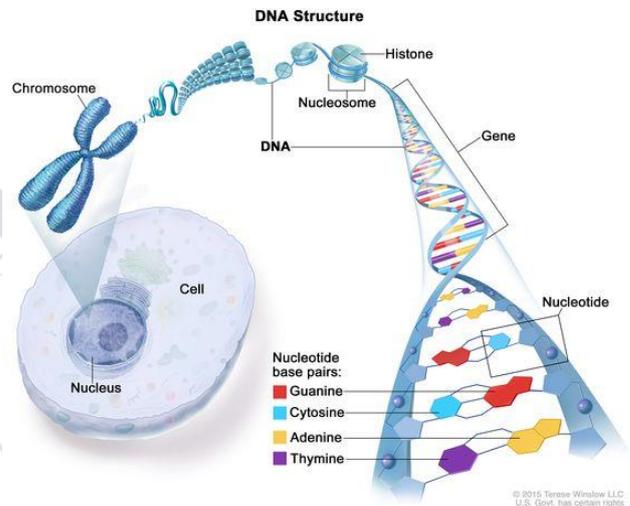
Partie 1 : le génome

I. Introduction

L'humain est composé d'un ensemble de **cellules**, qui sont organisées en **tissus** et en **organes** et qui forment ainsi notre organisme à proprement parlé.

Ces cellules possèdent **toutes** une **même information** génétique, **héritée** de nos parents : la moitié de notre génome provient du génome maternel et l'autre moitié du génome paternel.

L'information est présente en **2 exemplaires** (= génome diploïde) dans le noyau de la cellule sous forme **d'ADN** (ou acide désoxyribonucléique).



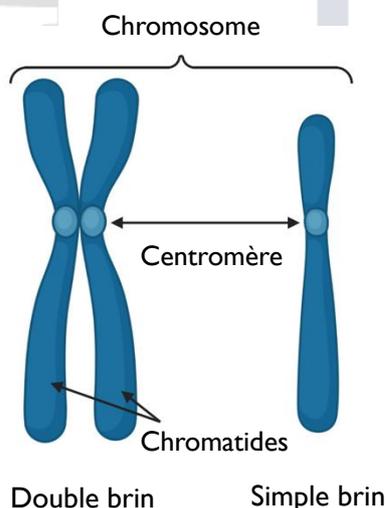
Source : [National Cancer Institute](http://www.nationalcancerinstitute.gov) ©

II. Les chromosomes

1. Définition

https://www.youtube.com/watch?v=kK7ebn_6jk0

L'**ADN** contenu dans le noyau de nos cellules est divisé en portions, qu'on appelle **chromosome**.



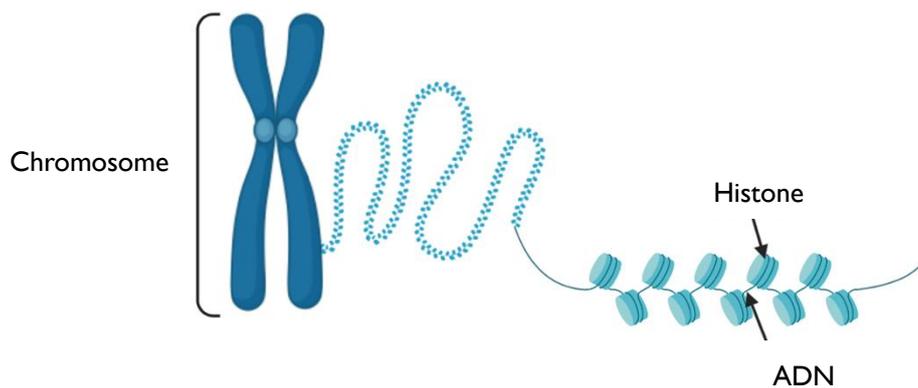
Réalisé sur Biorender.com

Chez l'être humain, il y a 23 paires de chromosomes (46 chromosomes) dans chaque cellule somatique (qui sont les cellules composant notre corps, à l'opposé des cellules germinales qui sont à l'origine des gamètes) dont :

Chacun des chromosomes possèdent **2 chromatides** (= 2 brins). Ils sont le support des **gènes** qui contiennent l'information génétique et qui permettent la transmission des caractères héréditaires.

Chaque chromosome est segmenté en de nombreux **gènes** (dont le nombre total est encore inconnu) : ce sont des « unités » d'information génétique qui sont nécessaire à la formation d'un brin d'ARN (= Acide RiboNucléique) codant pour une protéine (→ transcription).

Les chromosomes peuvent se trouver dans différents états de condensation grâce à la présence de protéines appelées **histones**. Ces protéines permettent d'enrouler l'ADN sous forme de chromosome et de le compacter. L'ADN est sous cette forme uniquement lors des **divisions cellulaires** (= mitose, méiose). Autrement, il est déroulé : cela va permettre la mise en place de différents processus lors de l'interphase (réplication, transcription etc.).



Réalisé sur [Biorender.com](https://www.biorender.com)

2. Les différents états de l'ADN

On peut schématiser les différents états que peuvent prendre les chromosomes dans le tableau ci-dessous.

État	Simple (= Haploïdie)	Double (= Diploïdie)
Décondensé : pendant l'interphase		
Condensé : pendant la mitose		

Schémas réalisés sur [Biorender.com](https://www.biorender.com)

L'être humain possède **23 paires** de chromosomes dans les cellules **diploïdes** ($2n$) dont **22 paires** d'autosome et **une paire** de chromosome sexuel (XX chez la femme et XY chez l'homme). La **diploïdie** permet de doubler les informations contenues dans l'ADN, elle évite la perte d'information et permet la compensation et la réparation en cas de dommage.



Pourquoi avoir différents états d'ADN ?

L'état **décondensé** permet la lecture de l'ADN par des complexes protéiques : on va pouvoir transcrire l'ADN en ARN et l'ARN sera traduit en protéines. L'ADN peut être **exprimé**.

L'état **condensé** empêche l'accès de l'ADN aux complexes protéiques : on ne pourra pas transcrire l'ADN et on ne produira donc pas de protéine. L'ADN n'est **pas exprimé**.

3. Chromosomes et cellules

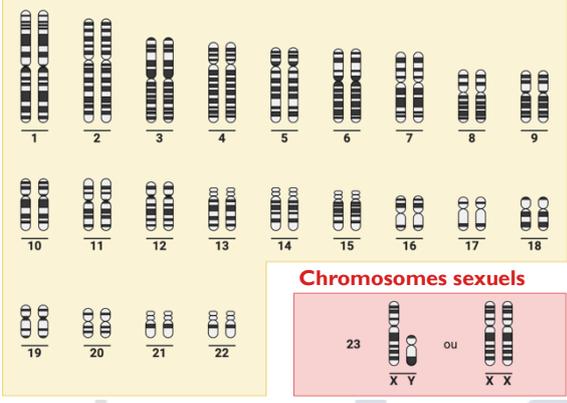
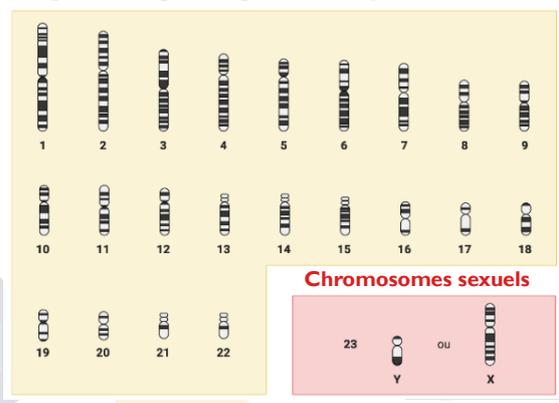
Dans le corps humain, il existe différents types de cellules :

Les cellules **somatiques** : cellules qui composent le corps et qui ne sont pas impliquées dans la production des gamètes (ovules ou spermatozoïdes).

→ Elles se divisent par **mitose**.

Les cellules germinales : cellules qui peuvent produire des gamètes (ovules ou spermatozoïdes)

→ Elles se divisent par **méiose**.

Cellule somatique	Cellule germinale
<p>Diploïde (2n) $2 \times 23 = 46$ chromosomes (23 paires de chromosomes)</p>	<p>Haploïde (n) 1×23 chromosomes (23 chromosomes de chromosomes)</p>
<p>Caryotype diploïde</p> <p>Autosomes</p>  <p>Chromosomes sexuels</p>	<p>Caryotype haploïde</p> <p>Autosomes</p>  <p>Chromosomes sexuels</p>

Caryotypes réalisés sur Biorender.com

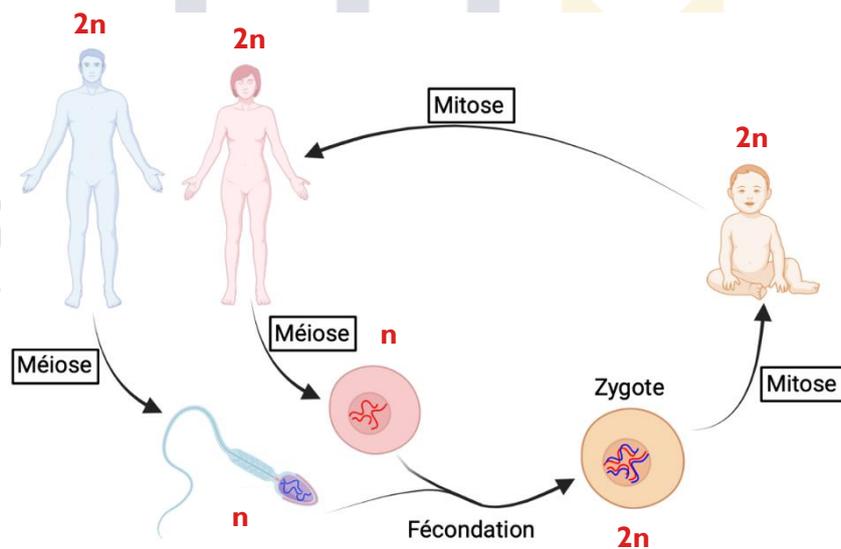


Schéma réalisé sur Biorender.com

Partie 2 : cycle cellulaire et mitose

I. Le cycle cellulaire

I. Différentes phases

Le cycle cellulaire est composé de 2 grandes phases :

- La **mitose** : c'est la phase de division cellulaire
- L'**interphase** : c'est la phase de croissance cellulaire et de réplication de l'ADN

Ces 2 grandes phases sont elles-mêmes sous-divisées en plusieurs phases : (phases décrites ultérieurement dans le cours)

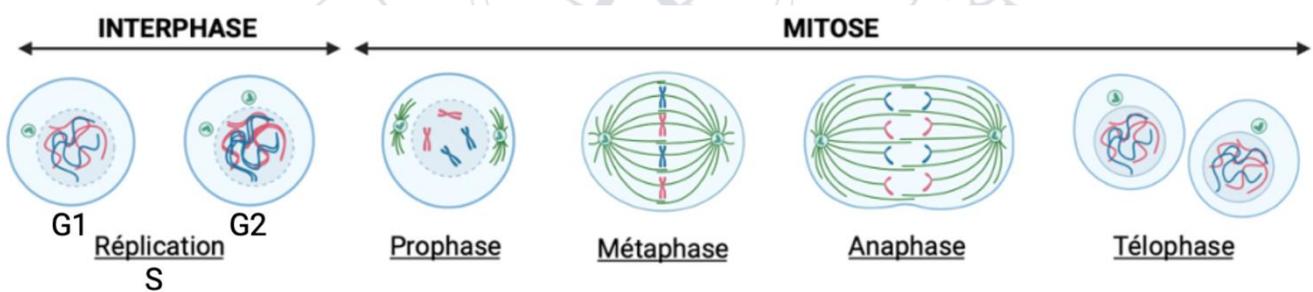


Schéma réalisé sur [Biorender.com](https://www.biorender.com)

La **phase G0** correspond à la **vie de la cellule**, on dit alors que la cellule est **quiescente**. Cette phase peut être **semi-permanente** comme dans les cellules du foie, du rein et de l'estomac qui vont pouvoir se diviser à nouveau en recommençant le cycle en phase G1. Mais elle peut aussi **durer indéfiniment** comme dans les neurones ou les hématies qui ne vont plus se diviser. C'est le moment où la cellule va **réaliser ses fonctions primaires**.

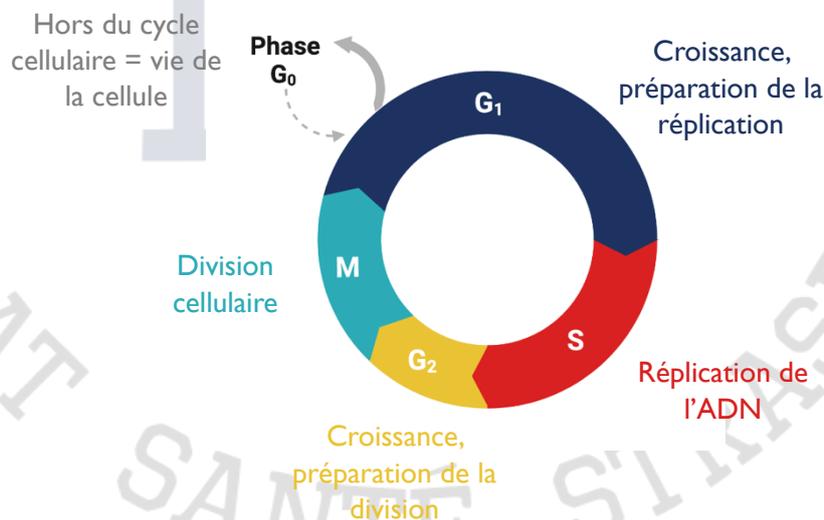


Schéma réalisé sur [Biorender.com](https://www.biorender.com)

2. Quantité d'ADN au cours du cycle cellulaire

La quantité d'ADN au cours du cycle cellulaire varie :

- **Phase G1** : la cellule sort de mitose et vient de se diviser. Sa quantité d'ADN a donc été divisée par 2 lors de la mitose et il ne reste plus que n ADN.
- **Phase S** : la cellule réplique son ADN et double la quantité d'ADN qui passe de n à $2n$.
- **Phase G2** : phase de croissance, la quantité d'ADN n'est pas modifiée.
- **Phase M** : phase de division où la cellule (dont son noyau) se divise en 2 cellules filles. La quantité d'ADN est également divisée par 2, c'est pourquoi on revient à n ADN.

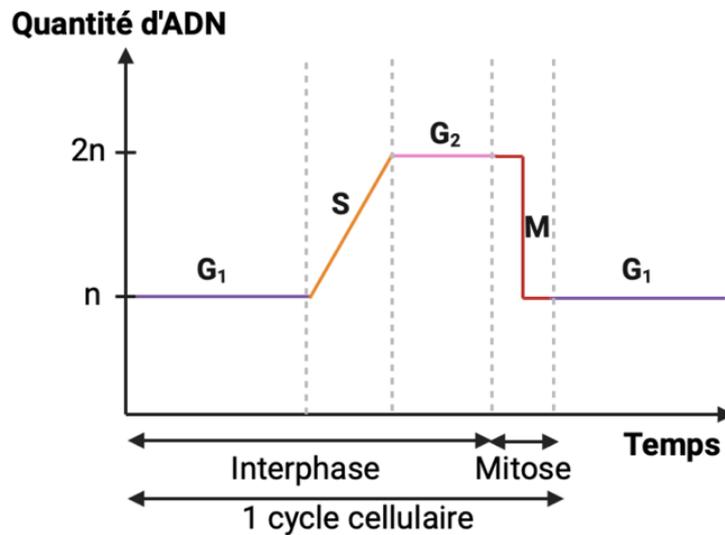


Schéma réalisé sur [Biorender.com](https://www.biorender.com)

☺ Ce schéma est très important ! Essayez de le comprendre et de l'avoir en tête un maximum ☺

3. L'interphase: https://www.youtube.com/watch?v=VXLSTd_dIKg&t=1s

C'est la période qui se situe **entre 2 mitoses**. Elle comprend les phases G1, S et G2.

Phases G1 et G2 : ce sont des phases de croissance où la cellule synthétise tous les composants nécessaires à sa division.

- G1 permet de préparer la cellule à répliquer son ADN
- G2 permet de préparer la cellule à entrer en mitose

Phase S : c'est la phase de répllication de l'ADN. Elle est nécessaire à la mitose comme à la méiose car elle permet de **doubler la quantité d'ADN** dans la cellule afin que cette dernière se divise.

→ On passe d'un ADN **simple brin** (n) à un ADN **double brin** (2n)

4. Les modèles de répllication de l'ADN : <https://www.youtube.com/watch?v=qOvLCS0qNCQ>

Plusieurs modèles de répllication ont été explorés mais l'expérience de Meselson et Stahl a permis de démontrer la pertinence de la **répllication semi-conservative**.

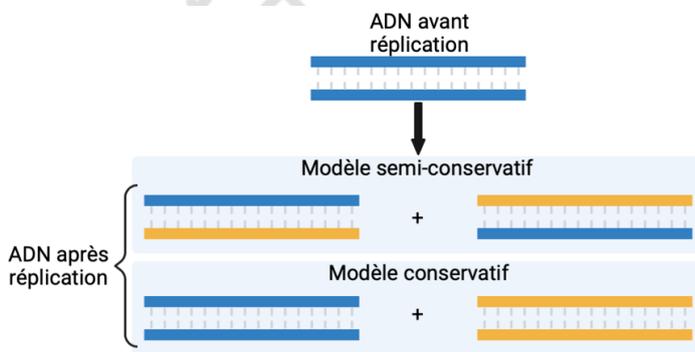


Schéma réalisé sur [Biorender.com](https://www.biorender.com)

Semi-conservative : chaque brin de la molécule d'origine sert de matrice pour la fabrication d'un nouveau brin.

Conservative : la molécule originale à 2 brins est entièrement conservée et une 2^{ème} molécule à 2 brins est intégralement reconstruites.

5. La mitose : https://www.youtube.com/watch?v=bM2UCwVz_dc

a. Définition

Division de la cellule « mère » en deux cellules « filles ».

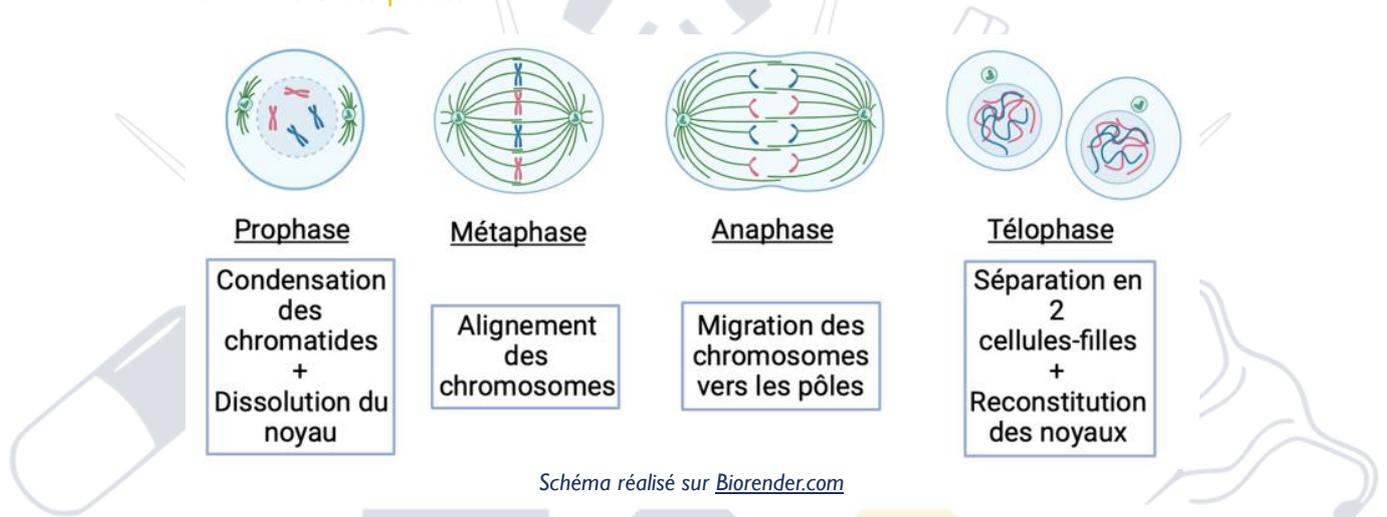
→ Elle est précédée par la duplication de tous les éléments de la cellule mère.

b. Buts

Elle permet la **croissance** et la **régénération** des tissus cellulaires. Les mitoses sont essentielles à la survie du corps.

Par exemple, nous produisons 3 millions de globules rouges par seconde et ces derniers sont produits à partir de cellules souches sanguines qui se divisent plusieurs fois !

c. Différentes phases

**1^{er} phase - la prophase :**

- Condensation des chromosomes : l'ADN se condense en s'enroulant comme une pelote de laine. Cela induit l'arrêt de la transcription de l'ADN et la formation des chromosomes sous la forme de « X ».
- Dissolution du noyau : l'enveloppe nucléaire se fragmente et induit la dispersion du matériel génétique (des chromosomes) dans tout le volume de la cellule

2^{ème} phase – la métaphase : les chromosomes s'alignent sur la plaque équatoriale de la cellule (zone de la cellule située à mi-chemin entre ses 2 pôles). Le plan équatorial est défini par l'alignement des centromères de chaque chromosome.

3^{ème} phase – l'anaphase : sous l'action d'enzyme, les deux chromatides de chaque chromosome se séparent (le centromère se « casse ») et chacune migre vers un pôle cellulaire opposé. Cette migration est permise par des protéines présentes dans le cytoplasme de la cellule qui forment des filaments. On a donc la séparation du matériel génétique de manière équitable à chaque pôle de la cellule.

4^{ème} phase – la télophase :

- La cellule se scinde en deux (on appelle ça la cytokinèse) de manière à former 2 cellules filles ayant chacune la moitié de la quantité d'ADN de la cellule mère.
- L'ADN se décondense.
- Les noyaux se reforment autour de l'ADN.

Partie 3 : Réplication de l'ADN

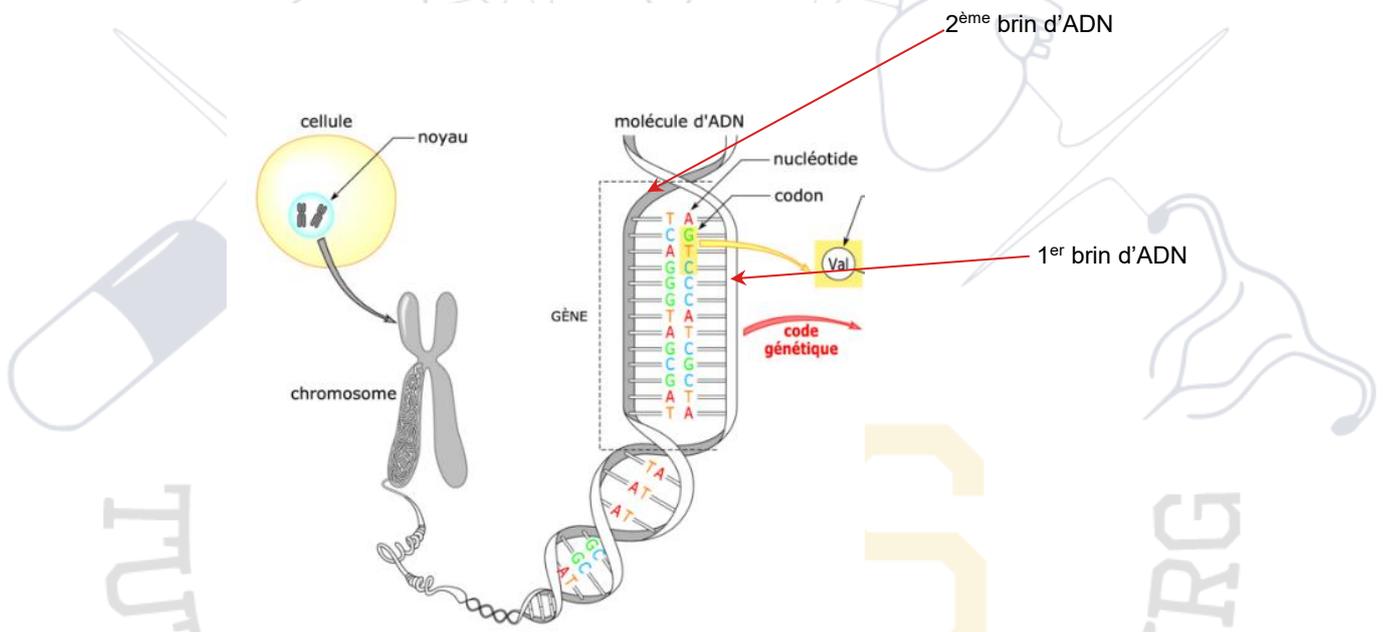
La réplication de l'ADN est une étape essentielle du cycle cellulaire : elle permet la **conservation de la quantité d'ADN** en formant deux molécules d'ADN identiques à partir d'une molécule d'ADN mère, pour permettre leur distribution égale aux deux cellules filles pendant la **mitose**.

I. La réplication : un modèle semi conservatif

I. L'ADN (Rappel)

L'ADN (=Acide Désoxyribonucléique) est le support de l'information génétique. C'est une molécule constituée de deux brins, chacun constitué d'un enchaînement de **nucléotides** formés de **bases**, enroulés en double hélice.

Il existe **4 bases azotées** différentes : **Adénine, Cytosine, Guanine, et Thymine**.

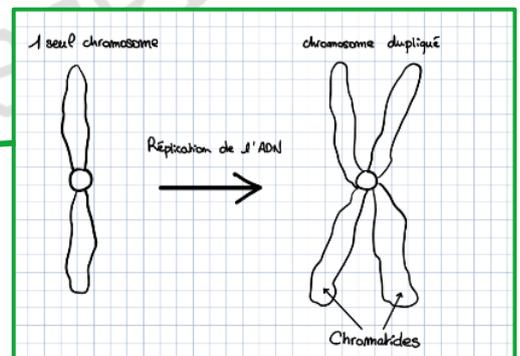
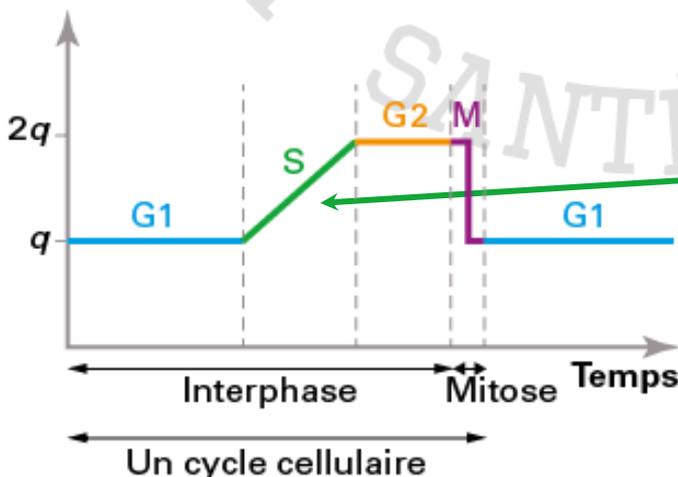


Source de l'image : © Réussite-bac

2. Le cycle cellulaire

Le cycle cellulaire est constitué de 2 étapes : la **mitose** et l'**interphase**. L'interphase comprend 3 phases : G1, S, G2. C'est au cours de ce cycle que la quantité d'ADN varie et change de forme.

Quantité d'ADN dans la cellule



Source de l'image : © Annabac

La **réplication** de l'ADN, aussi appelée **duplication**, s'effectue durant cette **phase S**. En effet, c'est durant cette phase que l'on passe d'un chromosome condensé à une chromatide vers un chromosome à 2 chromatides.

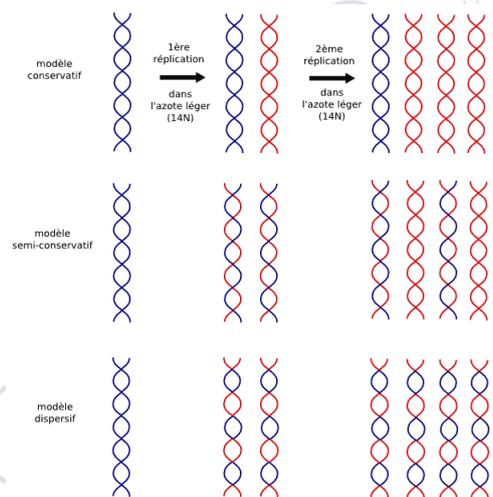
NB : N'hésitez pas à revoir la partie 3 sur le cycle cellulaire pour une meilleure compréhension

3. Expérience de Meselson et Stahl (1948)

<https://www.youtube.com/watch?v=LTUONxUOK88>

<https://www.youtube.com/watch?v=wBDaLQNwEhU>

L'expérience de Meselson et Stahl cherche à savoir sous quel modèle l'ADN se réplique. Il existe 3 modèles de réplication différents : le **modèle conservatif**, **semi-conservatif** et **dispersif**.



Source de l'image : © SVT-biologie-première

Le modèle conservatif : Modèle à partir duquel une molécule d'ADN bicaténaire "mère" sera à l'origine d'une **nouvelle molécule d'ADN bicaténaire totalement néoformée**.

Le modèle semi-conservatif : Chacun des deux brins de la molécule d'ADN bicaténaire mère sert de matrice pour la formation d'un nouveau brin complémentaire. **Chaque nouvelle molécule "fille" ne conserve donc que la moitié de la molécule "mère"**.

Le modèle dispersé : Aucun brin ne reste intact, **les nouveaux brins sont constitués à la fois d'ADN de la molécule mère et d'ADN néoformé**.

Expérience (appuyez-vous sur le schéma pour mieux comprendre)

Au cours de cette expérience, les scientifiques vont tout d'abord placer des bactéries dans de l'azote lourd ^{15}N pour que leurs ADN puissent se répliquer et ainsi incorporer l'azote, une base majeure de leurs structures (retrouvée dans les bases notamment). Une fois l'azote incorporé, ces molécules d'ADN vont être placées dans de l'azote léger ^{14}N et répliquées une première fois.

A la fin de cette première réplication, nous obtenons des molécules "**d'ADN hybrides**" qui contiennent toutes à la fois de l'azote ^{15}N et ^{14}N .

Ainsi nous pouvons **exclure le modèle conservatif** : pour que ce modèle soit validé, on aurait dû retrouver des molécules d'ADN comportant uniquement de l'azote lourd, et d'autres comportant uniquement de l'azote léger, mais pas d'hybrides comme cela a été le cas

A la suite de cette expérience, les cellules cultivées en milieu ^{14}N vont subir une deuxième réplication. à partir d'une molécule d'ADN hybride (^{14}N et ^{15}N), nous obtenons alors des molécules composées de **50% d'ADN hybride** (^{14}N et ^{15}N) et de **50% d'ADN léger** (^{14}N).

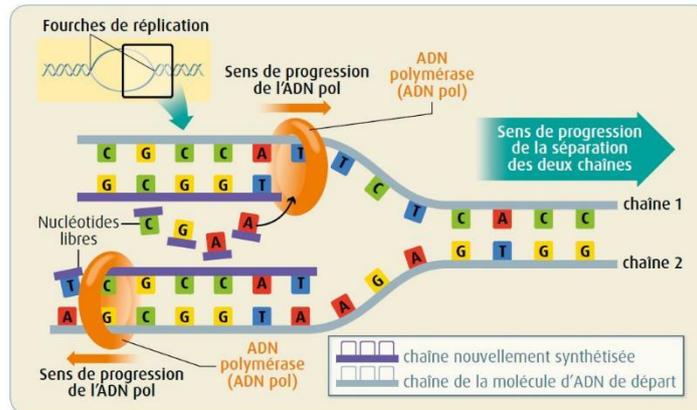
Nous pouvons conclure que l'ADN se réplique sous un modèle semi-conservatif : une molécule **d'ADN mère hybride** forme des molécules composées à part égale d'ADN hybride (issu du brin mère) et **d'ADN léger, néoformé**. Le modèle dispersé impliquerait que toutes les molécules d'ADN soient composées à 100% d'ADN hybride.

Conclusion : La réplication de l'ADN se fait donc sous un modèle semi conservatif : la molécule d'ADN néoformée contient un **brin ancien** et un **brin nouveau**.

II. Réplication de l'ADN

1. L'ADN polymérase : <https://www.youtube.com/watch?v=oebogqrX5F4>

Vidéo 2 : <https://www.youtube.com/watch?v=TNKWgcFPHqw&list=PLOZ55MwDaD9WoxSHQvvyOw64pcauGUBJN&index=4>



Source de l'image : ©Belin Education/Humensis, 2019 SVT 1^{re} enseignement de spécialité (©Amandine Wanert)

L'ADN polymérase permettant la formation d'un nouveau brin d'ADN à partir d'un brin matriciel. Cette formation se fait par **complémentarité** nous savons que d'une succession de les uns aux autres par **phosphodiester** au sein d'une même chaîne.

Ces nucléotides ne sont pas disposés au

hasard dans l'ADN. En effet, il existe ce que l'on appelle des **paires de bases**.

est une **enzyme** formation d'un (le brin **néoformé**) à d'ADN dit **matriciel**. fait par **de bases**. En effet, l'ADN est composé **nucléotides** accrochés des **liaisons** sein d'une même

sont pas disposés au

Définition : une **paire de base** est l'appariement de deux bases azotées situées sur deux brins complémentaires d'ADN. Cet appariement est réalisé par des liaisons hydrogènes.

Complémentarité de bases :

Brin matriciel	Brin néoformé
A	T
C	G
T	A
G	C

Sur ce schéma, nous pouvons voir une double hélice d'ADN séparée ainsi que 2 ADN polymérases (en orange). Ces ADN polymérases vont positionner en face de chaque nucléotide du brin matriciel son nucléotide complémentaire : ils **forment les brins néoformés** (en violet).

NB : Les ADN polymérases sont susceptibles de faire des erreurs lors de la réplication, c'est pourquoi elles possèdent une activité de correction d'erreurs

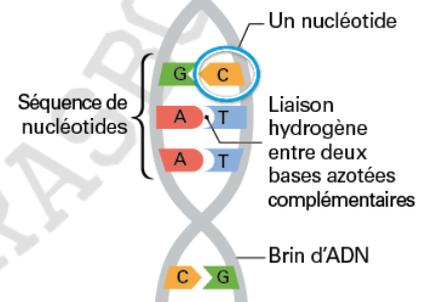
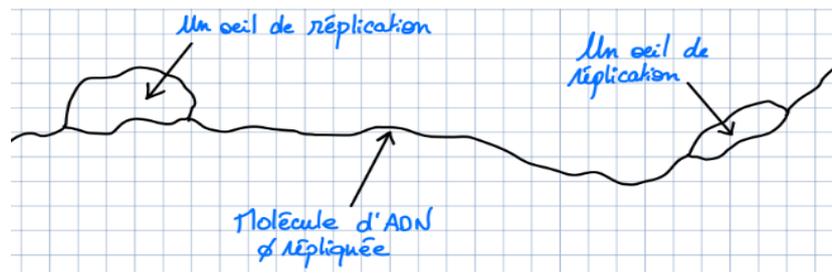


Schéma réalisé sur Biorender.com

2. Observation au Microscope électronique (MET)

Cette réplication est visible en MET par la présence de **fourches de réplication** (=œil de réplication). Elles représentent l'ouverture de la double hélice d'ADN indispensable à la réplication. Il existe de multiples fourches de réplication par chromosome, pouvant être ouvertes en même temps, ce qui permet d'augmenter la vitesse de réplication chez l'Homme.

À noter que la réplication de l'intégralité du génome peut durer **plusieurs heures**.



3. La PCR

La PCR (Polymerase Chain Reaction) est une méthode **d'amplification** de l'ADN qui repose sur le phénomène de répllication. En effet, elle utilise :

- des molécules d'ADN
- des amorces (= des fragments d'ADN dont la séquence est connue) nécessaires pour débiter la répllication
- des ADN polymérases responsables de cette amplification.

Cette technique permet ainsi d'obtenir un grand nombre de copies d'une portion d'ADN donnée.

Conclusion :

L'ADN est une molécule dupliquée au cours de la phase S grâce à une enzyme, l'ADN polymérase, permettant ainsi de conserver la quantité d'ADN après une division cellulaire. Cette duplication se fait sous un modèle semi conservatif et repose sur la complémentarité de base des nucléotides.

Partie 4 : La méiose

1. Définition

<https://www.youtube.com/watch?v=NTWIhJ0fJMk>

Double division de la cellule aboutissant à la réduction de moitié du nombre de chromosome et qui se produit au moment de la formation des cellules reproductrices ou gamètes.

- 1^{ère} division méiotique est dite **réductionnelle** : elle permet le passage de **2n** à **n** quantité d'ADN
- 2^{ème} division est dite **équationnelle** : elle conserve une quantité **n** d'ADN, il s'agit juste du passage de chromosomes **double brins** à des chromosomes **simple brins**.

2. Objectifs

La méiose est le processus qui permet la **production de gamètes**. Ces dernières sont des cellules **haploïdes** qui permettent de réaliser la reproduction sexuée.

2 gamètes, un mâle et un femelle, se rencontrent et donnent par fusion un zygote (cellule œuf). C'est à cette occasion que le nombre de chromosome (46 ou 2n) est rétabli.

3. Différentes phases

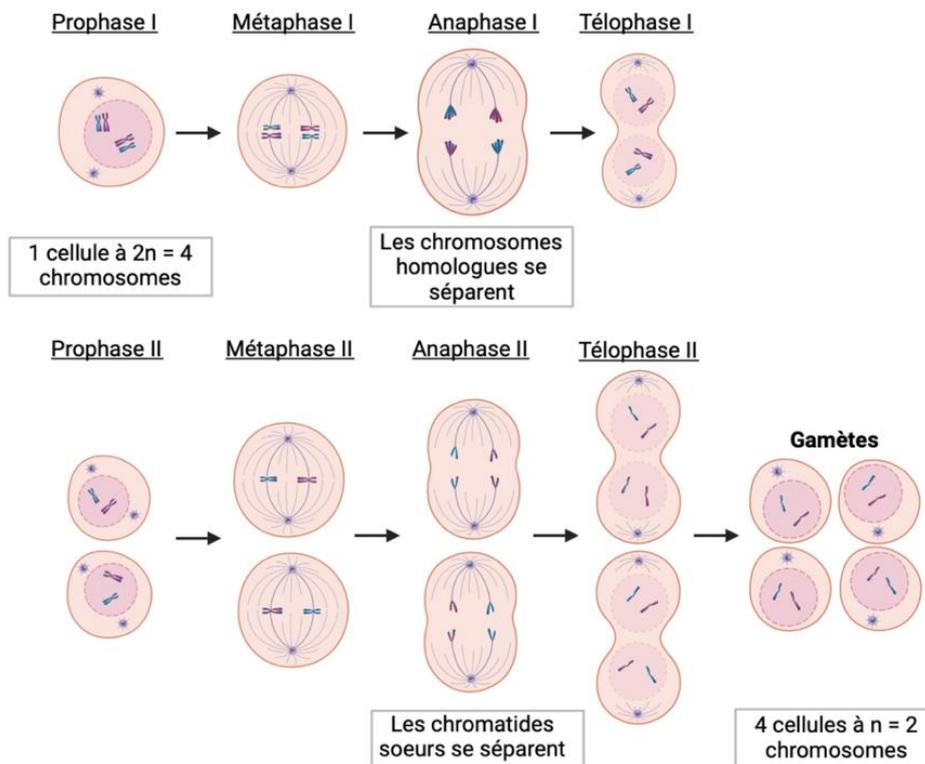


Schéma réalisé sur [Biorender.com](https://www.biorender.com)

La cellule mère de départ possède 4 chromosomes sur ce schéma : c'est un exemple pour simplifier les choses

Ce schéma est à appliquer sur une cellule humaine possédant 46 chromosomes (23 paires) !

a. Division réductionnelle

Elle est composée des mêmes 4 phases qu'une mitose classique à la différence que ce sont les paires de chromosomes homologues qui se séparent lors de l'anaphase et non les chromatides !

Lors de la métaphase I, les chromosomes homologues s'alignent sur la plaque équatoriale de la cellule et, du fait de leur proximité spatiale, peuvent échanger des fragments d'ADN et participer au brassage intrachromosomique qu'on appelle crossing-over.

b. Division équationnelle

Elle est identique à une mitose (cf II.c.4)

4. Quantité d'ADN au cours de la méiose

⚠ La quantité d'ADN dans une cellule en méiose varie différemment par rapport à une cellule en mitose.

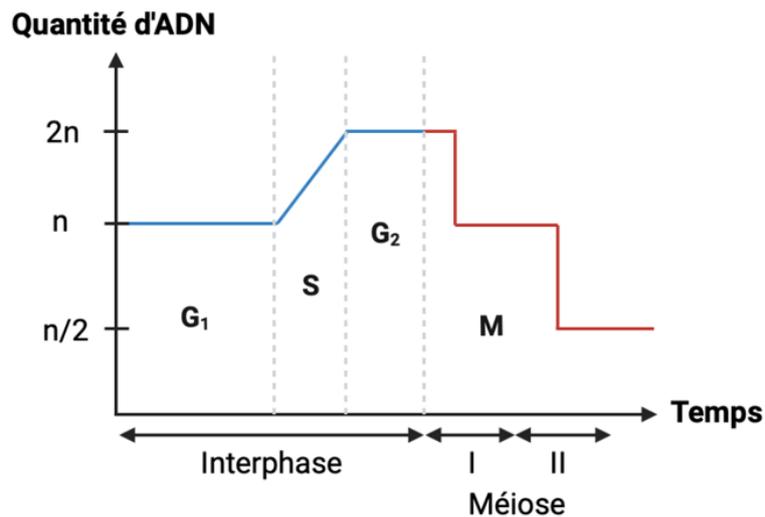


Schéma réalisé sur Biorender.com

À la fin de la méiose, on obtient bien des cellules filles haploïdes possédant chacune des chromosomes à une chromatide.

(Par comparaison : à la fin de la mitose, on obtient des cellules filles diploïdes identiques à la cellule-mère possédant chacune des chromosomes à une chromatide.)

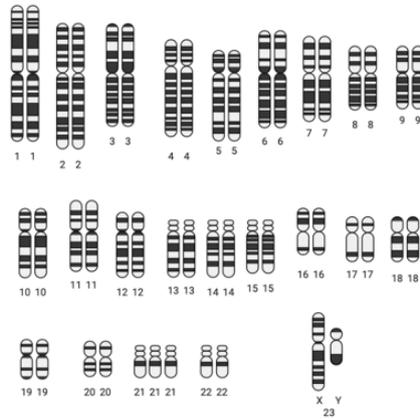


Exercices

1. Anomalies de la méiose

Sur le caryotype ci-dessous, on observe la présence de 3 chromosomes 21. Cette anomalie appelée trisomie 21 est l'une des anomalies chromosomiques les plus fréquentes.

Consigne : dessiner les étapes de la méiose qui pourraient conduire à ce caryotype particulier.



Caryotype réalisé sur [Biorender.com](https://www.biorender.com)

2. QCM sur la mitose

Quelle(s) est(sont) la(les) réponse(s) vraie(s) ?

Concernant la mitose :

- A. Elle se produit uniquement dans les cellules eucaryotes.
- B. Toutes les caractéristiques du caryotype de la cellule-mère sont conservées à l'identique.
- C. A son issue, les cellules-filles contiennent chacune 23 chromosomes doubles, elles sont donc diploïdes.
- D. Afin de réaliser la mitose, la cellule effectue une réplication conservative de son ADN.

3. Réplication

- 1) Donner le brin complémentaire de cette molécule d'ADN :
CCGTAACCTTAGAT
- 2) Parmi les propositions suivantes, laquelle est exacte ?
 - A. La réplication de l'ADN se déroule durant mitose.
 - B. La duplication de l'ADN se fait sous un modèle semi-conservatif.
 - C. Chaque molécule d'ADN est répliquée par une seule ADN polymérase.
 - D. Le brin matriciel et le brin néoformé sont identiques.
- 3) Qu'est-ce qu'une fourche de réplication ?

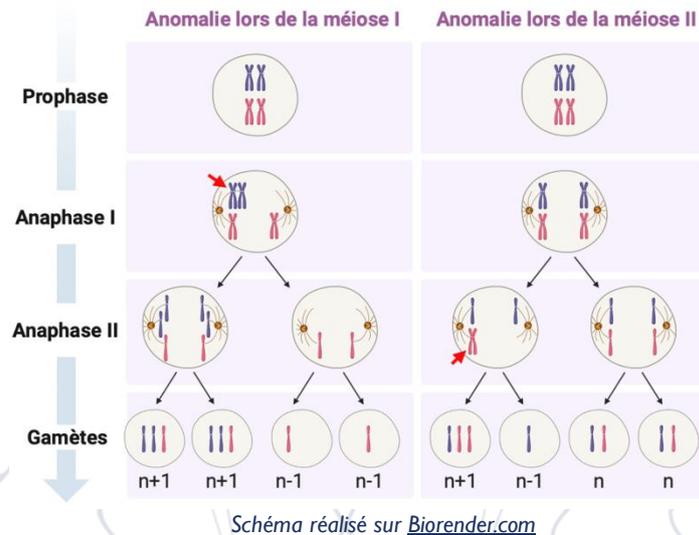
Correction

1. Anomalies de la méiose (schéma fait sur biorender)

💡 L'anomalie se produit lors de l'**Anaphase I ou II** de la méiose. L'un des chromosomes homologues ou l'une des chromatides sœurs ne se sépare pas ce qui mène à la formation :

- De gamète à $n = 3$ chromosomes qui donnera une **trisomie** si elle participe à la fécondation
- De gamète à $n = 1$ chromosome qui donnera une **monosomie** si elle participe à la fécondation

2. QCM sur la mitose



Quelle(s) est(sont) la(les) réponse(s) vraie(s) ?

Concernant la mitose :

- A. **VRAI** : Les cellules eucaryotes se caractérisent par la présence d'un noyau distinct, contrairement aux procaryotes qui n'ont pas de noyau délimité. Comme la mitose consiste en une réplication puis une division des constituants du noyau, elle ne peut se produire que dans les cellules eucaryotes !
- B. **VRAI** : Lors de la mitose, une chromatide de chaque chromosome est donnée à chaque cellule-fille. Elles sont donc génétiquement identiques à la cellule-mère, elles conservent alors toutes ses caractéristiques.
- C. **FAUX** : Les cellules-filles contiennent chacune 46 chromosomes simples. En effet, elles sont diploïdes, ce qui correspond à $2n = 2 \times 23 = 46$ chromosomes (ou 23 paires de chromosomes simples).
- D. **FAUX** : Il s'agit d'une réplication semi-conservative de l'ADN. C'est-à-dire que chaque brin de la molécule d'origine sert de matrice pour la fabrication d'un nouveau brin.

3. Partie 4

1) Donner le brin complémentaire à cette molécule d'ADN

CCGTAAC TTTAGAT (brin matriciel)

GGCATTGAAATCTA (brin néoformé)

Cf tableau sur la complémentarité des bases

2) Parmi les propositions suivantes, laquelle est exacte ?

- A. **FAUX**. La réplication se déroule durant la **phase S de l'interphase**.
- B. **VRAI**.
- C. **FAUX**. Chez l'Homme, un brin d'ADN est répliqué par **plusieurs** ADN polymérases en même temps.
- D. **FAUX**. Le brin matriciel et le brin néoformé sont **complémentaires**.

3) Une fourche de réplication (ou œil de réplication) correspond à l'ouverture des 2 brins d'ADN au cours de la réplication : elle permet la réplication de l'ADN.

Sources :

- <https://www.kartable.fr>
- <https://manuelnumeriquemax.belin.education/svt-premiere/topics/start>
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Exp%C3%A9rience_de_Meselson_et_Stahl

ACCIDENTS GÉNÉTIQUES DE LA MÉIOSE

Cours

Vidéo de cours : <https://www.youtube.com/watch?v=DnSQtlcAIOM>

La méiose permet la formation des gamètes qui sont des cellules germinales permettant le processus de reproduction. Une anomalie de méiose peut conduire à des conséquences plus ou moins graves au niveau des gamètes et par extensions au niveau des embryons et des individus qui en découlent.

Nous allons parler des différentes anomalies que l'on peut rencontrer lors d'une méiose.

I. Les non-disjonctions chromosomiques / chromatidiennes

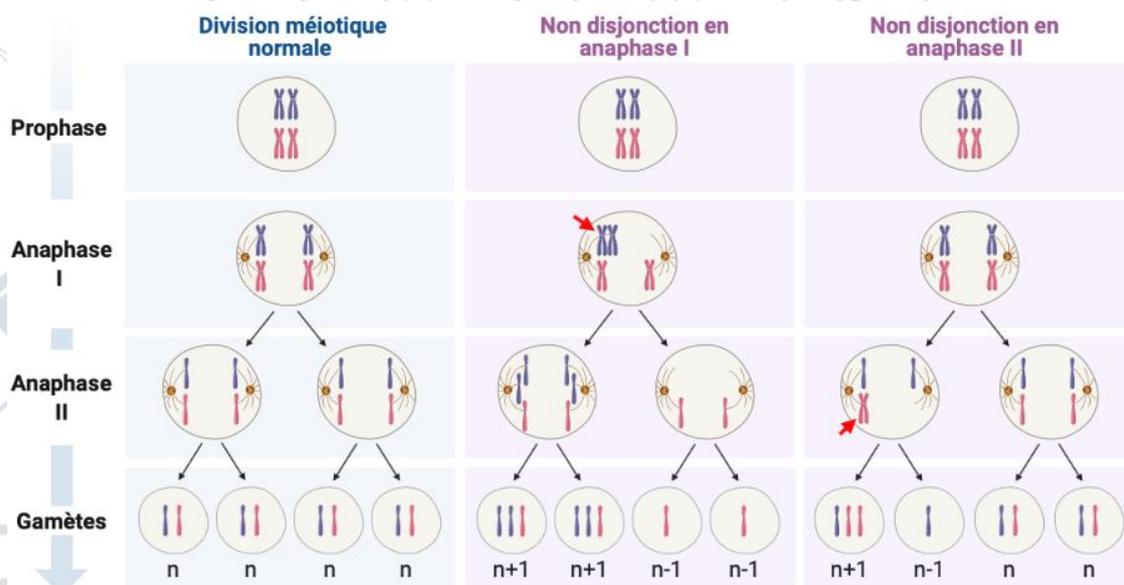


Schéma réalisé sur [Biorender.com](https://www.biorender.com)

1. Division méiotique normale (cf 1^{ère} colonne)

Pour rappel, la division méiotique normale fait passer 1 cellule mère **diploïde** (chromosomes à 2 chromatides) à 4 cellules filles **haploïdes** (chromosomes à 1 chromatide).

Rappel sur l'anaphase :

- **L'anaphase I** correspond à la séparation des paires de chromosomes homologues en 2 lots de chromosomes aux pôles de la cellule
→ **Disjonction chromosomique**
- **L'anaphase II** correspond à la séparation des chromatides de chaque chromosome en 2 lots aux pôles de la cellule
→ **Disjonction chromosomique**

2. Non-disjonction lors de l'anaphase I (cf 2^{ème} colonne)

En cas de non-disjonction lors de l'anaphase I, une paire de chromosome homologues ne se sépare pas. Il y aura donc la paire de chromosomes homologues à un pôle et aucun de ces chromosomes homologues à l'autre. Attention, cela concerne une seule paire de chromosome.

Conséquences :

- 2 cellules filles avec un chromosome en trop (*trisomie*)
- 2 cellules filles avec un chromosome en moins (*monosomie*).

3. Non disjonction lors de l'anaphase II (cf 3^{ème} colonne)

En cas de non-disjonction lors de l'anaphase II, ce sont les chromatides d'un chromosome qui ne se séparent pas. Il y aura donc le chromosome à 2 chromatides à un pôle et aucun chromosome à l'autre. Attention, cela concerne un chromosome. De plus, la première division de méiose a déjà eu lieu ce qui implique que cette anomalie concernera uniquement 2 des cellules filles finales !

Conséquences :

- 2 cellules filles normales
- 1 cellule fille avec un chromosome en trop (*trisomie*)
- 1 cellule fille avec un chromosome en moins (*monosomie*).

4. Conséquences des non-disjonctions

a. La trisomie

C'est une **aneuploïdie** ce qui veut dire que la cellule possède un nombre de chromosomes différent de l'état normal et ce nombre n'est pas un multiple de $2n$ (n étant le nombre de paires de chromosomes).

Elle se caractérise par la présence en **3 exemplaires d'un chromosome** (au lieu de 2 exemplaires). Le caryotype est de type $2n+1$.

b. La monosomie

C'est également une **aneuploïdie**.

Elle se caractérise par la présence en **un seul exemplaire d'un chromosome** (au lieu de 2 exemplaires). Le caryotype est du type $2n-1$.

c. Information complémentaire

Les **polyploïdies** sont des anomalies se caractérisant par un nombre de chromosomes supérieur ou égal à $3n$ ($4n, 5n...$). Il y a toujours en nombre pair total de chromosomes (n étant le nombre de paires de chromosomes).

Exemple : si on a $2n$ cela veut dire que chaque cellule possèdera 2 chromosomes pour chaque paire, donc 46 chromosomes en tout car $2 \times 23 = 46$, c'est la **diploïdie** !

Il faut comprendre que les aneuploïdies concernent uniquement une paire de chromosome alors que les polyploïdies concernent l'ensemble du caryotype.

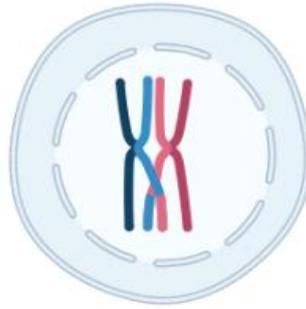
Attention : les *polyploïdies* ne sont pas des anomalies auxquelles on arrive à la suite d'une non-disjonction lors de la méiose !

II. Crossing-over inégal

1. Définition et déroulement normal

Le crossing-over correspond à l'échange mutuel de fragments de **chromatides** non-sœurs entre 2 **chromosomes** d'une même paire. Celui-ci contribue au brassage génétique et donc à l'échange d'allèles entre les chromosomes.

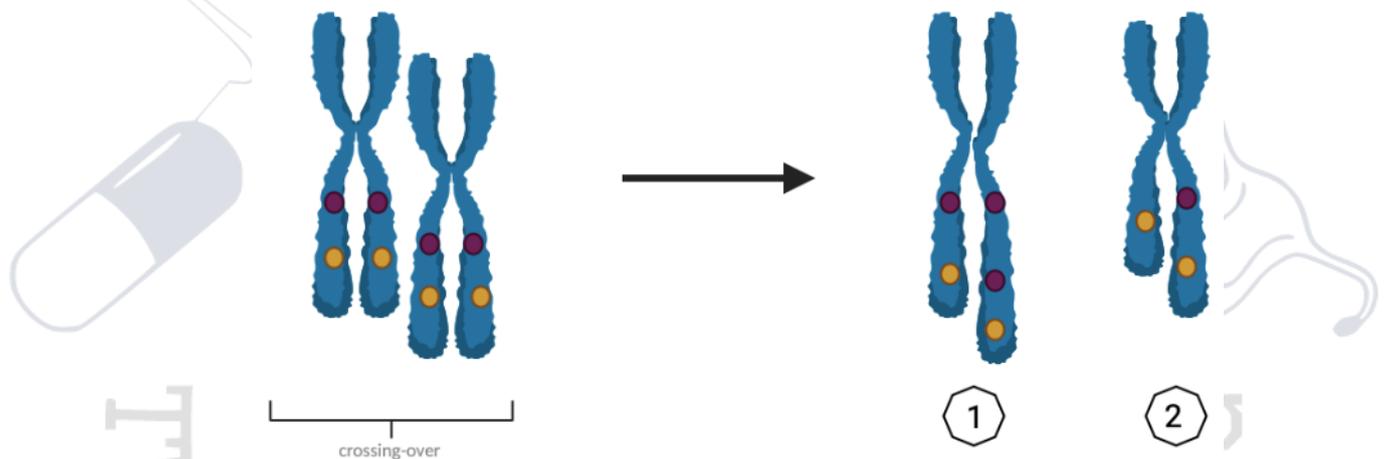
Voici un schéma montrant un crossing-over normal :

Schéma réalisé sur [Biorender.com](https://www.biorender.com)

Le crossing-over a lieu à la **fin de la prophase I** (voire au début de la métaphase I) de la méiose car c'est le moment où les paires de chromosomes homologues sont physiquement très proches. Il va donc pouvoir y avoir des accolements entre les chromosomes homologues et des échanges de fragments.

2. Anomalie de crossing-over

Lorsque le crossing-over s'effectue de manière anormale, l'échange de fragments sera tronqué et la résultante sera inégale :

Schéma réalisé sur [Biorender.com](https://www.biorender.com)

Sur le schéma ci-dessus, on remarque que l'échange des fragments est effectué à deux endroits différents sur les chromosomes concernés. Il en résultera un déséquilibre entre les 2 chromosomes.

Conséquence : perte et/ou au gain de matériel génétique

- Pour le chromosome indiqué en « 1 » on remarque la duplication de l'allèle violet sur la chromatide droite.
- Pour le chromosome indiqué en « 2 » on remarque la perte de matériel génétique sur la chromatide gauche.

Exercices

a. QCM sur les anomalies de la méiose

À propos des anomalies de la méiose, quelles sont les propositions inexactes ?

- A. La trisomie et la monosomie font partie des polyploïdies
- B. Lors de l'anaphase II, on peut retrouver une non-disjonction chromatidienne
- C. Les non-disjonctions chromosomiques peuvent donner des individus trisomiques
- D. Lors de l'anaphase II, on peut retrouver une non-disjonction chromosomique

b. Exercice

Grâce au caryotype humain ci-dessous,

- A. Détermine quelle est l'anomalie retrouvée dans ce caryotype.
- B. Après avoir déterminé l'anomalie décris les deux mécanismes possibles qui peuvent conduire à cette anomalie.

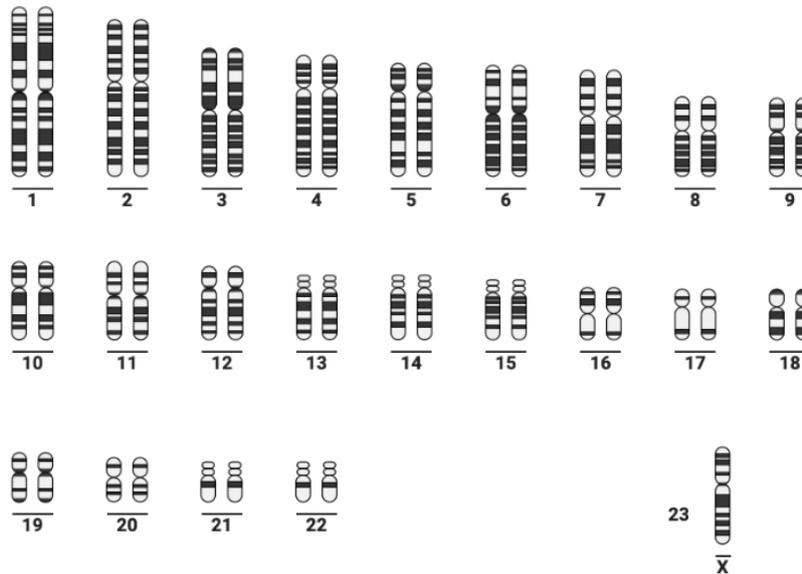


Schéma réalisé sur Biorender.com

Correction

QCM1. A propos des anomalies de la méiose, quelles sont les propositions inexactes ?

- A. **FAUX.** La trisomie et la monosomie font partie des **aneuploïdies**
- B. **VRAI.** En effet les chromosomes s'étant déjà disjoints en anaphase I. Ce sont les chromatides qui seront séparées en anaphase II.
- C. **VRAI.** Une non-disjonction chromosomique peut donner des individus monosomiques ET trisomiques mais ne donne aucun individu à caryotype normal.
- D. **FAUX.** Comme il est expliqué à la proposition B, en anaphase II se sont les chromatides qui se séparent et non les chromosomes qui eux se séparent en anaphase I.

Réponse attendue : A + D

Exercice :

- A. En regardant attentivement le caryotype, on remarque qu'il y a un chromosome manquant pour la paire 23, donc la paire gonosomique (XX chez les femmes, XY chez les hommes) . Un chromosome manquant veut dire que l'on est face à une **monosomie**.
- B. Maintenant qu'on a identifié la monosomie, on peut déterminer les 2 moyens, vu plus haut dans la fiche pour arriver à une monosomie.
 - 1) La première possibilité est une non-disjonction chromosomique, donc en anaphase I. En effet cette non-disjonction entrainera 50% de trisomies et 50% de monosomies.
 - 2) La deuxième possibilité est une non-disjonction chromatidienne, donc en anaphase II. Si S'il y a une mauvaise séparation des chromatides les individus seront soit pour 50% normaux, soit pour 25% trisomiques ou 25% monosomiques.

Voici le schéma récapitulatif ☺

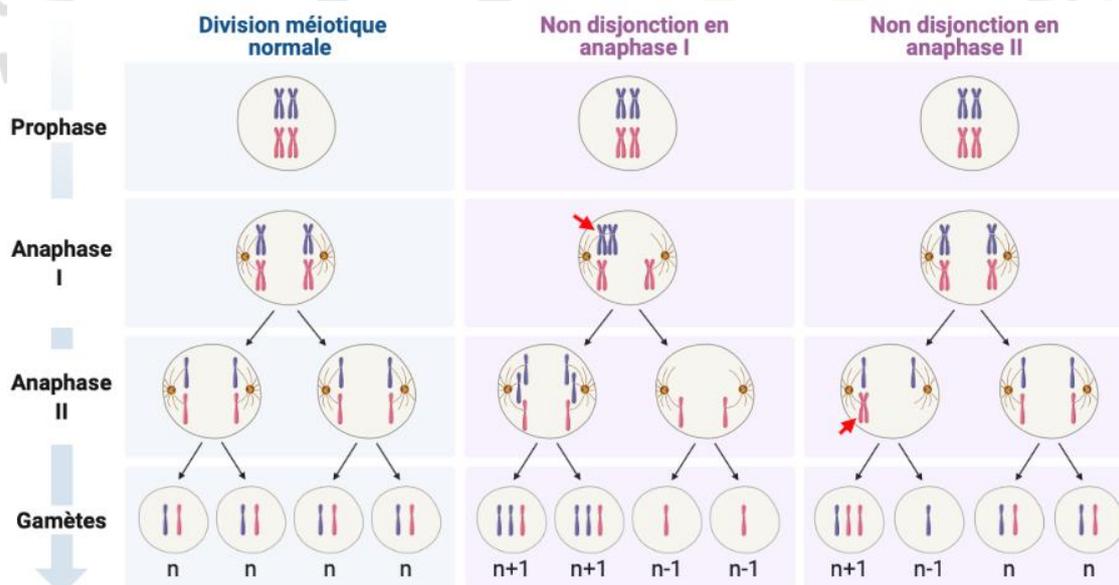


Schéma réalisé sur Biorender.com

TRANSCRIPTION DE L'ADN

Cours

Vidéo de cours : <https://youtu.be/fxnCdPOKj0c?si=YrOqAIQMCK-yXkR7>

Introduction :

L'information génétique d'un organisme est stockée dans l'ADN, une molécule présente dans le noyau des cellules eucaryotes. Cependant, l'ADN ne peut pas être directement utilisé pour synthétiser les protéines, qui sont les acteurs majeurs du fonctionnement cellulaire.

C'est là qu'intervient la transcription : un processus fondamental au cours duquel l'information contenue dans un gène est copiée sous forme d'ARN messager (ARNm). Cet ARNm servira ensuite de modèle pour la traduction en protéines.

La transcription est donc une étape essentielle de l'expression des gènes, permettant le passage du langage de l'ADN à celui de l'ARN. Ce mécanisme, bien que similaire chez tous les êtres vivants, présente des différences entre les cellules procaryotes et eucaryotes.

Dans ce cours, nous allons voir comment se déroule la transcription, quelles sont ses principales étapes et en quoi elle est indispensable à la synthèse des protéines.

I. Transcription

La transcription est la première étape de l'expression génétique, c'est un processus durant lequel la séquence d'ADN d'un gène va être copiée pour fabriquer une molécule d'ARN. Cette phase se déroule dans le noyau de la cellule. Durant cette étape les informations issues d'un premier vont servir à copier ce gène ou aboutir à la formation d'une protéine.

Objectif de la transcription : obtenir à partir de la séquence d'ADN, une copie ARN.

I. Comparaison ADN/ARN.

a. ADN

L'ADN (acide désoxyribonucléique) est une molécule présente dans le noyau des cellules eucaryotes et dans le cytoplasme des procaryotes. Il stocke l'ensemble de l'information génétique nécessaire au fonctionnement et au développement de l'organisme. Il est constitué de deux brins enroulés en une double hélice et formé de nucléotides contenant un sucre (le désoxyribose), un groupement phosphate et une base azotée (adénine, thymine, cytosine ou guanine). Sa structure stable permet de préserver l'information génétique et de la transmettre aux générations suivantes lors de la division cellulaire.

b. ARN

L'ARN (acide ribonucléique) est une molécule produite à partir de l'ADN par le processus de transcription. Contrairement à l'ADN, il est constitué d'un seul brin et contient un sucre différent, le ribose. De plus, la thymine (T) est remplacée par l'uracile (U). Il existe plusieurs types d'ARN, dont l'ARN messager (ARNm), qui sert de support à la synthèse des protéines, l'ARN ribosomal (ARNr), qui participe à la structure des ribosomes, et l'ARN de transfert (ARNt), qui transporte les acides aminés lors de la traduction. Contrairement à l'ADN, l'ARN est souvent une molécule transitoire, rapidement dégradée après avoir accompli sa fonction.

2. Les étapes de la transcription.

a. Initiation

L'initiation correspond à la première étape de la transcription. L'acteur principal de cette étape est l'ARN polymérase.

L'ARN polymérase est une enzyme possédant plusieurs sous-unités. Elle va utiliser une matrice d'ADN simple brin afin de synthétiser un brin d'ARN complémentaire. Le sens de construction du brin se fait de 5' vers 3'. Les eucaryotes possèdent 3 types différents d'ARN polymérase : I, II et III. Chacune de ces ARN polymérases est spécialisée dans la synthèse de certaines classes de gènes.

Pour débiter la synthèse du brin complémentaire, l'ARN polymérase va se lier au promoteur. Le promoteur est une séquence d'ADN situé au début du gène.

Afin de rendre accessible le brin d'ADN, l'ARN polymérase va séparer les 2 brins d'ADN.

b. Élongation

Après l'initiation, prend place l'élongation, qui correspond au stade où l'ARN devient plus long grâce à l'ajout de nucléotide. La transcription est un processus qui copie le brin d'ADN. Pour ce faire, le brin matrice va servir de modèle à l'ARN polymérase. Elle va construire le brin d'ARN en lisant base par base le brin matrice dans le sens 5' vers 3'. Pour chaque nucléotide que l'ARN polymérase va lire sur le brin d'ADN, elle va ajouter sa base complémentaire au brin d'ARN. Ainsi le brin d'ARN que l'on obtient à la fin portera les mêmes informations que le brin d'ADN non transcrit, la seule différence est que la thymine est remplacée par l'uracile dans le brin d'ARN transcrit. Ce processus repose sur la complémentarité des bases azotées. Dans l'ADN, l'adénine (A) s'apparie avec la thymine (T) et la cytosine (C) avec la guanine (G). Cependant, dans l'ARN, la thymine est remplacée par l'uracile (U). Ainsi, lorsqu'une adénine est présente sur le brin d'ADN transcrit, l'ARN polymérase incorpore un uracile dans l'ARN. Cette complémentarité permet une copie fidèle de l'information génétique sous forme d'ARN messenger, qui pourra ensuite être traduit en protéine.

c. Terminaison

La terminaison est la dernière étape de la transcription. Dans le brin matrice, on retrouve des séquences appelées terminateurs. Ces séquences signalent à l'ARN polymérase qu'elle doit arrêter la transcription. Une fois cette étape atteinte, l'ARN polymérase se détache de l'ADN, et le brin d'ARN synthétisé est libéré. Chez les procaryotes, la terminaison peut être spontanée, grâce à la formation d'une structure en épingle à cheveux dans l'ARN, ou dépendante d'une protéine spécifique comme Rho. Chez les eucaryotes, la terminaison est plus complexe et implique des signaux de polyadénylation qui préparent l'ARNm à sa maturation avant d'être exporté hors du noyau.

3. Maturation de l'ARN

Le produit final de la transcription est le pré-ARN messenger (pré-ARNm) il doit encore subir une maturation avant de pouvoir être traduit.

À l'extrémité 5' le pré-ARNm va se retrouver coiffé, on appelle ça le capping. Cette coiffe va permettre de protéger le pré-ARNm d'une dégradation prématurée. Elle intervient également au niveau de l'initiation de la synthèse protéique.

À l'extrémité 3' le pré-ARNm va se voir ajouter une queue de poly A, une succession d'adénine. Cette queue va permettre l'exportation du pré-ARNm en dehors du noyau. Certains ARN formés dans le noyau sont exportés dans le cytoplasme après une éventuelle maturation c'est le cas des ARN messenger. La queue a également une fonction de stabilisation, de protection de l'extrémité 3' de l'ARN contre les exonucléases. Elle fait également office de signal de reconnaissance pour le ribosome.

Le pré-ARNm subit également une action d'épissage. Lors de la maturation des ARN, les introns (séquence non codante) sont supprimés des séquences pré-ménagées et les exons (séquences codantes) sont conservés : c'est l'épissage. Les exons conservés peuvent être assemblés selon différentes combinaisons : c'est l'épissage alternatif. Ainsi à partir d'un gène on tient plusieurs ARN messagers et donc plusieurs protéines différentes.

II. La traduction : synthèse de protéines

La traduction correspond à la 2e étape de l'expression d'un gène. Cela va permettre de passer de l'ARN messager, fait de nucléotides en une suite d'acides aminés. Cette succession d'acides aminés correspond à une protéine et elle va être produite grâce au ribosome.

La traduction se déroule dans le **cytoplasme** de la cellule.

Le code génétique

		Deuxième nucléotide							
		U		C		A		G	
U	UUU	phényl-alanine	UCU	sérine	UAU	tyrosine	UGU	cystéine	
	UUC	leucine			UCC	STOP	UGC	tryptophane	
	UUA				UCA		UGA		
	UUG				UCG				
C	CUU	leucine	CCU	proline	CAU	histidine	CGU	arginine	
	CUC		CCC		CAC	glutamine			
	CUA		CCA		CAA				
	CUG		CCG		CAG				
A	AUU	isoleucine	ACU	thréonine	AAU	asparagine	AGU	sérine	
	AUC		ACC		AAC	lysine			
	AUA		ACA		AAA				
	AUG	ACG	AAG		arginine				
G	GUU	valine	GCU	alanine		GAU	acide aspartique	GGU	glycine
	GUC		GCC			GAC	acide glutamique		
	GUA		GCA		GAA				
	GUG		GCG		GAG				

Source : svtOlycée

I. Le code génétique

Pour permettre de synthétiser des protéines, il faut un système de correspondance entre les nucléotides de l'ARN et les acides aminés des protéines. Cela est réalisé grâce à une protéine, le ribosome, associé au code génétique.

1 codon = 3 nucléotides = 1 acide aminé (AA)

Au total il y a 64 codons différents, avec :

- 1 codon initiateur : « AUG » qui code pour la méthionine. Toutes les protéines vont donc commencer par cet acide aminé.
- 3 codons stop : « UAA », « UAG », « UGA », qui ne code pour aucune protéine et vont donc terminer la synthèse de la protéine.

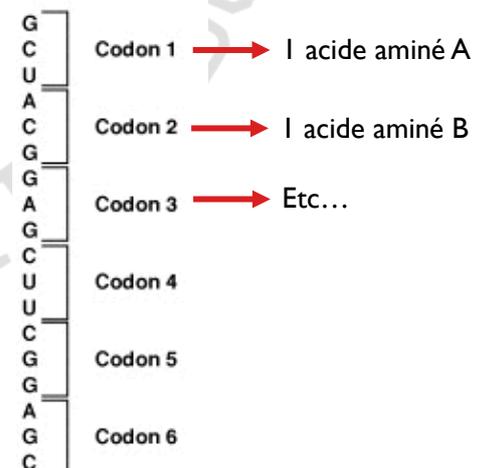
Il n'est pas nécessaire de connaître l'ensemble du code génétique mais il faut comprendre comment cela fonctionne et connaître le codon initiateur et les 3 codon stop.

Par exemple premier nucléotide est un A, le second un U et le troisième un C, l'acide aminé sera l'isoleucine.

À retenir

Ce code génétique possède **3 caractéristiques fondamentales** :

- **Universel** : identiques pour **tous les êtres vivants (à quelques exceptions près)**
- **Non ambigu** : 1 codon correspond toujours au même acide aminé. *Autrement, la cellule ne saurait pas qu'elle acide aminé assigné à un codon si un codon est assigné à plusieurs acides aminés.*



Source : Wikipedia

- **Redondant** : l'acide aminé peut être codé par plusieurs codons. Par exemple, l'histidine est codée par le codon CAU ou CAC.

2. Le ribosome

La formation des acides aminés. Ce fait par des ribosomes. C'est une structure **protéique** composée de 2 sous-unités qui vont s'agencer autour du brin d'ARN. Il y a une grande sous-unité en vert et une petite sous-unité en bleu sur le schéma.

On va pouvoir distinguer 3 étapes lors de la traduction.

a. L'initiation

Lors de cette phase, la grande et la petite sous-unité vont venir s'assembler. Et on va avoir la fixation du ribosome sur l'ARN messager (en violet). Le premier codon correspond au codon initiateur AUG qui code pour la méthionine. Et signale le départ de la traduction. Pour plus de détails, ce premier acide aminé vient se placer dans le premier emplacement de la grande sous-unité représentée ici par le site A.

💡 **Moyen mnémotechnique** : **A** comme **A**ccueil du nouveau codon.

b. L'élongation

Lors de l'élongation, la chaîne de protéines s'allonge progressivement. À chaque nouvel acide aminé ajouté, le ribosome se déplace pour faire de la place au suivant. L'acide aminé correspondant au codon suivant prend sa place dans un espace appelé site P, où il se lie au reste de la chaîne grâce à une liaison peptidique. Ce processus se répète encore et encore, jusqu'à ce que le ribosome rencontre un codon stop, qui lui indique que la synthèse est terminée.

💡 **Moyen mnémotechnique** : le site **P**, c'est là où se forme la **liaison Peptidique**, **P** comme **Peptidique** !

On parle d'élongation parce que la chaîne d'acides aminés s'allonge au fur et à mesure que de nouveaux acides aminés sont ajoutés. Ce processus se répète jusqu'à ce que le ribosome rencontre un codon stop, qui marque la fin de la synthèse.

Une **liaison peptidique** est un type de liaison chimique forte qui relie les acides aminés entre eux. Elle se forme grâce à une mise en commun d'électrons (liaison covalente) entre le groupement amine (**-NH₂**) d'un acide aminé et le groupement carboxyle (**-COOH**) d'un autre acide aminé. Ce lien est essentiel pour construire les protéines.

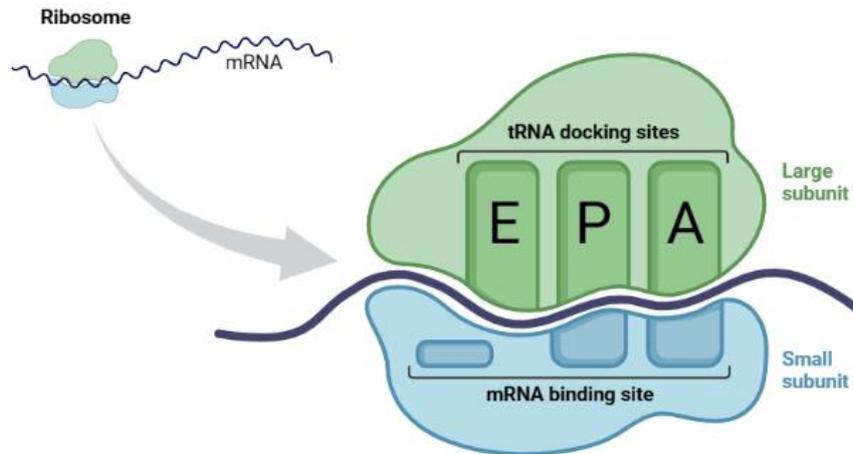
c. La terminaison

Le processus de traduction s'arrête lorsqu'un **codon stop** est lu. Il en existe trois dans le code génétique, et leur particularité est qu'ils ne codent pour aucun acide aminé. Lorsqu'un ribosome rencontre l'un de ces codons stop, cela déclenche la séparation de ses deux sous-unités.

Ce processus se déroule au niveau du **site E** du ribosome, où "E" fait référence à "Exit" (sortie en anglais). En d'autres termes, lorsque le ribosome se dissocie, la **chaîne d'acides aminés** nouvellement formée est libérée.

💡 **Moyen mnémotechnique** : E comme "Exit"

Cette chaîne d'acides aminés n'est pas encore fonctionnelle en l'état. Elle va d'abord subir différentes modifications et se **replier dans l'espace** pour adopter une structure tridimensionnelle. Ainsi, la forme de la chaîne d'acide aminé va donner des caractéristiques spécifiques à la protéine, lui permettant de remplir une fonction bien précise dans l'organisme.



Source : Biorender

III. Lien entre le génotype et le phénotype

Définition :

- Le **génotype** correspond à l'ensemble de l'**information génétique** d'un individu.
- Le **phénotype** correspond aux **caractéristiques observables** d'un individu, et il est visible à **différentes échelles** : moléculaires, cellulaires et macroscopiques. (= ce qui est visible à l'œil nu ex : couleur de cheveux, de peau, forme du visage etc).

Les protéines fabriquées par l'organisme sont responsables des différentes caractéristiques des individus (donc du phénotype). Chaque protéine est codée par un **gène**, et une mutation dans ce gène peut entraîner une modification de l'**ARN messager**, ce qui peut altérer la structure ou le fonctionnement de la protéine. Ces modifications peuvent affecter le repliement ou la composition en acides aminés de la protéine pouvant être la source de pathologie.

Ci-dessous deux exemples de maladies causées par des mutations génétiques. Ces exemples ne sont pas à mémoriser, mais il faut comprendre les relations de cause à effet entre le génotype et le phénotype.

- **Exemple de la drépanocytose** : La drépanocytose est une maladie hématologique où l'on va avoir un changement dans la séquence de la protéine codant pour une chaîne de l'hémoglobine. La glutamine sera remplacée par de la valine dans la chaîne de l'hémoglobine ce qui va causer entre autres une malformation des hématies. Ce changement d'acide aminé peut être causé soit par une mutation de l'ADN soit par un problème de transcription.
- **Exemple de la mucoviscidose** : On peut prendre l'exemple de la mucoviscidose, une maladie génétique grave, qui se traduit par des troubles digestifs et respiratoires. Cette maladie est impliquée par le gène CFTR, localisée sur le chromosome 7. Ce gène code pour la protéine CFTR, composée de différents acides aminés. Cette protéine est synthétisée par les cellules tapissant les voies respiratoires et digestives où elle va participer à la production d'un mucus fluide. Or, chez les malades, cette protéine ne remplit plus son rôle et engendre des modifications du mucus, qui devient alors épais et visqueux. Une mutation dans la séquence d'ADN sur le chromosome numéro 7 a été découverte engendrant une modification de l'ARN messager, impliquant donc la traduction d'une protéine erronée causant les différents symptômes. On peut ainsi classer les conséquences de cette variation sur différentes échelles.

Les différentes échelles du vivant (mucoviscidose)	Génotype	Phénotype moléculaire	Phénotype cellulaire	Phénotype macroscopique
Conséquences	Mutation d'un seul gène CFTR sur le chromosome numéro 7	Protéines CFTR modifiées (repliement ou la structure)	Production d'un mucus épais et visqueux par les cellules respiratoires et digestives	Symptôme respiratoire et digestif (difficulté respiratoire, bronchite, douleur abdominale, diarrhée etc...)

IV. Conclusion

L'expression d'un gène se fait en plusieurs étapes : synthèse d'un ARN dans le noyau (**transcription** par une **ARN polymérase**), exportation de l'ARN messager dans cytoplasme où il commande la **synthèse de la protéine (traduction)** au niveau des **ribosomes** grâce au code génétique (système de correspondance entre codon de l'ARNm et acide aminé)

1. Certains ARN produits dans le noyau subissent une **maturation** avant leur exportation dans le cytoplasme. Par exemple, au cours de l'épissage alternatif d'un ARN pré-messager, plusieurs ARN messagers différents sont produits par élimination des introns, qui seront à l'origine d'autant de protéines différentes. Ainsi à partir d'un seul gène, on peut obtenir plusieurs protéines différentes.

2. Le passage de l'ARN messager à une suite d'acides aminés et permis grâce à la traduction. Le ribosome va permettre de lire et d'assembler les acides aminés entre eux. Et cette correspondance est faite grâce au code génétique qui est **universel, non ambigu et redondant**.

3. L'expression des gènes est **régulée** par des facteurs internes et externes à la cellule. Il peut y avoir une erreur à chacune de ces différentes étapes causant la variabilité entre les individus comme différentes pathologies ayant une répercussion sur les différentes échelles.

MOTS-CLÉS : transcription – traduction – maturation – ARN pré-messager – ARNm – codon – ribosomes – code génétique – ARN polymérase – exons – introns

Exercices

Exercice I :

Complétez le tableau ci-dessous en comparant l'ADN et l'ARN selon les critères indiqués. Pour chaque caractéristique, indiquez les différences entre ces deux types d'acides nucléiques.

	ADN	ARN
Nombre de chaîne(s)		
Bases azotées		
Composition (du sucre)		
Fonction		
Durée de vie		

Exercice 2 : Mission transcription

Tu es un biologiste travaillant dans un laboratoire et tu viens de découvrir une séquence d'ADN contenant un gène inconnu. Ta mission est de transcrire cette séquence en ARN messager pour comprendre son rôle !

Consignes :

Lis attentivement la séquence d'ADN ci-dessous (brin transcrit).

Applique la règle de complémentarité pour obtenir la séquence d'ARNm correspondante.

Vérifie si ton résultat est correct avec la correction donnée à la fin.

Voici une séquence du brin transcrit de l'ADN :

TAC GGC ATA TTT CGA CAG

Questions :

- 1) Quelle est la séquence d'ARNm correspondante ?
- 2) Quelle est l'enzyme responsable de la transcription ?
- 3) Que devient cet ARNm après la transcription dans une cellule eucaryote ?

Correction

Exercice 1 :

	ADN	ARN
Nombre de chaîne	2 : en double brin ou en double hélice	1 : simple brin
Bases azotées	A, T, G, C	A, U, G, C
Composition (du sucre)	Désoxyribose (<i>le D de ADN</i>)	Ribose (<i>le R de ARN</i>)
Fonction	Stockage de l'information génétique	Synthèse de protéines
Durée de vie	Longue	Courte <i>L'ARN sera rapidement dégradé, on ne va pas avoir une accumulation d'ancien ARN dans notre corps</i>

Exercice 2 :

- 1) Séquence d'ARNm attendue : AUG CCG UAU AAA GCU GUC
- 2) L'enzyme responsable est l'ARN polymérase.
- 3) L'ARNm subit une maturation : ajout d'une coiffe, d'une queue poly-A et élimination des introns avant d'être exporté dans le cytoplasme pour la traduction.

LES ENZYMES ET LES PROTÉINES

Cours

I. Rappels

I. Acides Aminés

Les acides aminés sont des petites molécules, qui assemblées ensemble **forment une protéine**. Il existe 20 acides aminés au total, 10 sont présents naturellement dans notre corps et les 10 autres sont dits essentiels, **ils ne sont pas synthétisés dans notre corps et doivent être apportés par l'alimentation**.

La structure de base d'un acide aminé est un carbone central lié à un groupement amine (NH₂), un groupement carboxylique (COOH) ainsi qu'un radical spécifique à chaque acide aminé.

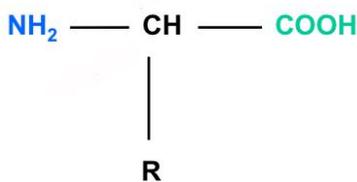


schéma issu du cours de LISpS du Dr. LAMOUR

Protéines

Une protéine est une molécule qui réalise des tâches dans la cellule, il en existe un grand nombre. Une protéine est **constituée d'un assemblage d'acides aminés**. L'ADN, qui contient l'information génétique, est transcrit en ARN qui sera lui-même traduit en une protéine (cf chapitre Transcription de l'ADN), une protéine est donc **issue de l'expression de l'information génétique**. Certaines protéines sont retrouvées dans toutes les cellules, tandis que d'autres ne se trouvent que dans certaines cellules, cela permet de donner une **fonction à la cellule et de la spécialiser**.

II. Enzymes

I. Catalyse et Spécificité

a. Catalyse

Une enzyme est une **protéine qui accélère une réaction chimique** et permet donc des processus essentiels, tels que la production d'énergie ou bien la digestion. On parle donc de **catalyseur**, car sans les enzymes, la digestion pourrait prendre des années, au lieu de juste quelques heures, et la vie ne serait pas possible. Afin d'augmenter la vitesse, **l'enzyme va abaisser l'énergie d'activation d'une réaction**, il y aura donc moins d'énergie nécessaire et la réaction se fera alors plus rapidement. Attention, au cours d'une réaction catalysée par une enzyme, **l'enzyme reste intacte et ne change pas** !

b. Spécificité

La composition en acide aminé du site actif confère une **double spécificité à l'enzyme** : une spécificité d'action et une spécificité de substrat. La spécificité d'action signifie que l'enzyme réalise toujours la même action, et la spécificité de substrat implique qu'elle agit toujours sur le même substrat (cela sera approfondi plus tard). Par exemple, l'amylase est une enzyme qui clive l'amidon en maltose (glucide composé de deux glucoses). De plus les enzymes nécessitent des conditions de pH, de température et de concentration particulières.

2. Notion de substrat et produits

Les substrats et les produits sont au cœur des réactions enzymatiques. Ces dernières sont **responsables de tous les processus biologiques** et permettent à la cellule de produire tout ce dont elle nécessite pour son bon fonctionnement (nutriment, énergie, molécules essentielles...). Ainsi il est important de comprendre leur principe et déroulement.

Une réaction enzymatique implique l'interaction d'une enzyme avec une molécule spécifique appelée **substrat**. Cette interaction conduit à la **transformation du substrat en un ou plusieurs produits**.

Le mécanisme se déroule en deux étapes. Il peut être résumé par l'équation suivante : **$E+S \rightarrow ES \rightarrow E+P$** (enzyme + substrat --> complexe enzyme-substrat --> enzyme et produit). Le complexe ES est transitoire. **L'enzyme se retrouve donc intacte** à la fin de la réaction et peut interagir avec une nouvelle molécule de substrat.

3. Substrat

a. Définition

Un substrat est une **molécule spécifique sur laquelle une enzyme agit** pour catalyser une réaction chimique. Le substrat est **transformé en produit** par l'enzyme. Pour cela, le substrat se fixe sur l'enzyme et cela va permettre la réaction enzymatique.

Logiciel interactif pour visualiser des enzymes en 3D et pour visualiser les interactions enzyme-substrat : <https://www.umass.edu/microbio/chime/>

b. Spécificité du substrat et notion de site actif

Il est important de comprendre que la **relation entre enzyme et substrat est très spécifique**.

Tout d'abord, le substrat ne va pas se fixer n'importe où sur l'enzyme. Chaque enzyme possède un **site actif**, qui est constitué de cavités dues au **repliement de la protéine** (les protéines ont une structure tridimensionnelle). Le site actif comprend un site de reconnaissance au substrat (et un site catalytique conf...). Ce site de reconnaissance est aussi appelé site de liaison ; il reconnaît et fixe une partie spécifique du substrat par complémentarité de forme. La forme du substrat doit correspondre parfaitement à celle du site actif de l'enzyme, cette liaison est comparable à une **clé qui s'insère dans une serrure** : seule la clé appropriée peut rentrer dans la serrure. Chaque enzyme a une **forme unique de site actif**, ce qui fait la **spécificité du substrat**.

La majorité des enzymes ne peuvent agir que sur un seul substrat, donc on peut dire qu'elles sont spécifiques de leur substrat. C'est une des définitions élémentaires des enzymes.

4. Produit

a. Définition

Le produit est le **résultat de la transformation du substrat par l'action d'une enzyme**. Il est directement lié à l'activité enzymatique et à la transformation du substrat. Il représente le résultat final de la réaction enzymatique.

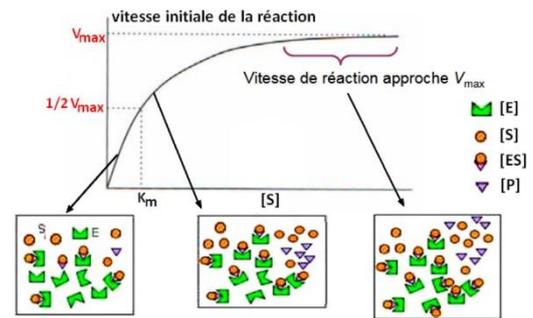
b. Rôle dans les voies métaboliques

Le produit d'une réaction enzymatique n'est **pas toujours le produit final d'une voie métabolique**. Il peut souvent servir d'intermédiaire, c'est-à-dire de molécule qui sera transformée à son tour par une autre enzyme, notamment dans les voies métaboliques. Les voies métaboliques sont des **séquences de réactions biochimiques interconnectées**, où le produit d'une réaction devient le substrat de la réaction suivante, cela crée une **chaîne de transformation**.

III. Vitesse de la réaction enzymatique

1. Définition de la vitesse de la réaction enzymatique

La vitesse de la réaction est définie comme la **quantité de substrat transformé ou la quantité de produit apparu par unité de temps** (ces deux quantités étant équivalentes). Au cours de cette réaction, la **quantité de substrat diminue** progressivement, tandis que **celle du produit augmente**. Pour mieux comprendre : lorsqu'une enzyme catalyse une réaction, **elle accélère la transformation d'un substrat en produit**. La vitesse de réaction mesure à quelle rapidité cette transformation se produit.



https://www.svt-a-feuillade.fr/pages/doc_spe_Prem/Cours-TH1A-CH3-enzymes1302185064.pdf

On peut évaluer la vitesse de la réaction par la **méthode graphique des tangentes**. Pour cela on réalise un graphique montrant la concentration de produit formé au cours du temps. La vitesse est alors évaluée par la tangente à l'origine V_i (vitesse initiale). On utilise cette vitesse en particulier car elle correspond à la vitesse maximale (on verra après pourquoi). Plus la pente de la **tangente V_i** est forte, plus la vitesse est importante. Pour calculer la V_i à partir d'une courbe, il suffit de tracer la tangente en T_0 , sa pente donnera la vitesse.

Une vidéo pour bien comprendre le calcul de la vitesse initiale de la réaction enzymatique :

https://www.youtube.com/watch?v=j_Ysv_UzVzc

2. Vitesse de la réaction en fonction de la concentration en substrat

Quelle que soit la concentration initiale en substrat, **la vitesse de la réaction diminue avec le temps**. Au début de la réaction, une **augmentation de la concentration du substrat entraîne une augmentation de la vitesse de la réaction**. Cela s'explique par le fait qu'il y a plus de molécules de substrat disponibles pour se lier aux sites actifs des enzymes, alors si plus de substrats se fixent sur les sites actifs, la réaction va plus vite car il y aura plus de transformations de substrats en produits en même temps. La vitesse de la réaction varie donc en fonction de la concentration en substrat.

La vitesse de la réaction va augmenter avec la concentration en substrat jusqu'à atteindre un **plateau V_{max}** , la vitesse maximale. **La V_{max} est atteinte lorsque tous les sites actifs de l'enzyme sont saturés par le substrat**.

A V_{max} , l'enzyme travaille à sa capacité maximale, et l'ajout de substrat supplémentaire n'augmente plus la vitesse de la réaction, ce qui explique le plateau sur la courbe. De même, **quand la concentration d'enzyme est plus élevée, la vitesse de la réaction va augmenter**.

3. Vitesse de la réaction en fonction de la concentration en produit

Dans certaines réactions enzymatiques, **le produit de la réaction peut agir comme un inhibiteur de l'enzyme qui catalyse la réaction**.

Ce mécanisme est appelé **rétro-inhibition** et il s'agit d'un moyen de réguler la production du produit. Lorsque la concentration du produit devient trop élevée, il se lie à l'enzyme (généralement à un site autre que le site actif), ce qui modifie la forme de l'enzyme et réduit son activité.

Cela empêche ainsi l'accumulation excessive de produit et le gaspillage de ressources, ce phénomène est présent notamment pour le contrôle des voies métaboliques.

4. Vitesse de la réaction en fonction de la concentration en enzyme

La concentration en enzyme influence directement la vitesse d'une réaction enzymatique, car les enzymes sont responsables de la transformation des substrats en produits.

Lorsque la concentration en enzyme est élevée, il y a **plus de sites actifs disponibles** pour fixer les substrats. Cela permet à un plus grand nombre de substrats d'être transformés simultanément, ce qui accélère la réaction. Plus il y a d'enzymes, plus la réaction est rapide, **tant que le substrat est en quantité suffisante**.

À l'inverse, si la concentration en enzyme est faible, il y a **moins de sites actifs disponibles**, donc moins de substrats peuvent être transformés à la fois. La réaction est alors plus lente, car chaque enzyme doit attendre d'avoir terminé son action avant de fixer un nouveau substrat.

Cependant, **cette augmentation de la vitesse a une limite**. Si la concentration en enzyme continue d'augmenter mais que le substrat devient rare, alors la vitesse de la réaction n'augmentera plus, car il n'y aura plus assez de substrats pour que toutes les enzymes puissent agir en même temps.



À retenir

Il existe 20 acides aminés qui sont les briques du vivant : l'association d'acides aminés donnent une protéine.

Une protéine permet à la cellule de réaliser certaines fonctions.

Les enzymes sont des catalyseurs, qui ont une double spécificité et ne sont pas modifiés par les réactions dans lesquelles elles interviennent.

Les enzymes sont spécifiques de leur substrat (notamment via leur site actif).

Plusieurs facteurs peuvent influencer la vitesse de la réaction enzymatique (C en substrat, C en enzyme...).

Ressources complémentaires :

<https://innoverensvt.org/category/chapitres-de-1ere-spe/>

https://www.svt-a-feuillade.fr/pages/doc_spe_Prem/Cours-TH1A-CH3-enzymes|302185064.pdf

<https://www.kartable.fr/ressources/svt/cours/les-enzymes-des-biomolecules-aux-proprietes-catalytiques/51135>

Exercices

Exercice I : QCM

- 1) Les protéines résultent de l'assemblage de molécules. Quelles sont ces molécules ?
 - A. Glucides
 - B. Lipides
 - C. Acides Aminés
 - D. ADN

- 2) Quel est le rôle des enzymes ?
 - A. Détruire les cellules
 - B. Accélérer une réaction chimique
 - C. Produire de l'énergie
 - D. Stocker des nutriments

- 3) Concernant le mode d'action d'une enzyme, quelle est la proposition exacte ?
 - A. Elle augmente l'énergie d'activation
 - B. Elle modifie les produits de la réaction
 - C. Elle diminue l'énergie d'activation
 - D. Elle ralentit la réaction

- 4) Parmi les propositions suivantes, quelle est celle qui fait référence à la partie de l'enzyme qui permet de fixer le substrat ?
 - A. La coenzyme
 - B. Le site actif
 - C. Le site allostérique
 - D. La membrane cellulaire

Exercice 2 : Application calculatoire

Expérience 1 : Influence de la concentration en substrat

Protocole expérimental :

1. On réalise une série d'expériences avec **une même concentration en enzyme**, mais avec **des concentrations en substrat différentes**.
2. On mesure, toutes les **10 secondes**, la quantité de **produit formé**.
3. On représente graphiquement l'évolution de la concentration du produit en fonction du temps.
4. On trace la **tangente à l'origine** pour déterminer la **vitesse initiale V_i** .

Données expérimentales :

Temps (s)	[Produit] (μmol) pour [S] = 0,1 M	[Produit] (μmol) pour [S] = 0,2 M	[Produit] (μmol) pour [S] = 0,4 M
0	0	0	0
10	5	9	14
20	9	16	25
30	12	22	33

Questions :

1. **Tracer les courbes** représentant la concentration du produit en fonction du temps pour chaque concentration en substrat.
2. **Tracer la tangente à l'origine ($t = 0$) sur chaque courbe** et déterminer les vitesses initiales **V_i** .
3. Compléter le tableau suivant avec les valeurs de V_i obtenues :

Concentration en substrat [S] (M)	Vitesse initiale V_i ($\mu\text{mol/s}$)
0,1 M	?
0,2 M	?
0,4 M	?

Analyser les résultats :

- Comment évolue **V_i** lorsque **$[S]$** augmente ?
- Pourquoi **V_i** n'augmente plus au-delà d'une certaine concentration en substrat ?
- Expliquer cette saturation enzymatique en utilisant la notion de **sites actifs occupés**.

Expérience 2 : Influence de la concentration en enzyme

Protocole expérimental

- On réalise une série d'expériences en gardant **une même concentration en substrat** mais en **variant la concentration en enzyme**.
- On mesure la quantité de **produit formé** en fonction du temps.
- On trace la **tangente à l'origine** pour déterminer la **vitesse initiale V_i** .

Données expérimentales

Temps (s)	[Produit] (μmol) pour $[E] = 1 \times$	[Produit] (μmol) pour $[E] = 2 \times$	[Produit] (μmol) pour $[E] = 3 \times$
0	0	0	0
10	4	8	12
20	8	15	23
30	11	21	31

Questions

- Tracer les courbes** représentant la concentration du produit en fonction du temps pour chaque concentration en enzyme.
- Déterminer la vitesse initiale V_i pour chaque condition** en traçant la tangente à l'origine.
- Compléter le tableau suivant avec les valeurs de V_i obtenues :

Concentration en enzyme $[E]$	Vitesse initiale V_i ($\mu\text{mol/s}$)
1 x	?
2 x	?
3 x	?

Analyser les résultats :

- Comment évolue **V_i** lorsque **$[E]$** augmente ?
- Pourquoi **V_i est proportionnelle à $[E]$** , tant que le substrat est en excès ?
- Que se passe-t-il si **$[S]$** devient limitant ?

Correction

Exercice 1 :

1) Réponse attendue : C

Très important : une protéine est constituée d'un assemblage d'acides aminés !!!

- A. **FAUX.**
- B. **FAUX.**
- C. **VRAI.** Très important : une protéine est constituée d'un assemblage d'acides aminés !!!
- D. **FAUX.**

2) Réponse attendue : B

- A. **FAUX.** Ce n'est pas son rôle.
- B. **VRAI.** Définition du rôle de l'enzyme !
- C. **FAUX.** La cellule produit de l'énergie grâce à une chaîne de réaction où interviennent des enzymes, mais attention les enzymes ne sont pas uniquement dédiées à cette fonction, et ce n'est pas elles qui produisent l'énergie finalement !
- D. **FAUX.** Ce n'est pas son rôle.

3) Réponse attendue : C

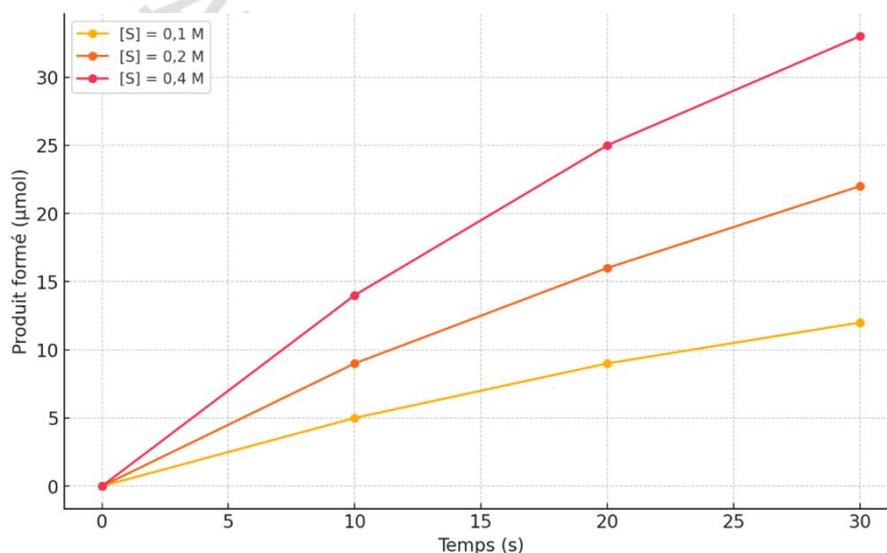
- A. **FAUX.** Si elle augmentait l'énergie d'activation, la réaction prendrait plus de temps, ce qui n'est pas logique sachant qu'une enzyme accélère la réaction.
- B. **FAUX.** Toutes réaction peut se produire indépendamment de l'enzyme, donc même si une enzyme est présente, celle-ci va uniquement accélérer la réaction sans pour autant transformer les substrats ou les produits.
- C. **VRAI.** En effet, une enzyme abaisse l'énergie d'activation pour augmenter la vitesse.
- D. **FAUX.** Une enzyme **accélère** une réaction.

4) Réponse attendue : B

- A. **FAUX.**
- B. **VRAI.** La séquence particulière en acides aminés au niveau du site actif permet de fixer le substrat.
- C. **FAUX.**
- D. **FAUX.**

Exercice 2 :

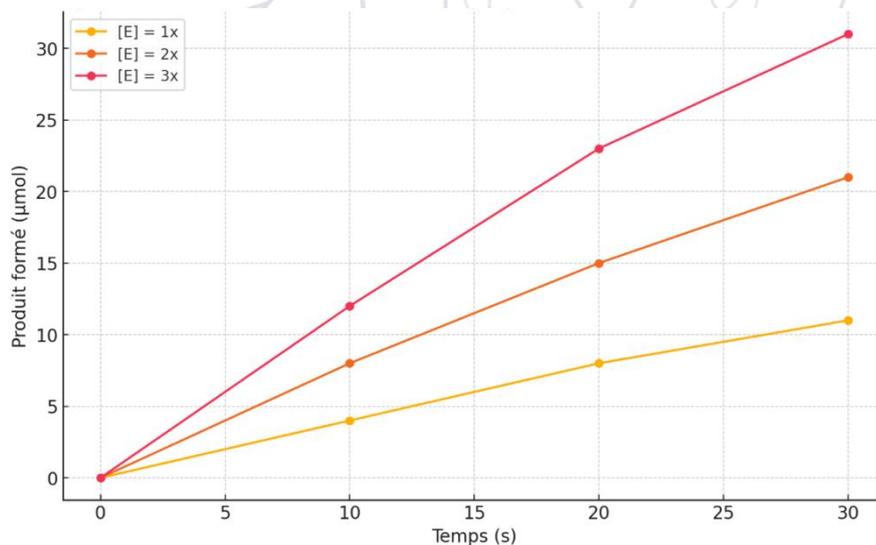
Expérience 1 :



Concentration en substrat [S] (M)	Vitesse initiale V_i ($\mu\text{mol/s}$)
0,1 M	0,5
0,2 M	0,9
0,4 M	1,4

La vitesse initiale (V_i) augmente avec la concentration en substrat jusqu'à atteindre un **plateau** (V_{max}). Une fois les enzymes saturées en substrat, la vitesse ne peut plus augmenter, car toutes les enzymes sont occupées.

Expérience 2 :



Concentration en enzyme [E]	Vitesse initiale V_i ($\mu\text{mol/s}$)
1 x	0,4
2 x	0,8
3 x	1,2

La vitesse initiale (V_i) augmente avec la concentration en enzyme tant que le substrat est en excès. Quand le substrat devient limitant, l'ajout d'enzyme n'affecte plus la vitesse, car il n'y a pas assez de substrat pour interagir avec toutes les enzymes.



SCIENCES DE LA VIE

REMISE À NIVEAU

TERMINALE

TUTORAT SANTÉ STRASBOURG



LE BRASSAGE GÉNÉTIQUE DE L'ADN

Cours

I. La reproduction sexuée

1. Définition

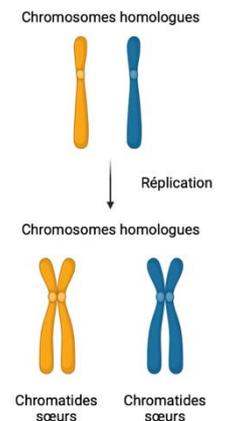
La reproduction sexuée est le processus biologique qui permet de créer un embryon diploïde à partir des gamètes haploïdes. Elle permet de **conserver le caryotype de l'espèce**.

La méiose a lieu dans les gonades (ovaires et testicules) des futurs parents. Elle aboutit à la formation d'un ovule chez la mère et d'un spermatozoïde chez le père. Ces deux cellules, appelées gamètes, sont haploïdes ($n = 23$).

Lors de la fécondation, les deux gamètes entrent en contact pour former l'embryon, une cellule diploïde ($2n = 46$).

2. Vocabulaire

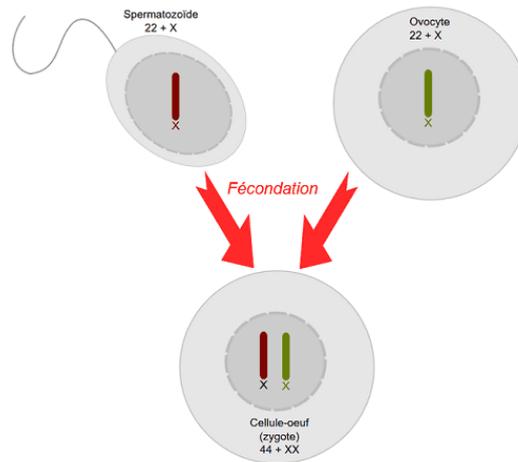
- **Autosome** – chromosome non sexuel ($n^{\circ}1$ à $n^{\circ}22$)
- **Gonosome** – chromosome sexuel (X ou Y)
- **Caryotype** – arrangement de l'ensemble des chromosomes d'une cellule. Chez l'Homme, il est composé de 23 paires de chromosomes (22 paires d'autosomes et 1 paire de gonosomes), soit 46 chromosomes
- **Chromosomes homologues** – paire de chromosome de même numéro. Chez un individu, l'un vient de la mère, l'autre vient du père. Ils peuvent être différents par leurs allèles.
- **Allèle** – version différente d'un même gène. Le gène va donc s'exprimer différemment. Par exemple, on peut avoir l'allèle « yeux bleus » sur nos deux chromosomes homologues, ou bien un allèle « yeux bleus » et un « yeux marrons ».
- **Cellule diploïde** – cellule qui comporte deux paires de chromosomes homologues ($2n$)
- **Cellule haploïde** – cellule qui ne comporte plus qu'un seul jeu de chromosomes. Il n'y a donc pas de paire de chromosomes homologues.
- **Chromatide** – molécule d'ADN qui compose le chromosome. Selon le moment du cycle cellulaire, le chromosome comporte soit 2 chromatides (début de la mitose ou de la méiose), soit 1 chromatide (fin de la mitose ou de la méiose).
- **Chromatine** – support de l'information génétique, elle correspond à l'ADN et aux protéines qui y sont associées.



Réalisé sur [Biorender.com](https://www.biorender.com)

3. Mécanismes

La fécondation est l'union d'une cellule reproductrice mâle (spermatozoïde) avec une cellule reproductrice femelle (ovule). Cela aboutit à la formation d'une cellule œuf qui sera la première cellule de l'embryon.



Source de l'image : © devenirgrand.com

Sur ce schéma : la cellule œuf donnera un embryon femelle car les chromosomes sexuels sont XX. Si le chromosome du père avait été Y et celui de la mère X, on aurait obtenu un zygote XY et donc un embryon mâle.

C'est donc le **spermatozoïde** qui va déterminer le sexe du futur embryon. Le spermatozoïde apporte son lot de chromosomes ($n = 23$) et l'ovule son lot de chromosomes ($n = 23$). Avec l'union de ces deux lots nous obtenons un caryotype normal : $2n = 46$.

II. Le brassage inter chromosomique

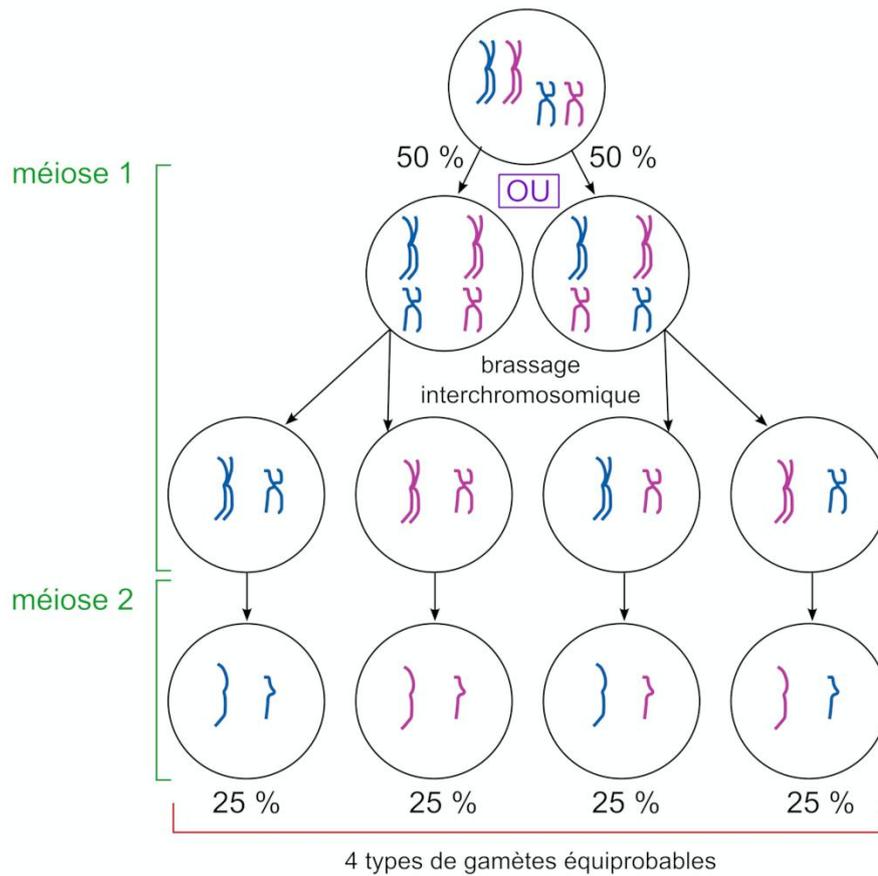
<https://www.youtube.com/watch?v=oE76Z68PEog>

Le brassage interchromosomique consiste en un brassage d'allèles **entre chromosomes non homologues**, plus précisément en la migration aléatoire des chromosomes homologues qui va former ces nouvelles combinaisons d'allèles.

Comment ça marche ?

Lors de l'anaphase I, les paires de chromosomes homologues vont se distribuer aléatoirement vers des pôles opposés. À la fin de la première division de méiose, on aura dans les deux nouvelles cellules haploïdes des chromosomes avec des allèles différents. Ces cellules ne donneront donc pas la même expression génétique.

Exemple : Pour deux gènes indépendants ou libres A et B (sur deux chromosomes différents), existant sous deux allèles Aa pour le premier et Bb pour le deuxième, l'allèle A peut migrer avec l'allèle B ou avec l'allèle b selon la même probabilité. Un individu hétérozygote de génotype A//a B//b peut donc former avec la même probabilité quatre types de gamètes différents : AB, ab, Ab, aB.



Source de l'image : © [assistance-scolaire-specialisees](http://assistance-scolaire-specialisees.fr)

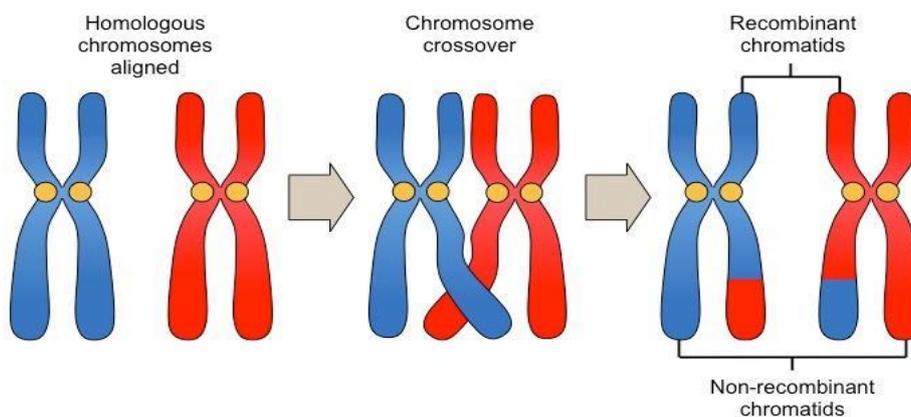
Ce brassage permet une diversité importante au sein des individus d'une même espèce.

III. Le brassage intra chromosomique et crossing-over

Vidéo : <https://fr.khanacademy.org/science/biology/cellular-molecular-biology/meiosis/v/phases-of-meiosis-i>

I. Principe général

Au cours de la première division de méiose, des échanges entre chromosomes homologues aboutissent à de nouvelles combinaisons d'allèles. C'est ce qu'on appelle le **crossing-over**.



Source de l'image : © [Prof-express](http://Prof-express.com)

2. Mécanisme

Lors de la prophase de première division méiotique, les chromosomes homologues s'apparient et leurs chromatides s'enchevêtrent au niveau des chiasmats (points de contact entre les chromosomes). Il y a alors l'échange entre deux portions de chromatides entre deux chromosomes homologues. Les deux chromatides d'un même chromosome ne sont donc plus identiques. Les gamètes recombinés portent donc des combinaisons alléliques différentes.

Les brassages inter et intra chromosomiques se succèdent et leurs effets se multiplient. Mais ces deux brassages ne marchent que si l'individu est hétérozygote. S'il est homozygote pour deux mêmes allèles, l'échange de ces allèles n'a aucun effet puisque ce sont les mêmes.

Exercices

1. QCM

1. Quelles sont la/les réponse(s) vraie(s) ?

- A. La fécondation permet la conservation du caryotype grâce à la fusion de deux cellules diploïdes.
- B. Le brassage interchromosomique a lieu lors du crossing over.
- C. Le spermatozoïde détermine le sexe du futur embryon.
- D. Le brassage intrachromosomique est permis grâce à un échange d'une portion de chromatide entre deux chromosomes homologues.

2. Prenons une cellule diploïde qui comporte deux paires de chromosomes avec des gènes C et E existant sous la forme de deux allèles C/c et E/e. En ne prenant en compte que le brassage interchromosomique, quelle est la probabilité d'avoir une cellule comportant l'allèle C ?

- A. 25%
- B. 75%
- C. 50%
- D. 10%

2. Questions

1. A l'aide de vos connaissances et des informations de cette fiche, expliquez comment la reproduction assure le maintien du nombre de chromosomes au cours du cycle de développement.
2. « Un gène peut avoir plusieurs allèles, mais chaque individu diploïde ne peut pas avoir plus de deux allèles de même gène. »

Vrai ou Faux ? Justifiez votre réponse.

Correction

I. QCM

1. Réponse attendue : C + D

- A. **FAUX**. La fécondation permet la conservation du caryotype grâce à la fusion de deux cellules haploïdes : l'ovule de la mère et le spermatozoïde du père.
- B. **FAUX**. Le brassage intrachromosomique a lieu lors du crossing over. Le brassage interchromosomique se fait lors de la migration aléatoire en anaphase des chromosomes homologues de part et d'autre de la cellule.
- C. **VRAI**. Le chromosome sexuel du spermatozoïde sera soit X, soit Y. Alors que celui de l'ovule sera tout le temps X.
- D. **VRAI**.

2. Réponse attendue : C

- A. **FAUX**.
- B. **FAUX**.
- C. **VRAI**. Il y a 4 combinaisons possibles à l'issue du brassage interchromosomique : C/E, C/e, c/E, c/e. Il y aura donc deux cellules sur les quatre à avoir l'allèle C, soit 50%.
- D. **FAUX**.

2. Questions

- 1. La fécondation est l'union d'une cellule reproductrice mâle (spermatozoïde) avec une cellule reproductrice femelle (ovule). Cela aboutit à la formation d'une cellule œuf qui sera la première cellule de l'embryon. Le spermatozoïde apporte son lot de chromosomes ($n=23$) et l'ovule son lot de chromosomes ($n=23$). Avec l'union de ces deux lots nous obtenons un caryotype normal : $2N=46$. A la fin de la fécondation on a donc un caryotype normal de l'espèce humaine : il sera diploïde avec 46 chromosomes (23 paires).
- 2. **VRAI**. Un individu diploïde possède par définition deux chromosomes homologues (triploïde correspondrait à 3 chromosomes homologues etc ...). Il aura donc deux allèles, différents ou identiques. Cependant, quand on observe le même gène chez plusieurs individus, il peut exister bien plus que 2 allèles différents ! C'est grâce à ça que nous sommes tous différents

CONTRÔLE DES FLUX DE GLUCOSE

Cours

Le glucose est une source d'énergie essentielle pour l'organisme. Son taux dans le sang, appelé **glycémie**, doit être maintenu dans des limites strictes pour éviter des déséquilibres. Ce contrôle implique des mécanismes de stockage, de libération et de transport régulés par des enzymes et des transporteurs spécifiques.

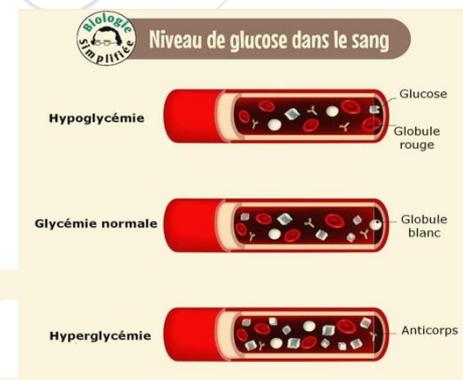
I. La glycémie

1. Qu'est-ce que c'est la glycémie ?

La **glycémie** correspond à la concentration de glucose circulant dans le sang. Elle s'exprime en g/L. Le glucose est un sucre **simple**, principal carburant des cellules, notamment des **neurones** et des **muscles**. Son taux doit être maintenu dans des limites physiologiques pour assurer un bon fonctionnement de l'organisme.

2. Valeurs

- **Glycémie normale à jeun** : entre **0,7 et 1,1 g/L**.
- **Hyperglycémie** (taux trop élevé) : **> 1,26 g/L**
(Si prise à jeun peut être un signe de diabète).
- **Hypoglycémie** (taux trop bas) : **< 0,6 g/L**
(Peut entraîner malaise et troubles neurologiques).



Source : *biologiesimplifiée.com*



Vidéo récapitulative :

<https://www.youtube.com/watch?v=6I68h0P3SGU>

II. Stockage et consommation du glucose

Le glucose présent dans le sang peut être **stocké** pour une utilisation ultérieure, ou **consommé** immédiatement par les cellules selon leurs besoins énergétiques.

1. Lieux de stockage du glucose

Le glucose est stocké sous forme de **glycogène**, un polymère de glucose, dans les cellules de deux principaux organes :

- **Le foie** : réserve principale permettant de libérer du glucose dans le sang en cas de besoin.
- **Les muscles** : stockent du glycogène pour un usage local, utilisé lors de l'effort physique.

2. Lieux de consommation du glucose

Le glucose est consommé par :

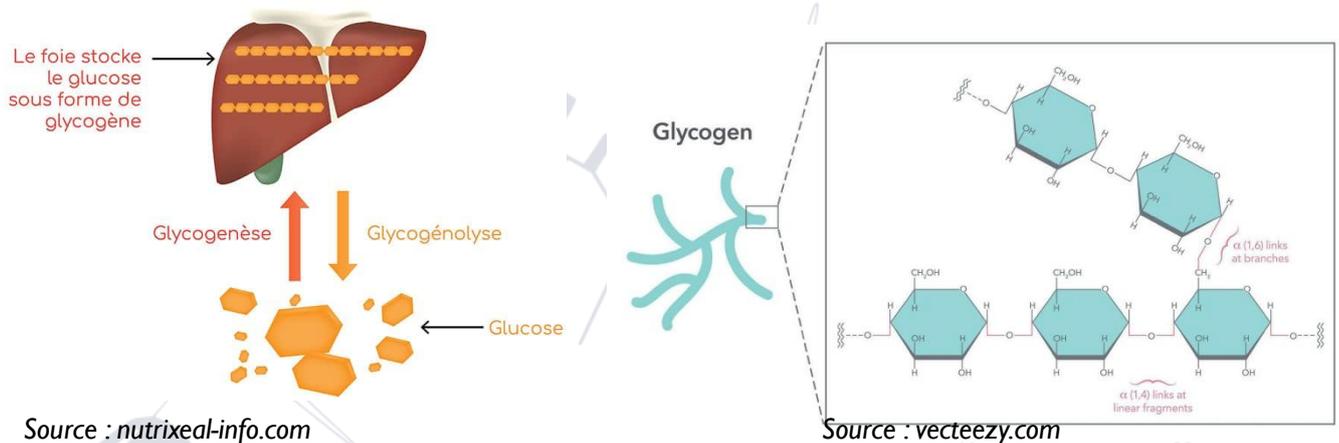
- **Le cerveau**, principal consommateur (exclusivement dépendant du glucose en conditions normales).
- **Les muscles**, qui utilisent du glucose en fonction de l'effort fourni.
- **Le tissu adipeux**, qui convertit l'excès de glucose en triglycérides pour le stockage.

III. Enzymes et transporteurs impliqués dans le métabolisme du glucose

1. Structure du glycogène

Le **glycogène** est une grosse molécule formée de plusieurs unités de **glucose** attachées entre elles. Il possède une structure **ramifiée**, ce qui permet de stocker beaucoup de glucose tout en le libérant rapidement lorsque le corps en a besoin. Ces ramifications se forment grâce à deux types de liaisons :

- **Liaisons $\alpha(1 \rightarrow 4)$** : relie les glucoses en chaîne.
- **Liaisons $\alpha(1 \rightarrow 6)$** : créent les branches tous les 8 à 12 glucoses.



2. Tableau récapitulatif : glycogénogenèse VS glycogénolyse

Glycogénogenèse	Glycogénolyse
Synthèse du glycogène	Dégradation du glycogène en glucose
But : stocker le glucose sous forme de glycogène	But : libérer le glucose en cas de besoins énergétique à partir des réserves de glycogène
Lieux principaux : le foie + muscles	Lieux principaux : le foie (pour libération du glucose dans le sang) + muscles (pour leur propre consommation)

RQ : On peut donc constater que :

- Le **foie** est un organe « **source** »
- Le **muscle** est un organe « **consommateur** »

IV. Transport du glucose dans les cellules

Le glucose ne peut pas traverser librement les membranes cellulaires. Son entrée dans les cellules se fait via des **transporteurs spécifiques**, appelés **GLUT (Glucose Transporters)**.

- **GLUT2 (foie, pancréas, intestin) :**
 - Fonctionne comme un **capteur de glycémie**.
 - Permet un transport **bidirectionnel** du glucose : le glucose entre ou sort des cellules en fonction de la concentration sanguine (**gradient de concentration**)
 - Rôle clé dans la régulation de la glycémie par le foie et la sécrétion d'insuline par le pancréas.
- **GLUT4 (muscles, tissu adipeux) :**
 - Activé par **l'insuline** après un repas.

- Permet l'entrée **unidirectionnelle** rapide du glucose dans les cellules musculaires et adipeuses pour être stocké ou utilisé comme énergie.
- RQ : en cas de diabète de type 2, son activation est réduite, ce qui limite l'absorption du glucose.



Vidéos récapitulatives :

Régulation de la glycémie + stockage glucose : <https://www.youtube.com/watch?v=-FRjiFppQ4I>

Pour aller plus loin – cours de biochimie : le glycogène <https://www.youtube.com/watch?v=GchG7pFB6Ng>

V. Régulation hormonale de la glycémie

I. Généralités :

La glycémie est une grandeur importante du corps, qui est indispensable au bon fonctionnement de l'organisme. Il est donc très important d'avoir un contrôle sur cette constante, et ce contrôle est principalement hormonale.

Définition : Une hormone est une substance produite par un organe, une cellule, qui circule dans le sang. Cette substance peut avoir des actions diverses, sur des cibles diverses de l'organisme ([vidéo explicative](#)).

Les hormones impliquées dans la glycémie sont synthétisées dans le pancréas, nous allons donc d'abord voir la structure du pancréas puis l'effet spécifique de chaque hormone sur la glycémie.

a. Structure du pancréas endocrine :

[Vidéo explicative](#) (les parties sur le pancréas exocrine et la somatostatine ne sont pas à connaître).

Le pancréas est une glande « amphicrine », c'est-à-dire que l'organe possède des capacités exocrines et endocrines (c'est une glande mixte). Pour ce cours, nous allons nous contenter de décrire le pancréas endocrine, car c'est celui qui est responsable de la synthèse hormonale.

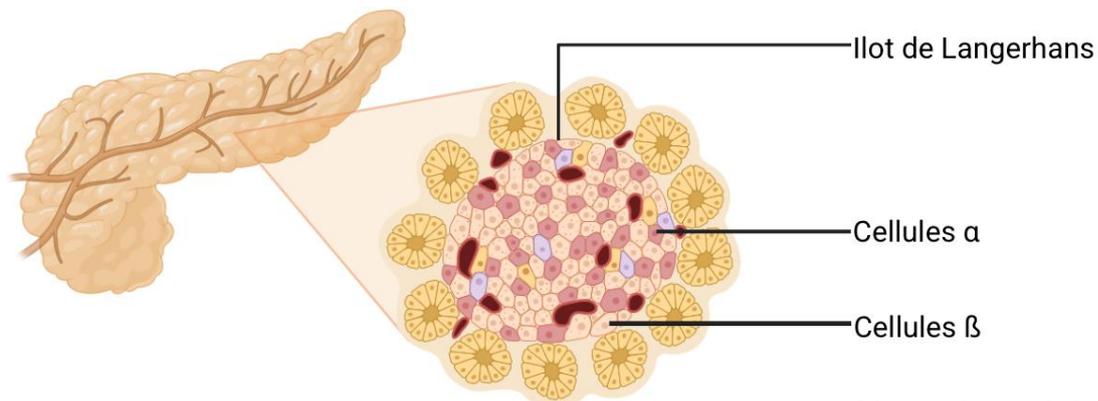


Schéma réalisé avec BioRender

Dans le pancréas endocrine, c'est-à-dire au niveau des îlots de Langerhans, il y a plusieurs types cellulaires, dont deux à connaître :

- Les cellules **alpha** synthétisent le **glucagon**
 - Les cellules **bêta** synthétisent l'**insuline**
- Moyen mnémotechnique : **Glucagon** – **alpha**

2. Régulation hormonale de la glycémie :

a. Par l'insuline

L'insuline est une hormone hypoglycémisante, c'est-à-dire que lorsqu'elle est synthétisée et libérée dans le sang, elle va diminuer la glycémie, elle va baisser le taux de glucose sanguin.

En temps normal, elle est donc synthétisée lorsque le taux de sucre sanguin augmente, c'est-à-dire en cas d'hyperglycémie.

Concrètement, lors d'une augmentation de la glycémie, il y a production d'insuline par le pancréas. L'insuline se fixe sur des récepteurs hépatiques ou musculaires, ce qui entraîne le passage de glucose du sang vers la cellule (hépatique avec le transporteur GLUT2 ou musculaire, transporteur GLUT4) et la formation de glycogène, c'est la glycogénogenèse. Il y a donc une baisse de la glycémie.

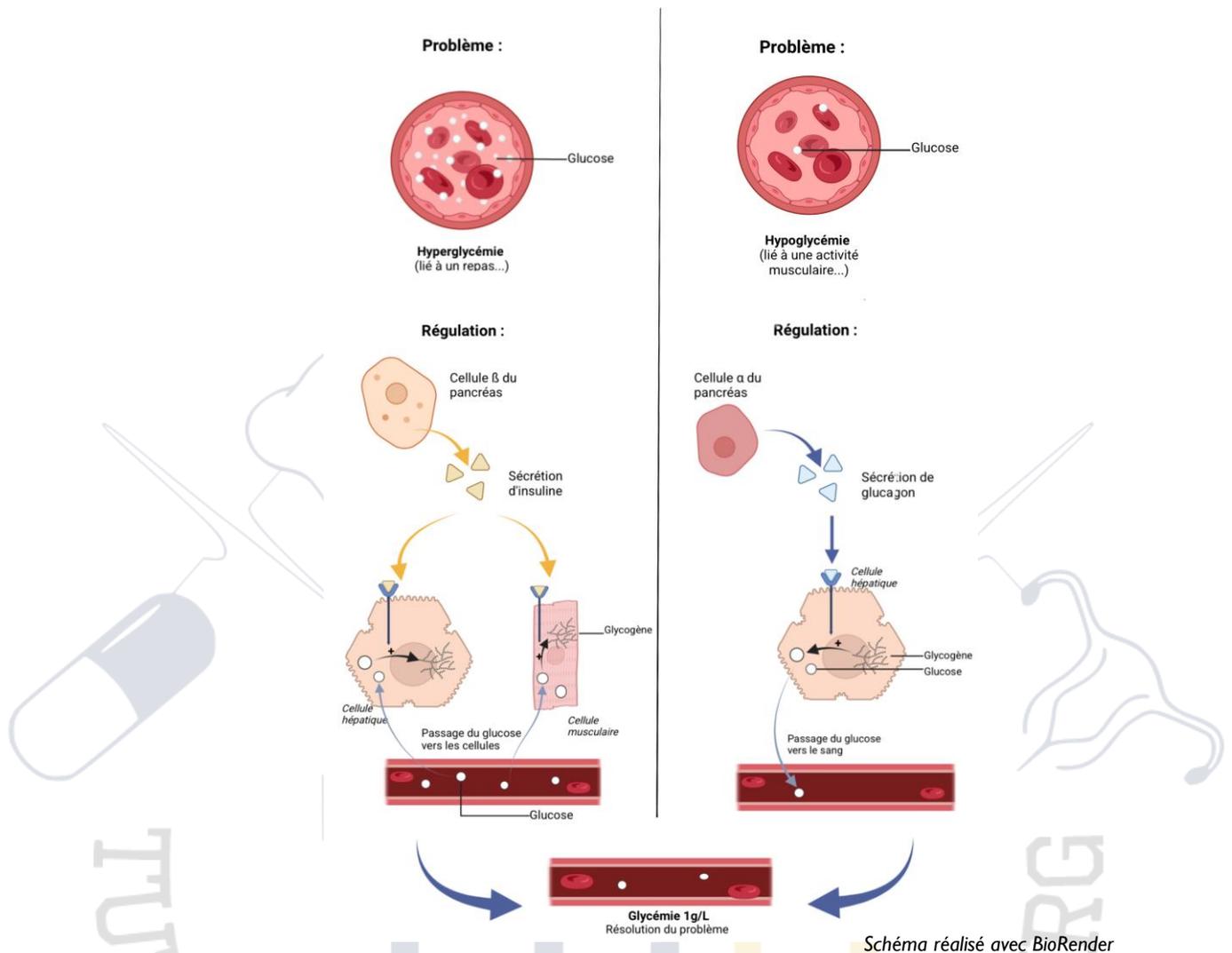
b. Par le glucagon

Le glucagon est une hormone hyperglycémisante, qui aura donc tendance à augmenter la glycémie (le taux de sucre) dans le sang lorsque qu'il est sécrété par le pancréas.

En temps normal, il est donc synthétisé lorsque le taux de sucre sanguin diminue, c'est-à-dire en cas d'hypoglycémie.

Concrètement, lorsque la glycémie baisse, il y a synthèse de glucagon par le pancréas. Le glucagon se fixe sur des récepteurs hépatiques, ce qui entraîne une formation de glucose à partir du glycogène stocké dans la cellule hépatique, c'est la glycogénolyse. Le glucose formé est ensuite sécrété vers le sang par le transporteur GLUT 2 des cellules hépatiques, ce qui augmente la glycémie.



Schéma général :

VI. Exemple d'un dysfonctionnement de la régulation de la glycémie : les diabètes

1. Définition du diabète

Un diabète se définit par un dysfonctionnement de la régulation de la glycémie.

Ils se caractérisent par certains symptômes :

Urines abondantes

Soif intense

Présence de glucose dans les urines

Et ils peuvent entraîner de nombreuses complications, comme des AVC, des infarctus ou encore une facilitation de plaies.

Il existe plusieurs types de diabètes, en fonction des structures et mécanismes touchés.

2. Diabète de type I

Le diabète de type I est qualifié **d'insulino-dépendant**.

Dans ce diabète, les cellules β des îlots de Langerhans sont détruites par le système immunitaire (Il s'agit donc d'une maladie auto-immune) ce qui résulte en une absence d'insuline.

Sans insuline, la glycémie, et notamment l'hyperglycémie ne peut pas être régulée, on aura donc une augmentation du taux de glucose sanguin, ce qui aboutit aux symptômes vus précédemment.

Vu qu'il s'agit d'une maladie auto-immune, c'est un diabète qui se développe et se manifeste souvent très tôt dans la vie (avant 20 ans dans la majorité des cas). Pour le traiter, on peut injecter de l'insuline (le reste du système (transporteurs...) fonctionne normalement.

3. Diabète de type II

Le diabète de type II est qualifié **d'insulino-résistant** (ou « non insulino-dépendant »).

Dans ce cas là, on observe une baisse de sensibilité à l'insuline des transporteurs des cellules cibles, notamment le transporteur GLUT 2 des cellules hépatiques.

En fait, au cours de la vie, ces récepteurs sont très sollicités (après chaque repas...), et avec le temps, ils ont besoin de plus en plus d'insuline pour s'activer (et donc entraîner la transformation du glucose en glycogène pour corriger la glycémie).

Au début, le pancréas arrive à compenser cette baisse de sensibilités en synthétisant plus d'insuline, mais au bout d'un moment, les cellules β s'épuisent et n'arrivent plus à produire de l'insuline, on aura donc une insulino-déficience (plus du tout d'insuline).

Ici, c'est un diabète qui se développe plutôt en fin de vie (vers 65 ans) vu qu'il s'agit d'un épuisement de la capacité des récepteurs, et qu'il dépend notamment des facteurs environnementaux (activité physique, type d'alimentation...). *Il est important de noter que 80% des personnes obèses sont atteintes d'un diabète de type II.*

Les traitements de ce type de diabète sont plus spécifiques.

VII. Conclusion

En conclusion, nous avons vu comment la glycémie est une grandeur très importante du corps, car elle permet notamment la nutrition, et donc le bon fonctionnement des cellules.

Vu que c'est une grandeur importante, elle doit posséder des systèmes de régulation adaptés, et ces systèmes passent notamment par deux hormones, l'insuline (rôle hypoglycémiant) et le glucagon (rôle hyperglycémiant) qui ont une action sur le « pool » (la réserve) de glucose et de glycogène des cellule hépatiques ou musculaires.

Exercices

Exercice I : QCMS

1. Concernant la régulation de la glycémie, indiquez la (les) réponse(s) exacte(s) ?

- A. La glycémie est peu régulée car les reins peuvent excréter le glucose.
- B. L'insuline entraîne une diminution de la glycémie, elle a donc une action hyperglycémiant.
- C. Le glucagon est synthétisé dans les cellules alpha du foie endocrine.
- D. Le glucagon est une hormone hyperglycémiant.

2. La glycogénogénèse :

- A. Implique une destruction du glycogène pour former du glucose.
- B. Implique une formation de glycogène à partir de glucose.
- C. Est stimulé par l'insuline.
- D. Est stimulée par le glucagon.

3. Concernants les diabètes, quels sont les réponses exactes ?

- A. Le diabète de type I touche majoritairement les personnes âgées car il est associé à un manque d'insuline lié à un problème auto-immun.
- B. Le diabète de type I est traité par des injections d'insuline.
- C. Le diabète de type II est lié à une baisse de sensibilités des récepteurs à l'insuline de la cellule pancréatique.
- D. Les diabètes peuvent entraîner des complications comme des AVC ou des infarctus.

Exercice II : QR

1. Expliquer en quelques lignes comment les cellules pancréatiques participent à la régulation de la glycémie.
2. Donner des pistes de traitement des deux types de diabètes, et justifier.

Correction

Exercice I : QCMS

1. Concernant la régulation de la glycémie, indiquez la (les) réponse(s) exacte(s) ?

- A. **FAUX** : La glycémie est une grandeur très régulée, notamment de manière hormonale. L'excrétion d'un taux élevé de glucose par les reins (donc dans les urines) est anormale.
- B. **FAUX** : L'insuline entraîne une diminution de la glycémie, elle a donc une action **hypoglycémiante**.
- C. **FAUX** : Le glucagon est synthétisé dans les cellules alpha du **pancréas** endocrine.
- D. **VRAI** : Le glucagon est une hormone hyperglycémiante, elle augmente la glycémie, et est donc sécrété en cas d'hypoglycémie.

2. La glycogénogénèse :

- A. **FAUX** : La glycogénogénèse implique une formation de glycogène. (*Genèse = création*). C'est la glycogénolyse qui implique une destruction du glycogène. (*Lyse = destruction*).
- B. **VRAI** : Cf A.
- C. **VRAI** : L'insuline entraîne l'entrée du glucose du sang dans la cellule et la transformation de ce glucose en glycogène, soit la glycogénogénèse.
- D. **FAUX** : Le glucagon stimule la glycogénolyse, soit la formation de glucose à partir de glycogène, lors d'une hypoglycémie.

3. Concernants les diabètes, quels sont les réponses exactes ?

- A. **FAUX** : Le diabète de type I touche majoritairement **les jeunes**.
- B. **VRAI** : Le diabète de type I est lié à un manque d'insuline (vu que les cellules sont détruites), il est donc traité par des injections d'insuline.
- C. **FAUX** : Le diabète de type II est lié à une baisse de sensibilités des récepteurs à l'insuline de la cellule **hépatique**.
- D. **VRAI** : Les diabètes peuvent bien entraîner des complications comme des AVC ou des infarctus, d'où l'importance d'avoir un mode de vie sain pour minimiser les risques de DT2.

Exercice II : Pistes de correction

1. Expliquer en quelques lignes comment les cellules pancréatiques participent à la régulation de la glycémie.

- Cellules β et insuline, action hypoglycémiante de l'insuline sur le foie/muscle.
- Cellules alpha et glucagon, action hyperglycémiante du glucagon sur le foie.

2. Donner des pistes de traitement des deux types de diabètes, et justifier.

- DT1 : lié manque d'insuline, donc injection d'insuline (*Petit plus : injection de glucagon pour pallier l'hypoglycémie causée par un surdosage d'insuline*)

- DTII : Plus compliqué, car les mécanismes sont plutôt sur les transporteurs, mais on peut mentionner la prévention (mode de vie sain, activité sportive régulière). Dans certains cas, on peut aussi prescrire de l'insuline.
- Traitements des complications, notamment par rapport aux plaies ou ulcères.



MÉTABOLISME

Cours

Vidéo : L'ensemble de la respiration cellulaire (glycolyse, cycle de Krebs et chaîne respiratoire) : <https://www.youtube.com/watch?v=p-Js0e0n02s>

I. Flux des gaz respiratoires et échanges de nutriments

1. Flux des gaz respiratoires

a. Le dioxygène

L'air est composé de 78% d'azote, de 21% de dioxygène et de 0,03% de dioxyde de carbone. La fonction principale de l'inspiration est d'apporter du dioxygène (O_2) à notre corps.

Le dioxygène va arriver dans les poumons, et entrer dans la circulation artérielle en passant à travers les alvéoles pulmonaires. Une fois dans la circulation sanguine, il sera transporté par l'hémoglobine et distribué à l'ensemble du corps.

En effet le dioxygène est essentiel à la vie, notamment pour la production d'énergie sous forme d'ATP, il est donc nécessaire que toutes les cellules en aient un apport suffisant.

b. Le dioxyde de carbone

Le dioxyde de carbone (CO_2) est le déchet principal produit lors de la production d'énergie. Il est toxique pour notre corps lorsqu'il est présent en trop grande quantité. Il est donc nécessaire de l'éliminer.

Il va donc être transporté par le système veineux jusqu'aux poumons. Au niveau des poumons il traversera les alvéoles pulmonaires afin d'être expulsé lors de l'expiration.

2. Échanges de nutriments

Pour fonctionner et créer de l'énergie, notre corps a besoin de nutriments. Cette énergie est essentiellement produite à partir du glucose ($C_6H_{12}O_6$). Le glucose est retrouvé dans de nombreux aliments et est notamment le produit de dégradation final de l'amidon.

Les nutriments sont donc apportés par l'alimentation. Après ingestion, les aliments subissent de nombreuses réactions grâce à l'action d'enzymes dans notre estomac, puis dans les intestins. On obtient notamment du glucose qui sera absorbé au niveau des entérocytes. Les entérocytes sont les cellules des intestins.

II. La glycolyse

Il s'agit de la première étape de la respiration cellulaire qui correspond à la dégradation du glucose. C'est une voie métabolique **anaérobie**, c'est à dire qui ne nécessite pas de dioxygène, qui **se déroule dans le cytoplasme** de toutes les cellules de notre organisme.

Cette étape est essentielle pour que le cycle de Krebs ait lieu car les mitochondries ne peuvent pas directement utiliser le glucose.

La glycolyse consiste en **l'enchaînement de 10 réactions**, afin d'obtenir **2 acides pyruviques (ou pyruvate) à partir de 1 glucose**.

Elle nécessite, en plus, la présence de 2 ADP et 2 phosphates inorganiques (Pi) et 2 coenzymes oxydés (R').

Cette première étape de la respiration cellulaire permet déjà d'obtenir de l'énergie sous forme de **2 ATP**.

Le bilan global est donc :

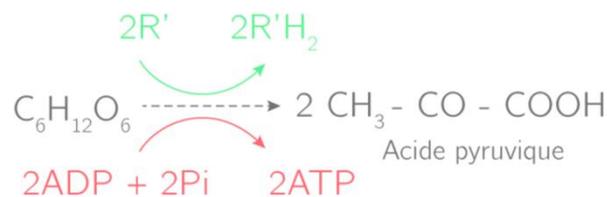


Image issue du site Kartable

À retenir :

- Voie métabolique anaérobie qui a lieu dans le cytoplasme de toutes les cellules.
- 1 glucose donne 2 acides pyruviques.
- Aboutit à la production de 2 ATP.

Le cycle de Krebs

Il s'agit de la deuxième étape de la respiration cellulaire. Le cycle de Krebs est une succession de 8 réactions biochimiques qui ont lieu **dans la matrice de la mitochondrie** en condition **aérobie**, c'est à dire que la présence d'O₂ est nécessaire.

L'acide pyruvique obtenu lors de la glycolyse va d'abord entrer dans la mitochondrie puis va être **transformé en acétyl-CoA** par une enzyme. C'est cet acétyl-CoA qui permettra de débiter le cycle de Krebs. La transformation de l'acide pyruvique en acétyl-CoA libère un coenzyme réduit (R'H₂).

Le cycle de Krebs démarre par l'acétyl-CoA, il aura besoin, pour un tour, de 4 coenzymes oxydés R', 3H₂O, 1 ADP et 1 phosphate inorganique (Pi).

Étant donné que la glycolyse permet d'obtenir 2 pyruvates, on a donc 2 acétyl-CoA et 2 tours du cycle de Krebs à partir d'une molécule de glucose.

Finalement en additionnant tout on obtient cette formule :

Le bilan du cycle de Krebs est :



Image issue du site Kartable

Sur les 10 R'H, 2 proviennent de la transformation des 2 pyruvates en acétyl-CoA et ensuite pour chaque tour du cycle de Krebs on en obtient 4.

Schéma simplifié du cycle de Krebs :

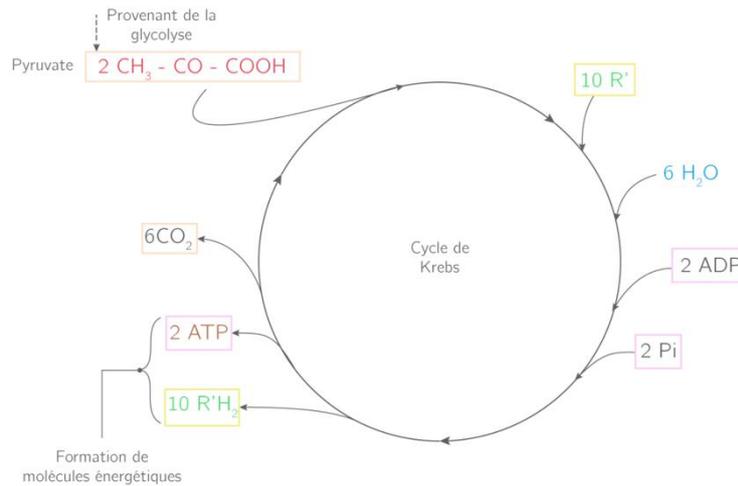


Image issue du site Kartable

À retenir :

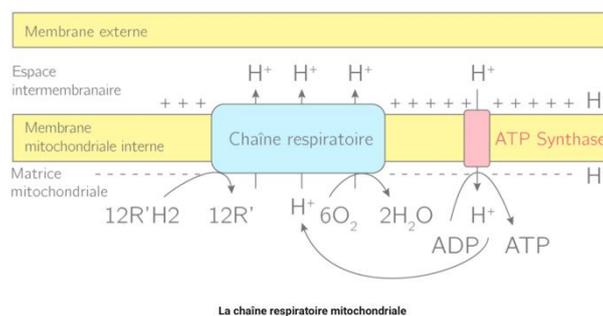
- Voie métabolique aérobie qui a lieu dans la matrice des mitochondries.
- 1 pyruvate donne 5 coenzymes réduits R'H₂.
- 1 glucose permet de faire 2 tours du cycle de Krebs.

III. La chaîne respiratoire mitochondriale

1. Principe général

Vidéo explicative détaillée : <https://youtu.be/VEuvaxAEZRs?si=gsIG4ChHSjAi2CFw> (la partie « autres complexes transférant les électrons » n'est pas à connaître).

La chaîne mitochondriale est une suite de réactions **ayant lieu au niveau de la membrane interne de la mitochondrie**. Il s'y déroule la **phosphorylation oxydative**, donc la production d'ATP (par phosphorylation de l'ADP) grâce à la ré-oxydation des coenzymes réduits (R'H₂ ou NADH, H⁺ et FADH₂ produits plus tôt dans le métabolisme du glucose).



La chaîne respiratoire mitochondriale

Image issue du site Kartable

2. Le déroulement de la phosphorylation oxydative

La chaîne respiratoire mitochondriale consiste en la succession de réactions d'oxydoréduction. Des complexes enzymatiques (au nombre de 4), présents dans la membrane interne de la mitochondrie, se chargent d'oxyder les cofacteurs réduits (R'H₂) en transférant leurs électrons à des transporteurs. **L'accepteur final des électrons (oxydant) est l'oxygène**, qui sera alors réduit en H₂O. Ces réactions d'oxydoréduction **permettent le transfert d'ions H⁺ vers l'espace intermembranaire** de la mitochondrie.

Cette accumulation de protons permet la création d'un gradient électrochimique de H^+ (de l'espace intermembranaire où la concentration est la plus forte vers la matrice mitochondriale). Ce gradient aussi appelé force proton motrice est utilisé par un autre complexe enzymatique dans la membrane interne de la mitochondrie, **l'ATP synthase**.

Le passage des H^+ à travers l'ATP synthase apporte l'énergie nécessaire à la phosphorylation de l'ADP en ATP.

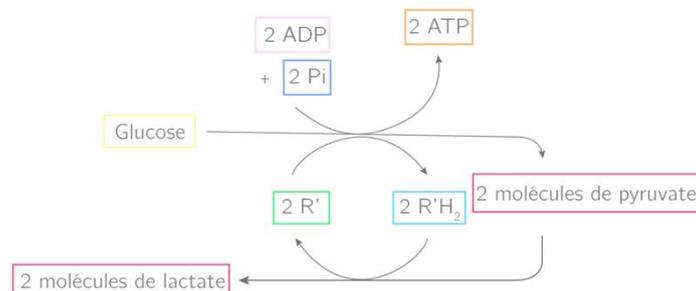
Il faut le passage de 3 ions H^+ à travers l'ATP synthase pour la synthèse d'un ATP. L'oxydation d'un $NADH, H^+$ permet le transfert de 10 H^+ vers l'espace intermembranaire contre 6 pour un $FADH_2$. Ainsi un $NADH, H^+$ permet la production de 3 ATP ($10/3 \approx 3$) et 2 ATP pour un $FADH_2$ ($6/3 = 2$).

IV. La fermentation lactique

1. Principe général

À la fin de la glycolyse on obtient 2 pyruvates pour une molécule de glucose. Ce pyruvate peut soit être transformé en acétyl-CoA pour entrer dans le cycle de Krebs, soit être utilisé pour la fermentation lactique. La **fermentation lactique se déroule en conditions anaérobies** (O_2 nécessaire dans la suite de la respiration cellulaire), donc généralement dans les cellules pauvres en dioxygène. Ces cellules pauvres en dioxygène sont principalement les cellules musculaires (surtout les fibres musculaires de type II) et les globules rouges, car ils ne possèdent pas de mitochondries.

2. Le déroulement de la fermentation lactique



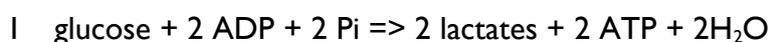
La fermentation lactique

Image issue du site Kartable

La fermentation lactique consiste en la **réduction du pyruvate en lactate**. Au cours de cette réaction un $NADH, H^+$ est oxydé en NAD^+ . L'accumulation de lactate dans la cellule entraîne une acidification et participe à la fatigue musculaire. La fermentation lactique se déroule dans le cytoplasme des cellules.

3. Bilan de la fermentation lactique

Les $NADH, H^+$ produits au cours de la glycolyse sont utilisés pour la fermentation lactique. Ainsi le bilan de la fermentation est :



V. Rendement énergétique de la métabolisation du glucose

I. Bilan des différentes étapes

Après oxydation complète du glucose, c'est-à-dire glycolyse + cycle de Krebs + chaîne respiratoire mitochondriale, on obtient :

Glycolyse : 1 glucose + 2 NAD⁺ + 2ADP + 2 Pi => 2 pyruvates + **2 NADH,H⁺** + **2 ATP** + 2 H₂O

Cycle de Krebs : 2 pyruvates + 8 NAD⁺ + 2 FAD + 2 GDP + 2 Pi + 2 H₂O => 6 CO₂ + **2 GTP** + **8 NADH,H⁺** + **2 FADH₂**

On a donc la formation de 10 NADH,H⁺, 2 FADH₂, 2 ATP et 2 GTP (équivalent énergétique de l'ATP). Le nombre total d'ATP produit après la chaîne respiratoire (et pour 1 glucose) est : 30 (10 NADH,H⁺ x 3) + 4 (2 FADH₂ x 2) + 4 (2 ATP et 2 GTP) = **38 ATP**.

Attention toutefois ce bilan de 38 ATP n'est valable que pour certaines cellules (cellules du foie, du cœur et du rein), car les NADH,H⁺ produits dans le cytoplasme (au cours de la glycolyse) sont « transportés » grâce à une navette spéciale sans perte d'énergie vers la matrice mitochondriale. Dans d'autres cellules telles que les cellules musculaires squelettiques, la navette transforme le NADH,H⁺ en FADH₂ (ce qui entraîne la perte de 2 ATP au niveau de la chaîne respiratoire mitochondriale). Le bilan dans ces cellules est donc de **36 ATP**.

Enfin en conditions anaérobies, la fermentation lactique va succéder la glycolyse et le bilan énergétique ne sera que de **2 ATP**.

Exercices

QCM 1 : La glycolyse

Concernant la glycolyse, quelles sont les 2 propositions exactes ?

- A. La glycolyse a lieu uniquement en condition aérobie.
- B. Elle permet la production de 2 glucoses à partir de 1 pyruvate.
- C. Elle se déroule dans le cytoplasme des cellules.
- D. Il s'agit d'un enchaînement de 10 réactions.
- E. Elle ne produit pas du tout d'énergie.

QCM2 : Le cycle de Krebs

Concernant le cycle de Krebs, quelles sont les 3 propositions exactes ?

- A. Le cycle de Krebs démarre avec le pyruvate.
- B. Un tour du cycle de Krebs permet la production de 10 coenzymes réduits.
- C. Il comporte 8 étapes.
- D. Il se déroule uniquement en condition aérobie.
- E. Il s'agit de la principale source de production d'énergie.

QCM 3 : La chaîne respiratoire mitochondriale

Quelles sont les 2 propositions exactes ?

- A. La chaîne respiratoire mitochondriale se déroule au niveau de la membrane externe de la mitochondrie.

- B. C'est l'oxydation des cofacteurs réduits qui permet l'acidification de l'espace intermembranaire.
- C. L'ATP synthase nécessite un flux de proton pour phosphoryler l'ADP.
- D. Un FADH_2 permet la formation d'une quantité plus importante d'ATP qu'un NADH, H^+ .

QCM4 : Fermentation lactique + Bilan énergétique

Quelles sont les 2 propositions inexactes ?

- A. La fermentation lactique doit se dérouler en milieu aérobie.
- B. La fermentation lactique permet, au final, de produire 2 ATP.
- C. Au cours de la fermentation lactique, le pyruvate est transformé en lactate, ce qui au passage permet de réduire un NAD^+ .
- D. Le bilan de la respiration cellulaire varie selon le type de cellules.

Correction

Les réponses attendues au QCM 1 sur la glycolyse sont :

- A. **FAUX.** La glycolyse ne nécessite pas de dioxygène pour avoir lieu, elle peut très bien se dérouler en conditions anaérobie.
- B. **FAUX.** C'est l'inverse, elle permet la production de 2 pyruvates à partir de 1 glucose. La glycolyse tient son nom du glucose.
- C. **VRAI.** Elle a bien lieu dans le cytoplasme de toutes nos cellules, mêmes celles dépourvues de mitochondries comme les globules rouges.
- D. **VRAI.**
- E. **FAUX.** Pour un glucose on obtient à la fin de la glycolyse 2 ATP.

Les réponses attendues au QCM 2 sur le cycle de Krebs sont :

- A. **FAUX.** Il démarre avec l'acétyl-CoA. Le pyruvate, obtenu à la fin de la glycolyse, entre dans la mitochondrie mais il devra être transformé en acétyl-CoA avant de démarrer le cycle de Krebs.
- B. **FAUX.** Un tour du cycle de Krebs permet d'obtenir 5 coenzymes réduits, mais pour un glucose on a 2 tours du cycle de Krebs.
- C. **VRAI.**
- D. **VRAI.** Le dioxygène est nécessaire au fonctionnement du cycle de Krebs car il est l'accepteur final de la chaîne respiratoire, pour la production d'ATP.
- E. **VRAI.** Il permet de produire une grande quantité d'ATP, bien plus que la glycolyse.

2.

3. Les réponses attendues au QCM 3 sont :

- A. **FAUX.** La chaîne respiratoire mitochondriale a lieu au niveau de la **membrane interne** de la mitochondrie.
- B. **VRAI.** La réoxydation des cofacteurs réduits apporte l'énergie nécessaire au transfert des H^+ vers l'espace intermembranaire.
- C. **VRAI.**
- D. **FAUX.** C'est l'inverse, un NADH, H^+ permet la sortie de 10 H^+ contre 6 pour un FADH_2 . Ainsi un FADH_2 permettra la synthèse de 2 ATP contre 3 pour un NADH, H^+ .

4.

5. Les réponses attendues au QCM 4 sont :

- A. **FAUX.** La fermentation peut se dérouler en milieu anaérobie (car ne nécessite pas d'oxygène), c'est aussi le cas de la glycolyse.
- B. **VRAI.** Ce sont les 2 ATP produits au cours de la glycolyse, les cofacteurs réduits sont eux réoxydés au cours de la fermentation.
- C. **FAUX.** Le pyruvate est bien transformé en lactate mais au passage, c'est un NADH, H^+ qui est oxydé.
- D. **VRAI.** Selon le type de navette utilisée, le bilan peut être soit de 36 soit de 38 ATP.



CELLULES MUSCULAIRES

Cours

I. Les trois types de cellules musculaires

Dans le corps humain, nous retrouvons trois types de cellules musculaires qui ont chacune des propriétés différentes. En effet, il existe les cellules musculaires **lisses**, les cellules musculaires **striées squelettiques** et les cellules musculaires **striées cardiaques**.

On appelle **faisceau musculaire** le regroupement de plusieurs cellules musculaires. Ces dernières peuvent se contracter en se raccourcissant et en s'épaississant, grâce à l'action de stimulus nerveux.

I. Le muscle strié squelettique

La cellule musculaire striée squelettique est également appelée **rhabdomyocyte**. C'est une cellule multinucléée, ce qui veut dire qu'elle possède plusieurs noyaux.

Le muscle strié squelettique est attaché aux os grâce aux tendons et ils permettent d'exercer un contrôle **volontaire** de la motricité.

On dit que les muscles striés squelettiques sont **antagonistes** car quand l'un est relâché, un autre est contracté. Par exemple, lorsque l'on fait une flexion de l'avant-bras sur le bras (on plie le coude), on contracte les muscles fléchisseurs comme le biceps brachial, tandis que le muscle fléchisseur (triceps) se relâche.

On distingue deux types de muscles, les muscles **extenseurs** (lorsqu'ils se contractent, ils éloignent les deux éléments d'un membre) et les muscles **fléchisseurs** (lorsqu'ils se contractent, ils rapprochent les deux éléments d'un membre).

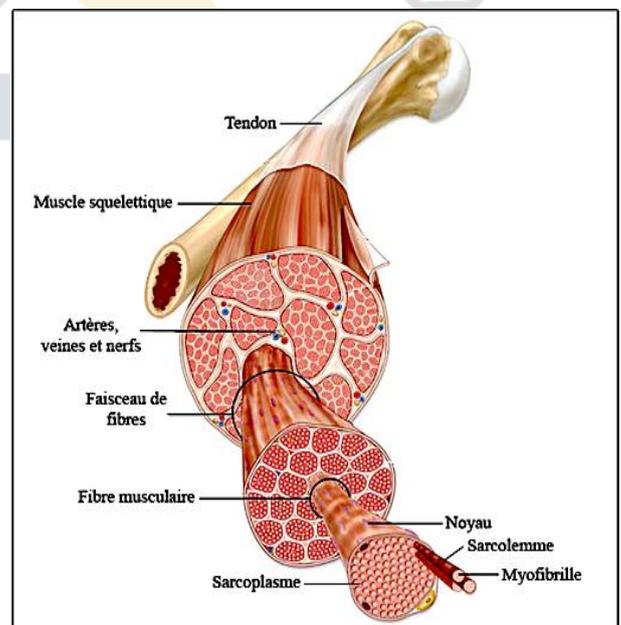
Les os sont reliés les uns aux autres grâce aux ligaments.

Une cellule musculaire striée est composée d'un **cytosquelette** qui est un réseau de filaments protéiques dans le cytoplasme. Ce cytosquelette est composé de myofilaments (filaments musculaires), à savoir les **filaments épais de myosine** et les **filaments fins d'actine**. Cela forme une **myofibrille**.

Ces myofilaments sont disposés en **sarcomères** répétitifs qui correspondent à l'unité contractile du muscle.

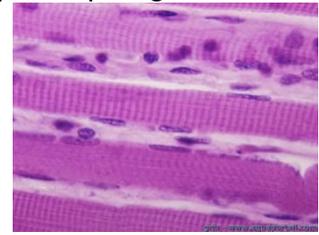
Autour des myofibrilles, nous retrouvons une membrane sarcoplasmique ou **sarcolemme**.

L'association de plusieurs myofibrilles forment une **fibre musculaire**, l'ensemble de ces fibres se disposent en faisceaux musculaires qui forment le muscle.



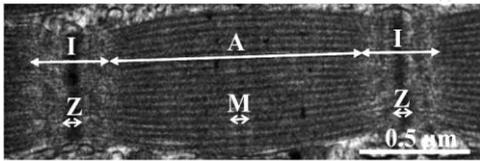
Source de l'image : © [sites.google.com](https://www.google.com)

Au microscope optique, on peut repérer les cellules musculaires striées squelettiques grâce à leurs **striations transversales** à l'axe de cellule.



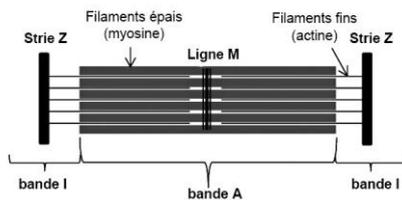
Source de l'image : © aquaportal

Le sarcomère est constitué de plusieurs parties :



Sur ce schéma, on peut voir que chaque sarcomère est limité par les **striés Z**. Les striés Z sont contenus dans une **bande I** (I = isotrope, claire) en périphérie, et au centre, entre les bandes I, on retrouve les **bandes A** (A = anisotrope, sombre).

Au centre des bandes A, on retrouve la **bande H** qui est elle-même centrée par la **ligne M**.



Les bandes I ne comportent que les filaments fins d'actine tandis que les bandes H ne contiennent que des filaments épais de myosine.

Source de l'image : © researchgate

2. Les cellules musculaires lisses

Ces cellules forment les muscles lisses qui se retrouvent au niveau des organes creux et des vaisseaux sanguins, et ils permettent d'exercer un contrôle **involontaire**.

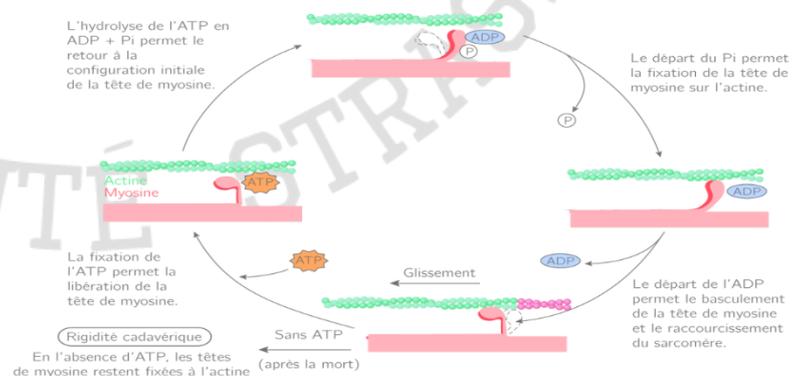
3. Les cellules musculaires striées cardiaques

Ces cellules se retrouvent au niveau du cœur, (plus précisément au niveau du **myocarde**) et constituent donc le muscle cardiaque, qui permet une contraction **involontaire**.

II. Comment se réalise la contraction musculaire ?

La contraction musculaire se réalise en 4 étapes, grâce à l'intervention de l'ATP (adénosine triphosphate, correspond à l'énergie de la cellule) et du Ca^{2+} (le calcium). Ces 4 étapes continuent de se réaliser tant qu'il y a du calcium.

Sur ce schéma, on retrouve en rose la myosine et en vert l'actine. Le principe de la contraction musculaire est de faire glisser les filaments d'actine par l'actine des têtes de myosine (petit excroissance rose). Le glissement de l'actine va permettre de raccourcir la cellule, et à plus grande échelle, le muscle.



Source de l'image : © kartable

- 1ère étape : la **fixation**

La tête de myosine activée se fixe sur le filament d'actine.

- 2ème étape : phase **motrice**

La tête de myosine change de conformation et pivote de **45 degrés**, ce qui entraîne le glissement du filament d'actine vers le centre du sarcomère. Pendant ce temps, l'ADP qui était fixé à la tête de myosine est éjecté.

- **3ème étape : la séparation**

Après que l'ADP ait été libéré, l'ATP vient se fixer sur la tête de myosine, ce qui provoque **la séparation de la tête de myosine du filament d'actine** ; le filament d'actine glisse ainsi vers l'extrémité du sarcomère.

- **4ère étape : l'activation**

L'ATP va être hydrolysé en **ADP** (adénosine diphosphate) selon la réaction suivante :

ATP + H₂O → ADP + Pi. Cette réaction se fait grâce à la tête de myosine qui a une **activité ATPasique** (elle est donc capable d'hydrolyser cet ATP). La tête de myosine va alors pivoter à **90 degrés** pour adopter une position pliée.

ATTENTION : la fixation de l'ATP à la tête de myosine est indispensable au relâchement du muscle, car cette molécule permet le passage de la tête de myosine d'un angle de 45 à 90 degrés.

Cela permet d'expliquer le phénomène de **rigidité cadavérique** car, lorsqu'un individu décède, l'ATP disparaît et donc les muscles ne peuvent ni se relâcher, ni se contracter et restent dans leur position.



Vidéos récapitulatives :

La cellule musculaire : <https://www.youtube.com/watch?v=GkMwjlLMz9k>

Contraction musculaire : <https://www.youtube.com/watch?v=IKairCXBOYM>

Exercices

1) Qui est-ce ?

A) Je me tourne à 45 ou à 90° et j'ai besoin d'énergie pour me séparer de l'actine.

B) Il me faut 4 étapes, du calcium et de l'ATP pour me mettre en marche.

C) On me retrouve dans les vaisseaux sanguins ou dans les organes creux et je n'ai pas besoin de réfléchir pour fonctionner.

2) Schéma à compléter.

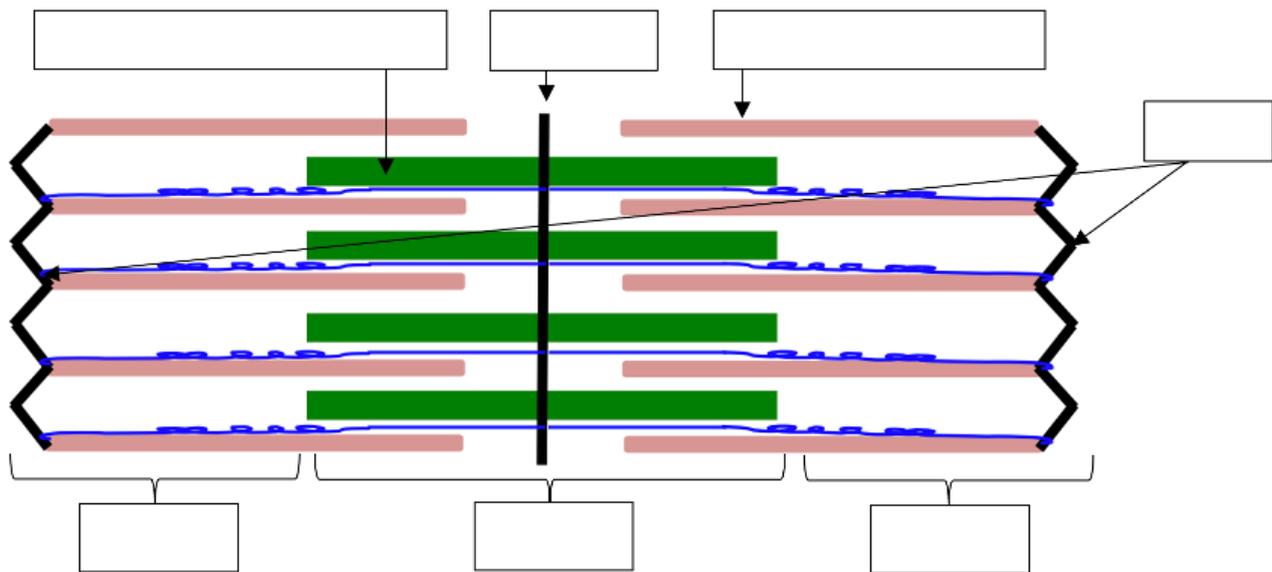


Image tirée du cours de Pr.Antal

3) Qui est l'intrus ?

- A. Activation – Elimination- Séparation
- B. Mg - Ca²⁺ - ATP
- C. ATP – H₂O – Pi
- D. Bande A – Bande S – Bande I

Correction

1) Qui est-ce ?

A) La myosine :

-Lors de la libération du phosphate inorganique (Pi) de l'ATP (Adénosine triphosphate) il y a **libération d'énergie** permettant le passage d'un angle de 90° à un angle à 45°.

-L'ATP est l'énergie de la cellule : sa fixation entraîne la **cassure** de la liaison actine / myosine.

B) La contraction musculaire :

-Les **4 étapes** sont : la fixation / la phase motrice / la séparation / l'activation.

-Les **ions calciums** se fixent à la **troponine** et permettent de former l'**union actine / myosine**.

-L'ATP est nécessaire pour délier actine et myosine.

C) Le muscle lisse :

-Il constitue la **paroi des vaisseaux sanguins** et des **organes creux**.

-Ses contractions sont **involontaires** : par exemple nous n'avons pas besoin de penser à contracter nos artères pour qu'elles pulsent : c'est automatique.

2) Schéma à compléter.

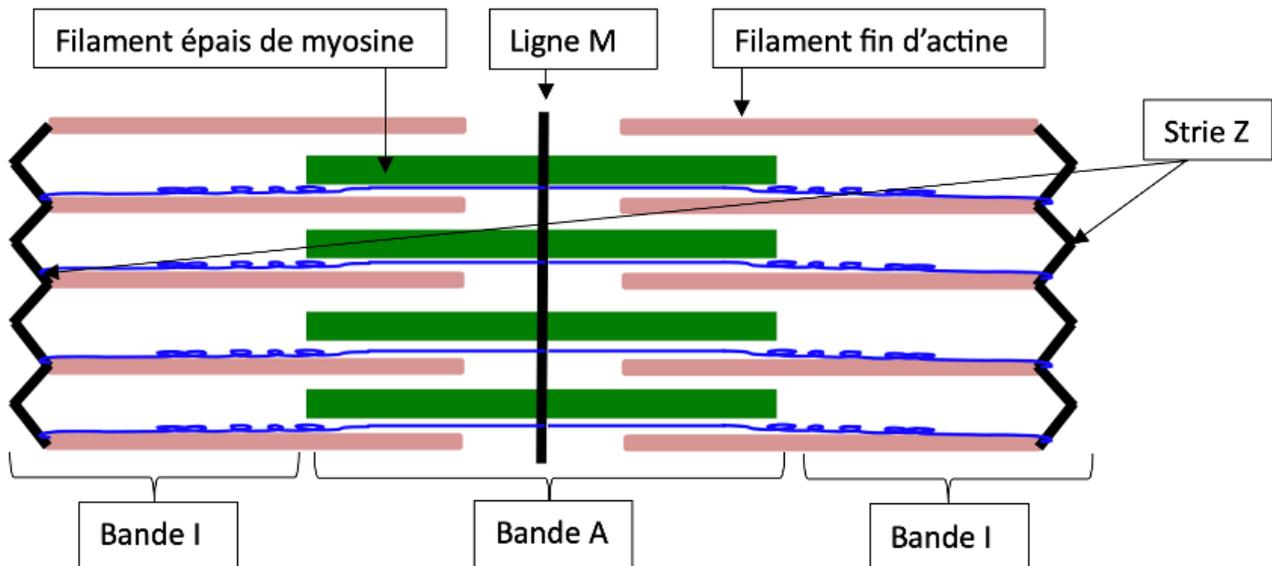


Image tirée du cours de Pr.Antal

3) Qui est l'intrus ?

- L'activation et la séparation sont des étapes de la contraction musculaire. Il n'existe pas d'étape d'élimination lors de celle-ci c'est donc l'intrus.
- L'ATP (adénosine triphosphate) et le Ca^{2+} (calcium) sont utilisés lors de la contraction musculaire. Le Magnésium (Mg) n'entre pas dans ce processus il est donc l'intrus.
- La réaction d'hydrolyse de l'ATP lors de l'étape d'activation s'écrit : $\text{ATP} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{ADP} + \text{P}_i$. Ici c'est l' H_2O qui réagit avec l'ATP ce qui va permettre de détacher un de ses 3 phosphate (P_i). P_i est donc le seul à se retrouver du côté des produits c'est donc l'intrus.
- La bande A (anisotrope) contient à la fois de l'actine et de la myosine, la bande I contient uniquement de l'actine et la bande S n'existe pas c'est donc l'intrus.

SYSTEME NERVEUX ET REFLEXE MYOTATIQUE

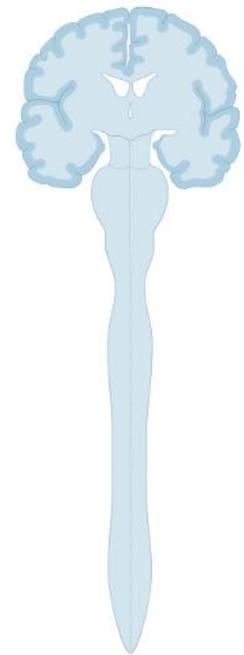
Cours

I. Système Nerveux Central et Système Nerveux Périphérique

Le système nerveux est divisé en deux parties fonctionnelles, le **système nerveux central SNC** et le **système nerveux périphérique SNP**.

I. Le système nerveux central (SNC)

Le SNC se compose du **cerveau** et du **tronc cérébral**, qui sont localisés au niveau de la boîte intracrânienne, et de la **moelle spinale (ou moelle épinière)**, située au niveau de la colonne vertébrale. Tous ces éléments sont situés dans des zones solides osseuses (crâne et colonne) car ce sont des structures fragiles et sensibles. Il envoie et code des informations grâce aux **neurones** qui vont transmettre le signal électrique dans tout le corps.



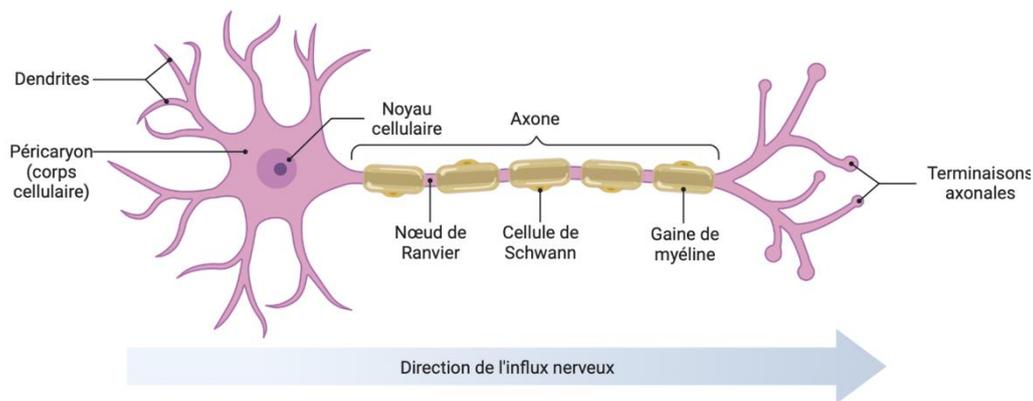
Réalisé sur Biorender.com

a. Les neurones

Un **neurone** est une cellule nerveuse, qui constitue l'unité fonctionnelle du système nerveux. Les neurones assurent la transmission de l'influx nerveux. Il existe différents types de neurones, classés selon leur morphologie, leur localisation, leur nombre de prolongements.

Un neurone est composé de **3 parties** : un **corps cellulaire** appelé péricaryon, ainsi que de 2 types de prolongements, l'**axone** (unique) et les **dendrites** (multiples).

Les **dendrites** conduisent l'influx nerveux de la périphérie vers le péricaryon, c'est-à-dire de manière **centripète**. L'**axone** conduit l'influx du péricaryon vers les terminaisons axonales donc de manière **centrifuge** (mnémotechnique : fuge=fugue, ça fuit la cellule). Ensuite les terminaisons axonales feront une synapse (point de contact) avec une dendrite d'un autre neurone et le schéma se répète.



Réalisé sur Biorender.com

Donc si on récapitule, le circuit de l'influx nerveux à travers les neurones :



L'axone est entouré **d'une gaine de myéline** qui est **isolante** et **discontinue** permettant ainsi d'accélérer la diffusion de l'influx et qu'il ne se disperse pas. Entre des segments de gaine de myéline, on dit que l'axone est "nu", car il est dépourvu de gaine de myéline, à ces endroits se trouvent **les nœuds de Ranvier**, qui sont les lieux de formation de l'influx nerveux, la conduction est donc dite **saltatoire**, car le signal se propage de nœuds en nœuds vu que la gaine de myéline est isolante.

b. Les cellules gliales

Les autres cellules composant le SNC sont les **cellules gliales** qui ont pour but de protéger et soutenir les neurones.

II. Le système nerveux périphérique (SNP)

Le système nerveux périphérique est l'autre partie du système nerveux.

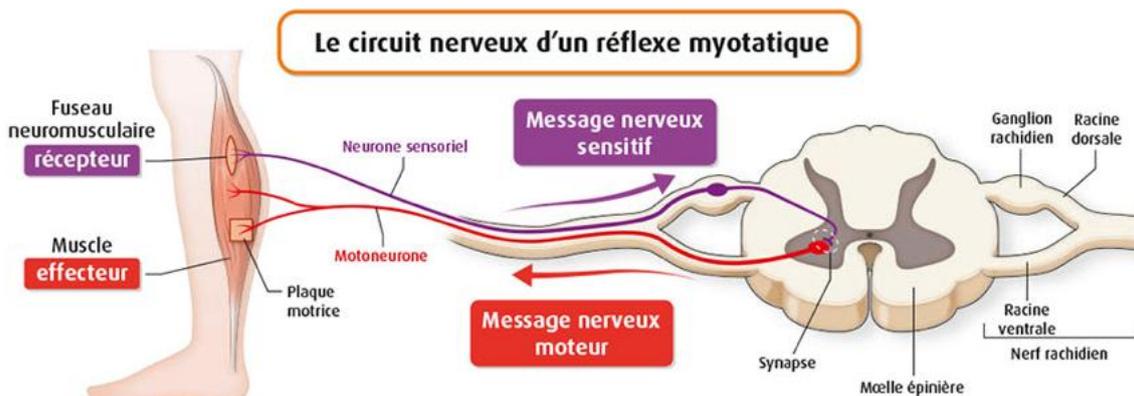
À l'inverse du SNC, il ne sera pas protégé par les os du crâne ou de la colonne. Au niveau du cerveau, le SNP sera représenté par les **nerfs crâniens**, qui partent du cerveau pour aller à la moelle, et au niveau de la moelle spinale le SNP sera représenté par les **nerfs spinaux**, qui partent de la moelle pour aller en périphérie. Il va véhiculer des informations entre les organes et le SNC.

Attention à ne pas confondre SNC/SNP au niveau de la moelle épinière. Les neurones communicants avec le cerveau et ne sortant pas latéralement de la moelle spinale sont des cellules du SNC. En revanche les neurones possédants des synapses avec les neurones intra spinaux et sortant pour aller innerver les organes font partie des nerfs spinaux du SNP.

Ainsi, le SNP et SNC sont complémentaires, ils ne peuvent pas fonctionner l'un sans l'autre 😊

III. Le réflexe myotatique : <https://www.youtube.com/watch?v=4lq02EzzV4U>

Le réflexe myotatique peut se définir comme une contraction **INVOLONTAIRE** de courte durée du muscle en réponse à un stimulus. Ces réflexes sont indispensables au maintien de notre posture et notre équilibre car ils entraînent une contraction automatique de nos muscles.



Source de l'image : © Belin Education/Humanis 2022

Mécanisme :

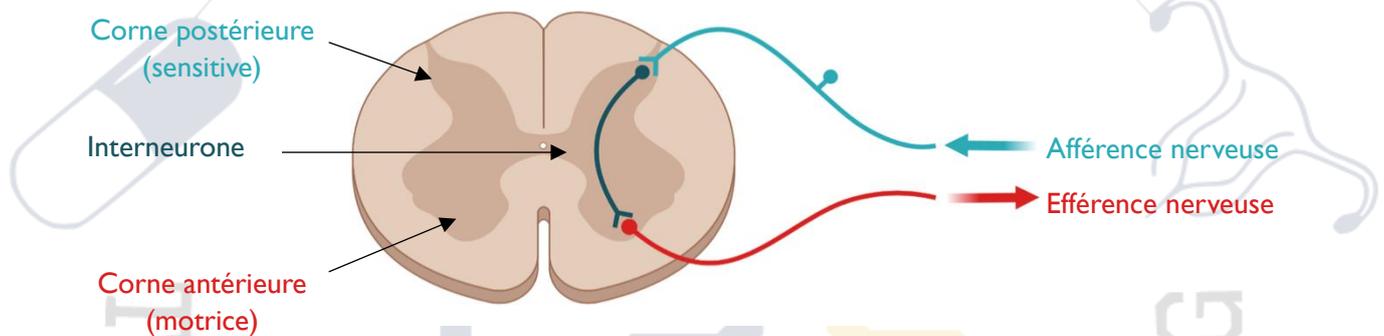
- 1) Un stimulus extérieur (exemple : coup de marteau) est appliqué sur le muscle, provoquant une extension de celui-ci (si on appuie sur un muscle, il s'étend sous la pression qu'on lui inflige, c'est une action purement mécanique)
- 2) Le récepteur musculaire sensoriel appelé fuseau neuromusculaire enregistre cette extension du muscle (information sensitive).
- 3) Le message nerveux sensitif qui en est issu chemine via un neurone sensoriel jusqu'au ganglion rachidien. Le ganglion rachidien est aussi appelé ganglion spinal et se situe dans la racine dorsale du nerf rachidien (voir schéma ci-dessus). Après être passé dans le ganglion rachidien le message nerveux

continu et est transmis à un motoneurone via une synapse située dans la substance grise (centrale, en papillon) de la moelle spinale. Ce dernier se poursuit jusque dans la substance grise de la moelle épinière.

- 4) Là-bas a lieu la synapse neuro-neuronale avec un motoneurone. Le message nerveux est alors moteur et chemine dans le motoneurone via la branche ventrale du nerf rachidien/spinal.
- 5) Le motoneurone se termine sur le même muscle que celui de départ, au niveau de la plaque motrice, formant avec ce dernier une synapse neuro-musculaire. L'information transportée indique au muscle qu'il doit se contracter pour compenser l'extension ressentie.
- 6) Le muscle se contracte : le réflexe myotatique est terminé.

IV. La transmission de l'information : <https://www.youtube.com/watch?v=UVaTJjuxMHo>

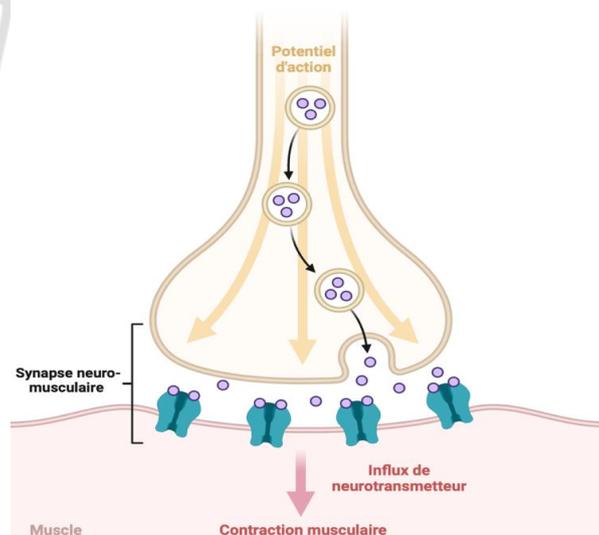
Lorsqu'un stimulus externe arrive au muscle, celui-ci va se propager sous forme d'influx nerveux à travers les neurones pour remonter jusqu'à la moelle spinale. Le signal arrive au niveau de la corne postérieure/dorsale qui reçoit l'information (sensitive), est transmis grâce à des synapses vers la corne antérieure/ventrale (motrice) qui renvoie l'information vers la périphérie sans remonter jusqu'au cerveau. Une fois ce signal arrivé au muscle, il provoquera la contraction non contrôlée (= involontaire) de ce dernier. Ce mécanisme est nommé « Arc réflexe » car il se produit de manière **INVOLONTAIRE**.



V. Contraction du muscle

Une cellule musculaire est composée d'une membrane présentant des sortes de replis vers l'intérieur de la cellule (invaginations) qui se nomment tubules T (=tubule transverse) dans le cas de la cellule musculaire, ainsi qu'un **réticulum sarcoplasmique**, qui est le nom donné au réticulum endoplasmique spécialisé de la cellule musculaire et qui constitue réserve considérable de calcium (Ca^{2+}).

La synapse au niveau du muscle se nomme la synapse neuromusculaire car elle fait le lien entre un neurone et le muscle. Ainsi, une fois que le signal électrique arrive à cette synapse, il va provoquer une libération de neurotransmetteurs du neurone vers la cellule musculaire. Ces derniers vont traverser la fente synaptique pour se lier à des récepteurs sur la membrane musculaire et provoquer une dépolarisation membranaire. La dépolarisation se propage sur toute la membrane et plus précisément au niveau des tubules T, qui contiennent une petite réserve de calcium.



La dépolarisation énoncée ci-dessus permet l'ouverture des canaux calciques (passage pour le calcium qui doit traverser la membrane pour arriver à l'intérieur de la cellule) qui sont sensibles au signal électrique. Ça permet au calcium situé dans les tubules T de rentrer dans la cellule. Ce dernier vient à son tour activer les récepteurs très sensibles au calcium qui sont situés sur le réticulum sarcoplasmique. Cela provoque leur ouverture et la libération d'une **TRÈS grande quantité** de calcium. (*Rappel : réticulum sarcoplasmique = source de grande quantité de calcium*)

On retrouve donc à ce moment une énorme quantité de calcium dans la cellule, on va appeler ce moment : le pic calcique. Ce calcium va venir se lier aux myofibrilles (élément contractile de la cellule musculaire) et ainsi provoquer une **CONTRACTION**.

Exercices

Concernant le système nerveux, quelle(s) est(sont) la(les) propositions exactes ?

- A. Les éléments du SNC et le SNP sont des structures fragiles qui sont contenus dans des structures osseuses résistantes.
- B. Le SNC et le SNP sont 2 structures qui agissent de manière indépendante.
- C. Un neurone est constitué de 3 parties distinctes : un corps cellulaire, un axone, et des dendrites.
- D. Les nœuds de Ranvier se trouvent sur la gaine de myéline.

Concernant le réflexe myotatique, quelle(s) est(sont) la(les) propositions exactes ?

- A. Le réflexe myotatique est une contraction volontaire qui permet de garder notre posture lorsqu'on sent qu'on n'est pas en équilibre.
- B. L'ordre des événements d'un arc réflexe est : Stimulus > Corne postérieure > Cerveau > Corne Antérieure > Contraction muscle.
- C. Une afférence, dans le cas du réflexe myotatique est défini comme une information qui part de la moelle et allant vers la périphérie.
- D. Une efférence, dans le cas du réflexe myotatique est défini comme une information qui part de la moelle et allant vers la périphérie.

cachez cette partie ↓

Correction

Les réponses attendues au QCM sur le système nerveux sont :

- A. **FAUX**. Ce sont bien tous les 2 des structures fragiles mais à la différence du SNC, le SNP n'est pas contenu dans des structures osseuses protectrices, il est donc davantage exposé à des lésions mécaniques et aux toxines.
- B. **FAUX**. Le SNC et le SNP sont complémentaires ! Ils n'ont aucun effet l'un sans l'autre.
- C. **VRAI**.
- D. **FAUX**. Les nœuds de Ranvier se trouvent **ENTRE** les segments de myéline, donc dans des endroits dépourvus de gaine de myéline (là où l'axone est nu).

Les réponses attendues au QCM sur le réflexe myotatique sont :

- A. **FAUX**. Le réflexe myotatique est une contraction **INVOLONTAIRE** qui permet cependant bien de garder notre posture.
- B. **FAUX**. L'ordre des événements est : Stimulus > Corne postérieure > Corne antérieure > Contraction. Le cerveau n'intervient pas dans l'arc réflexe.
- C. **FAUX**. La définition correspond à une efférence. Une afférence, dans le cas du réflexe myotatique est une information allant de la périphérie vers le centre (moelle ici). Elle est mise en œuvre par les neurones sensitifs/sensoriels.
- D. **VRAI**.

Nous avons besoin de ton avis

Trop compliqué ou au contraire trop facile ? Un chapitre t'a semblé peu compréhensible ? Tu penses avoir remarqué des erreurs ? N'hésite pas à nous faire un retour sur ce que tu as pensé du contenu de ce cahier.

Tes remarques nous permettrons d'adapter et de perfectionner cette remise à niveau au fur et à mesure des années.

Nous te remercions pour ton retour et nous espérons que ce cahier t'aura été utile.

L'équipe du Tutorat



TUTORAT
SANTÉ STRASBOURG

