Document téléchargeable sur le site
https://www.svt-tanguy-jean.com/

Lycée Valentine LABBÉ
41 rue Paul DOUMER – BP 20226
59563 LA MADELEINE CEDEX
CLASSE PRÉPARATOIRE TB
(Technologie & Biologie)

ENSEIGNEMENT DE SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE (SVT)
°° SCIENCES DE LA VIE °°

Partie 1. Organisation fonctionnelle de la cellule eucaryote
>> Cours <<

Chapitre 6 : proposition de fiche à compléter

Le cycle cellulaire et la vie des cellules

Objectifs : extraits du programme

Connaissances clefs à construire	Commentaires, capacités exigibles
1.5 Le cycle cellulaire et la vie des cellules	Ce chapitre permet une approche temporelle des différents processus cellulaires décrits dans la partie 1. Il est l'occasion de rappeler l'importance de la conservation de l'information génétique pour le renouvellement cellulaire et le maintien des organismes.
Le cycle cellulaire est constitué par une succession de phases assurant la croissance, le maintien et la division cellulaires.	-mettre en relation les différentes phases du cycle cellulaire avec la quantité d'ADN dans les cellules et les activités cellulaires, en particulier les processus liés à l'information génétique ; -connaître les durées relatives des phases du cycle cellulaire en lien avec les processus s'y déroulant.
Le passage d'une phase à une autre est sous le contrôle de signaux extracellulaires et de facteurs internes notamment liés à l'intégrité de l'information génétique.	- montrer que les points de contrôle du cycle cellulaire participent à la conservation de l'information génétique.
La conservation de l'information génétique au cours des cycles cellulaires est liée à : -la réparation des lésions de l'ADN ; -la duplication de l'information génétique au cours de la phase S par réplication semi-conservative de l'ADN ;	- montrer l'importance de la conservation de l'information génétique dans le maintien de l'activité des organismes. -montrer que la complémentarité des bases azotées est à l'origine de la fidélité des processus de réparation et de réplication ; -caractériser à l'échelle chromosomique la duplication chez les eucaryotes. **Limite** : Les mécanismes moléculaires de la réparation et de la réplication ne sont pas au programme. **Lien Biotechnologies** : 4.2.1 **Lien** : 5.1 [chapitre 21. Mécanismes de l'évolution]
La mitose répartit de façon équitable le matériel génétique nucléaire entre les deux cellules filles.	-caractériser les différentes phases de la mitose. -montrer l'importance du fuseau mitotique et de son fonctionnement dans la répartition équitable de l'information génétique. **Lien** : 3.1 [chapitres 13-14. Reproduction animale / végétale] - montrer, à l'aide de l'exemple de la division des cellules végétales la distinction entre division nucléaire et division cellulaire.
La différenciation cellulaire implique un arrêt des divisions cellulaires et une sortie du cycle cellulaire.	- montrer à partir d'un exemple que la différenciation cellulaire conduit à l'arrêt de la prolifération cellulaire. **Limite** : Aucun détail des signaux impliqués n'est attendu. **Lien** : 3.3 [chapitre 17. Développement embryonnaire animal]
Des dérèglements du cycle cellulaire conduisent à des divisions incontrôlées à l'origine des cancers.	**Limite** : La connaissance du contrôle du cycle cellulaire n'est pas attendue

Introduction

Cycle cellulaire :

Comment le cycle cellulaire se déroule-t-il et est-il contrôlé ?
Comment l'information génétique est-elle conservée au cours du cycle cellulaire et notamment lors de la duplication du matériel génétique ?
Comment l'information génétique est-elle équitablement répartie entre les cellules-filles lors des divisons cellulaires mitotiques ?

I. Le cycle cellulaire eucaryote, un ensemble d'étapes de vie cellulaire sous contrôle interne et extracellulaire

Capacités exigibles	✓ **Mettre en relation** les différentes phases du cycle cellulaire avec la quantité d'ADN dans les cellules et les activités cellulaires, en particulier les processus liés à l'information génétique ; ✓ **Connaître** les durées relatives des phases du cycle cellulaire en lien avec les processus s'y déroulant. ✓ **Montrer** que les points de contrôle du cycle cellulaire participent à la conservation de l'information génétique. ✓ **Montrer** à partir d'un exemple que la différenciation cellulaire conduit à l'arrêt de la prolifération cellulaire.

A. Le cycle cellulaire, étapes de la vie d'une cellule notamment caractérisées par une conservation de l'information génétique

1. Notions de cycle cellulaire, mitose, méiose

Divisions cellulaires :

Mitose (s. l.) : (!) **Conservation** du **nombre de chromosomes**
Méiose : (!) **Division par deux** du **nombre de chromosomes**

2. Rappel : la notion de chromosome simple (= à une chromatide) et de chromosome double (= à deux chromatides) [*important*]

Attention, les notions de ce paragraphe ont été vues plusieurs fois dans l'enseignement secondaire et sont absolument majeures. AUCUN CADEAU NE VOUS SERA FAIT, ni à l'écrit, ni à l'oral, sur ces notions. Aucune confusion sur le vocabulaire ne doit subsister !

Chromatide :
Chromosome : **- simple = monochromatidien :** **- double = bichromatidien = dupliqué :** → **chromatides sœurs** (**identiques** / associées par un **centromère**)

Dans cette liaison interviennent des ***protéines associant les deux chromatides*** qu'on nomme **cohésines**.

3. Étapes du cycle cellulaire mitotique et évolution de la quantité d'ADN

FIGURE 1. Évolution de la quantité d'ADN lors du cycle cellulaire.
Schémas : état et évolution d'un seul chromosome.

a. Un cycle divisé en interphase et mitose

Interphase : (!) **Chromosomes décondensés = chromatine**
Phase M = division cellulaire = mitose au sens large : (!) **Chromosomes condensés**
- Caryocinèse = Caryodiérèse (= mitose en sens strict) : (!) Chromosomes **doubles** > chromosomes **simples**
- Cytoocinèse = Cytodiérèse :

b. Une interphase divisible en phases G1, S et G2

G1 :
S :
G2 :

4. Cas du cycle cellulaire des cellules germinales s'engageant dans la méiose

⮝ **FIGURE 4. Évolution de la quantité d'ADN lors du cycle cellulaire d'une cellule germinale subissant la méiose.** D'après LIZEAUX, BAUDE *et al.* (2008)
Schémas : état et évolution d'une paire de chromosomes.

⮝ **FIGURE 5. Évolution chromosomique lors de la méiose.** *Schéma original.*

Division réductionnelle = méiose I : (!) **Réduction chromosomique** : **diploïdie** >> **haploïdie**
Division équationnelle = méiose II : (!) Chromosomes **simples** >> **doubles**

5. Quelques remarques sur le cycle cellulaire des Eubactéries

a. Une division cellulaire rudimentaire : la scissiparité

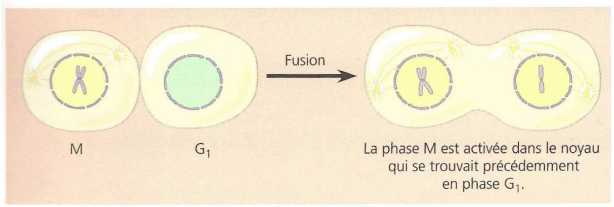
b. Une division cellulaire qui suppose une réplication du chromosome bactérien souvent en amont et s'inscrit dans des cycles cellulaires variables

c. Et les plasmides ? Une réplication et une répartition lors des divisons qui semblent aléatoires

B. Le cycle cellulaire, un processus contrôlé (exemple des Vertébrés)

1. Un contrôle intrinsèque (= intracellulaire)

a. Mise en évidence d'un contrôle cytoplasmique du cycle cellulaire par des expériences de fusion cellulaire ou d'injections cytoplasmiques



Mise en évidence de stimulus chimiques générés par le cytoplasme dans la régulation du cycle cellulaire. Il est possible de provoquer la fusion de cellules mammaliennes mises en culture et de former une cellule unique munie de deux noyaux. Le résultat d'une fusion de cellules qui se trouvent à des phases différentes du cycle laisse croire que des substances chimiques régissent l'enchaînement des phases. Par exemple, lorsqu'une cellule en phase M fusionne avec une cellule qui est rendue à une autre phase du cycle, le second noyau amorce immédiatement la mitose. Si la seconde cellule est en phase G_1, comme on le voit dans l'illustration, les chromosomes condensés, en début de prophase, apparaissent sous la forme d'un simple trait, sans chromatide sœur, parce qu'ils ont esquivé les phases S et G_2.

⮝ **FIGURE 7. Fusion d'une cellule en mitose et d'une cellule en interphase.**
D'après CAMPBELL & REECE (2004).

b. L'existence de points de contrôle assurant que la phase en amont a été réalisée, autorisant ainsi la poursuite du cycle

-

-

-

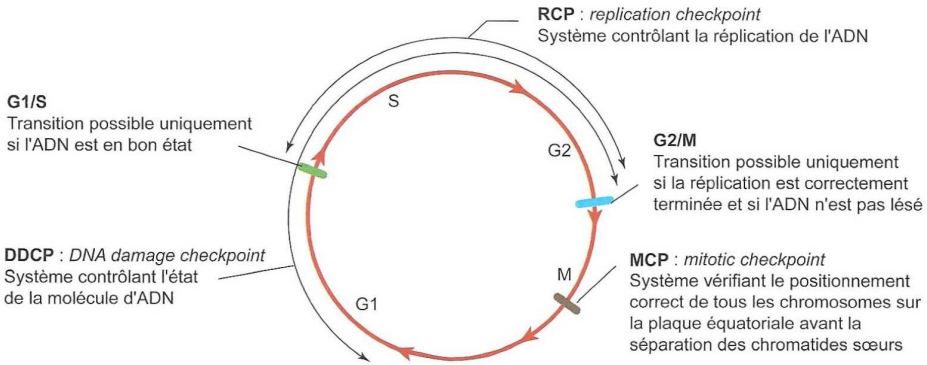
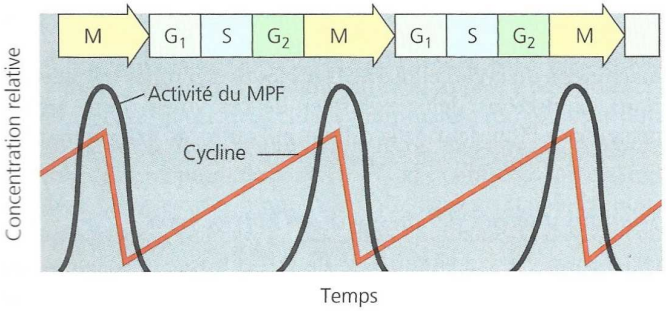


FIGURE 8. Points de contrôle du cycle cellulaire.
D'après RICHARD *et al.* (2015).

c. Une variation cyclique de certaines molécules cytoplasmiques, notamment le MPF [*limite programme ?*]



Fluctuation de l'activité du MPF et de la cycline pendant le cycle cellulaire

FIGURE 9. Activité MPF et concentration en cycline B lors du cycle cellulaire.
D'après CAMPBELL & REECE (2004).

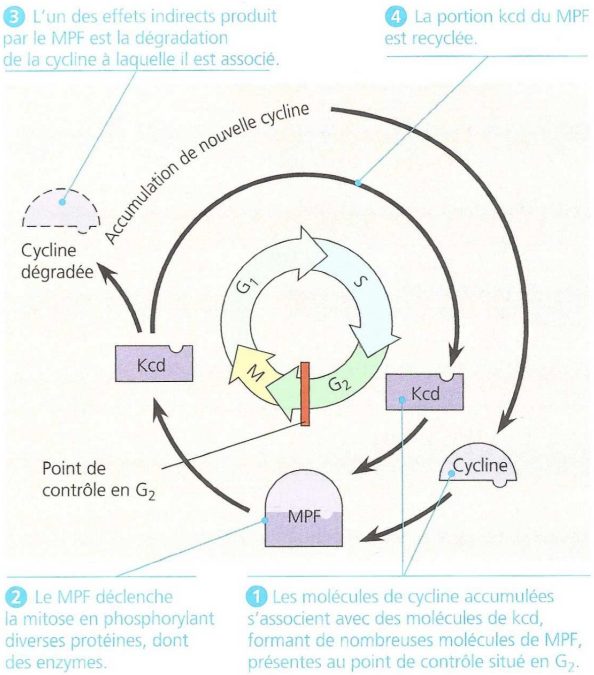


FIGURE 10. Modèle moléculaire simple de contrôle du cycle cellulaire d'une cellule animale.
D'après CAMPBELL & REECE (2004).

2. Un contrôle extrinsèque (= extracellulaire) : les facteurs de croissance

Facteurs de croissance = mitogènes :

Ex. Hormones, facteurs paracrines, contacts juxtacrines…

Inhibition de contact :

3. Le cycle cellulaire, un processus qui se fige lors de la différenciation (entrée en phase G0)

Phase G0 :

4. Un dérèglement possible du cycle cellulaire engendrant une prolifération cellulaire incontrôlée : l'exemple des cancers

a. Des cellules proliférant de manière incontrôlée : notion de cancer

Cancer = tumeur maligne :

3 caractéristiques :

-

-

-

b. Des cancers dus à plusieurs mutations affectant des oncogènes

Ce que je raconte ici est extrêmement simplifié et caricatural…

Proto-oncogène :
Oncogène :

D'autres gènes que les oncogènes peuvent être et sont souvent impliqués.

c. Des cellules qui finissent par se déplacer et envahir l'organisme : notion de métastase

Métastase :

d. Une prise en charge par le système immunitaire ou… des traitements anticancéreux

Bilan (adapté du programme)	✓ Le **cycle cellulaire** est constitué par une **succession de phases** assurant la **croissance**, le **maintien** et la **division cellulaires**. ✓ Le **passage** d'une phase à une autre est sous le **contrôle** de **signaux extracellulaires** et de **facteurs internes** notamment liés à **l'intégrité de l'information génétique**. ✓ La **différenciation cellulaire** implique un **arrêt des divisions cellulaires** et une **sortie** du **cycle cellulaire**. ✓ Des **dérèglements du cycle cellulaire** conduisent à des **divisions incontrôlées** à l'origine des **cancers**.

II. La conservation de l'information génétique au cours de l'interphase

Capacités exigibles	✓ **Montrer** l'importance de la conservation de l'information génétique dans le maintien de l'activité des organismes. ✓ **Montrer** que la complémentarité des bases azotées est à l'origine de la fidélité des processus de réparation et de réplication ; ✓ **Caractériser** à l'échelle chromosomique la duplication chez les eucaryotes [on en parlera dans le chapitre 16… plus adapté !]

A. La réplication, un processus semi-conservatif et plutôt conforme de duplication de l'information génétique

Réplication :

1. La réplication, un processus semi-conservatif où un brin est néoformé à partir d'un brin matrice par complémentarité de bases

a. Mise en évidence de la semi-conservativité de la réplication chez les Bactéries (Meselson & Stahl 1958, Cairns 1963)

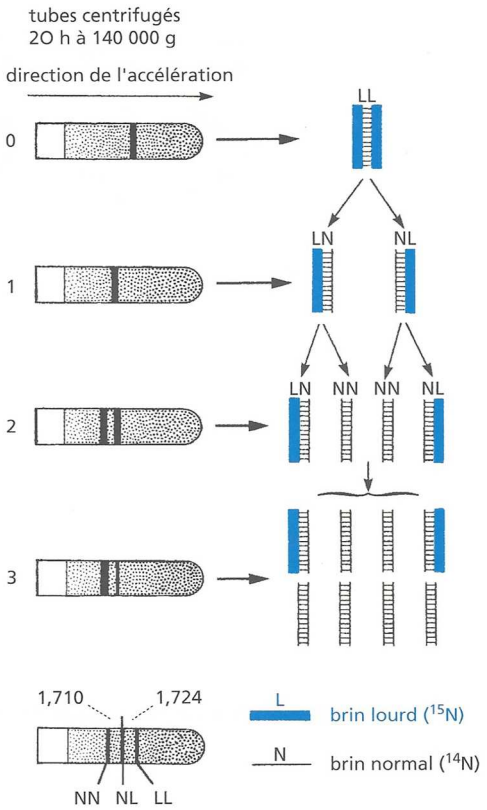
α. Position du problème : la réplication est-elle conservative, semi-conservative ou dispersive ?

Semi-conservativité :

β. Les travaux décisifs de Meselson & Stahl (1958)

i. Principe général : des cultures de colibacilles sur milieu azoté radioactif puis non radioactif

ii. Résultats obtenus



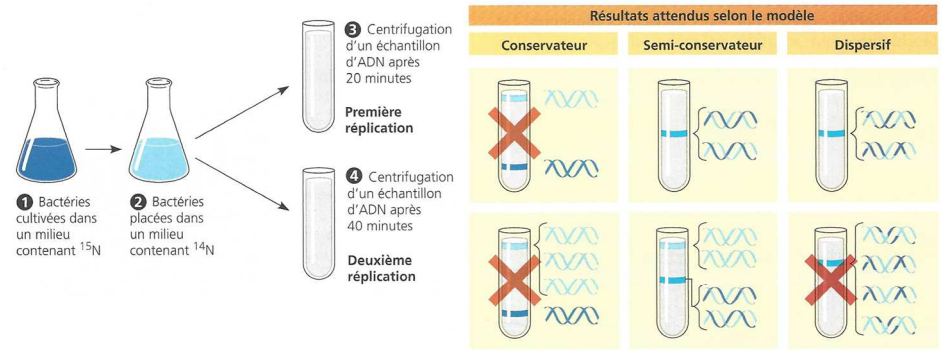
Expérience de Meselson et Stahl.

Le tube 0 est obtenu avec une population bactérienne cultivée pendant de nombreux cycles cellulaires sur NH_4Cl marqué au ^{15}N lourd ; l'ADN de cette population est donc lourd (densité 1, 724). Un échantillon prélevé dans cette population est cultivé sur NH_4Cl marqué au 14^N léger. L'évolution de son ADN est suivie (tubes 1, 2, 3) après 1, 2, 3 doublements de populations donc 1, 2, 3 cycles cellulaires. Le tube inférieur sert de référence.

FIGURE 16. <u>Expérience de MESELSON & STAHL : résultats (à gauche) et interprétation (à droite).</u> D'après PEYCRU *et al.* (2010a)

iii. Éléments d'analyse et d'interprétation

➢ ***Invalidation du modèle dispersif***

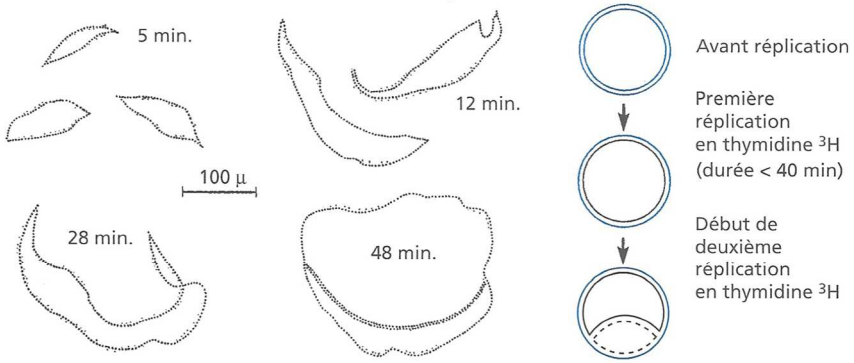


L'expérience de Meselson et Stahl a permis de tester les trois modèles de réplication de l'ADN. Meselson et Stahl ont cultivé plusieurs générations de bactéries *E. coli* dans un milieu contenant un isotope lourd de l'azote, ^{15}N. Une fois que les bactéries ont incorporé l'azote lourd dans leurs nucléotides, puis dans leur ADN, elles ont été placées dans un milieu contenant l'isotope le plus léger et le plus commun de l'azote, ^{14}N. Ainsi, tout nouvel ADN synthétisé par les bactéries devait être plus léger que l'« ancien » ADN fabriqué dans le milieu contenant le ^{15}N. Après centrifugation de l'ADN extrait des bactéries, Meselson et Stahl ont été en mesure d'identifier les molécules de différentes masses volumiques. Sur ce schéma, les éprouvettes représentent les résultats prévus selon chacun des trois modèles de la figure 16.8. La première réplication effectuée dans le milieu ^{14}N a produit une bande d'ADN hybride (^{15}N-^{14}N), ce qui a permis d'éliminer le modèle conservateur. La deuxième réplication a produit à la fois un ADN léger et un ADN hybride, ce qui a permis d'éliminer le modèle dispersif et a confirmé l'exactitude du modèle semi-conservateur.

FIGURE 17. <u>Un résumé illustré et interprété de l'expérience de Meselson & Stahl (1958).</u> D'après CAMPBELL & REECE (2004)

β. La confirmation par CAIRNS (1963)

i. Principe général : une visualisation autoradiographique des brins d'ADN sur le chromosome bactérien en cours de réplication



Résultats et interprétation de l'expérience de Cairns.

Chez E. coli, la durée maximale d'une réplication est de 40 minutes. Elle est ici suivie par utilisation de ^3H-thymidine et autoradiographie. Les stades à 5, 12 et 28 minutes correspondent donc à une première réplication en cours. Le stade à 48 minutes correspond à la réplication suivante. Les schémas d'interprétation sont représentés à droite.

FIGURE 20. <u>Expérience de CAIRNS : deuxième vision</u>. D'après PEYCRU *et al.* (2010a)
Sur cette figure, seuls les brins radioactifs apparaissent.

ii. Résultats et interprétation : confirmation de la semi-conservativité de la réplication et illustration de l'origine unique de réplication chez les Bactéries

b. Principe opératoire fondamental : une synthèse d'un brin néoformé par complémentarité de bases avec le brin matrice

FIGURE 21. La réplication : principe fondamental. D'après CAMPBELL & REECE (2004).

On essaiera d'**employer à bon escient** les mots « **duplication** » et « **réplication** ».

- La **duplication** est la ***copie (aussi conforme que possible) d'un objet*** ; par exemple, on peut parler de **chromosome dupliqué** pour désigner les ***chromosomes doubles*** puisque les **chromatides** y sont en deux **exemplaires semblables** et résultent d'une copie.
- La **réplication** est le nom du ***processus moléculaire qui permet justement de dupliquer l'ADN***. C'est un **mécanisme biochimique précis**.

2. La réplication, un processus qui suppose la polymérisation de nucléotides (initialement sous forme triphosphate) dans le sens 5' → 3'

FIGURE 22. Polymérisation nucléotidique lors de la réplication.
D'après CAMPBELL & REECE (2004).

3. La réplication, un processus bidirectionnel à une seule origine chez les Bactéries et plusieurs chez les Eucaryotes

Origine de réplication :
Réplicon :
Fourche de réplication :
Œil de réplication :

4. La réplication, un processus assuré par un complexe enzymatique que l'on peut nommer réplisome ou complexe de réplication

a. Une ouverture de la molécule par une hélicase et un désenroulement par des topoisomérases

b. Des protéines stabilisatrices empêchant le ré-appariement de la séquence : les SSB

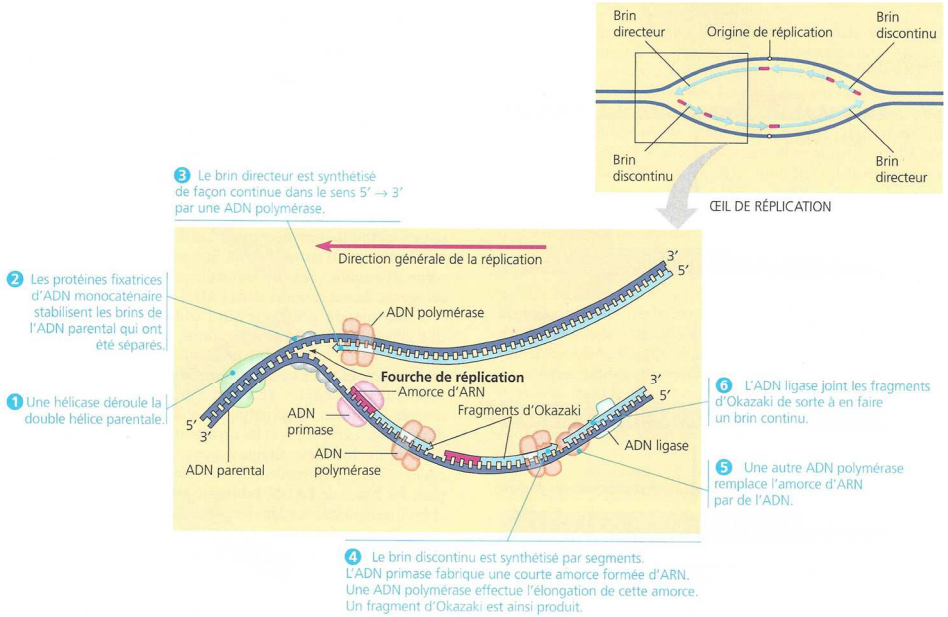
c. Une initiation de la polymérisation de l'ADN par une primase déposant une amorce ARN suivie d'une polymérisation par une ADN polymérase

d. Une polymérisation de l'ADN continue dans le brin précoce et discontinue dans le brin tardif constitué de fragments d'OKAZAKI

e. Une liaison des morceaux de brins néo-synthétisé par des ligases

f. Bilan : une vision d'ensemble de la réplication

FIGURE 26. La réplication : une vision synthétique. D'après PEYCRU *et al.* (2010a), corrigé.
Cadres : **protéines** appartenant au **complexe de réplication**.



Résumé de la réplication de l'ADN. Le schéma détaillé ci-dessus montre une fourche de réplication. Cependant, comme le rappelle la petite illustration globale un peu plus haut, à droite, la réplication se déroule simultanément aux deux fourches situées à chaque extrémité d'un œil de réplication. Remarquez que les brins directeurs sont amorcés par un segment d'ARN (magenta), tout comme la plupart des fragments d'Okazaki des brins discontinus. Dans les deux fragments sans amorce, une ADN polymérase a déjà remplacé les nucléotides d'ARN par des nucléotides d'ADN. Si l'on regarde chacun des nouveaux brins, on remarque que la moitié de leur longueur est synthétisée de façon continue, sous forme de brin directeur, alors que l'autre moitié (de l'autre côté du point d'origine) est synthétisée par fragments, sous forme de brin discontinu.

FIGURE 27. La réplication : une autre vision synthétique. D'après CAMPBELL & REECE (2004).

TABLEAU I. Principales enzymes intervenant lors de la réplication.
D'après CAMPBELL & REECE (2004).

*Pour les ADN polymérases, celles qui sont nommées avec une **lettre grecque** se retrouvent chez les **Eucaryotes** alors que celles qui sont nommées avec un **chiffre romain** se retrouvent chez les **Eubactéries** [pas nécessaire de retenir ça !].*

*NB Les **topoisomérases** ont été **omises** dans ce tableau.*

Début de la réplication

La double hélice se déroule ; chacun de ses deux brins sert de matrice	**Protéines de réplication, hélicases** et **protéines fixatrices d'ADN monocaténaire**

Synthèse d'un brin directeur

Amorçage	**ADN primase**
Élongation	**ADN polymérase (α et δ ou III)**
Remplacement de l'amorce d'ARN par de l'ADN	**ADN polymérase (β ou I)**

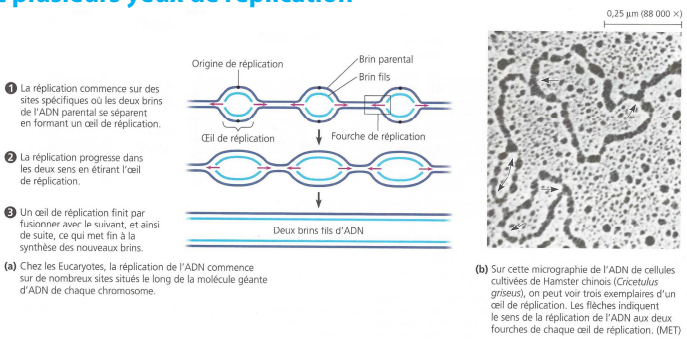
Synthèse d'un brin discontinu

Amorçage de chaque fragment d'Okazaki	**ADN primase**
Élongation du fragment	**ADN polymérase (α et δ ou III)**
Remplacement de l'amorce d'ARN par de l'ADN	**ADN polymérase (β ou I)**
Assemblage des fragments	**ADN ligase**

Principales protéines intervenant dans la réplication de l'ADN et leurs fonctions.

5. Quelques particularités de la réplication eucaryote

a. La réplication : un processus à plusieurs origines chez les Eucaryotes, et donc plusieurs yeux de réplication



(a) Chez les Eucaryotes, la réplication de l'ADN commence sur de nombreux sites situés le long de la molécule géante d'ADN de chaque chromosome.

(b) Sur cette micrographie de l'ADN de cellules cultivées de Hamster chinois (*Cricetulus griseus*), on peut voir trois exemplaires d'un œil de réplication. Les flèches indiquent le sens de la réplication de l'ADN aux deux fourches de chaque œil de réplication. (MET)

FIGURE 28. La réplication eucaryote : plusieurs yeux de réplications simultanés.
D'après CAMPBELL & REECE (2004).

b. Le problème de la réplication des télomères et l'intérêt des télomérases que l'on rencontre dans certaines cellules [*pour information ?*]

6. L'existence d'erreurs généralement corrigées lors de la réplication (correction sur épreuve) ou après (réparation post-réplicative)

7. Bilan : la réplication, un processus hautement conforme

Un **processus génétique** est dit **conforme** ***lorsqu'il y a conservation de la séquence nucléotidique au cours du processus***.

B. Les mutations ponctuelles, des modifications génétiques aléatoires généralement corrigés mais pouvant être transmises

1. Des modifications locales de la séquence nucléotidique de plusieurs types

a. Définition de mutation et mutation ponctuelle

Mutation au sens large = variation génétique :
Mutation ponctuelle :

b. Typologie des mutations ponctuelles : insertions (= additions), délétions, substitutions

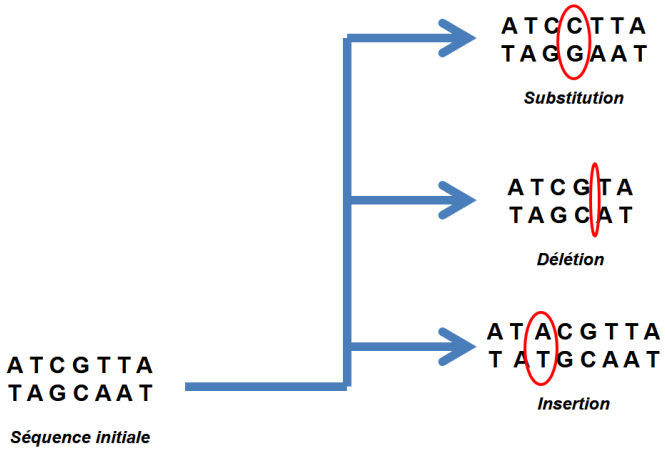


FIGURE 30. Typologie des mutations ponctuelles. *D'après mon cours de Capes.*

2. Des modifications locales de la séquence nucléotidique qui peuvent apparaître lors de la réplication ou du stockage de l'ADN

a. Des mutations ponctuelles qui peuvent apparaître lors de la réplication de l'ADN

α. L'exemple des mésappariements dus à la tautomérie des bases azotées

FIGURE 32. Appariements standards de bases azotées et mésappariements : une schématisation simple. *Schéma original.*
Les pointillés rouges indiquent les liaisons H entre bases azotées.

β. Insertions ou délétions par glissement de brins [*pour information ?*]

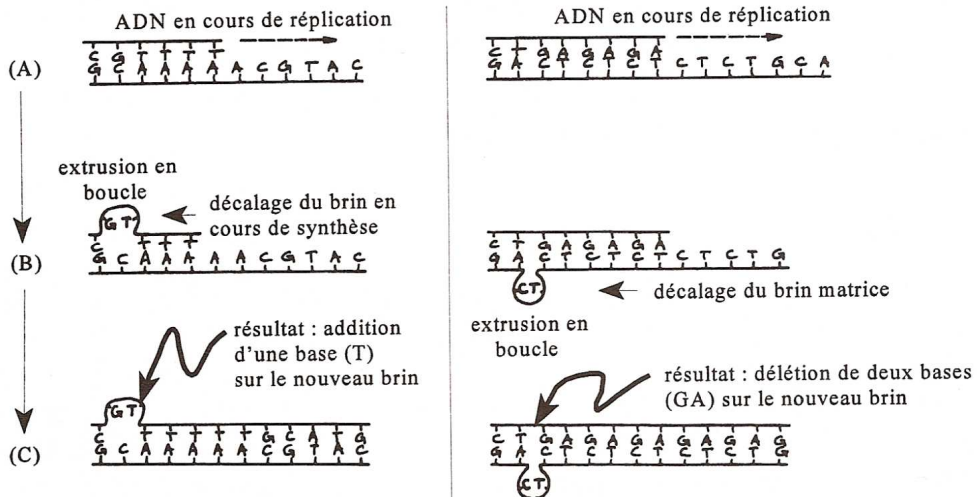


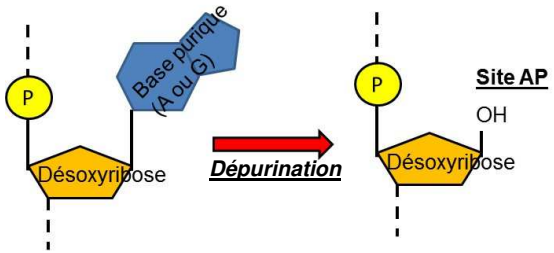
FIGURE 33. Les glissements de brin lors de la réplication et leurs conséquences [*pour information ?*]. D'après POULIZAC (1999).

b. Des mutations ponctuelles qui peuvent apparaître lors du stockage de l'ADN de manière spontanée ou induite → Agents mutagènes

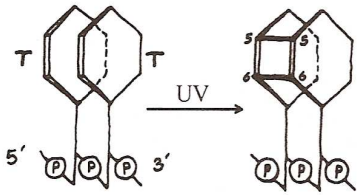
α. Un exemple d'altération chimique pouvant engendrer une mutation spontanée : la dépurination

Dépurination :

→ site AP (apurinique)



β. Un exemple d'altération de l'ADN engendrée par le rayonnement UV (un agent mutagène) et pouvant susciter une mutation induite : la dimérisation de thymines



Dimérisation de deux thymines adjacentes sur un brin

FIGURE 35. Dimérisation de thymines. D'après POULIZAC (1999).

3. Des modifications locales de la séquence nucléotidique qui sont souvent corrigées par des systèmes enzymatiques de réparation de l'ADN

a. Des erreurs de réplication corrigées au moment même de la réplication : l'activité auto-correctrice des ADN polymérases (activité exonucléasique)

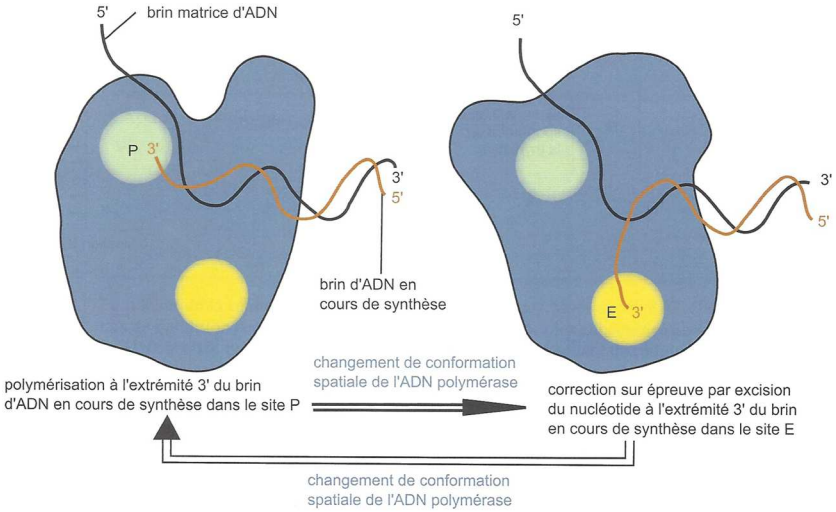


FIGURE 36. Activité auto-correctrice d'une ADN polymérase. D'après PEYCRU *et al.* (2013).
Site P : activité polymérase. Site E : activité exonucléasique.

b. Une correction des altérations de l'ADN hors réplication impliquant des endonucléases

FIGURE 37. Ensemble d'étapes enzymatiques permettant d'exciser et de remplacer un nucléotide défectueux (par exemple : un site AP) : un modèle possible.
D'après PEYCRU *et al.* (2013).

Pour comprendre : différence entre endonucléase et exonucléase

Une **enzyme** ayant une **activité exonucléasique** ***dépolymérise un acide nucléique par une extrémité***, alors qu'une **enzyme** à **activité endonucléasique** ***coupe un brin d'acide nucléique (ou deux brins) au milieu de la molécule***.

Remarque : les **enzymes de restriction** sont des **endonucléases** !

c. Des corrections hors réplication pouvant recourir à des mécanismes particuliers : l'exemple de la dé-dimérisation de thymines

α. Une possibilité de réversion directe

β. Une possibilité de réversion par la photolyase

4. Des modifications locales de la séquence nucléotidique aléatoires et à la fréquence variable

On peut en définir la **fréquence**.

Un **chiffre** est souvent avancé chez les **Eubactéries** et régulièrement extrapolé à tous les êtres vivants (totalement indicatif !!) :

- Le **taux de mutation moyen** serait de l'ordre de **10^{-9} par cycle cellulaire**
- Le **taux de mutation lors de réplication** serait de l'ordre de **10^{-6} par réplication** : les **mécanismes de réparation** expliquent que l'on tombe à des **taux de mutation nettement plus faibles** sur l'ensemble du **cycle cellulaire**.

5. Des modifications locales de la séquence nucléotidique qui peuvent avoir des conséquences cellulaires et se répandre dans les populations

a. Des mutations classables selon leur effet sur l'information génétique : mutations faux-sens, non-sens, neutres…

1. **Mutations efficaces** =

a) Mutation **faux-sens** :

° Mutation perte de fonction = défavorable = délétère :

° Mutation gain de fonction = favorable :

b) Mutation **non-sens** :

NB Mutation **décalante** :

2. **Mutations neutres** =

a)

b) Mutation silencieuse :

b. Des mutations qui sont forcément transmises à la descendance chez les unicellulaires

c. Des mutations qui ne peuvent se répandre dans les populations que si elles touchent les cellules à l'origine des gamètes (cellules germinales dans le cas des Mammifères)

d. Des mutations qui se répandent ou non dans les populations sous l'effet de la sélection naturelle et de la dérive génétique

Voir chapitres 19 (**Populations**) et 21 (**Évolution**)

Sélection naturelle :
Dérive génétique :

Notez que, **à l'échelle moléculaire, il est aujourd'hui évident et démontré que la plupart des mutations sont neutres**. Le **hasard** est donc un élément déterminant de l'**évolution** des **populations** et des **espèces**.

Bilan (adapté du programme)	✓ La **conservation de l'information génétique** au cours des **cycles cellulaires** est liée à : - la **réparation** des **lésions de l'ADN** ; - la **duplication** de **l'information génétique** au cours de la **phase S** par **réplication semi-conservative** de l'ADN.

III. La transmission conforme de l'information génétique au cours de la division cellulaire mitotique

Capacités exigibles	✓ **Caractériser** les différentes phases de la mitose. ✓ **Montrer** l'importance du fuseau mitotique et de son fonctionnement dans la répartition équitable de l'information génétique. ✓ **Montrer**, à l'aide de l'exemple de la division des cellules végétales la distinction entre division nucléaire et division cellulaire.

A. Un processus séquentiel : les étapes de la mitose (exemple des cellules animales)

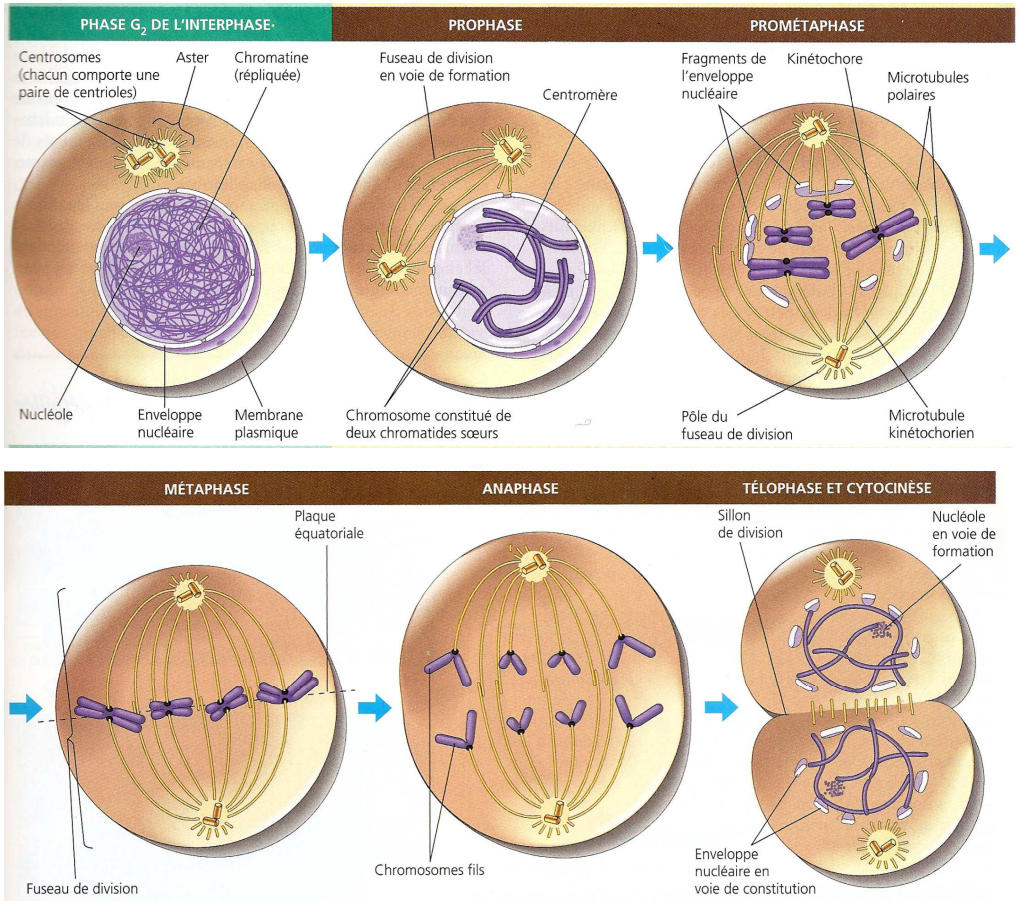


FIGURE 41. Une vision d'ensemble (simple) de la mitose. D'après CAMPBELL & REECE (2004).

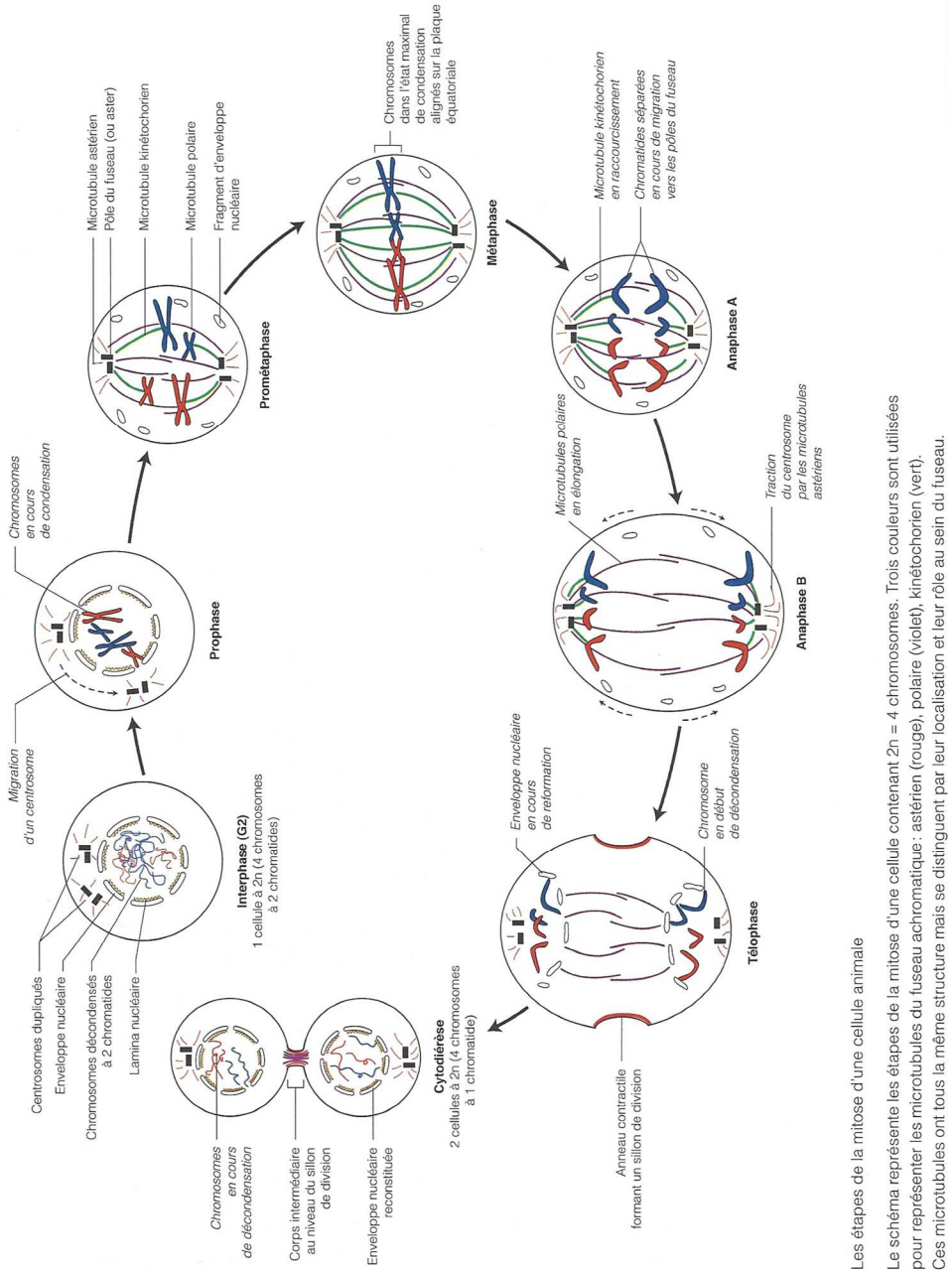


FIGURE 42. Une vision d'ensemble (plus complète) de la mitose. D'après SEGARRA *et al.* (2014).

Les étapes de la mitose d'une cellule animale

Le schéma représente les étapes de la mitose d'une cellule contenant 2n = 4 chromosomes. Trois couleurs sont utilisées pour représenter les microtubules du fuseau achromatique : astérien (rouge), polaire (violet), kinétochorien (vert). Ces microtubules ont tous la même structure mais se distinguent par leur localisation et leur rôle au sein du fuseau.

Préalablement à la mitose, on rappelle que la cellule était en **phase G2** et que la **phase S** a auparavant permis :
- La **duplication de l'information génétique** au moyen de la **réplication**.
- La **duplication des centrosomes** (il y en a **deux**, composés **chacun** de **deux centrioles**).

1. La prophase et la prométaphase (2*n* chromosomes doubles)

Prophase :
- **condensation** des **K**
- mise en place du **fuseau**

Prométaphase :
- **Vésicularisation** de l'**enveloppe nucléaire**
- **Fixation** des **microtubules kinétochoriens**

2.La métaphase (2*n* chromosomes doubles)

- Formation de la **plaque métaphasique** (alignement équatorial des K)

3. L'anaphase (2*n* chromosomes doubles > simples)

- **Séparation** des **chromatides-sœurs** (clivage des centromères) [*MT kinétochoriens*]
- **Ascension polaire** [*MT kinétochoriens*]
  >> (!) **répartition équitable** du **matériel génétique**
- **Allongement** de la **cellule** (cellules animales seulement) [*MT polaires*]

4. La télophase et la cytodiérèse (2*n* chromosomes simples)

Télophase :
- **Reformation** de **l'enveloppe nucléaire**
- **Dépolymérisation** progressive du **fuseau**

Cytodiérèse :
- **Clivage** des **cytoplasmes** [dans les cellules animales, **anneau contractile** : actine-myosine]
*(!) **Phragmoplaste** dans les cellules végétales*

5. Bilan des étapes de la mitose

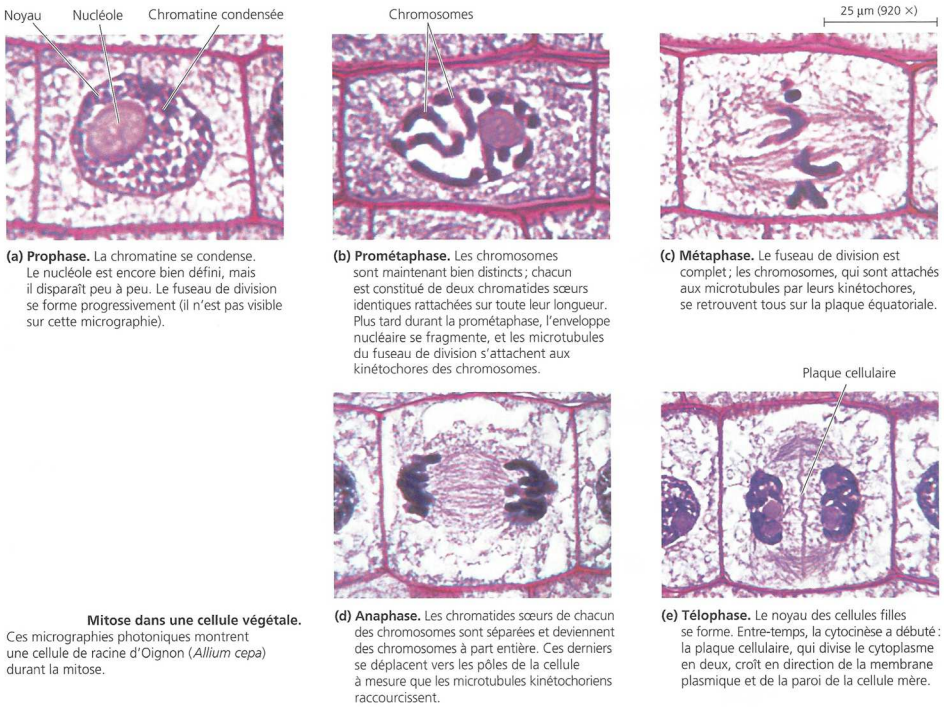
TABLEAU III. La mitose en bref. D'après PEYCRU *et al.* (2010a).

Étape de la mitose (durée en min)	chromosomes	cytosquelette
Prophase (20 à 30)	Compaction d'un facteur 10 000. 2chromatides par chromosome.	Séparation des centrosomes. Mise en place du fuseau mitotique grâce au MTOC.
Prométaphase (5)	Chromosomes rendus accessibles aux microtubules. Migration vers l'équateur.	Fixation des chromosomes aux microtubules kinétochoriens.
Métaphase (20 à 40)	Organisation sur le plan équatorial de la cellule.	Mise sous tension des chromosomes par les microtubules kinétochoriens.
Anaphase (5 à 10)	Clivage des centromères. Séparation des chromatides sœurs. Ascension polaire.	Dépolymérisation des microtubules kinétochoriens. Écartement des pôles.
Télophase et cytocinèse (10 à 30)	2 lots de chromosomes identiques à 1 chromatide. Décondensation	Sillon de division perpendiculaire au fuseau de division dû à la contraction d'un anneau d'actine et de myosine. Phragmoplaste.

En rouge : caractéristique des cellules animales ; en vert : caractéristique des cellules végétales ; en noir : ce qui est commun aux cellules animales et végétales. MTOC : Centre Organisateur des MicroTubules.

B. Les particularités de la mitose végétale

FIGURE 49. Mitose dans les cellules végétales (5)/(6) : télophase / cytodiérèse.



(a) Prophase. La chromatine se condense. Le nucléole est encore bien défini, mais il disparaît peu à peu. Le fuseau de division se forme progressivement (il n'est pas visible sur cette micrographie).

(b) Prométaphase. Les chromosomes sont maintenant bien distincts ; chacun est constitué de deux chromatides sœurs identiques rattachées sur toute leur longueur. Plus tard durant la prométaphase, l'enveloppe nucléaire se fragmente, et les microtubules du fuseau de division s'attachent aux kinétochores des chromosomes.

(c) Métaphase. Le fuseau de division est complet ; les chromosomes, qui sont attachés aux microtubules par leurs kinétochores, se retrouvent tous sur la plaque équatoriale.

Mitose dans une cellule végétale. Ces micrographies photoniques montrent une cellule de racine d'Oignon (*Allium cepa*) durant la mitose.

(d) Anaphase. Les chromatides sœurs de chacun des chromosomes sont séparées et deviennent des chromosomes à part entière. Ces derniers se déplacent vers les pôles de la cellule à mesure que les microtubules kinétochoriens raccourcissent.

(e) Télophase. Le noyau des cellules filles se forme. Entre-temps, la cytocinèse a débuté : la plaque cellulaire, qui divise le cytoplasme en deux, croît en direction de la membrane plasmique et de la paroi de la cellule mère.

FIGURE 52. Mitose dans les cellules végétales. D'après CAMPBELL & REECE (2004).

1. L'absence de centrioles dans le COMT

2. L'absence d'élongation cellulaire lors de la division

3. Une cytodiérèse reposant sur l'édification d'une plaque cellulaire (phragmoplaste) percée de plasmodesmes

4. Un déplacement des microtubules lors de la mitose (et plus globalement du cycle cellulaire)

C. Les mécanismes importants de la mitose

1. Importance de la condensation de l'ADN

Revoir les **niveaux de condensation de l'ADN** (chapitre 1 sur la cellule)

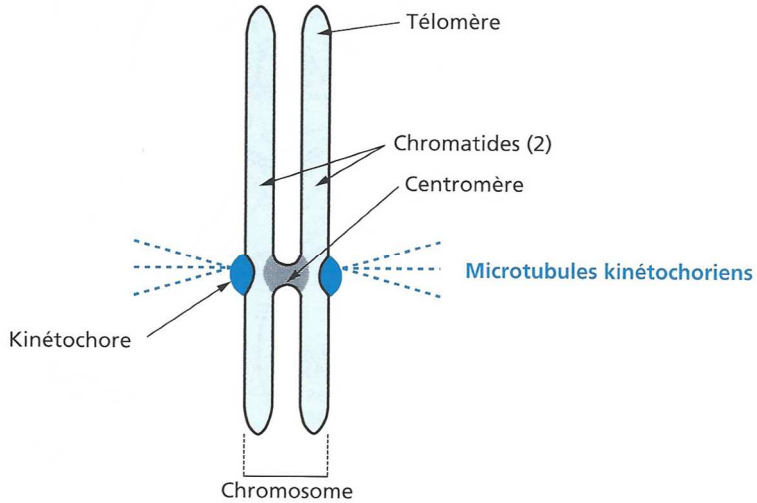


FIGURE 53. Rappel de l'organisation d'un chromosome double condensé.
D'après PEYCRU *et al.* (2010a).

2. Importance du cytosquelette

a. Des microtubules organisés en un fuseau de division (microtubules polaires, astériens et kinétochoriens)

Fuseau de division :

- ***Microtubule astériens*** *: vers la* ***membrane***
  > rôle pas clair.
- ***Microtubules kinétochoriens*** *: fixation sur* ***kinétochores***
  *> **déplacement des chromosomes** et **chromatides**.*
  *(!) **interaction kinétochore/ MT** (affinité plus forte du **kinétochore** pour tubuline polymérisée que dépolymérisée)*
- ***Microtubule polaire*** *: se rejoignent au* ***centre la cellule***
  *> contrôle de **l'allongement** de la cellule*
  *(!) Interaction avec **kinésine** (moteur moléculaire)*

FIGURE 56. Organisation et fonctionnement du fuseau mitotique.
D'après SEGARRA *et al.* (2014).

b. Importance de la polymérisation-dépolymérisation des microtubules dans leur allongement ou leur raccourcissement

FIGURE 58. Mécanisme de l'ascension polaire des chromatides.
D'après SEGARRA *et al.* (2014).

c. Rôle des lamines dans la vésicularisation et la reformation de l'enveloppe nucléaire [*phosphorylation / déphosphorylation*]

⮝ FIGURE 59. Rôle des lamines sur l'état de l'enveloppe nucléaire.
D'après SEGARRA *et al.* (2014).

d. Rôle des interactions actine-myosine dans la cytodiérèse des cellules animales

[**Sillon de division** dû à **anneau contractile** d'actine-myosine]

D. Aspects génétiques de la mitose : discussion de sa conformité

1. La mitose, un processus fondamentalement conforme

- **Conformité** permise par :
  - ° **Réplication** en amont [**mutations rares** et souvent **corrigées**]
  - ° **Mécanismes** de la **mitose**, avec **condensation des K**
- **Importance** chez les **organismes pluricellulaires** :
  - ° **Développement**
  - ° **Reproduction asexuée**

2. Des limites à la conformité

a. La possibilité de mutations non réparées transmises aux cellules-filles

b. Une inégalité de répartition du matériel cytoplasmique (y compris génétique) lors de la cytodiérèse

c. L'existence (très rare) de recombinaisons mitotiques : les *crossing-over* mitotiques [*pour information*]

E. Aspects ontogénétiques et reproductifs de la mitose

1. La base du développement pluricellulaire et de la reproduction asexuée

a. La multiplication des cellules germinales (Métazoaires) ou des cellules-mères de spores (Embryophytes)

α. Cas de la multiplication des cellules germinales (ex. des Mammifères) [avec rappels sur la gamétogenèse]

Revoir le chapitre 13 sur la **reproduction animale**

β. Cas de la multiplication des cellules mères de spores mâles (ex. des Angiospermes)

Revoir le chapitre 14 sur la **reproduction végétale**

b. La production d'un gamétophyte chez les Embryophytes

Revoir chapitre 14 sur la **reproduction végétale**

2. Une intervention dans le cadre de la reproduction sexuée

Bilan (adapté du programme)	✓ La **mitose** répartit de façon **équitable** le **matériel génétique nucléaire** entre les **deux cellules filles**.

Quelques schémas bilans

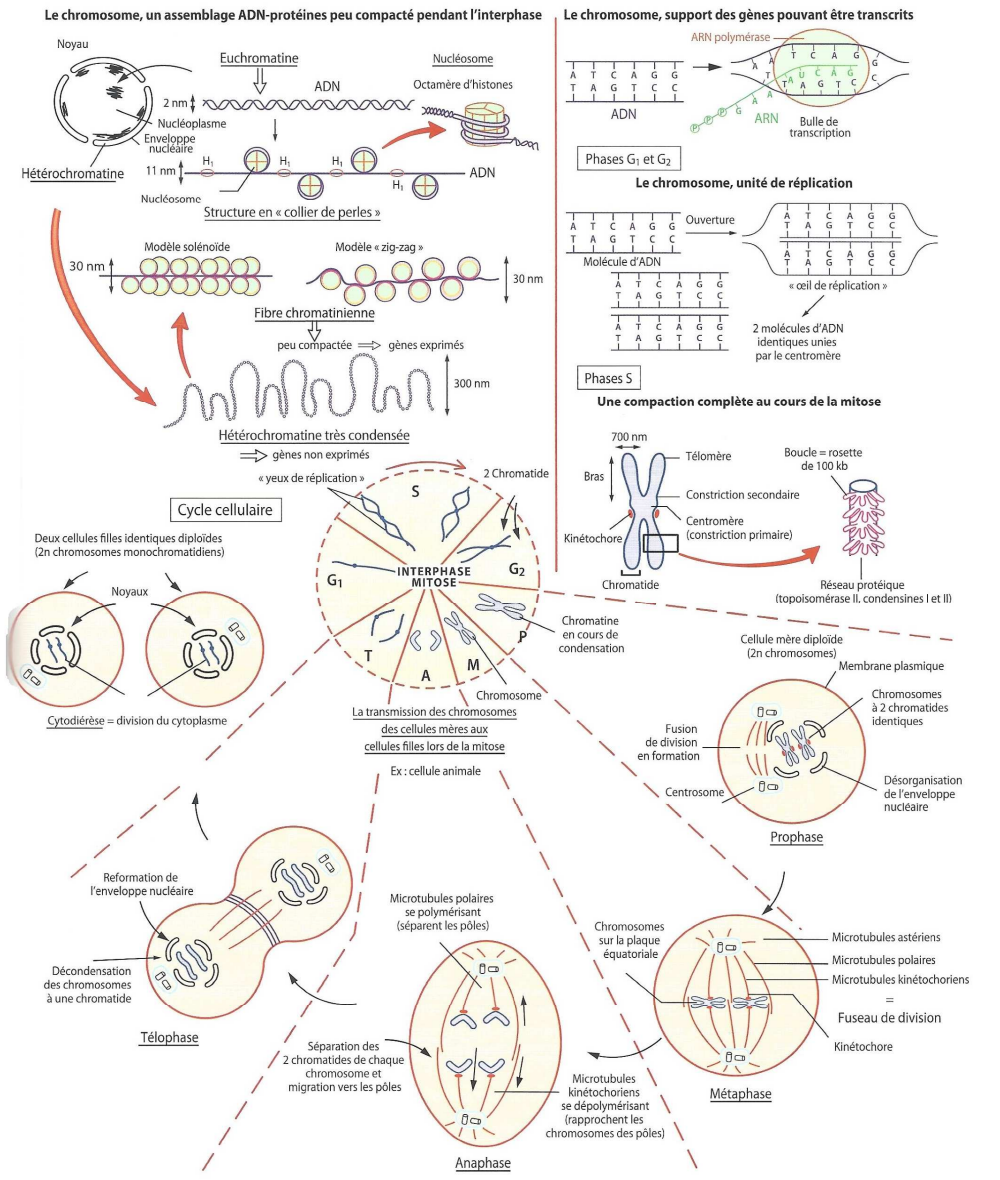


FIGURE 66. Le cycle cellulaire et les chromosomes. D'après SAINTPIERRE *et al.* (2017).

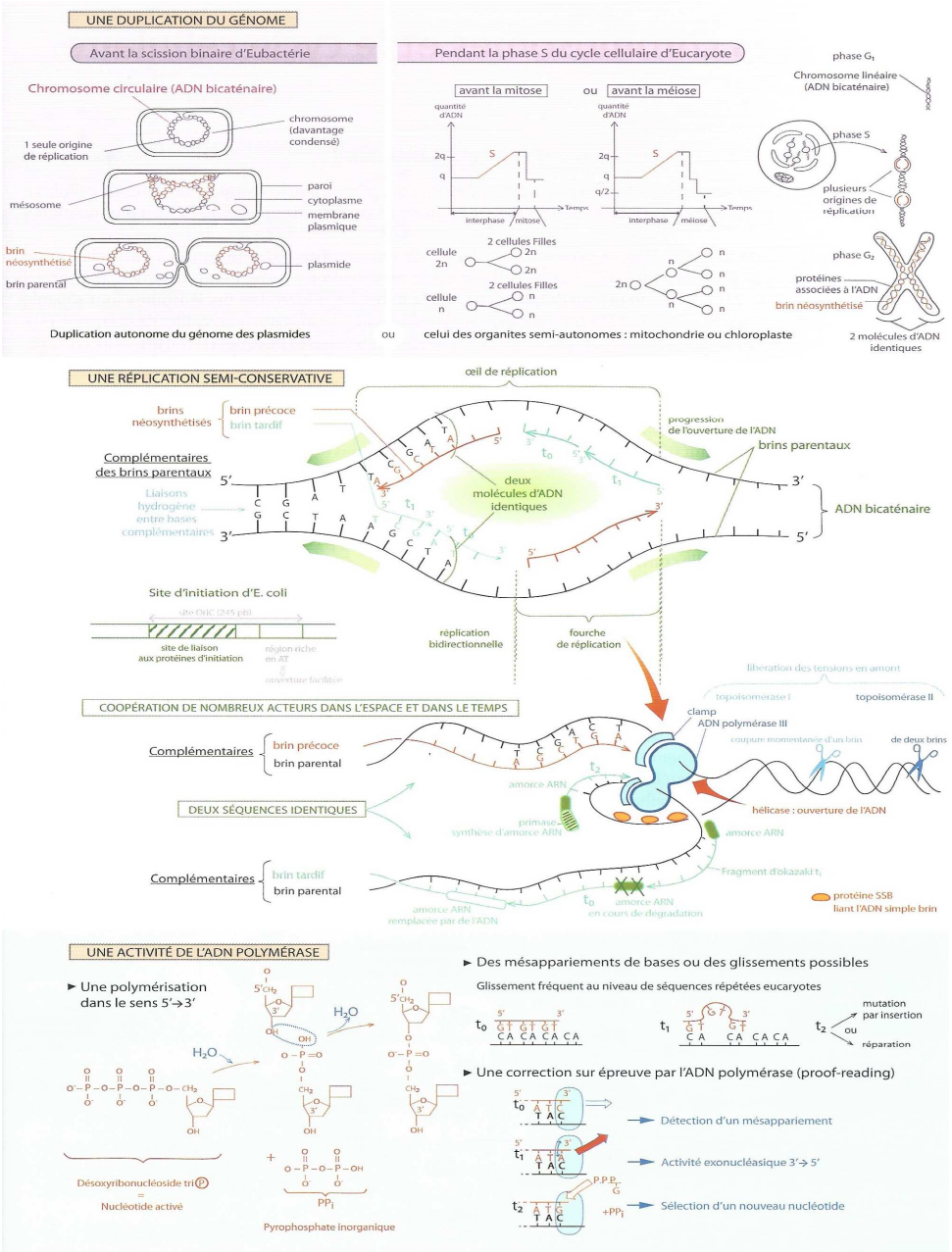
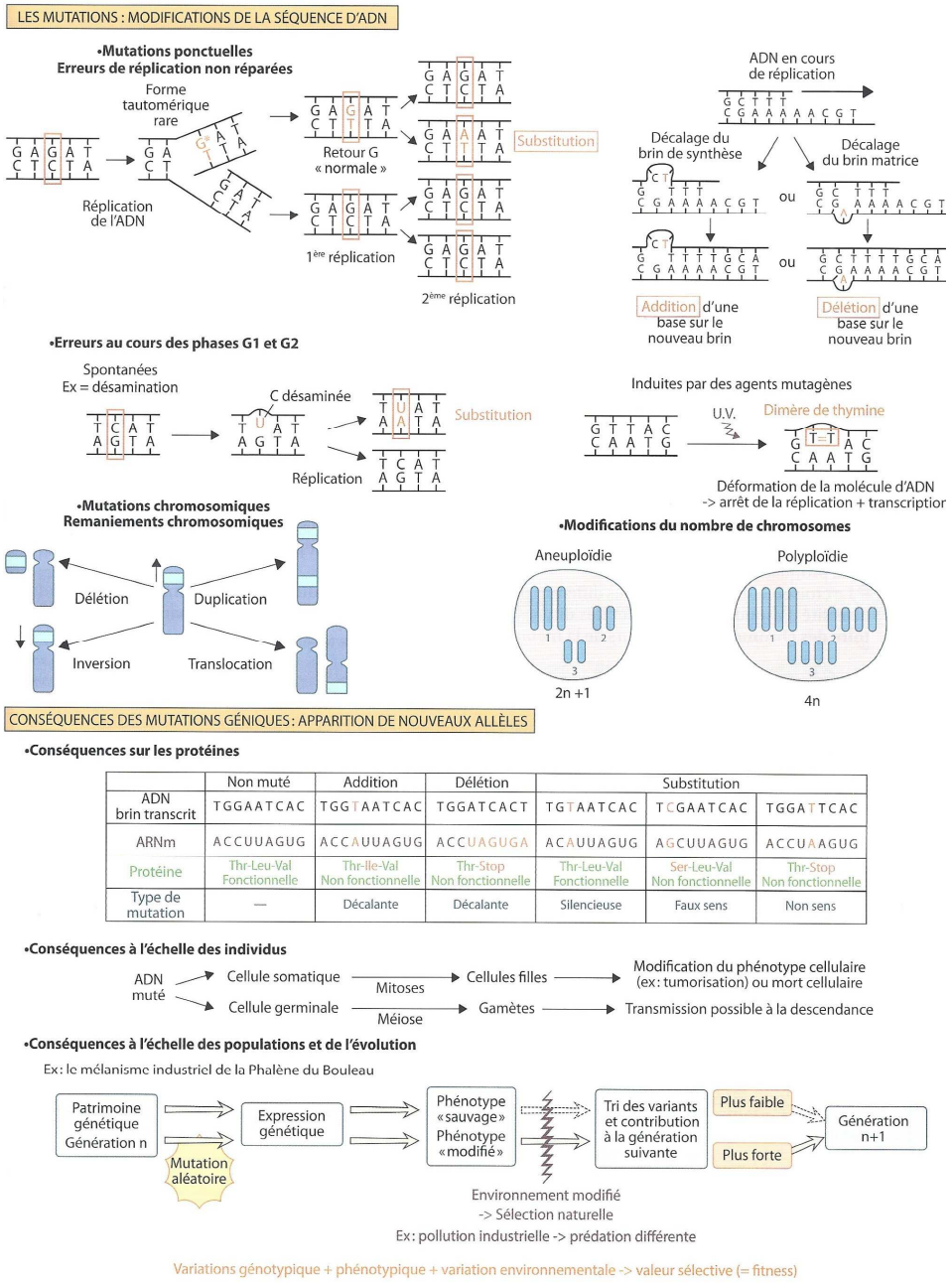


FIGURE 67. La réplication. D'après SAINTPIERRE *et al.* (2017).



	Non muté	Addition	Délétion	Substitution		
ADN brin transcrit	TGGAATCAC	TGGTAATCAC	TGGATCACT	TGTAATCAC	TCGAATCAC	TGGATTCAC
ARNm	ACCUUAGUG	ACCAUUAGUG	ACCUAGUGA	ACAUUAGUG	AGCUUAGUG	ACCUAAGUG
Protéine	Thr-Leu-Val Fonctionnelle	Thr-Ile-Val Non fonctionnelle	Thr-Stop Non fonctionnelle	Thr-Leu-Val Fonctionnelle	Ser-Leu-Val Non fonctionnelle	Thr-Stop Non fonctionnelle
Type de mutation	—	Décalante	Décalante	Silencieuse	Faux sens	Non sens

FIGURE 68. Les mutations. D'après SAINTPIERRE *et al.* (2017).

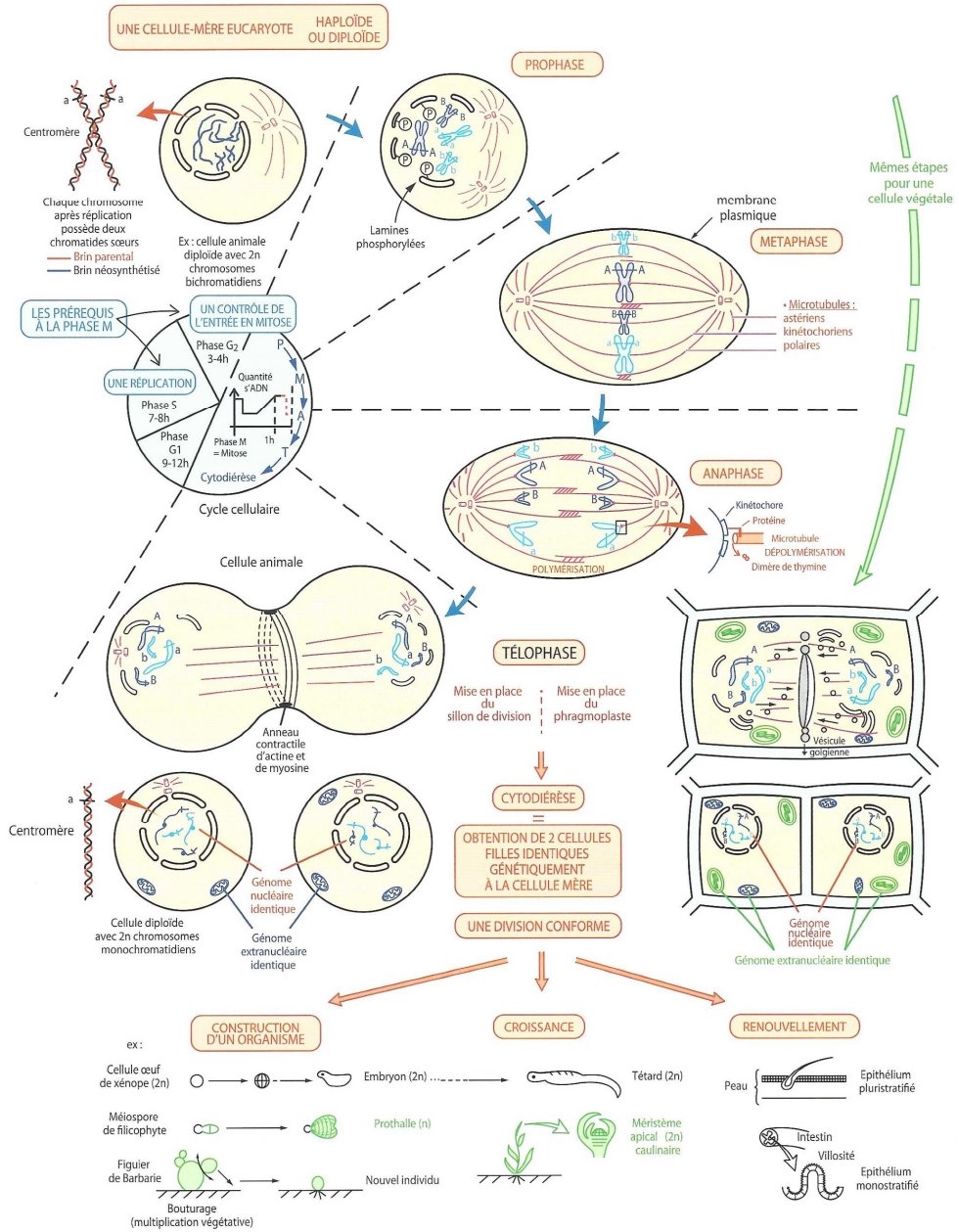


FIGURE 69. La mitose. D'après SAINTPIERRE *et al.* (2017).

Pour faire une fiche de révision : quelques pistes

Il est conseillé de maîtriser les **grandes lignes du plan**

*Le **plan** ne doit pas être perçu comme un carcan figé, ou comme un modèle de plan de dissertation à ré-utiliser en devoir, mais bien comme un **outil d'apprentissage et de structuration** des **concepts importants**. Vous pouvez en **recopier les grandes lignes** ou **annexer le plan du polycopié** directement.*

Il est conseillé de réaliser un **lexique des principales définitions**.

Il est conseillé de reproduire les **schémas (et tableaux) majeurs** :

Liste indicative.

- *Cycle cellulaire et contrôle*

° Évolution de la **quantité d'ADN** au cours du **cycle cellulaire mitotique** (lien avec **l'état des chromosomes**)
° *Idem* pour le **cycle méiotique**
° **Points de contrôle** du **cycle cellulaire**

- *Conservation de l'IG*

° Expérience de **MESELSON & STAHL** (Biotechnologies)
° Expérience de **CAIRNS** (Biotechnologies)
° **Réplication**
° Typologie des **mutations ponctuelles**
° **Mésappariements**
° **Dépurinations**
° **Dimères** de **thymines**
° Modèle de **correction** (ex. endonucléase)

- *Mitose*

° **Étapes** de la **mitose**
° **Tableau** des étapes de la mitose
° **Mitose végétale** : au moins la **cytodiérèse**
° **Fuseau mitotique**

Vous devez en outre **savoir** / **pouvoir** :
° **Reconnaître** et **dessiner** les principales **étapes** de la **mitose** en microscopie optique ou électronique (en lien avec TP 1.3.)

Références

ALBERTS, B., A. JOHNSON, J. LEWIS, M. RAFF, K. ROBERTS & P. WALTER (2004). *Biologie moléculaire de la cellule. Quatrième édition.* Traduction de la quatrième édition américaine (2002) par F. LE SUEUR-ALMOSNI. Flammarion, Paris. Première édition américaine 1983 (1986 1e édition française).

BERTHET, J. (2006). *Dictionnaire de Biologie.* De Boeck Université, Bruxelles (Belgique).

BOUJARD, D. (dir). B. ANSELME, C. CULLIN & CÉLINE RAGUÉNÈS-NICOL (2015). *Biologie cellulaire et moléculaire. Tout le cours en fiches. Licence. PACES. CAPES.* 2e édition (1e édition 2012), Dunod, Paris.

BREUIL, M. (2007). *Biologie 1re année BCPST-véto.* Tec & Doc, Lavoisier, Paris.

BREUIL, M. (2009). *Biologie 2e année BCPST-véto.* Tec & Doc, Lavoisier, Paris.

CALLEN, J.-C. (2005). *Biologie cellulaire. Des molécules aux organismes.* Dunod, Paris, 2e édition (1e édition 1999).

CAMPBELL, N. A. & J. B. REECE (2004). *Biologie.* De Boeck Université, Bruxelles, 2e édition (1e édition 1995).

[CAMPBELL, N. A.], J. B. REECE, L. A. URY, M. L. CAIN, S. A. WASSERAMN, P. V. MINORSKY, R. B. JACKSON (2012). *Campbell Biologie.* Adaptation française J. FAUCHER & R. LACHAÎNE. Pearson, Paris (4e edition).

DAUTEL, O. (dir.), A. PROUST, M. ALGRAIN, C. BORDI, A. HELME-GUIZON, F. SAINTPIERRE, M. VABRE & C. BOGGIO (2017). *Biologie Géologie BCPST 1re année.* Vuibert, Paris.

DENŒUD, J., T. FERROIR, O. GUIPPONI, H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON, M.-L. PONS & F. TEJEDOR (2011). *Biologie-Géologie BCPST-véto 2e année.* Tec & Doc, Lavoisier, Paris.

DENŒUD, J., C. GODINOT, O. GUIPPONI, H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON & F. TEJEDOR (2013). *Biologie-Géologie BCPST-véto 1e année.* Tec & Doc, Lavoisier, Paris.

DENŒUD, J., C. GODINOT, O. GUIPPONI, H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON, M.-L. PONS & F. TEJEDOR (2014). *Biologie-Géologie BCPST-véto 2e année.* Tec & Doc, Lavoisier, Paris.

GODINOT, C., H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON & F. TEJEDOR (2010). *Biologie-Géologie 1re année BCPST-véto.* Tec & Doc, Lavoisier, Paris.

KLEIMAN, C. (2001). *La reproduction des Angiospermes.* Belin, Paris.

LAFON, C. (2003). *La biologie autrement. 100 questions de synthèse.* Ellipses, Paris.

LATRUFFE, N. (dir.), F. BLEICHER-BARDETTI, B. DUCLOS & J. VAMECQ (2014). *Biochimie. Tout le cours en fiches. Licence. PACES-UE1. CAPES.* Dunod, Paris.

LIZEAUX, C., D. BAUDE (dir.), V. AUDEBERT, C. BRUNET, G. GUTJAHR, Y. JUSSERAND, A. MATHEVET, P. PILLOT, S. RABOUIN & A. VAREILLE, 2008. *SVT Sciences de la Vie et de la Terre Terminale S. Enseignement obligatoire.* Bordas, Paris.

MEYER, S., C. REEB & R. BOSDEVEIX (2008). *Botanique. Biologie et physiologie végétales.* Maloine, Paris, 2e édition (1e édition 2004).

MORÈRE, J.-L., R. PUJOL (coord.), J.-C. CALLEN, L. CHESNOY, J.-P. DUPONT, A.-M. GIBERT-TANGAPREGASSOM, G. RICOU, N. TOUZET (dir.) et colloborateurs (2003). *Dictionnaire raisonné de Biologie.* Frison-Roche, Paris.

PEYCRU, P. (dir.), J.-F. FOGELGESANG, D. GRANDPERRIN, B. AUGÈRE, J.-C. BAEHR, C. PERRIER, J.-M. DUPIN & C. VAN DER REST (2010*a*). *Biologie tout-en-un BCPST 1re année.* Dunod, Paris, 2e édition (2009), réimpression corrigée (2010) (1e édition 2006).

PEYCRU, P. (dir.), J.-C. BAEHR, F. CARIOU, D. GRANDPERRIN, C. PERRIER, J.-F. FOGELGESANG & J.-M. DUPIN (2010*b*). *Biologie tout-en-un BCPST 2e année.* Dunod, Paris, 2e édition (1e édition 2007).

PEYCRU, P., D. GRANDPERRIN, C. PERRIER (dir.), B. AUGÈRE, T. DARRIBÈRE, J.-M. DUPIN, C. ESCUYER J.-F. FOGELGESANG, & C. VAN DER REST (2013). *Biologie tout-en-un BCPST 1re année.* Dunod, Paris, 3e édition (1e édition 2006).

PEYCRU, P., D. GRANDPERRIN, C. PERRIER (dir.), B. AUGÈRE, J.-F. BEAUX, F. CARIOU, P. CARRÈRE, T. DARRIBÈRE, J.-M. DUPIN, C. ESCUYER, J.-F. FOGELGESANG, S. MAURY, É. QUÉINNEC, E. SALGUEIRO & C. VAN DER REST (2014). *Biologie tout-en-un BCPST 2e année.* Dunod, Paris, 3e édition (1e édition 2007).

PEYCRU, P., D. GRANDPERRIN, C. PERRIER (dir.), B. AUGÈRE, T. DARRIBÈRE, J.-M. DUPIN, C. ESCUYER, J.-F. FOGELGESANG, & C. VAN DER REST (2017). *Biologie tout-en-un BCPST 1re année.* Dunod, Paris, 4e édition (1e édition 2006).

PEYCRU, P., D. GRANDPERRIN, C. PERRIER (dir.), B. AUGÈRE, J.-F. BEAUX, F. CARIOU, P. CARRÈRE, T. DARRIBÈRE, J.-M. DUPIN, C. ESCUYER, J.-F. FOGELGESANG, S. MAURY, É. QUÉINNEC, E. SALGUEIRO & C. VAN DER REST (2018). *Biologie tout-en-un BCPST 2e année.* Dunod, Paris, 3e édition (1e édition 2007).

PRAY, L. (2008). DNA replication and causes of mutation. *Nature Education*, **1** (1) : 214.

RAVEN, P. H., G. B. JOHNSON, J. B. LOSOS, S. S. SINGER (2007). *Biologie.* De Boeck, Bruxelles.

RICHARD, D. (dir.), P. CHEVALET, S. FOURNEL, N. GIRAUD, F. GROS, P. LAURENTI, F. PRADÈRE & T. SOUBAYA (2012). *Biologie. Tout le cours en fiches. Licence. CAPES. Prépas.* Dunod, Paris, 2e édition (1e édition 2010).

SAINTPIERRE, F., C. BORDI (dir.), M. ALGRAIN, Y. KRAUSS, I. MOLLIÈRE & H. CLAUCE (2017). *Mémento Biologie BCPST 1re et 2e années.* Vuibert, Paris.

SEGARRA, J. (dir.), É. CHAUVET, C. COLSON-PROCH, M. HUILLE, M. LABROUSSE, F. LOUET, F. METZ & E. PIÈTRE (2014). *Biologie BCPST 1re année.* Ellipses, Paris.

SEGARRA, J., E. PIÈTRE (dir.), G. BAILLY, O. CHASSAING, D. FAVRE, T. JEAN, F. METZ & C. MEUNIER (2015). *Biologie BCPST 2e année.* Ellipses, Paris.

VIGNAIS, P. (2001). *La Biologie des origines à nos jours. Une Histoire des idées et des hommes.* « Grenoble Sciences », EDP Sciences, Les Ulis.

VIGNAIS, P. (2006). *Science expérimentale et connaissance du Vivant. La Méthode et les concepts.* « Grenoble Sciences », EDP Sciences, Les Ulis.

Plan du chapitre

Objectifs : extraits du programme 1
Introduction 1

I. Le cycle cellulaire eucaryote, un ensemble d'étapes de vie cellulaire sous contrôle interne et extracellulaire 2
A. Le cycle cellulaire, étapes de la vie d'une cellule notamment caractérisées par une conservation de l'information génétique 2
1. Notions de cycle cellulaire, mitose, méiose 2
2. Rappel : la notion de chromosome simple (= à une chromatide) et de chromosome double (= à deux chromatides) [*important*] 3
3. Étapes du cycle cellulaire mitotique et évolution de la quantité d'ADN 3
a. Un cycle divisé en interphase et mitose 3
b. Une interphase divisible en phases G1, S et G2 4
4. Cas du cycle cellulaire des cellules germinales s'engageant dans la méiose 4
5. Quelques remarques sur le cycle cellulaire des Eubactéries 5
a. Une division cellulaire rudimentaire : la scissiparité 5
b. Une division cellulaire qui suppose une réplication du chromosome bactérien souvent en amont et s'inscrit dans des cycles cellulaires variables 5
c. Et les plasmides ? Une réplication et une répartition lors des divisons qui semblent aléatoires 5
B. Le cycle cellulaire, un processus contrôlé (exemple des Vertébrés) 6
1. Un contrôle intrinsèque (= intracellulaire) 6
a. Mise en évidence d'un contrôle cytoplasmique du cycle cellulaire par des expériences de fusion cellulaire ou d'injections cytoplasmiques 6
b. L'existence de points de contrôle assurant que la phase en amont a été réalisée, autorisant ainsi la poursuite du cycle 6
c. Une variation cyclique de certaines molécules cytoplasmiques, notamment le MPF [*limite programme ?*] 6
2. Un contrôle extrinsèque (= extracellulaire) : les facteurs de croissance 7
3. Le cycle cellulaire, un processus qui se fige lors de la différenciation (entrée en phase G0) 8
4. Un dérèglement possible du cycle cellulaire engendrant une prolifération cellulaire incontrôlée : l'exemple des cancers 8
a. Des cellules proliférant de manière incontrôlée : notion de cancer 8
b. Des cancers dus à plusieurs mutations affectant des oncogènes 8
c. Des cellules qui finissent par se déplacer et envahir l'organisme : notion de métastase 8
d. Une prise en charge par le système immunitaire ou… des traitements anticancéreux 8

II. La conservation de l'information génétique au cours de l'interphase 9
A. La réplication, un processus semi-conservatif et plutôt conforme de duplication de l'information génétique 9
1. La réplication, un processus semi-conservatif où un brin est néoformé à partir d'un brin matrice par complémentarité de bases 9
a. Mise en évidence de la semi-conservativité de la réplication chez les Bactéries (MESELSON & STAHL 1958, CAIRNS 1963) 9
α. Position du problème : la réplication est-elle conservative, semi-conservative ou dispersive ? 9
β. Les travaux décisifs de MESELSON & STAHL (1958) 10
i. Principe général : des cultures de colibacilles sur milieu azoté radioactif puis non radioactif 10
ii. Résultats obtenus 10
iii. Éléments d'analyse et d'interprétation 11
➢ Invalidation du modèle dispersif 11
➢ Invalidation du modèle conservatif et validation du modèle semi-conservatif 11
β. La confirmation par CAIRNS (1963) 11
i. Principe général : une visualisation autoradiographique des brins d'ADN sur le chromosome bactérien en cours de réplication 12
ii. Résultats et interprétation : confirmation de la semi-conservativité de la réplication et illustration de l'origine unique de réplication chez les Bactéries 12
b. Principe opératoire fondamental : une synthèse d'un brin néoformé par complémentarité de bases avec le brin matrice 13
2. La réplication, un processus qui suppose la polymérisation de nucléotides (initialement sous forme triphosphate) dans le sens 5' → 3' 13
3. La réplication, un processus bidirectionnel à une seule origine chez les Bactéries et plusieurs chez les Eucaryotes 13
4. La réplication, un processus assuré par un complexe enzymatique que l'on peut nommer réplisome ou complexe de réplication 14
a. Une ouverture de la molécule par une hélicase et un désenroulement par des topoisomérases 14
b. Des protéines stabilisatrices empêchant le ré-appariement de la séquence : les SSB 14
c. Une initiation de la polymérisation de l'ADN par une primase déposant une amorce ARN suivie d'une polymérisation par une ADN polymérase 14
d. Une polymérisation de l'ADN continue dans le brin précoce et discontinue dans le brin tardif constitué de fragments d'OKAZAKI 15
e. Une liaison des morceaux de brins néo-synthétisé par des ligases 15
f. Bilan : une vision d'ensemble de la réplication 15
5. Quelques particularités de la réplication eucaryote 16
a. La réplication : un processus à plusieurs origines chez les Eucaryotes, et donc plusieurs yeux de réplication 16
b. Le problème de la réplication des télomères et l'intérêt des télomérases que l'on rencontre dans certaines cellules [*pour information ?*] 17
6. L'existence d'erreurs généralement corrigées lors de la réplication (correction sur épreuve) ou après (réparation post-réplicative) 18
7. Bilan : la réplication, un processus hautement conforme 18
B. Les mutations ponctuelles, des modifications génétiques aléatoires généralement corrigés mais pouvant être transmises 18
1. Des modifications locales de la séquence nucléotidique de plusieurs types 18
a. Définition de mutation et mutation ponctuelle 18
b. Typologie des mutations ponctuelles : insertions (= additions), délétions, substitutions 18
2. Des modifications locales de la séquence nucléotidique qui peuvent apparaître lors de la réplication ou du stockage de l'ADN 18
a. Des mutations ponctuelles qui peuvent apparaître lors de la réplication de l'ADN 18
α. L'exemple des mésappariements dus à la tautomérie des bases azotées 18
β. Insertions ou délétions par glissement de brins [*pour information ?*] 19
b. Des mutations ponctuelles qui peuvent apparaître lors du stockage de l'ADN de manière spontanée ou induite 19
α. Un exemple d'altération chimique pouvant engendrer une mutation spontanée : la dépurination 19
β. Un exemple d'altération de l'ADN engendrée par le rayonnement UV (un agent mutagène) et pouvant susciter une mutation induite : la dimérisation de thymines 20
3. Des modifications locales de la séquence nucléotidique qui sont souvent corrigées par des systèmes enzymatiques de réparation de l'ADN 20
a. Des erreurs de réplication corrigées au moment même de la réplication : l'activité auto-correctrice des ADN polymérases (activité exonucléasique) 20
b. Une correction des altérations de l'ADN hors réplication impliquant des endonucléases 21

c. Des corrections hors réplication pouvant recourir à des mécanismes particuliers : l'exemple de la dé-dimérisation de thymines 21
α. Une possibilité de réversion directe 21
β. Une possibilité de réversion par la photolyase 21
4. Des modifications locales de la séquence nucléotidique aléatoires et à la fréquence variable 22
5. Des modifications locales de la séquence nucléotidique qui peuvent avoir des conséquences cellulaires et se répandre dans les populations 23
a. Des mutations classables selon leur effet sur l'information génétique : mutations faux-sens, non-sens, neutres… 23
b. Des mutations qui sont forcément transmises à la descendance chez les unicellulaires 23
c. Des mutations qui ne peuvent se répandre dans les populations que si elles touchent les cellules à l'origine des gamètes (cellules germinales dans le cas des Mammifères) 23
d. Des mutations qui se répandent ou non dans les populations sous l'effet de la sélection naturelle et de la dérive génétique 23

III. La transmission conforme de l'information génétique au cours de la division cellulaire mitotique 24
A. Un processus séquentiel : les étapes de la mitose (exemple des cellules animales) 24
1. La prophase et la prométaphase (2*n* chromosomes doubles) 25
2. La métaphase (2*n* chromosomes doubles) 25
3. L'anaphase (2*n* chromosomes doubles > simples) 25
4. La télophase et la cytodiérèse (2*n* chromosomes simples) 26
5. Bilan des étapes de la mitose 27
B. Les particularités de la mitose végétale 28
1. L'absence de centrioles dans le COMT 29
2. L'absence d'élongation cellulaire lors de la division 29
3. Une cytodiérèse reposant sur l'édification d'une plaque cellulaire (phragmoplaste) percée de plasmodesmes 29
4. Un déplacement des microtubules lors de la mitose (et plus globalement du cycle cellulaire) 29
C. Les mécanismes importants de la mitose 30
1. Importance de la condensation de l'ADN 30
2. Importance du cytosquelette 30
a. Des microtubules organisés en un fuseau de division (microtubules polaires, astériens et kinétochoriens) 30
b. Importance de la polymérisation-dépolymérisation des microtubules dans leur allongement ou leur raccourcissement 31
c. Rôle des lamines dans la vésicularisation et la reformation de l'enveloppe nucléaire 32
d. Rôle des interactions actine-myosine dans la cytodiérèse des cellules animales 32
D. Aspects génétiques de la mitose : discussion de sa conformité 32
1. La mitose, un processus fondamentalement conforme 32
2. Des limites à la conformité 33
a. La possibilité de mutations non réparées transmises aux cellules-filles 33
b. Une inégalité de répartition du matériel cytoplasmique (y compris génétique) lors de la cytodiérèse 33
c. L'existence (très rare) de recombinaisons mitotiques : les *crossing-over* mitotiques [*pour information*] 33
E. Aspects ontogénétiques et reproductifs de la mitose 33
1. La base du développement pluricellulaire et de la reproduction asexuée 33
2. Une intervention dans le cadre de la reproduction sexuée 33
a. La multiplication des cellules germinales (Métazoaires) ou des cellules-mères de spores (Embryophytes) 33
α. Cas de la multiplication des cellules germinales (ex. des Mammifères) [avec rappels sur la gamétogenèse] 33
β. Cas de la multiplication des cellules mères de spores mâles (ex. des Angiospermes) 34
b. La production d'un gamétophyte chez les Embryophytes 35

Quelques schémas bilans 37
Pour faire une fiche de révision : quelques pistes 39
Références 39
Plan du chapitre 40
Plan simplifié du chapitre 42
Plan très simplifié du chapitre 43

Plan simplifié du chapitre

Objectifs : extraits du programme 1
Introduction 1

I. Le cycle cellulaire eucaryote, un ensemble d'étapes de vie cellulaire sous contrôle interne et extracellulaire 2
A. Le cycle cellulaire, étapes de la vie d'une cellule notamment caractérisées par une conservation de l'information génétique 2
1. Notions de cycle cellulaire, mitose, méiose 2
2. Rappel : la notion de chromosome simple (= à une chromatide) et de chromosome double (= à deux chromatides) [*important*] 3
3. Étapes du cycle cellulaire mitotique et évolution de la quantité d'ADN 3
4. Cas du cycle cellulaire des cellules germinales s'engageant dans la méiose 4
5. Quelques remarques sur le cycle cellulaire des Eubactéries 5
B. Le cycle cellulaire, un processus contrôlé (exemple des Vertébrés) 6
1. Un contrôle intrinsèque (= intracellulaire) 6
2. Un contrôle extrinsèque (= extracellulaire) : les facteurs de croissance 7
3. Le cycle cellulaire, un processus qui se fige lors de la différenciation (entrée en phase G0) 8
4. Un dérèglement possible du cycle cellulaire engendrant une prolifération cellulaire incontrôlée : l'exemple des cancers 8

II. La conservation de l'information génétique au cours de l'interphase 9
A. La réplication, un processus semi-conservatif et plutôt conforme de duplication de l'information génétique 9
1. La réplication, un processus semi-conservatif où un brin est néoformé à partir d'un brin matrice par complémentarité de bases 9
2. La réplication, un processus qui suppose la polymérisation de nucléotides (initialement sous forme triphosphate) dans le sens 5' → 3' 13
3. La réplication, un processus bidirectionnel à une seule origine chez les Bactéries et plusieurs chez les Eucaryotes 13
4. La réplication, un processus assuré par un complexe enzymatique que l'on peut nommer réplisome ou complexe de réplication 14
5. Quelques particularités de la réplication eucaryote 16
6. L'existence d'erreurs généralement corrigées lors de la réplication (correction sur épreuve) ou après (réparation post-réplicative) 18
7. Bilan : la réplication, un processus hautement conforme 18
B. Les mutations ponctuelles, des modifications génétiques aléatoires généralement corrigés mais pouvant être transmises 18
1. Des modifications locales de la séquence nucléotidique de plusieurs types 18
2. Des modifications locales de la séquence nucléotidique qui peuvent apparaître lors de la réplication ou du stockage de l'ADN 18
3. Des modifications locales de la séquence nucléotidique qui sont souvent corrigées par des systèmes enzymatiques de réparation de l'ADN 20
4. Des modifications locales de la séquence nucléotidique aléatoires et à la fréquence variable 22
5. Des modifications locales de la séquence nucléotidique qui peuvent avoir des conséquences cellulaires et se répandre dans les populations 23

III. La transmission conforme de l'information génétique au cours de la division cellulaire mitotique 24
A. Un processus séquentiel : les étapes de la mitose (exemple des cellules animales) 24
1. La prophase et la prométaphase (2*n* chromosomes doubles) 25
2. La métaphase (2*n* chromosomes doubles) 25
3. L'anaphase (2*n* chromosomes doubles > simples) 25
4. La télophase et la cytodiérèse (2*n* chromosomes simples) 26
5. Bilan des étapes de la mitose 27
B. Les particularités de la mitose végétale 28
1. L'absence de centrioles dans le COMT 29
2. L'absence d'élongation cellulaire lors de la division 29
3. Une cytodiérèse reposant sur l'édification d'une plaque cellulaire (phragmoplaste) percée de plasmodesmes 29
4. Un déplacement des microtubules lors de la mitose (et plus globalement du cycle cellulaire) 29
C. Les mécanismes importants de la mitose 30
1. Importance de la condensation de l'ADN 30
2. Importance du cytosquelette 30
D. Aspects génétiques de la mitose : discussion de sa conformité 32
1. La mitose, un processus fondamentalement conforme 32
2. Des limites à la conformité 33
E. Aspects ontogénétiques et reproductifs de la mitose 33
1. La base du développement pluricellulaire et de la reproduction asexuée 33
2. Une intervention dans le cadre de la reproduction sexuée 33

Quelques schémas bilans 37
Pour faire une fiche de révision : quelques pistes 39
Références 39
Plan du chapitre 40
Plan simplifié du chapitre 42
Plan très simplifié du chapitre 43

Plan très simplifié du chapitre

Objectifs : extraits du programme 1
Introduction 1

I. Le cycle cellulaire eucaryote, un ensemble d'étapes de vie cellulaire sous contrôle interne et extracellulaire 2
- **A. Le cycle cellulaire, étapes de la vie d'une cellule notamment caractérisées par une conservation de l'information génétique** 2
- **B. Le cycle cellulaire, un processus contrôlé (exemple des Vertébrés)** 6

II. La conservation de l'information génétique au cours de l'interphase 9
- **A. La réplication, un processus semi-conservatif et plutôt conforme de duplication de l'information génétique** 9
- **B. Les mutations ponctuelles, des modifications génétiques aléatoires généralement corrigés mais pouvant être transmises** 18

III. La transmission conforme de l'information génétique au cours de la division cellulaire mitotique 24
- **A. Un processus séquentiel : les étapes de la mitose (exemple des cellules animales)** 24
- **B. Les particularités de la mitose végétale** 28
- **C. Les mécanismes importants de la mitose** 30
- **D. Aspects génétiques de la mitose : discussion de sa conformité** 32
- **E. Aspects ontogénétiques et reproductifs de la mitose** 33

Quelques schémas bilans 37
Pour faire une fiche de révision : quelques pistes 39
Références 39
Plan du chapitre 40
Plan simplifié du chapitre 42
Plan très simplifié du chapitre 43

© Tanguy JEAN. Les textes et les figures originales sont la propriété de l'auteur. Les figures extraites d'autres sources restent évidemment la propriété des auteurs ou éditeurs originaux.
Document produit en mai 2019 • Dernière actualisation : *idem*.
Contact : Tanguy.Jean4@gmail.com
Adresse de téléchargement : https://www.svt-tanguy-jean.com/

Ces données sont placées sous licence *Creative Commons Attribution – Pas d'Utilisation commerciale 4.0 CC BY NC* qui autorise la reproduction et la diffusion du document, à condition d'en citer explicitement la source et de ne pas en faire d'utilisation commerciale.