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 3. Reproduction des individus et pérennité des populations
>> Cours <<

Chapitre 16 : Proposition de fiche à compléter

Aspects chromosomiques et génétiques de la reproduction

Objectifs : extraits du programme
Introduction

Reproduction asexuée = clonalité :
Clone (→ clonage) **:**
Reproduction sexuée :
Parthénogenèse :

Comment l'information génétique est-elle transmise au cours des processus reproductifs et notamment des divisions qu'ils impliquent ? Comment les populations sont-elles impactées génétiquement ?

I. La reproduction, une fonction impliquant des processus génétiques variés

A. Quatre processus génétiques majeurs impliqués lors de la reproduction : réplication, mitose, méiose, fécondation

Caryotype : - sens 1 - sens 2
Ploïdie : **Haploïdie (*n*) / Diploïdie (2*n*) / Triploïdie (3*n*)** … Ex. Gamète humain (haploïde) : ***n* = 23** // Cellule humaine diploïde : **2*n* = 46**
Chromatide :
Chromosome simple = unichromatidien :
Chromosome double = bichromatidien = dupliqué :

Gène : *(!) Partie effectivement codante du gène :* ***cistron*** *(!) On peut aussi parler de « gène » pour des portions codant des ARN non messagers*
Locus :
Allèles :

Homozygote (pour un gène donné) **:**
Hétérozygote (pour un gène donné) **:**
*1 allèle qui s'exprime = **allèle*** *1 allèle qui ne s'exprime pas = **allèle*** *2 allèles coexprimés : **allèles***
Génome : ***1. Ensemble de tous les gènes d'un individu ou d'une espèce.*** ***2. Ensemble de tout l'ADN caractérisant un individu ou une espèce.***
Génotype : ***1. Ensemble de tous les gènes d'un individu avec les allèles qu'il porte.*** ***2. Ensemble des deux allèles d'un individu pour un gène donné que l'on étudie*** *(sens courant en génétique formelle ou en génétique des populations).*
Phénotype : ***1. Ensemble des caractéristiques structurales et fonctionnelles d'un individu provenant de l'expression de ses gènes (et plus précisément de ses allèles).*** ***2. Caractéristique structurale ou fonctionnelle provenant de l'expression d'un ou plusieurs gènes (plus précisément des allèles concernés)*** *(sens courant en génétique formelle ou en génétique des populations).* *(!) On rappelle que **l'expression du génotype** est **modulée par l'environnement** : le **phénotype** n'est donc pas qu'une manifestation pure du génotype.*

1. La réplication, processus conforme permettant la duplication de l'information génétique dans la cellule ($n > 2n$)

Réplication :

(!) **Processus semi-conservatif** =

(!) ***Ensemble des enzymes de la réplication*** = **réplisome**

(!) Brin en cours de **polymérisation** : toujours dans le sens **5'→3'** (**ajout en 3'**)

(1) - **Désenroulement** / **ré-enroulement** de l'ADN : **topo-isomérases** (**gyrases**)
(2) - **Ouverture** de la molécule : **hélicases**
- **Stabilisation** de la molécule ouverte : **protéines SSB** (*single-strand binding* = « se liant au simple-brin »)

Synthèse du brin précoce = directeur
(3) **Amorçage** (synthèse d'une courte **amorce ARN**) : **ADN primase** (une ARN polymérase !)
(4) **Élongation** (synthèse d'ADN) : **ADN polymérase**
(5) **Remplacement de l'amorce** par de l'**ADN** : autre **ADN polymérase**

Synthèse du brin retardé = tardif >> fragments d'OKAZAKI
Pour chaque fragment
(3') **Amorçage** (synthèse d'une courte **amorce ARN**) : **ADN primase** (une ARN polymérase !)
(4') **Élongation** (synthèse d'ADN) : **ADN polymérase**
(5') **Remplacement de l'amorce** par de l'**ADN** : autre **ADN polymérase**
(6) **Soudure** des **fragments** : **ADN ligase**

FIGURE 1. La réplication : une vision synthétique. D'après PEYCRU *et al.* (2010a).
Cadres : **protéines** appartenant au **complexe de réplication (= réplisome)**.

2. La mitose, division cellulaire eucaryote conforme aboutissant à la formation de deux cellules-filles génétiquement identiques (2*n* > 2*n* ou *n* > *n*)

Mitose à l'état diploïde **Mitose à l'état haploïde**

FIGURE 3. La conformité de la mitose. *Original.*

Mitose (sens large) = phase M :

Caryocinèse (= ***division des noyaux*** = mitose s. str.)
+ **Cytodiérèse** (***division des cytoplasmes***)

3. La méiose, division eucaryote non conforme d'une cellule mère diploïde en quatre cellules-filles haploïdes (2*n* > *n*) [pas forcément toutes conservées]

FIGURE 4. Évolution chromosomique lors de la méiose. *Original.*

Méiose :

→ ***4 cellules-filles haploïdes*** *(!) Méiose femelle : dégénérescence de cellules*

Méiose I : réduction chromosomique 2*n* > *n* (nbre de chromatides inchangés)
Méiose II : séparation des chromatides (nbre de chromosomes inchangés : *n* > *n*)

4. La fécondation, fusion de deux gamètes haploïdes réunissant leur matériel génétique en un génome diploïde (*n* + *n* > 2*n*)

Fécondation :

Plasmogamie (***fusion des cytoplasmes***) + **Caryogamie** (***fusion des noyaux****)
** Il y a alors **amphimixie** (**mise en commun des génomes haploïdes**)*
(!) Mammifères : amphimixie sans caryogamie !

FIGURE 5. Fécondation : principe génétique. *Original.*

B. Des divisions cellulaires s'intégrant dans un cycle cellulaire

Cycle cellulaire :

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

Interphase :

- Phase G1 : *Cellule différenciée → G0*
- Phase S :
- Phase G2 :

FIGURE 7. Évolution de la quantité d'ADN lors du cycle cellulaire.
Schémas : état et évolution d'un seul chromosome.
http://cancerdesos.ndreze.free.fr/ (consultation janvier 2012, modifié et complété)

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

Cellule somatique :
Cellule germinale :

FIGURE 9. Évolution de la quantité d'ADN lors du cycle cellulaire d'une cellule germinale subissant la méiose.
Schémas : état et évolution d'une paire de chromosomes.
D'après LIZEAUX, BAUDE *et al.* (2008)

C. Des processus génétiques s'intégrant dans un cycle de vie (= cycle de reproduction)

1. Le vocabulaire des cycles de vie

Cycle de vie (= biologique = de reproduction…) :
Phase :
Génération : ***Nbre de générations*** *: Monogénétique // Digénétique // Trigénétique*

Spore : *Souvent structure de **résistance** et de **dissémination*** *(!) Pas le cas chez les Spermatophytes !*
Gamète (*n*) :
Zygote (2*n*) :

2. Quelques cycles vitaux types

a. Les Métazoaires (dont les Mammifères) : un cycle monogénétique diplophasique

FIGURE 11. Cycle de vie des Mammifères. *Original.*

b. Les Embryophytes (dont les Angiospermes) : un cycle digénétique haplodiplophasique

FIGURE 13. Le cycle des Embryophytes : principe d'un cycle vital digénétique (2 générations : gamétophyte + sporophyte) haplodiplophasique
(phase haploïde en vert, phase diploïde en rouge). *Original.*

Chez les **Embryophytes** (et d'autres taxons végétaux),
- La ***génération haploïde*** s'appelle le **gamétophyte** ;

Gamétophytes chez les Angiospermes : ♀ sac embryonnaire ; ♂ grain de pollen.
Gamètes chez les Angiospermes : ♀ oosphère (+ cellule centrale) ; ♂ noyaux spermatiques.
- La ***génération diploïde*** s'appelle le **sporophyte**.

FIGURE 16. Cycle de vie simplifié d'une Angiosperme.
D'après KLEIMAN (2001).

c. Les Eumycètes : un cycle traditionnellement compris comme monogénétique haplophasique

FIGURE 19. Cycle de reproduction typique des Basidiomycètes et Ascomycètes.
D'après PEYCRU *et al.* (2010b), modifié. *L'haplophase monocaryotique est en vert, l'haplophase dicaryotique en bleu* et *la diplophase en rouge.*

D. Avantages et inconvénients comparés des reproductions végétative et sexuée

1. Un avantage sélectif de la reproduction asexuée possible dans des conditions environnementales stables

a. Une reproduction plus rapide et à plus faible coût énergétique que la reproduction sexuée

b. Une clonalité qui assure l'occupation de l'espace par un même génotype (isogénie des clones), ce qui implique une faible variation phénotypique

2. Une prime à la reproduction sexuée dans l'adaptation à l'environnement et ses variations

a. La faible adaptabilité face aux environnements variables (fluctuants et/ou hétérogènes), un inconvénient de la reproduction asexuée

b. Un risque d'affaiblissement génétique lors de la reproduction asexuée

TABLEAU I. Reproduction asexuée vs. sexuée : avantages et inconvénients.
D'après MEYER *et al.* (2008) et PEYCRU ***et al.*** (2010b)
[choisir ou compiler les tableaux // possibilité d'ajouter la figure 20]

II. Les divisions cellulaires et la fécondation : mécanismes et conséquences génétiques et reproductives

A. La mitose, une division cellulaire qui assure une transmission conforme de l'information génétique de la cellule-mère aux cellules-filles

1. Les étapes de la mitose

a. 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**

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

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

c. 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*]

d. 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*

e. Bilan des étapes de la mitose

TABLEAU II. 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.

2. Les mécanismes importants de la mitose

a. Importance de la condensation de l'ADN

Revoir les **niveaux de condensation de l'ADN**

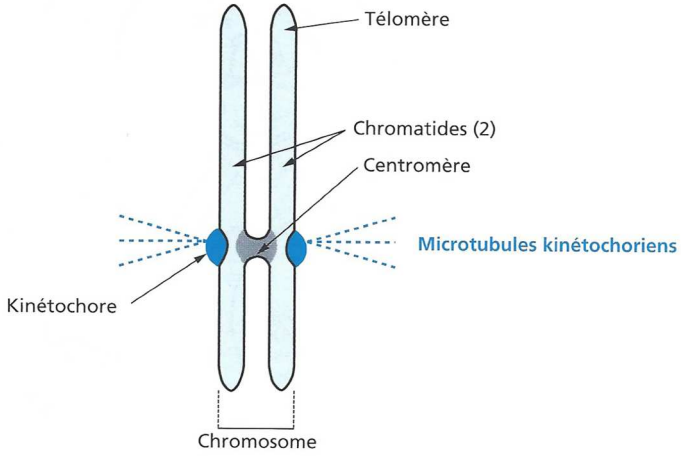


FIGURE 29. Rappel de l'organisation d'un chromosome double condensé.
D'après PEYCRU *et al.* (2010a).

b. Importance du cytosquelette

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

FIGURE 31. Organisation et fonctionnement du fuseau mitotique.
D'après SEGARRA *et al.* (2014).

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 de la cellule***
  > contrôle de ***l'allongement*** *de la cellule*
  (!) Interaction avec ***kinésine*** *(moteur moléculaire)*

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

- MT : **13 protofilaments** (creux au centre) ; suite de **dimères de tubuline alpha + bêta**
- **Extrémité (–)** au contact du *centrosome* (comprend **2 centrioles** dans les cellules animales)

(!) Le ***COMT des cellules végétales*** *ne comprend* ***pas de centrioles*** *et n'est donc pas un vrai centrosome.*

FIGURE 33. Mécanisme de l'ascension polaire des chromatides.
D'après SEGARRA *et al.* (2014).

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

FIGURE 34. Rôle des lamines sur l'état de l'enveloppe nucléaire.
D'après SEGARRA *et al.* (2014).

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

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

c. L'existence d'un contrôle du cycle cellulaire et de la division cellulaire

Revoir le chapitre 6 sur le **cycle cellulaire**

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

a. 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**

b. Des limites à la conformité

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

Revoir le chapitre 6 sur le **cycle cellulaire**

β. Une inégalité de répartition du matériel cytoplasmique lors de la cytodiérèse

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

4. Aspects reproductifs de la mitose

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

b. Une intervention dans le cadre de la reproduction sexuée

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

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

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

La **gamétogenèse** désigne ***l'ensemble des processus qui permettent, à partir des cellules germinales, de produire des gamètes***.
On parle de **spermatogenèse** dans le cas de la ***production de gamètes mâles*** et d'**ovogenèse** dans le cas de la ***production de gamètes femelles***.

À retenir de ces rappels : **multiplication des cellules germinales par mitose** en amont de la **méiose** !

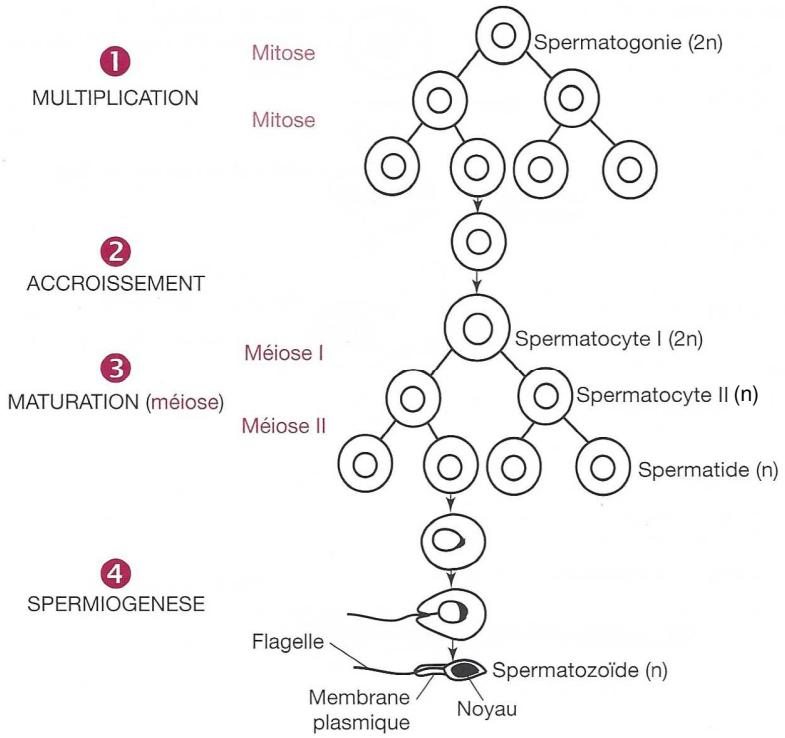


FIGURE 35. Les grandes étapes de la spermatogenèse.
D'après DENŒUD *et al.* (2011).

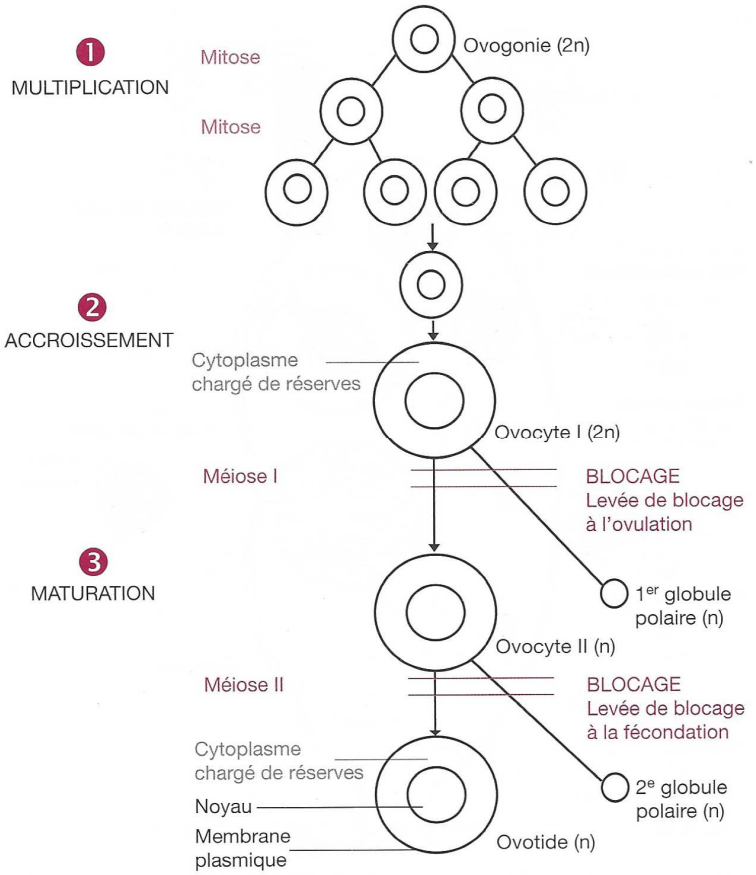


FIGURE 36. Les grandes étapes de l'ovogenèse.
D'après DENŒUD *et al.* (2011).

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

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

- Au centre des **jeunes anthères**, on trouve du **tissu sporogène**, c'est-à-dire des ***cellules à l'origine des cellules mères des spores (cellules sporogènes)*** qui ***subissent des mitoses et deviennent ainsi des cellules-mères de spores***.

β. La production d'un gamétophyte chez les Embryophytes

Revoir chapitre 14 sur la **reproduction végétale**

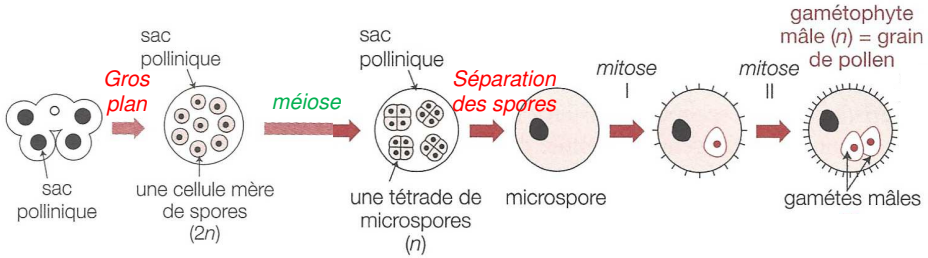


FIGURE 38. Étapes de la formation d'un grain de pollen : une vision simplifiée.
D'après KLEIMAN (2001).

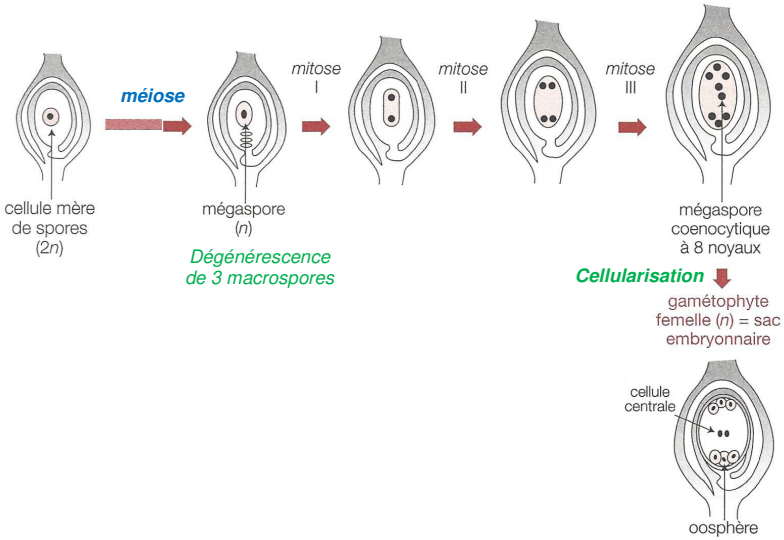


FIGURE 40. Étapes de la formation d'un sac embryonnaire : une vision simplifiée.
D'après KLEIMAN (2001).

B. La méiose, une division cellulaire qui conduit à l'haploïdie et assure un brassage génétique des génomes parentaux originels

FIGURE 41. Étapes de la méiose. D'après SEGARRA *et al.* (2014).

1. Un processus comprenant deux divisions successives sans réplication intermédiaire

a. La division réductionnelle (méiose I) : une étape assurant la réduction chromosomique et générant deux cellules-filles haploïdes

- **Prophase I** particulièrement longue
  - *Comme dans la mitose :*
    - **Condensation** des **chromosomes doubles**,
    - **Vésicularisation** de l'**enveloppe nucléaire**,
    - Mise en place du **fuseau méiotique** avec fixation des **microtubules kinétochoriens** sur les **chromosomes doubles**.
  - *Particularités de la méiose (voir encadré B – page 25) :*
    - ***Regroupement des chromosomes homologues par paires*** = **appariement** des chromosomes homologues.

> - Les **chromosomes appariés** sont ***attachés entre eux par leurs chromatides*** au niveau de zones nommées **chiasmas** (ou *chiasmata*, si l'on utilise le pluriel grec).
> - ***Deux chromosomes ainsi appariés*** forment ce qu'on appelle une **tétrade** ou encore un **bivalent**.

    - ***Au niveau des chiasmas, des portions de chromatides peuvent être échangées entre chromosomes homologues appariés*** = ***crossing-over*** (ou **enjambement**).
      (!) Intervention de nodules de recombinaison

> *(!)* Comme ***le phénomène est le plus souvent équilibré (des fragments de même taille sont échangés)***, on peut le qualifier de **recombinaison homologue**. Ces échanges génétiques constituent le **brassage intrachromosomique**.

- **Métaphase I** : ***alignement des bivalents = tétrades, c'est-à-dire les chromosomes homologues toujours appariés***.
- **Anaphase I** : ***ségrégation (= séparation puis migration) des chromosomes homologues sans disjonction des chromatides*** : cette étape est cruciale et assure la **réduction chromosomique** (***le nombre de chromosomes est divisé par deux***) avec **cassure des chiasmas**.

> Attention, les **chromosomes** sont toujours **doubles** !

- **Télophase I** :
  - **décondensation des chromosomes** et une **reformation des enveloppes nucléaires**. *Ces processus sont plus ou moins marqués, selon que la méiose II commence immédiatement après la fin de la méiose I ou non.*
  - **cytodiérèse** → **deux cellules-filles haploïdes**.

b. La division équationnelle (méiose II) : une étape techniquement assimilable à une mitose à l'état haploïde

- La **méiose II** est **identique à une mitose**, sauf que les **chromosomes sont en un seul exemplaire**. On obtient *in fine* **quatre cellules filles haploïdes** où les **chromosomes** sont à **une seule chromatide** (figure 41).

2. La méiose, un processus où un brassage génétique permet la production d'une recombinaison génétique

a. Notions de recombinaison génétique et de brassage génétique

Recombinaison génétique = réassociation génétique :
Brassage génétique :

b. Un brassage interchromosomique lors de l'anaphase I assurant une répartition aléatoire des chromosomes paternels et maternels

FIGURE 42. Un exemple de brassage interchromosomique seul pour une cellule initialement à $2n = 4$.

Brassage interchromosomique :

2^n possibilités

Ex. Chez l'Homme : **2^{23} = 8 388 608 possibilités** d'associations des chromosomes !
(sans prise en compte du brassage intra… qui augmente encore les possibilités !)

c. Un brassage intrachromosomique lors de la prophase I

α. Les *crossing-over* (CO) : des échanges habituellement réciproques de portions de chromatides entre chromosomes appariés en prophase I

Crossing-over = enjambement :

FIGURE 43. Un *crossing-over*. D'après POULIZAC (1999).
*Des **gènes liés** ont été représentés de manière à manifester le **brassage allélique** résultant du **brassage intrachromosomique** dans cet exemple.*

*À cause du **brassage intrachromosomique**, le **brassage interchromosomique** qui intervient **en aval** ne répartira **pas vraiment des chromosomes maternels ou paternels** mais plutôt des **chromosomes contenant des portions paternelles et maternelles**.*

β. Un processus non aléatoire qui a lieu au niveau de zones préférentielles : les points chauds de recombinaison

Point chaud de recombinaison :

d. Bilan : les cellules issues de la méiose, des cellules haploïdes génétiquement originales porteuses de combinaisons alléliques uniques

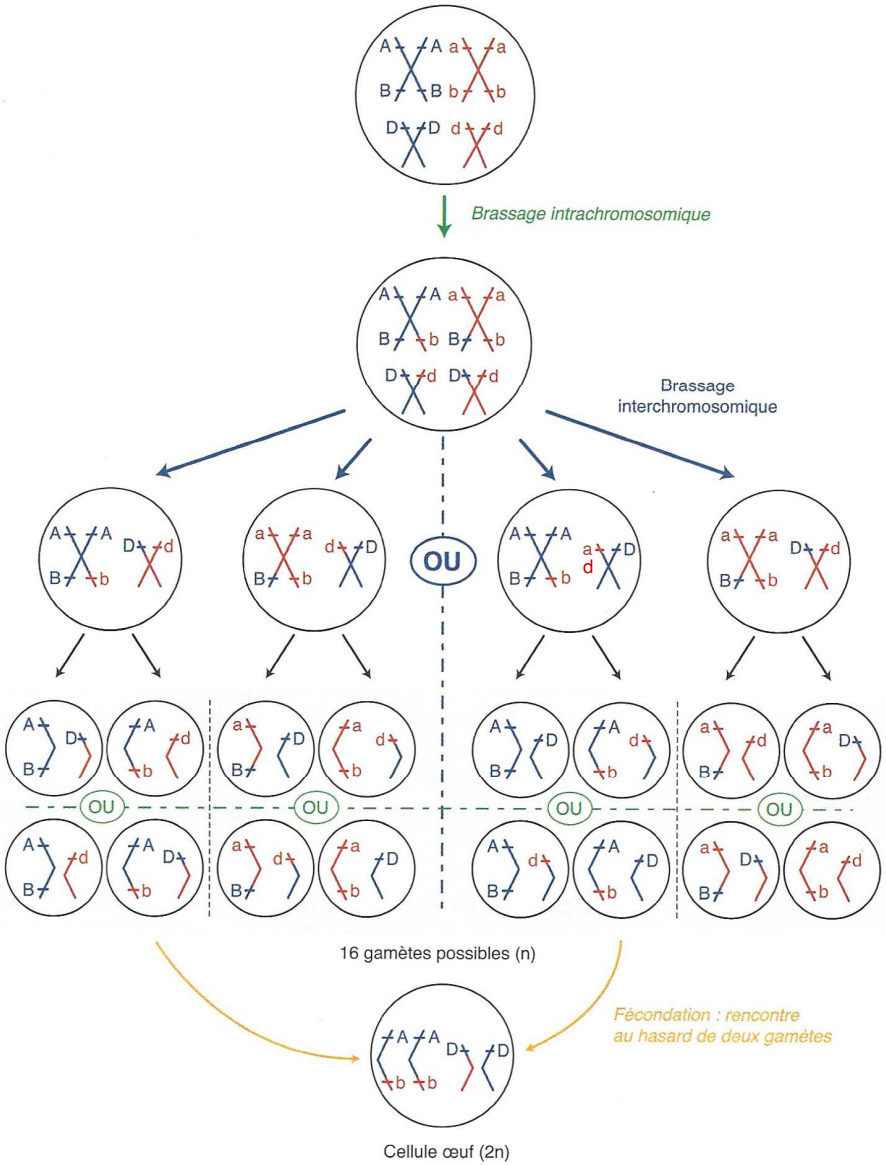


FIGURE 44. Aspects génétiques de la reproduction sexuée : la genèse de diversité. Superposition des brassages génétiques intra et interchromosomique + impact génétique de la fécondation. D'après SEGARRA *et al.* (2014).

3. La méiose, un processus où peuvent survenir des anomalies aux conséquences chromosomiques et/ou caryotypiques

- Il s'agit ici d'examiner les **conséquences de dysfonctionnements méiotiques** sur l'**équipement chromosomique** des gamètes et des individus ensuite générés à partir de ces gamètes suite à une **fécondation**.

Les exemples pris dans cette partie le seront surtout chez l'Homme.

a. Rappels : notion de caryotype et caryotypes normaux

α. Notion de caryotype

β. Des caryotypes diploïdes normaux humains

Caryotype humain normal :

b. La méiose, un processus pouvant générer des remaniements chromosomiques (= mutations chromosomiques au sens strict)

α. Les *crossing-over* inégaux, un processus permettant la duplication de gènes

Duplication :
***Crossing-over* inégal :**

Les **duplications de gènes** sont **majeures** dans l'**évolution biologique** où elles contribuent à l'**augmentation de la taille des génomes**.

FIGURE 46. Deux schématisations d'une duplication de gènes par CO inégal. [au choix]

β. Les *crossing-over* inégaux ou anormaux, un processus permettant des remaniements chromosomiques d'ampleur : fissions, insertions, délétions, inversions, translocations

- **fissions** = ***un chromosome est scindé en deux***.
- **délétions** = ***pertes de fragments chromosomiques***.
- **insertions** = ***adjonctions de fragments chromosomiques***.
- **inversions** = ***retournements de fragments de chromosomes***.
- **translocations** = ***échanges de fragments entre chromosomes***.

FIGURE 47. Remaniements chromosomiques. *Sources variées.*
[Schématiser deux / trois exemples]

c. La méiose, un processus pouvant générer des modifications du caryotype

α. Les aneuploïdies, des caryotypes anormaux provenant souvent de non-disjonctions de chromosomes homologues ou de chromatides lors de la méiose

Aneuploïdie :

(Nullisomie) **Trisomie** (Tétrasomie) …

FIGURE 48. Conséquences caryotypiques d'une non-disjonction de chromosomes homologues lors de la méiose I. D'après POULIZAC (1999).

β. Les euploïdies, des caryotypes affectant le nombre total de paires de chromosomes [*pour information ?*]

Euploïdie :

→ Triploïdie, tétraploïdie, pentaploïdie, hexaploïdie…

(!) ***Rôle évolutif*** *des* ***polyploïdisations*** *(notamment chez les* ***végétaux*** *ou certains groupes animaux)*

C. Quelques aspects génétiques de la fécondation croisée

1. La fécondation, source de variabilité : la production d'une combinaison génétique diploïde nouvelle par réunion de gamètes originaux

- En prenant en compte le **seul brassage interchromosomique** issu de la **méiose**, la fécondation produit $\mathbf{2^n \times 2^n = 2^{2n}}$ **possibilités de combinaisons chromosomiques** ! Exemple chez l'Homme : $2^{23} \times 2^{23} = 2^{46} = \mathbf{7 \cdot 10^{13}}$ **combinaisons** !

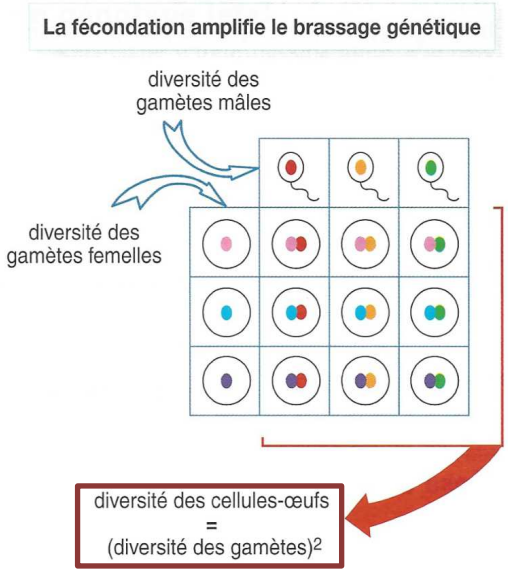
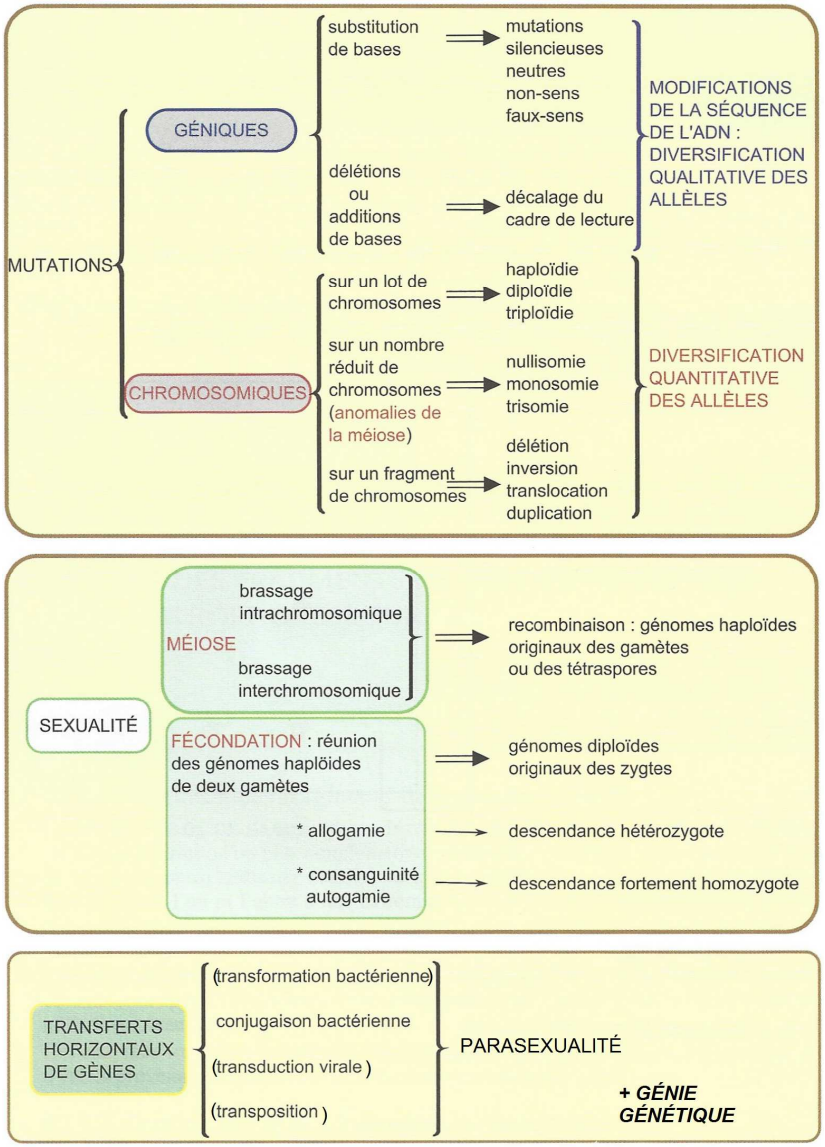


FIGURE 50. Le rôle de la fécondation dans la genèse de diversité génétique : la mise en commun alétaoire de deux génomes originaux de gamètes. D'après LIZEAUX, BAUDE *et al.* (2008).

2. La fécondation, source de stabilité : la restauration de la diploïdie et le maintien du caryotype de l'espèce et du nombre de gènes

Encadré D Processus de diversification des génomes : une vue d'ensemble

Important – *d'après* PEYCRU *et al.* (2013)



La diversification des génomes : une vision d'ensemble
[il manque le génie génétique sur la figure originale !]

3. Autogamie et allogamie : l'exemple de la pollinisation chez les Angiospermes

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

Pollinisation :

a. Un processus qui peut se faire au sein d'une même fleur (autogamie = autopollinisation) ou entre fleurs différentes (allogamie = allopollinisation)

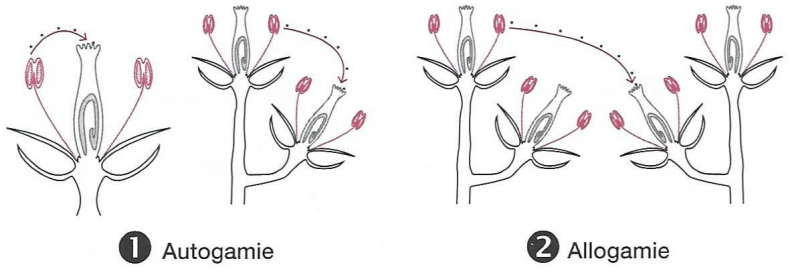


FIGURE 51. Pollinisations autogame et allogame. D'après DENŒUD *et al.* (2011).

- Autogamie (= autopollinisation) = ***pollinisation entre le pollen et le stigmate d'une même fleur ou de fleurs d'un même pied***. Ce processus est permis par **simple agitation des étamines** par le **vent** ou le passage d'un **Insecte**.

- Allogamie (= allopollinisation = pollinisation croisée) = ***pollinisation entre le pollen et le stigmate d'une même fleur ou de fleurs issues de pieds différents***. Ce processus domine chez la **plupart des espèces**.

b. Une autogamie plutôt rare quoique pouvant être parfois privilégiée chez certaines espèces (cas des anthères introrses ou de la cléistogamie)

Cléistogamie :

≠ **chasmogamie** (***fleurs s'ouvrant avant la maturité des pièces fertiles*** → favorise souvent l'**allogamie**)

Anthères introrses :

c. Une dispersion du pollen qui suppose des agents extérieurs : diversité des modes de pollinisation (les « -gamies » ou « -philies »)

Attention à bien parler de **dispersion du pollen** et non pas de ~~**dissémination**~~ ! On ne peut parler de **dissémination** que ***lorsque la structure déplacée permet de produire un nouvel individu, favorisant ainsi l'occupation du milieu***. Le terme « **dissémination** » s'appliquera donc aux **semences**.

α. L'anémogamie (= anémophilie) : transport du pollen par le vent

Anémogamie = anémophilie :

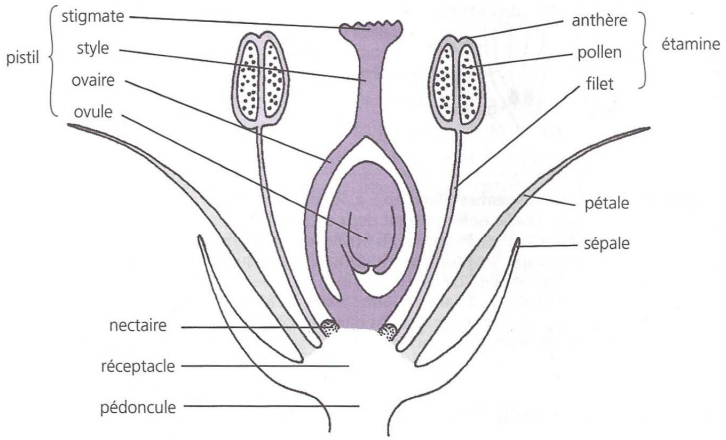
- ***Pollen*** *souvent* ***léger****, de* ***petite taille****,* ***peu ornementé****, produit en très* ***grande quantité***
- ***Fleur*** *souvent* ***peu colorée*** *(peu attractive),* ***filets pendants*** *avec* ***anthères à l'extérieur***

FIGURE 53. Fleurs de Poacée avec glumelles (gauche) ou simplifiée sans représentation des glumelles (à droite). D'après DUCREUX (2002) et DENŒUD *et al.* (2011).

β. L'entomogamie (= entomophilie) : une relation interspécifique mutualiste où le pollen est pris en charge par des Insectes [+ notion de coévolution]

Entomogamie = entomophilie :

- ***Pollen*** *de* ***taille variable****,* ***lourd****, produit en* ***faible quantité****, à* ***paroi ornementée*** *(→* ***accrochage*** *sur Insectes)*



Organisation générale de la fleur d'angiosperme, ici en coupe longitudinale.

FIGURE. Une fleur hermaphrodite syncarpe à carpelles soudés en ovaire unique = exemple typique de fleur entomophile.
D'après DUCREUX (2002), modifié.

Fleur *:*
- *souvent* ***colorée*** *→* ***visibilité****, attractivité*
- *souvent des* ***nectaires*** *→* ***alimentation*** *des Insectes (****nectar****)*
- *existence* ***d'autres substances*** *attractives*

+ ***adaptations particulières variées***

Sans être complètement une « ~~**symbiose**~~ » (puisque la **relation plante-pollinisateur** est **brève** = **transitoire** et **non durable**), la pollinisation entomophile est bien un **mutualisme** : c'est une ***relation interspécifique à bénéfices réciproques***. En effet, **l'Insecte assure la pollinisation** de la fleur et permet donc sa **reproduction sexuée** alors que la **plante** assure la **nutrition de l'Insecte**.

80 % des Angiospermes seraient **entomophiles**
et **dépendraient** donc des **Insectes** dans leur **survie** !

Beaucoup d'Angiospermes et **d'Insectes** ont **co-évolué** ; on constate ainsi que la **radiation évolutive** (= ***augmentation brutale du nombre d'espèces d'un groupe taxonomique au cours des temps géologiques***) des **Angiospermes** coïncide avec celle des **Abeilles** ! Et les **exemples** que nous venons de citer illustrent clairement des **co-adaptations**.

Il existe d'ailleurs de nombreux exemples d'**Angiospermes pollinisées** par **une seule espèce de pollinisateur** (et inversement des **pollinisateurs inféodés** à **une seule espèce d'Angiosperme**).

γ. L'existence d'autres modalités (hydrogamie, autres zoogamies…) [*pour information*]

δ. Bilan : comparaison anémogamie / entomogamie

TABLEAU IV. Anémophilie vs. entomophilie. D'après MEYER *et al.* (2008)

	Fleur anémophile	Fleur entomophile
Exemples	*Poa* (Poacées)	*Ophrys* (Orchidacées)
Morphologie	Fleur discrète, terne, sans parfum, ni odeur, ni nectar. Étamines exposées au vent, stigmates plumeux	Fleur voyante petite en inflorescence ou grande et isolée, de formes très diverses. Couleurs vives, parfum, odeur, nectar (cf. chapitre 6)
Pollen	Production díune grande quantité de petits grains de pollen lisses dispersés à grande distance	Production plus réduite de gros grains de pollen à exine très ornementée adhérant au pollinisateur. Dispersion à courte distance
Type de végétaux	Anémophilie fréquente chez les plantes monoïques (arbres en particulier) + Poacées hermaphrodites	Entomophilie fréquente chez les plantes dioïques et hermaphrodites

Pas de généralisation abusive !

d. L'existence fréquente de mécanismes limitant l'autogamie et favorisant l'allogamie (et donc l'hétérozygotie)

α. La séparation spatiale des fleurs mâles et femelles sur des individus différents : la dioécie

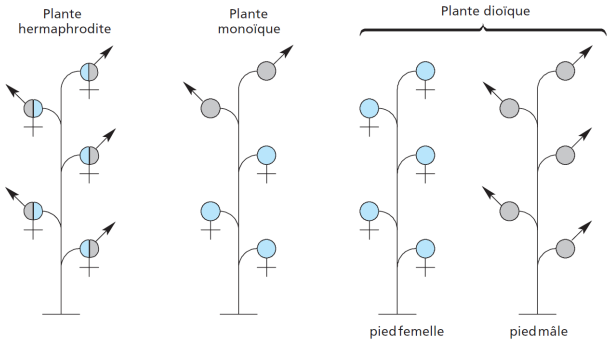


FIGURE 58. Hermaphrodisme, monoécie, dioécie [rappels]. D'après PEYCRU *et al.* (2010b).
Dioécie *rare (5 % des Angiospermes) : séparation pieds mâles / pieds femelles*

β. La séparation temporelle des structures mâles et femelles : la dichogamie (protogynie, protandrie)

Dichogamie :

Pièces femelles *à maturité en premier (**protogynie**) ou **pièces mâles** (**protandrie**)*

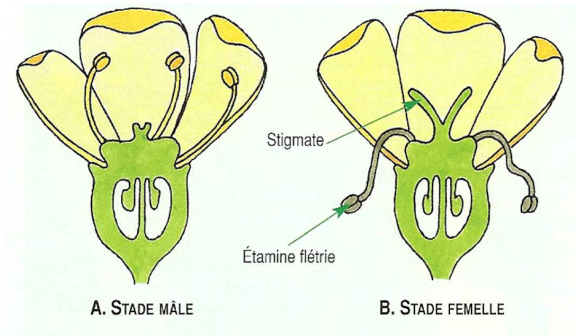
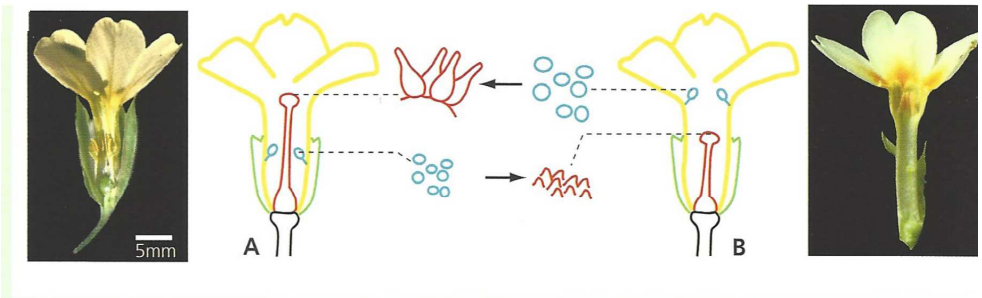


FIGURE 59. Un exemple de fleur protandre (Apiacée).
D'après MORÈRE, PUJOL *et al.* (2013).

γ. Des obstacles morpho-anatomiques à l'autofécondation : les autoincompatibilités hétéromorphes (exemple des fleurs hétérostylées de Primevère)



Hétérostylie de la primevère (*Primula sp.*, Primulacées)
A. fleur longistylée à grandes papilles stigmatiques et petit pollen. **B.** fleur brévistylée à petites papilles stigmatiques et grand pollen. Les flèches indiquent la pollinisation croisée.

FIGURE 61. Hétérostylie des Primevères : taille du pollen et des papilles stigmatiques associées. D'après MEYER *et al.* (2011).

Autoincompatibilité :
Autoincompatibilité hétéromorphe :

Primevère
- ***Hétérostylie*** *(fleurs* ***brévistylées*** */ fleurs* ***longistylées****)*
+ ***Papilles stigmatiques*** *et* ***grains de pollen*** *de* ***tailles*** *différentes*
+ ***Reconnaissance*** *moléculaire*

δ. Des obstacles moléculaires à l'autofécondation : les autoincompatibilités homomorphes (reposant sur un complexe S pluri-allélique)

Autoincompatibilité homomorphe : Implique le **gène *S*** (*self incompatibility*)

i. Les autoincompatibilités sporophytiques (AIS) (exemple du Chou)

Autoincompatibilité sporophytique = ***les molécules de signalisation présentes dans la paroi pollinique sont codées par le génotype (diploïde) de la plante (= sporophyte) car produites en totalité ou en partie par le tapis de l'étamine (ou la cellule-mère de spores).***

⇒ *les* ***deux allèles S de la plante productrice*** *de* ***pollen*** *sont* ***différents*** *des* ***deux allèles de la plante réceptrice*** *du pollen pour que la* ***germination*** *ou la* ***croissance*** *du* ***tube pollinique*** *– et donc in fine la* ***fécondation*** *– soit* ***possible*** *(figure 62).*

En réalité, il existe des **situations plus complexes** où **certains allèles** sont **récessifs** par rapport à **d'autres** qui les **dominent**… mais il semble exclu de rentrer dans de tels détails.

Modèle : Chou

ii. Les autoincompatibilités gamétophytiques (AIG) (exemple du Tabac)

Autoincompatibilité gamétophytique = ***les molécules de signalisation présentes dans la paroi pollinique sont codées par le génotype (haploïde) du grain de pollen (= gamétophyte) car produites en totalité par le grain de pollen lui-même (ou la microspore).***

⇒ *seul* ***l'allèle S porté par le grain de pollen*** *est* ***différent*** *des* ***deux allèles de la plante réceptrice*** *du pollen pour que la* ***germination*** *ou la* ***croissance*** *du* ***tube pollinique*** *– et donc in fine la* ***fécondation*** *– soit* ***possible*** *(figure 42).*

FIGURE 62. Autoincompatibilités sporophytique et gamétophytique.
D'après CHASSANY *et al.* (2012), précisé.
Attention, couleurs à modifier (diploïde → rouge, haploïde → vert).

ε. Des obstacles mécaniques à l'autofécondation : l'hercogamie (exemple chez les Orchidacées)

Hercogamie :

Ex. **rostellum** séparant les pollinies du stigmate (Orchidées)

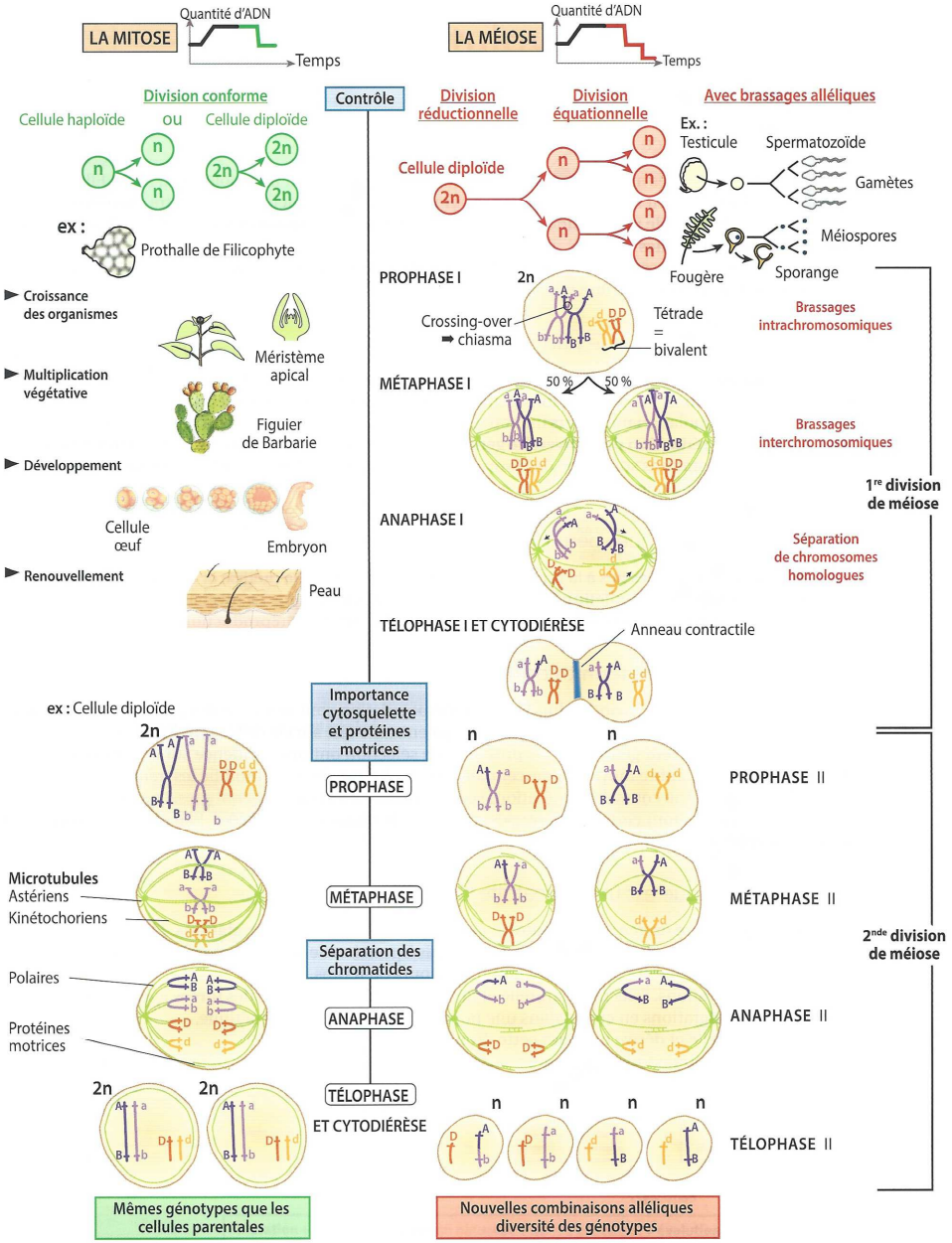


FIGURE 64. Autoincompatibilités sporophytique et gamétophytique.
D'après SAINTPIERRE *et al.* (2007).

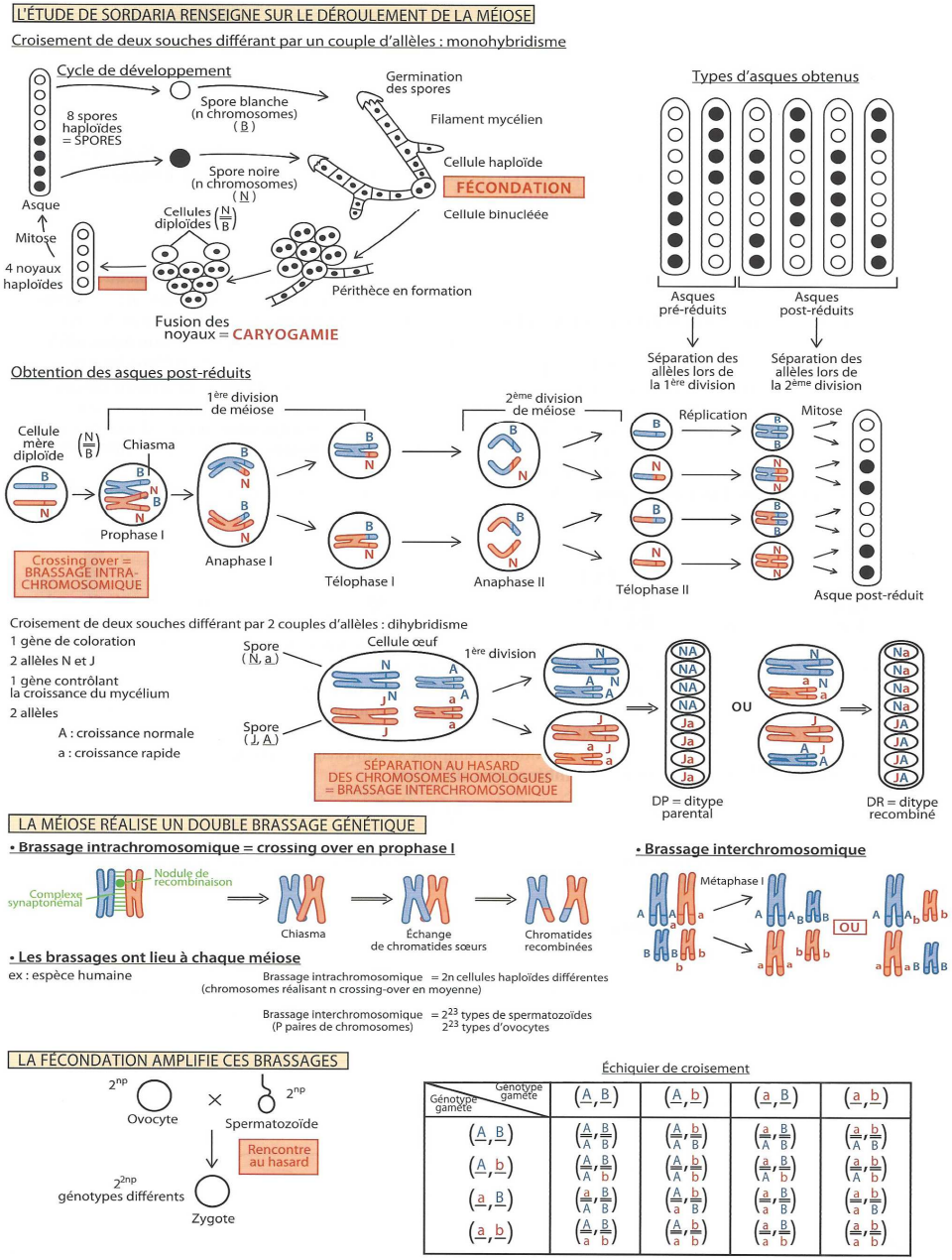


FIGURE 64. Le brassage génétique associé à la reproduction sexuée.
D'après SAINTPIERRE *et al.* (2007). [Voir TP 3.4.]

III. L'impact des processus reproductifs sur les allèles présents dans les populations

Voir chapitre 19 sur la **dynamique des populations** + chapitre 21 sur les **mécanismes de l'évolution**

- On peut appeler **population** l'***ensemble des individus d'une même espèce qui vivent dans un lieu donné***.

A. Le polymorphisme et la structure génétique des populations

Capacité exigible	✓ **Exploiter** des données quantifiant le polymorphisme.

1. Définitions du polymorphisme

Polymorphisme :
Polytypisme :
Polymorphisme génétique : ***Au moins deux allèles avec fréquence supérieure à 1 %.*** *[envisageable aussi au niveau chromosomique, biochimique…]*
Cryptopolymorphisme :
Existence d'un **polymorphisme épigénétique**

2. Mesure et appréciation du polymorphisme

a. Marqueurs morphologiques

b. Marqueurs biochimiques

c. Marqueurs chromosomiques

d. Marqueurs moléculaires

3. La structure génétique des populations

a. Les populations, des réservoirs d'allèles : notion de *pool* génétique

***Pool* génétique :**

b. Une structure génétique correspondant à la quantification des fréquences alléliques et génotypiques

Structure génétique d'une population :
Fréquence génotypique :
Fréquence allélique :

B. Les variations génétiques des populations

*On étudie le cas théorique le plus simple : un **gène porté par un locus autosomique présent sous deux formes alléliques seulement dans la population** ; on note ces **allèles A et a**. p est la fréquence de l'allèle A et q est la fréquence de l'allèle a.*

1. Des populations à l'équilibre génétique modélisables par l'équilibre de HARDY-WEINBERG (1908)

Modèle de HARDY-WEINBERG :

Conditions de validité :

-
-
-
-
-
-
-

$f(AA) =$

$f(Aa) =$

$f(aa) =$

NB $p + q = 1$ et $p^2 + 2pq + q^2 = 1$

FIGURE 65. Conditions de validité de l'équilibre de HARDY-WEINBERG.
D'après SEGARRA *et al.* (2015).

2. L'existence possible d'une variation à l'équilibre de HARDY-WEINBERG dans les populations naturelles (test du khi-2 = test à l'équilibre)

- Les **populations naturelles** sont **rarement à l'équilibre de HARDY-WEINBERG**, signe qu'***une ou plusieurs conditions ne sont pas remplies***.

Le **test du khi-2** ***permet de savoir si une population respecte l'équilibre de HW et toutes ses prescriptions ou si ou moins une de ces prescriptions n'est pas respectée***. Il arrive toutefois que ce test ne soit **pas assez fin pour détecter certaines pressions évolutives**, d'où le fait que **le modèle fonctionne souvent bien en première approximation**.

On calcule ainsi le **khi-2** qui mesure ***l'écart entre les fréquences mesurées et les fréquences attendues selon le modèle de HARDY-WEINBERG*** :

$$\chi^2 = \sum_{génotypes} \frac{(effectif\ observé - effectif\ théorique)2}{effecif\ théorique}$$

On applique ensuite la règle suivante :
Si **χ^2 calculé > χ^2 théorique** (obtenu avec des **tables déjà calculées**), alors il n'y a **pas conformité au modèle de HW**.

3. Les raisons possibles de l'écart à l'équilibre de HW et donc de la variation génétique des populations

a. L'écart à la panmixie

α. Rappel de la définition

Panmixie :

Détection d'un **écart à la panmixie** *possible par des* ***fréquences d'hétérozygotes significativement différentes*** *des fréquences attendues (dans l'ex. 2pq).*

β. Des systèmes de reproduction diminuant le taux d'hétérozygotes : autogamie, homogamie, consanguinité

Réduction de l'hétérozygotie au fil des générations ←

Situations reproductives *pouvant l'expliquer :*

- Autogamie :

⮝ **FIGURE 66. Équilibre de HARDY-WEINBERG.**

Explication

Prenons une **population théorique avec les génotypes AA, Aa et aa** :

- Les **individus homozygotes**, **AA** et **aa**, donnent des **individus avec le même génotype qu'eux**, donc **homozygotes**.
- Les **individus hétérozygotes** donnent **½ de Aa, ¼ de aa et ¼ de AA**, soit **la moitié d'hétérozygotes** et **la moitié d'homozygotes** >> *Le taux d'hétérozygotes diminue de moitié à chaque génération*.

>> L'autogamie favorise donc clairement **l'homozygotie**.

Notez qu'en partant d'une population avec 100 % d'hétérozygotes, avec ce mode de reproduction, il faudra seulement 5 générations pour atteindre une fréquence d'hétérozygotie inférieure à 5 % !

- Homogamie :

- Consanguinité :

γ. Un système de reproduction augmentant le taux d'hétérozygotes : l'hétérogamie

Hétérogamie :

Pourquoi c'est plus que l'allogamie :

>> ***Brassage génétique*** *fort* >> ↑ ***taux d'hétérozygotes***

δ. Bilan

FIGURE 67. Effets des modes de reproduction sur la diversité génotypique.
D'après SEGARRA *et al.* (2015) et PEYCRU *et al.* (2014).

b. La présence de forces évolutives

Ce point sera **repris** et largement **étoffé** dans le chapitre 21 (Mécanismes de l'évolution)

Forces évolutives :

α. La variation génétique (mutation au sens large)

Mutation (sens large) = variation génétique :

Modalités possibles :

-
  >
  >
  >
  >
-
-
-
-

Effet variable : **bénéfique** / **neutre** / **délétère**

Notez qu'à l'échelle de **quelques générations**, les **mutations** peuvent être facilement **négligées** mais, à l'échelle de **nombreuses générations** et de **toute l'évolution**, il s'agit d'un **phénomène majeur** puisque c'est la **source de nouveauté génétique**. Il s'agit donc d'un **facteur qui augmente le polymorphisme**.

β. Les migrations (immigration et émigration)

Migrations :

Flux géniques :

- À une **échelle locale**, l'accueil de nouveaux allèles pourra être un **apport de variabilité**.
- À une **échelle globale**, les migrations, surtout quand elles sont **multidirectionnelles**, ont tendance à **homogénéiser les fréquences alléliques des populations en contact**, *limitant les effets locaux de la dérive ou de la sélection*. Dans ce cas, il y a plutôt **uniformisation du polymorphisme** (figure 68).

FIGURE 68. Effet des migrations sur le polymorphisme (population théorique).
D'après HARRY (2008).

γ. La dérive génétique

Dérive génétique :

*Une **approche statistique** et **probabiliste** permet d'estimer la **probabilité** qu'il se **répande** ou soit **éliminé** de la population. Cette probabilité dépend de la **fréquence initiale de l'allèle** et de la **taille de la population** : **plus la population est petite, plus la dérive génétique agit, et agit rapidement**.*

- La **dérive génétique** a un **effet variable sur le polymorphisme**. Ce modèle rend compte de très nombreuses observations.
- Elle est très active dans les **populations à faible effectif**.

δ. La sélection naturelle

Là encore, ce point sera très largement développé dans le chapitre 21.

Sélection naturelle :

- La sélection peut **réduire la diversité allélique** et **favoriser l'homozygotie** des individus (figure 69).
- Il existe néanmoins des cas documentés où ***l'hétérozygotie représente un avantage adaptatif par rapport à l'homozygotie*** (= **vigueur hybride**). Il y a alors sélection de l'hétérozygotie et, par là, contribution au **maintien du polymorphisme**.

FIGURE 69. Effet de la sélection sur le polymorphisme (population théorique).
D'après HARRY (2008).

- **L'étude quantitative de la sélection** peut se faire au moyen de la notion de ***fitness*** **= valeur sélective = valeur adaptative**.

Tous les aspects que nous devons de voir ici seront très largement complexifiés dans le chapitre 21 sur les mécanismes de l'évolution.

***Fitness* = succès reproducteur = valeur sélective = valeur adaptative** > moyen de **quantifier la sélection.**

***Fitness* individuelle :**

***Fitness* génotypique :**

- *Fitness* absolue :

- *Fitness* relative :

Modification de l'équilibre de Hardy Weinberg par la *fitness*

° Concrètement, **les *fitness* vont modifier l'équilibre de Hardy Weinberg** : il s'agit d'un **coefficient modifiant les fréquences génotypiques à la génération suivante**, quantifiant en quoi un génotype est mieux adapté que les autres à permettre la survie de ses descendants. La *fitness* est liée au ***nombre de descendants laissés à la génération suivante par les individus porteurs de ce génotype***.

Modification des fréquences de la génération *n*+1 par les *fitness*.

Génotypes	AA	Aa	aa
Fréquences génotypiques sans sélection (équilibre de HARDY-WEINBERG)			
Fitness (absolue)			
Fréquences génotypiques avec sélection			

c. Bilan

TABLEAU VI. Les variations génétiques des populations : une vue d'ensemble.
D'après SEGARRA *et al.* (2015)

Écarts aux conditions de réalisation de l'équilibre de HARDY-WEINBERG		Conséquences sur la structure génétique des populations

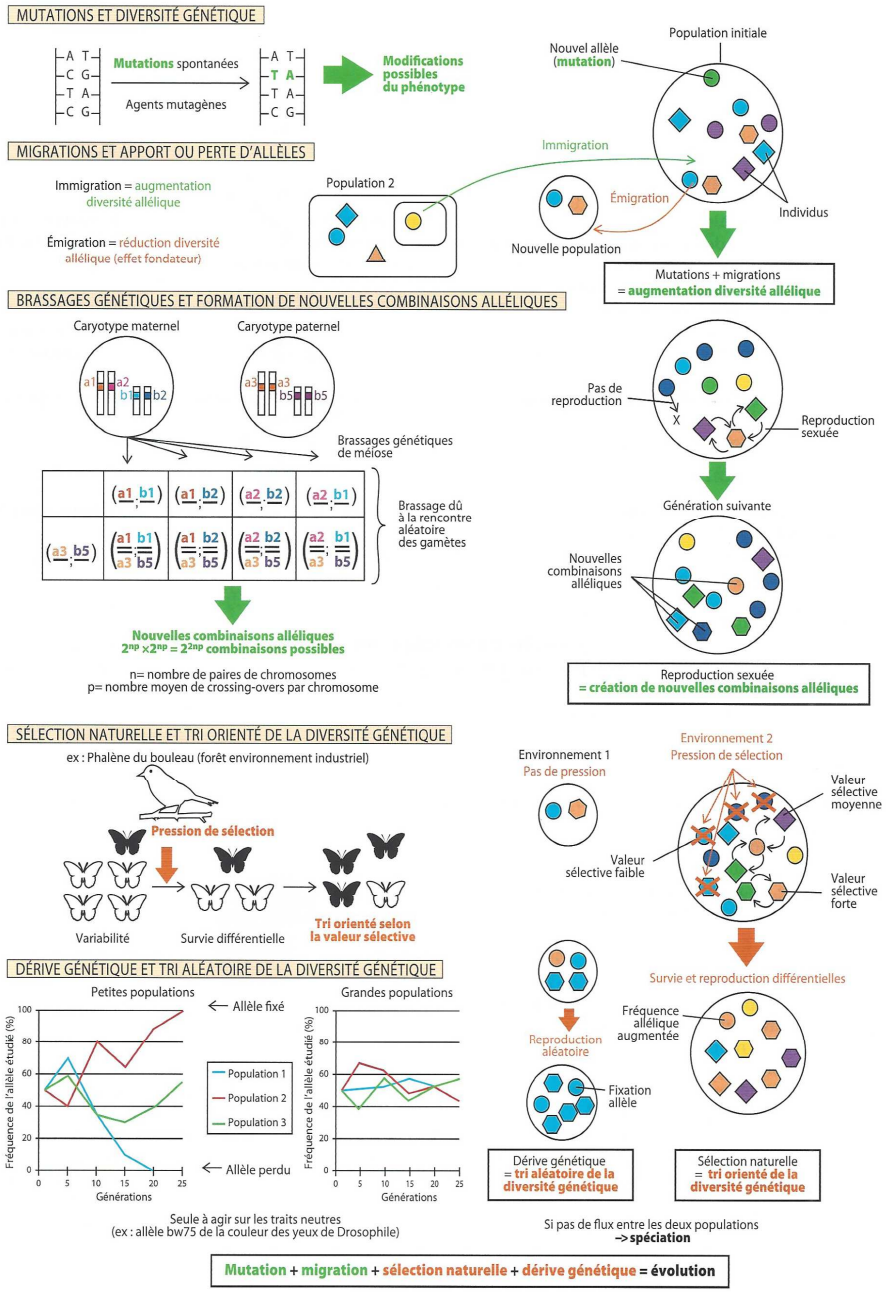


FIGURE 70. Le polymorphisme dans les populations. D'après SAINTPIERRE *et al.* (2017).

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.

- Diversité des processus génétiques impliqués
° **Réplication** et **enzymes** impliquées [rappels]
° **Principes** génétiques : **mitose** / **méiose** / **fécondation**
° **Évolution** de la **quantité d'ADN** au cours du **cycle cellulaire mitotique** [rappels]
° **Évolution** de la **quantité d'ADN** au cours du **cycle cellulaire méiotique**
° **Cycle** des Métazoaires : cas des **Mammifères** [rappels]
° **Cycle** des Embryophytes : cas des **Angiospermes** [rappels]
[° **Cycle** des **Eumycètes** – utile pour les TP]
° **Comparaison** reproduction sexuée / asexuée
(!) Les mutations n'ont pas été revues ici → revoir chapitre 5 !

- Mécanismes génétiques
° **Mitoses** : étapes
° **Chromosome métaphasique** [rappels]
° Types de **MT du fuseau**
[° Mécanisme de **l'ascension polaire**]
° Mécanisme de la **vésicularisation** de l'enveloppe nucléaire
[° **Centrosome**]
[>> rappels sur
- **gamétogenèse** mâle et femelle des Mammifères
- formation du **grain de pollen**
- formation du **sac embryonnaire**]
° **Méiose** : étapes

- Genèse de diversité méiotique
° **Brassage interchromosomique**
° **Brassage intrachromosomique** (*crossing-over*)
° ***Crossing-over* inégal** et duplication génique
[° **Fission** / **délétion** / **inversion** / **addition** / **translocation chromosomiques**]
° Conséquences de **non-disjonctions de chromosomes** ou **chromatides**

- Fécondation croisée / autofécondation (Angiospermes)
[° **Autogamie** / **Allogamie**]
° **Fleur anémogame** (Poacées) [Revoir aussi les **fleurs entomogames**]
° **Monoécie** / **dioécie** / **hermaphrodisme**
[° **Protandrie**]
° **Primevères**
° **Autoincompatibilités**

- *Reproduction et génétique des populations*
° **Formules** de **fréquences**
° **Équilibre** de **Hardy-Weinberg** : **conditions**
° **Équilibre** de **Hardy-Weinber**g : **tableau** [+ graphe ?]
° **khi-2**
° Effets des **modes de reproduction**
° **Migration**
° **Sélection**
° ***Fitness* : tableau** (modification de l'équilibre de HW)

Vous devez en outre **savoir** / **pouvoir** :

Voir le TP 3.3 sur la méiose

° **Exploiter** des données de **croisements** / **Résoudre** des **exercices** de génétique
° **Exploiter** des **clichés microscopiques** (MO ou MET) montrant les **divisions cellulaires**, leurs étapes et leurs modalités
° **Traiter** des **données génétiques** de populations

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).

CHASSANY, V., M. POTAGE & M. RICOU (2012). *Mini manuel de Biologie végétale.* Dunod, Paris.

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.

LE GUYADER, H. (dir.) (1998). *L'Évolution.* Belin-Pour la Science, 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).

POULIZAC, J.-A. (1999). *La variabilité génétique.* Ellipses, Paris.

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.

SALGUEIRO, E. & A. REYSS (2002). *Biologie de la reproduction sexuée.* Belin, 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. La reproduction, une fonction impliquant des processus génétiques variés 2
A. Quatre processus génétiques majeurs impliqués lors de la reproduction : réplication, mitose, méiose, fécondation 2
1. La réplication, processus conforme permettant la duplication de l'information génétique dans la cellule ($n > 2n$) 2
2. La mitose, division cellulaire eucaryote conforme aboutissant à la formation de deux cellules-filles génétiquement identiques ($2n > 2n$ ou $n > n$) 3
3. La méiose, division eucaryote non conforme d'une cellule mère diploïde en quatre cellules-filles haploïdes ($2n > n$) [pas forcément toutes conservées] 4
4. La fécondation, fusion de deux gamètes haploïdes réunissant leur matériel génétique en un génome diploïde ($n + n > 2n$) 4
B. Des divisions cellulaires s'intégrant dans un cycle cellulaire 5
1. Étapes du cycle cellulaire mitotique et évolution de la quantité d'ADN 5
a. Un cycle divisé en interphase et mitose 5
b. Une interphase divisible en phases G1, S et G2 5
2. Cas du cycle cellulaire des cellules germinales s'engageant dans la méiose 6
C. Des processus génétiques s'intégrant dans un cycle de vie (= cycle de reproduction) 6
1. Le vocabulaire des cycles de vie 6
a. Notion de cycle de vie 6
b. Notion de phase (haplophase vs. diplophase) 6
c. Notion de génération (cycles monogénétique, digénétique, trigénétique) 6
d. Spore, gamète, zygote 7
2. Quelques cycles vitaux types 7
a. Les Métazoaires (dont les Mammifères) : un cycle monogénétique diplophasique 7
b. Les Embryophytes (dont les Angiospermes) : un cycle digénétique haplodiplophasique 8
c. Les Eumycètes : un cycle traditionnellement compris comme monogénétique haplophasique 10
D. Avantages et inconvénients comparés des reproductions végétative et sexuée 11
1. Un avantage sélectif de la reproduction asexuée possible dans des conditions environnementales stables 11
a. Une reproduction plus rapide et à plus faible coût énergétique que la reproduction sexuée 11
b. Une clonalité qui assure l'occupation de l'espace par un même génotype (isogénie des clones), ce qui implique une faible variation phénotypique 11
2. Une prime à la reproduction sexuée dans l'adaptation à l'environnement et ses variations 11
a. La faible adaptabilité face aux environnements variables (fluctuants et/ou hétérogènes), un inconvénient de la reproduction asexuée 11
b. Un risque d'affaiblissement génétique lors de la reproduction asexuée 12

II. Les divisions cellulaires et la fécondation : mécanismes et conséquences génétiques et reproductives 13
A. La mitose, une division cellulaire qui assure une transmission conforme de l'information génétique de la cellule-mère aux cellules-filles 13
1. Les étapes de la mitose 14
a. La prophase et la prométaphase ($2n$ chromosomes doubles) 14
b. La métaphase ($2n$ chromosomes doubles) 14
c. L'anaphase ($2n$ chromosomes doubles > simples) 14
d. La télophase et la cytodiérèse ($2n$ chromosomes simples) 15
e. Bilan des étapes de la mitose 16
2. Les mécanismes importants de la mitose 17
a. Importance de la condensation de l'ADN 17
b. Importance du cytosquelette 17
α. Des microtubules organisés en un fuseau de division (microtubules polaires, astériens et kinétochoriens) 17
β. Importance de la polymérisation-dépolymérisation des microtubules dans leur allongement ou leur raccourcissement 18
γ. Rôle des lamines dans la vésicularisation et la reformation de l'enveloppe nucléaire 19
δ. Rôle des interactions actine-myosine dans la cytodiérèse des cellules animales 19
c. L'existence d'un contrôle du cycle cellulaire et de la division cellulaire 19
3. Aspects génétiques de la mitose : discussion de sa conformité 20
a. La mitose, un processus fondamentalement conforme 20
b. Des limites à la conformité 20
α. La possibilité de mutations non réparées transmises aux cellules-filles 20
β. Une inégalité de répartition du matériel cytoplasmique lors de la cytodiérèse 20
γ. L'existence (très rare) de recombinaisons mitotiques : les *crossing-over* mitotiques [*pour information*] 20
4. Aspects reproductifs de la mitose 20
a. La base du développement pluricellulaire et de la reproduction asexuée 20
b. Une intervention dans le cadre de la reproduction sexuée 20
α. La multiplication des cellules germinales (Métazoaires) ou des cellules-mères de spores (Embryophytes) 20
i. Cas de la multiplication des cellules germinales (ex. des Mammifères) [avec rappels sur la gamétogenèse] 20
ii. Cas de la multiplication des cellules mères de spores mâles (ex. des Angiospermes) 21
β. La production d'un gamétophyte chez les Embryophytes 22
B. La méiose, une division cellulaire qui conduit à l'haploïdie et assure un brassage génétique des génomes parentaux originels 23
1. Un processus comprenant deux divisions successives sans réplication intermédiaire 23
a. La division réductionnelle (méiose I) : une étape assurant la réduction chromosomique et générant deux cellules-filles haploïdes 23
b. La division équationnelle (méiose II) : une étape techniquement assimilable à une mitose à l'état haploïde 24
2. La méiose, un processus où un brassage génétique permet la production d'une recombinaison génétique 26
a. Notions de recombinaison génétique et de brassage génétique 26
b. Un brassage interchromosomique lors de l'anaphase I assurant une répartition aléatoire des chromosomes paternels et maternels 26
c. Un brassage intrachromosomique lors de la prophase I 27
α. Les *crossing-over* (CO) : des échanges habituellement réciproques de portions de chromatides entre chromosomes appariés en prophase I 27
β. Un processus non aléatoire qui a lieu au niveau de zones préférentielles : les points chauds de recombinaison 27
d. Bilan : les cellules issues de la méiose, des cellules haploïdes génétiquement originales porteuses de combinaisons alléliques uniques 27
3. La méiose, un processus où peuvent survenir des anomalies aux conséquences chromosomiques et/ou caryotypiques 28
a. Rappels : notion de caryotype et caryotypes normaux 28
α. Notion de caryotype 28
β. Des caryotypes diploïdes normaux humains 28
b. La méiose, un processus pouvant générer des remaniements chromosomiques (= mutations chromosomiques au sens strict) 29

α. Les *crossing-over* inégaux, un processus permettant la duplication de gènes 29
β. Les *crossing-over* inégaux ou anormaux, un processus permettant des remaniements chromosomiques d'ampleur : fissions, insertions, délétions, inversions, translocations 29
c. La méiose, un processus pouvant générer des modifications du caryotype 30
α. Les aneuploïdies, des caryotypes anormaux provenant souvent de non-disjonctions de chromosomes homologues ou de chromatides lors de la méiose 30
β. Les euploïdies, des caryotypes affectant le nombre total de paires de chromosomes [*pour information ?*] 31
C. Quelques aspects génétiques de la fécondation croisée 31
1. La fécondation, source de variabilité : la production d'une combinaison génétique diploïde nouvelle par réunion de gamètes originaux 31
2. La fécondation, source de stabilité : la restauration de la diploïdie et le maintien du caryotype de l'espèce et du nombre de gènes 32
3. Autogamie et allogamie : l'exemple de la pollinisation chez les Angiospermes 33
a. Un processus qui peut se faire au sein d'une même fleur (autogamie = autopollinisation) ou entre fleurs différentes (allogamie = allopollinisation) 33
b. Une autogamie plutôt rare quoique pouvant être parfois privilégiée chez certaines espèces (cas des anthères introrses ou de la cléistogamie) 33
c. Une dispersion du pollen qui suppose des agents extérieurs : diversité des modes de pollinisation (les « -gamies » ou « -philies ») 33
α. L'anémogamie (= anémophilie) : transport du pollen par le vent 33
β. L'entomogamie (= entomophilie) : une relation interspécifique mutualiste où le pollen est pris en charge par des Insectes [+ notion de coévolution] 34
γ. L'existence d'autres modalités (hydrogamie, autres zoogamies…) [*pour information*] 36
δ. Bilan : comparaison anémogamie / entomogamie 36
d. L'existence fréquente de mécanismes limitant l'autogamie et favorisant l'allogamie (et donc l'hétérozygotie) 36
α. La séparation spatiale des fleurs mâles et femelles sur des individus différents : la dioécie 36
β. La séparation temporelle des structures mâles et femelles : la dichogamie (protogynie, protandrie) 36
γ. Des obstacles morpho-anatomiques à l'autofécondation : les autoincompatibilités hétéromorphes (exemple des fleurs hétérostylées de Primevère) 37
δ. Des obstacles moléculaires à l'autofécondation : les autoincompatibilités homomorphes (reposant sur un complexe S pluri-allélique) 38
i. Les autoincompatibilités sporophytiques (AIS) (exemple du Chou) 38
ii. Les autoincompatibilités gamétophytiques (AIG) (exemple du Tabac) 38
ε. Des obstacles mécaniques à l'autofécondation : l'hercogamie (exemple chez les Orchidacées) 39

III. L'impact des processus reproductifs sur les allèles présents dans les populations 41
A. Le polymorphisme et la structure génétique des populations 41
1. Définitions du polymorphisme 41
a. Définition générale 41
b. Le polymorphisme génétique 41
c. Le cryptopolymorphisme 41
d. Le polymorphisme épigénétique 41
2. Mesure et appréciation du polymorphisme 41
a. Marqueurs morphologiques 41
b. Marqueurs biochimiques 41
c. Marqueurs chromosomiques 41
d. Marqueurs moléculaires 41
3. La structure génétique des populations 41
a. Les populations, des réservoirs d'allèles : notion de pool génétique 41
b. Une structure génétique correspondant à la quantification des fréquences alléliques et génotypiques 41
B. Les variations génétiques des populations 42
1. Des populations à l'équilibre génétique modélisables par l'équilibre de HARDY-WEINBERG (1908) 42
2. L'existence possible d'une variation à l'équilibre de HARDY-WEINBERG dans les populations naturelles (test du khi-2 = test à l'équilibre) 44
3. Les raisons possibles de l'écart à l'équilibre de HW et donc de la variation génétique des populations 44
a. L'écart à la panmixie 44
α. Rappel de la définition 44
β. Des systèmes de reproduction diminuant le taux d'hétérozygotes : autogamie, homogamie, consanguinité 44
γ. Un système de reproduction augmentant le taux d'hétérozygotes : l'hétérogamie 44
δ. Bilan 44
b. La présence de forces évolutives 45
α. La variation génétique (mutation au sens large) 45
β. Les migrations (immigration et émigration) 45
γ. La dérive génétique 46
δ. La sélection naturelle 46
c. Bilan 47

Pour faire une fiche de révision : quelques pistes 48
Références 49
Plan du chapitre 50
Plan simplifié (3 niveaux de titres) 52
Plan très simplifié (2 niveaux de titres) 52

Plan simplifié (3 niveaux de titres)

Objectifs : extraits du programme 1
Introduction 1

I. La reproduction, une fonction impliquant des processus génétiques variés 2
A. Quatre processus génétiques majeurs impliqués lors de la reproduction : réplication, mitose, méiose, fécondation 2
1. La réplication, processus conforme permettant la duplication de l'information génétique dans la cellule ($n > 2n$) 2
2. La mitose, division cellulaire eucaryote conforme aboutissant à la formation de deux cellules-filles génétiquement identiques ($2n > 2n$ ou $n > n$) 3
3. La méiose, division eucaryote non conforme d'une cellule mère diploïde en quatre cellules-filles haploïdes ($2n > n$) [pas forcément toutes conservées] 4
4. La fécondation, fusion de deux gamètes haploïdes réunissant leur matériel génétique en un génome diploïde ($n + n > 2n$) 4
B. Des divisions cellulaires s'intégrant dans un cycle cellulaire 5
1. Étapes du cycle cellulaire mitotique et évolution de la quantité d'ADN 5
2. Cas du cycle cellulaire des cellules germinales s'engageant dans la méiose 6
C. Des processus génétiques s'intégrant dans un cycle de vie (= cycle de reproduction) 6
1. Le vocabulaire des cycles de vie 6
2. Quelques cycles vitaux types 7
D. Avantages et inconvénients comparés des reproductions végétative et sexuée 11
1. Un avantage sélectif de la reproduction asexuée possible dans des conditions environnementales stables 11
2. Une prime à la reproduction sexuée dans l'adaptation à l'environnement et ses variations 11

II. Les divisions cellulaires et la fécondation : mécanismes et conséquences génétiques et reproductives 13
A. La mitose, une division cellulaire qui assure une transmission conforme de l'information génétique de la cellule-mère aux cellules-filles 13
1. Les étapes de la mitose 14
2. Les mécanismes importants de la mitose 17
3. Aspects génétiques de la mitose : discussion de sa conformité 20
4. Aspects reproductifs de la mitose 20
B. La méiose, une division cellulaire qui conduit à l'haploïdie et assure un brassage génétique des génomes parentaux originels 23
1. Un processus comprenant deux divisions successives sans réplication intermédiaire 23
2. La méiose, un processus où un brassage génétique permet la production d'une recombinaison génétique 26
3. La méiose, un processus où peuvent survenir des anomalies aux conséquences chromosomiques et/ou caryotypiques 28
C. Quelques aspects génétiques de la fécondation croisée 31
1. La fécondation, source de variabilité : la production d'une combinaison génétique diploïde nouvelle par réunion de gamètes originaux 31
2. La fécondation, source de stabilité : la restauration de la diploïdie et le maintien du caryotype de l'espèce et du nombre de gènes 32
3. Autogamie et allogamie : l'exemple de la pollinisation chez les Angiospermes 33

III. L'impact des processus reproductifs sur les allèles présents dans les populations 41
A. Le polymorphisme et la structure génétique des populations 41
1. Définitions du polymorphisme 41
2. Mesure et appréciation du polymorphisme 41
3. La structure génétique des populations 41
B. Les variations génétiques des populations 42
1. Des populations à l'équilibre génétique modélisables par l'équilibre de HARDY-WEINBERG (1908) 42
2. L'existence possible d'une variation à l'équilibre de HARDY-WEINBERG dans les populations naturelles (test du khi-2 = test à l'équilibre) 44
3. Les raisons possibles de l'écart à l'équilibre de HW et donc de la variation génétique des populations 44

Pour faire une fiche de révision : quelques pistes 48
Références 49
Plan du chapitre 50
Plan simplifié (3 niveaux de titres) 52
Plan très simplifié (2 niveaux de titres) 52

Plan très simplifié (2 niveaux de titres)

Objectifs : extraits du programme 1
Introduction 1

I. La reproduction, une fonction impliquant des processus génétiques variés 2
A. Quatre processus génétiques majeurs impliqués lors de la reproduction : réplication, mitose, méiose, fécondation 2
B. Des divisions cellulaires s'intégrant dans un cycle cellulaire 5
C. Des processus génétiques s'intégrant dans un cycle de vie (= cycle de reproduction) 6
D. Avantages et inconvénients comparés des reproductions végétative et sexuée 11

II. Les divisions cellulaires et la fécondation : mécanismes et conséquences génétiques et reproductives 13
A. La mitose, une division cellulaire qui assure une transmission conforme de l'information génétique de la cellule-mère aux cellules-filles 13
B. La méiose, une division cellulaire qui conduit à l'haploïdie et assure un brassage génétique des génomes parentaux originels 23
C. Quelques aspects génétiques de la fécondation croisée 31

III. L'impact des processus reproductifs sur les allèles présents dans les populations 41
A. Le polymorphisme et la structure génétique des populations 41
B. Les variations génétiques des populations 42

Pour faire une fiche de révision : quelques pistes 48
Références 49
Plan du chapitre 50
Plan simplifié (3 niveaux de titres) 52
Plan très simplifié (2 niveaux de titres) 52

© 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 juin 2017 (dans sa version initiale) • Dernière actualisation : janvier 2021.

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.