

Chapitre II : TRANSMISSION DE L'INFORMATION GENETIQUE : MITOSE ET MEIOSE

1. Le cycle cellulaire

Le cycle cellulaire couvre la totalité de la période qui s'écoule entre deux divisions de la cellule somatique. C'est l'ensemble des événements qui se déroulent au cours des divisions de ces cellules.

2. Caractéristiques du cycle cellulaire

Le cycle cellulaire comprend deux phases : **L'interphase** et la **mitose** (Figure 1). La phase M (M pour mitose) est la période la plus courte.

L'interphase est une étape beaucoup plus longue (environ 90% du cycle cellulaire). Au cours de l'interphase, la cellule exerce ses fonctions primordiales à savoir, augmente sa masse et réplique son ADN. Alors que la phase M correspond à la division nucléaire et cytoplasmique pour donner deux cellules filles identiques.

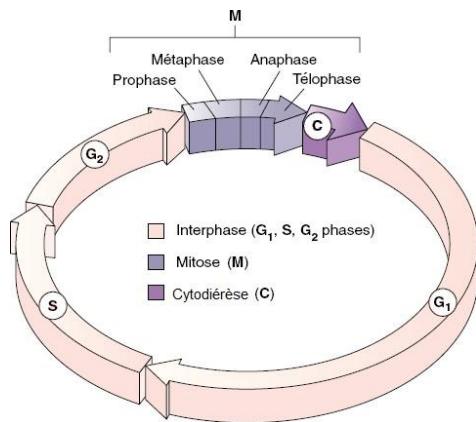


Figure 1 : Le cycle cellulaire

2.1 . L'interphase : L'interphase peut être subdivisée en trois périodes successives :

- La phase G₁ :** (G vient du mot anglais **Gap** qui veut dire vide) Il s'agit d'une phase de croissance où il n'y a pas de synthèse d'ADN. Au cours de cette phase, une cellule diploïde possède 2N chromosomes (nombre) et 2C d'ADN (quantité) (Figure 2). Il y a une synthèse intense de divers ARN (ARNm, ARNr...), enzymes (ADN polymérase, ARN polymérase...) et protéines (histones...). Dans cette phase, la cellule se prépare à la réPLICATION de son ADN.
- La phase S :** C'est la phase durant laquelle la cellule réplique son ADN (S pour Synthèse). Le contenu en ADN est intermédiaire entre celui d'une cellule en G₁ et une cellule en G₂ (Figure 2).
- La phase G₂ :** C'est une nouvelle phase de croissance qui suit la phase S et survient lorsque la réPLICATION de l'ADN est terminée. La quantité de l'ADN est dédoublée ayant atteint 4C à la fin de la phase précédente (Figure 2). Pendant la phase G₂, la synthèse protéique est intense et concerne surtout les protéines de l'appareil mitotique. A ce moment, la cellule augmente grandement de volume mais elle n'est pas encore en division, la mitose est en préparation.

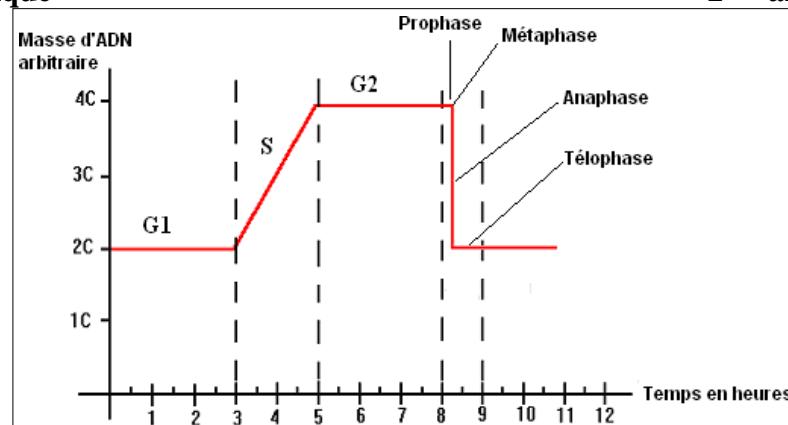


Figure 2 : Variation de la quantité de l'ADN dans la cellule au cours du cycle cellulaire (Le nombre de molécules d'AND de chacun de ces stades= le nombre de chromatides).

2.2. La mitose :

La mitose se déroule en 4 phases, suivies par la division cytoplasmique (cytodièrèse).

a) La prophase : Au cours de la prophase, la chromatine se condense en chromosomes bien visibles au microscope. Pendant la phase S précédente, les chromosomes se sont dupliqués, par conséquent, chaque chromosome est formé de deux chromatides sœurs unies par un centromère (Figure 3). Le centrosome se dédouble et chaque centrosome s'entoure de microtubules rayonnant (une structure étoilée appelée **aster**) et se déplace vers un pôle opposé de la cellule. La membrane nucléaire commence à disparaître et les fuseaux des microtubules commencent à irradier des centrosomes formant le fuseau achromatique

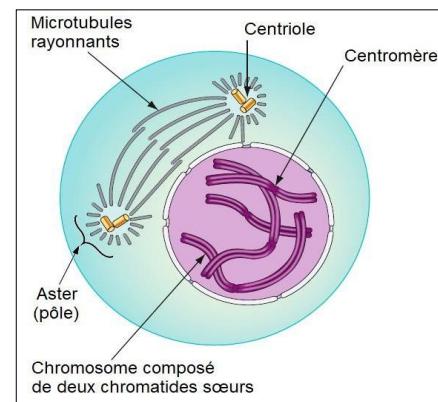


Figure 3 : La prophase.

b) La métaphase : Les chromosomes, dont la condensation est maximale, sont animés de mouvements par les fibres du fuseau achromatique (Figure 4a), ils finissent par se placer dans la région médiane de la cellule à une distance égale des deux pôles formant **la plaque équatoriale** (ou plaque métaphasique) (Figure 4b). Les micro-tubules kinétochoriens sont dirigés de part et d'autre des chromatides vers les centrioles.

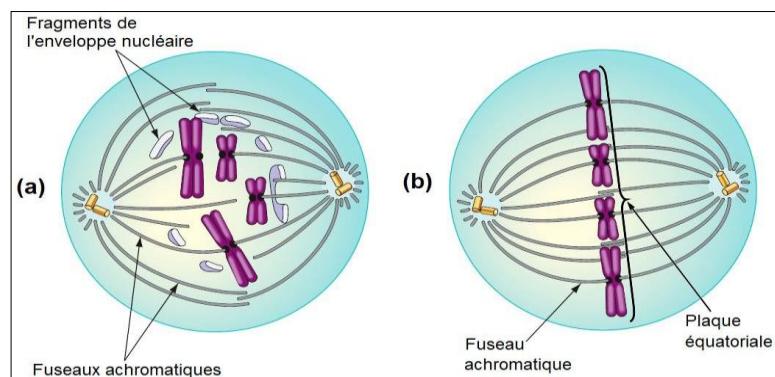


Figure 4 : (a) La prométaphase, (b) La métaphase.

c)L'anaphase : Au cours de cette phase, les centromères se fissurent (se divisent) et les chromatides sœurs se séparent en deux chromosomes indépendants. Chacun de ces chromosomes contient un centromère qui est lié à un pôle de la cellule par une fibre du fuseau achromatique (Figure 5). Chaque chromosome se déplace vers un pôle de la cellule par raccourcissement des microtubules kinétochoriens qui se dépolymérisent.

C'est donc dans cette phase que chaque copie du chromosome est distribuée à chaque cellule fille.

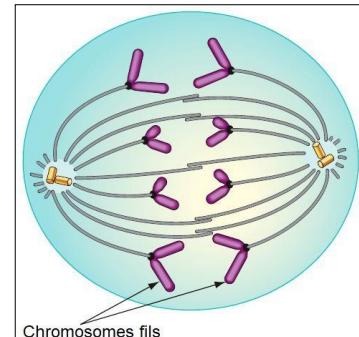


Figure 5 : L'anaphase.

d)La Télophase : Au cours de la télophase, les chromatides atteignent les pôles de la cellule, **les microtubules kinétochoriens** deviennent de plus en plus courts et se dépolymérisent. A ce moment, les chromosomes fils se regroupent autour de l'astre, se déroulent et deviennent moins apparents. Le nucléole réapparaît de nouveau et de nouvelles membranes nucléaires se reforment autour des noyaux des cellules filles (Figure 6). Le fuseau mitotique et les microtubules disparaissent.

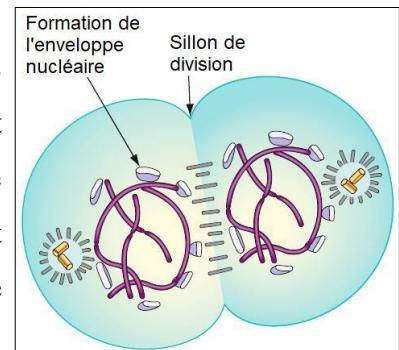


Figure 6 : Télophase et cytokinèse.

- ✓ **La cytodiéresse (ou cytokinèse) :** Il s'agit de la division cytoplasmique qui débute en fin d'anaphase ou lors de la télophase(Figure 6). Cette séparation est en fait le résultat de la formation d'un anneau contractile constitué de filaments d'actine et de myosine.

2.3 . Conséquence de la mitose

- Chaque mitose détermine la formation de deux (02) cellules filles qui sont des copies exactes de la cellule mère qui a été à leur origine quant au nombre et aux autres particularités des chromosomes que contenait celle-ci. La mitose est donc une division **équationnelle**.
- Toutes les cellules d'un organisme pluricellulaire qui sont produites par mitose à partir d'un zygote devraient contenir un même **nombre chromosomique**
- La mitose est donc le mécanisme de transmission des caractères d'une cellule mère à des cellules filles.

3. La division cellulaire sexée (la méiose)

La plupart des organismes supérieurs se reproduisent par voie sexuelle. Au cours de cette forme de reproduction, deux gamètes, un ovocyte et un spermatozoïde, fusionnent en un zygote qui se

développe en un embryon, aboutissant lui-même à un organisme qui à son tour, produit ovocytes et spermatozoïdes, selon le cas. Durant ce cycle de reproduction alterne **phase haploïde** et **phase diploïde**. Les gamètes (ovocytes et spermatozoïdes) sont à l'état haploïde, (ne comportant qu'un seul jeu de chromosomes) ; en revanche, le zygote issu de la fusion de deux gamètes haploïdes, est lui à l'état diploïde (comportant deux jeux de chromosomes ; un d'origine maternelle et un autre d'origine paternelle). Afin de maintenir ce cycle, le nombre de chromosomes au cours de la formation des gamètes doit à nouveau être réduit de moitié. Cette réduction s'effectue au cours d'une division de réduction particulière appelée **méiose**.

Dans une cellule somatique, au cours de la phase S précédant la mitose, la teneur en ADN est doublée passant de 2C à 4C (Figure 2). Et pendant la mitose, cette teneur en ADN est réduite de moitié (2C). De même, durant la phase de préparation de la méiose, la teneur en ADN est également doublée, puis réduite de moitié pendant la première division méiotique. Mais puisque la première division méiotique est aussitôt suivie par une deuxième division méiotique sans qu'une phase S ne s'intercale, la teneur en ADN du noyau qui en résulte n'est plus que de 1C (Figure 7). En effet, la méiose est la source de cellules filles haploïdes (gamètes).

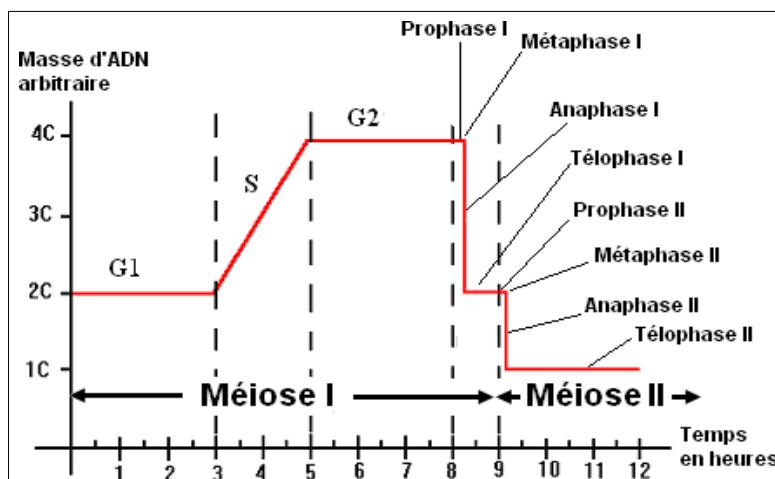


Figure 7 : Variation de la quantité de l'ADN dans la cellule au cours de la méiose.

La méiose est organisée en deux divisions successives. La première est dite **réductionnelle** (**division méiotique I**) et la seconde est dite **équationnelle** (**division méiotique II**).

3.1. Méiose I :

Du point de vue morphologique, la première division méiotique (Méiose I ou division réductionnelle) est caractérisée par une longue prophase (Prophase I) durant laquelle les chromosomes homologues s'apparent et échangent leur matériel génétique. On distingue ensuite une métaphase I, une anaphase I, et une télophase I. Cette division méiotique est suivie d'une interkinèse, qui précède la seconde division méiotique (Méiose II).

3.1.1. La prophase I

La prophase I de la méiose est une phase particulièrement longue pouvant durer des jours, des mois voire même des années.

La prophase I de la méiose diffère de la prophase de la mitose du fait que les chromosomes homologues viennent se situer côté à côté dans un processus d'appariement appelé **synapsis** afin d'échanger le matériel génétique entre chromatides des chromosomes homologues dans un processus appelé **crossing over** ou **recombinaison** (ou encore **enjambement**). Les événements de la prophase sont complexes et peuvent être subdivisés en cinq stades (Figure 8)

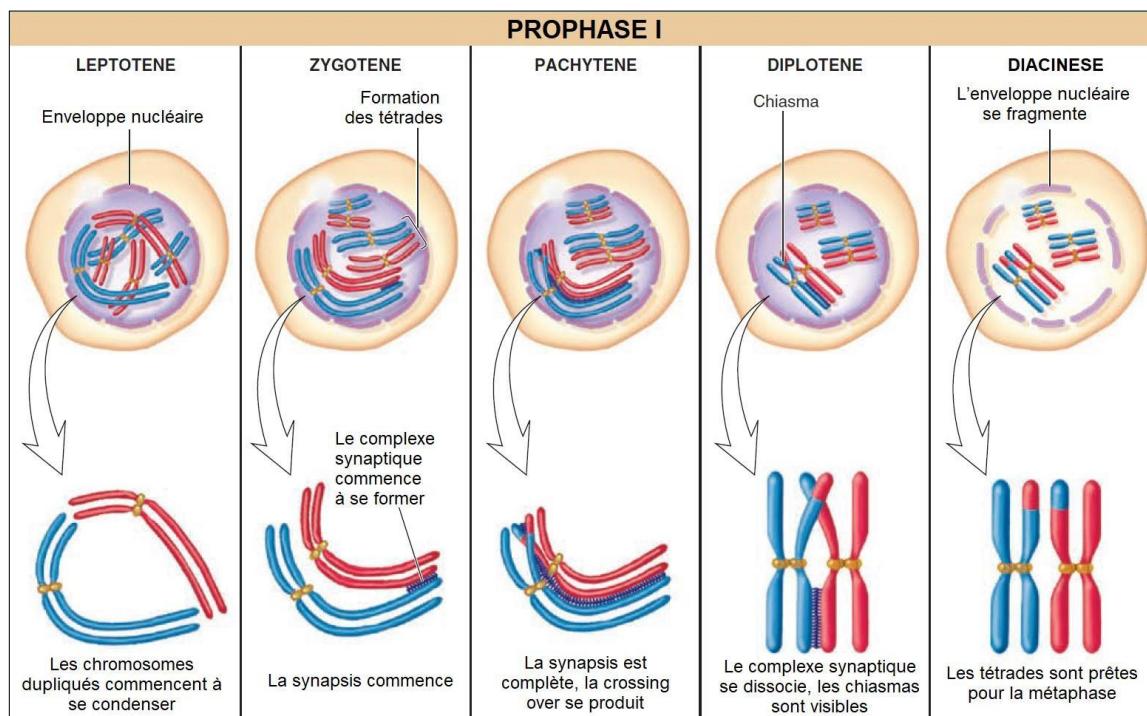


Figure 8 : Les différents stades de la prophase I de la méiose.

3.1.1.1. Le stade leptotène : Au cours de ce stade, les chromosomes subissent une condensation légère, ils deviennent apparents pour la première fois sous forme de structures finement filamentées. Ils sont constitués de deux chromatides sœurs unies au niveau du centromère. Les chromosomes sont attachés par leurs extrémités ou télomères à la lamina (protéines internes de la membrane nucléaires).

3.1.1.2. Le stade zygotène : C'est le premier phénomène essentiel de la méiose. Les chromosomes homologues, entraînés probablement par les protéines de la lamina, s'alignent et s'apparent suivant un mécanisme appelé **synapsis** des chromosomes. Cet appariement débute au niveau des télomères et progresse vers les centromères aboutissant à la formation des tétrades. Cet appariement des chromosomes repose sur l'homologie ou la ressemblance des séquences d'ADN des deux chromosomes homologues.

3.1.1.3. Le stade pachytène : A ce stade l'appariement est achevé : les quatre chromatides apparaissent étroitement appariées (en tétrades). C'est à ce moment que prend place la

recombinaison génétique. En effet, il se produit durant ce stade des cassures suivies par un échange de segments entre chromatides non sœurs. Ces échanges ont appelés **Crossing-over** ou **recombinaison**.

3.1.1.4. Le stade Diplotène : A ce stade les chromosomes appariés se repoussent et commencent à se séparer. Cependant, les chromosomes sont encore liés entre eux par des ponts appelées **Chiasma**. Le nombre de chiasma varie d'un chromosome à un autre. Le stade diplotène est un stade de longue durée. Par exemple, les ovocytes humains atteignent le stade diplotène durant le 5^{ème} mois de la vie embryonnaire et restent à ce stade jusqu'à l'ovulation qui a lieu quelques années plus tard au cours de la puberté.

3.1.1.5. La Diacinese : Les chromosomes atteignent leur degré de condensation maximale à ce stade tandis que le nucléole et la membrane nucléaire disparaissent et que le fuseau achromatique commence à se former.

3.1.2. La métaphase I

Lors de cette phase, les tétrades ou bivalents se placent au niveau de la plaque équatoriale. Les kinétochores ne se forment que sur une face chez les deux chromatides formant le même chromosome, par conséquent, les microtubules kinétochoriens ne s'orientent que vers un pôle du fuseau ; pour un chromosome, le centromère ne se divise pas.

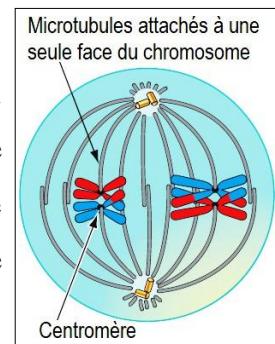


Figure 9 : La métaphase I

3.1.3. L'anaphase I

Les chromosomes homologues se séparent et migrent vers un pôle de la cellule, chaque chromosome étant constitué de deux chromatides sœurs. Cette migration permet de réduire le nombre de chromosomes de $2N$ à N , c'est pour cette raison que la méiose I est dite **réductionnelle**.

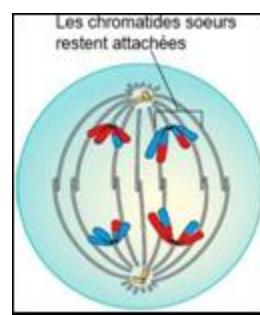


Figure 10 : L'anaphase I.

3.1.4. La télophase I :

Des enveloppes nucléaires se reforment autour des noyaux fils et au cours de la cytokinèse, le matériel cytoplasmique est réparti entre les deux cellules filles. Chaque cellule fille contient des chromosomes formés de deux chromatides sœurs attachées au niveau de leurs centromères. En raison du crossing over, ces chromatides sœurs peuvent ne plus être génétiquement identiques.

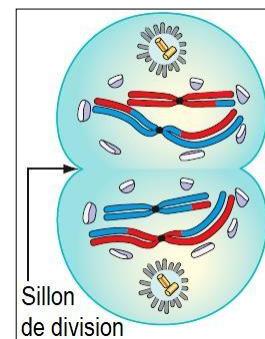


Figure 11 : Télophase I et cytokinèse.

Interkinèse : La période entre deux divisions méiotiques s'appelle **interkinèse**.

Cette période est plus ou moins longue. Dans cette période, l'ADN ne se réplique pas.

3.2. Méiose II

La deuxième division méiotique (Meiose II ou division **équationnelle**) s'enchaîne en suite avec un mécanisme qui ne peut être distingué d'une mitose normale (Figure 12). En effet, en prophase II de la méiose, les chromosomes se présentent encore sous forme de deux chromatides unies au niveau du centromère, le fuseau achromatique se forme. En **métaphase II**, les chromosomes individualisés se placent sur la plaque équatoriale. Au début des mouvements des chromosomes qui ont lieu lors de **l'anaphase II**, les centromères se divisent et chacune des deux chromatides sœurs d'un chromosome est entraînée dans une direction opposée, vers l'un des pôles de la cellule. La cytokinèse de la télophase II divise chaque cellule en deux cellules filles. Le cycle méiotique permet donc d'obtenir quatre cellules filles haploïdes, à partir d'une cellule mère diploïde. Les caractéristiques de la mitose et de la méiose sont résumées dans le tableau 1 et la figure 13.

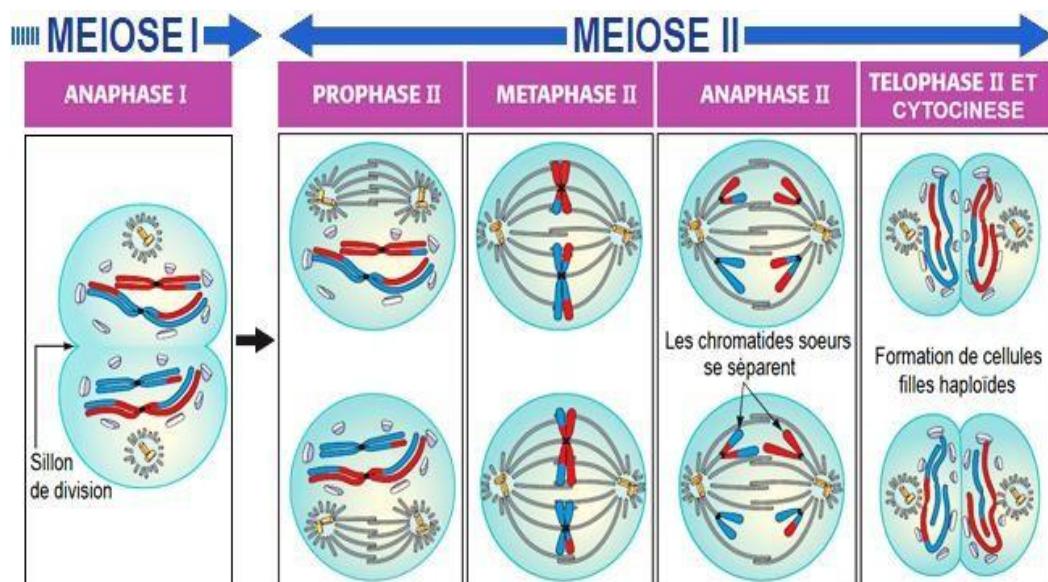


Figure 12 : La méiose II.

Tableau 1 : Différences caractéristiques entre la mitose et la méiose

Mitose	Méiose
Une division équationnelle sépare les chromatides sœurs	La première étape (méiose I) est une division réductionnelle qui sépare les chromosomes homologues à la première anaphase ; Les chromatides sœurs se séparent pendant la division équationnelle (méiose II) de la seconde anaphase.
Une division par cycle, soit une division cytoplasmique (cytokinèse) par division chromosomique équationnelle.	Deux divisions par cycle, soit deux divisions cytoplasmiques, une à la suite de la division réductionnelle, et l'autre à la suite de la division équationnelle.
Les chromosomes n'entrent pas en synapsis. Pas de formation de chiasma.	Les chromosomes entrent en synapsis et forment des chiasmas.
Pas d'échanges génétiques entre les chromosomes homologues.	Des échanges génétiques se produisent entre les chromosomes homologues.
Deux cellules filles sont produites par cycles.	Quatre cellules (gamètes) sont produites par cycle.
Le contenu génétique des cellules filles est identique à celui de la cellule mère.	Le contenu génétique des cellules filles est différent de la cellule mère.
Le nombre de chromosomes des cellules filles est identique à celui de la cellule mère.	Le nombre de chromosomes des cellules filles est réduit de moitié par rapport à celui de la cellule mère.
Les cellules issues de la mitose sont capables de subir d'autres mitoses.	Les cellules issues de la méiose ne peuvent pas subir une autre méiose mais peuvent subir une mitose
Se produit dans les cellules somatiques.	Se produit seulement dans les cellules spécialisées de la ligne germinale.
Commence au stade zygote et continue pendant la vie de l'organisme.	Se produit chez les organismes supérieurs matures.

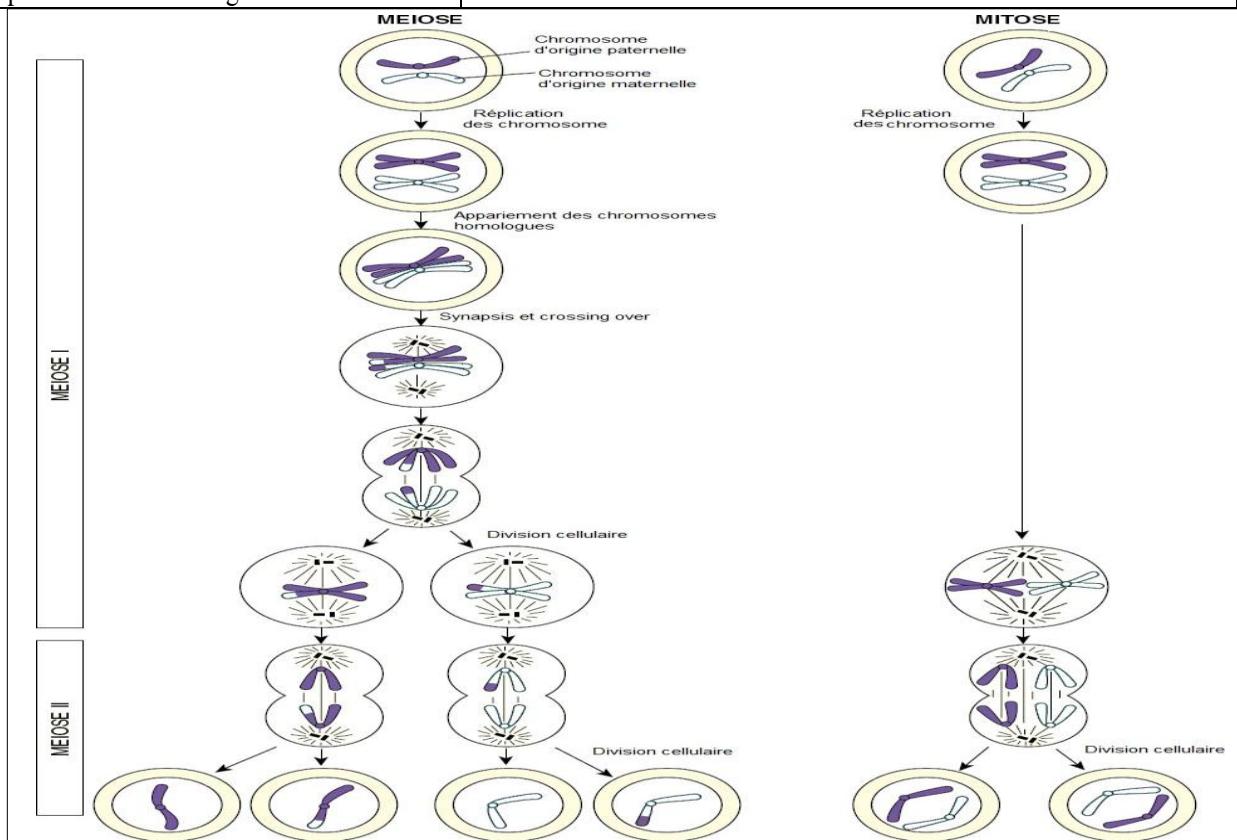


Figure 13 :Différences caractéristiques entre la mitose et la méiose.

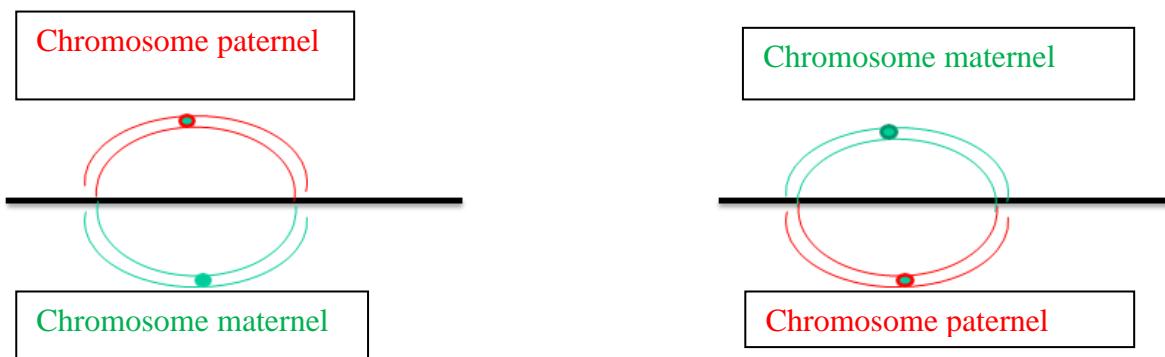
La méiose implique deux divisions nucléaires sans réPLICATION d'ADN entre elles. Il se produit ainsi quatre cellules filles, chacune porte la moitié du nombre de chromosomes. La recombinaison (crossing over) prend place en prophase I de la méiose. La mitose implique une seule division nucléaire après réPLICATION de l'ADN. Il se produit ainsi deux cellules filles, chacune porte le nombre original de chromosomes.

3.1.Conséquence génétique de la méiose

3.1.1. Brassage inter chromosomique

Le brassage inter chromosomique concerne les **gènes indépendants**, c'est-à-dire 2 gènes situés sur des paires de chromosomes différentes.

En **anaphase 1** s'effectue la **disjonction aléatoire** des paires de **chromosomes homologues**. Un chromosome d'une paire peut migrer avec l'un des 2 chromosomes de chacune des autres paires. Le nombre de combinaisons possibles est 2^n avec **n** = nombre de paires de chromosomes.



L'orientation de 2 homologues de chaque bivalent par rapport à l'équateur de la cellule se fait au hasard, de sorte que chaque chromosome dans une paire de homologues sera, en moyen dirigé vers l'un des pôles dans 50% des cas, et vers l'autre dans 50% des cas.

3.1.2. Brassage intra chromosomique

Le brassage intra chromosomique concerne les **gènes liés**, c'est-à-dire situés sur le même chromosome. En **prophase 1**, les chromosomes sont **appariés en bivalents**, leurs chromatides peuvent se croiser, ces chevauchements s'appellent des **chiasmas**. Des portions de chromatides peuvent s'échanger entraînant un échange d'allèles entre les 2 **chromosomes homologues**, ce mécanisme est un **crossing-over** ou recombinaison génétique. En fin de méiose, les gamètes contenant la même combinaison allélique que la cellule initiale, sont de type **parental**, celles contenant le résultat d'un crossing-over, sont de type **recombiné**.

Le brassage intra chromosomique dépend de la **position des gènes (locus)** sur le chromosome, il est **aléatoire et rare** mais n'affecte pas toutes les méioses.

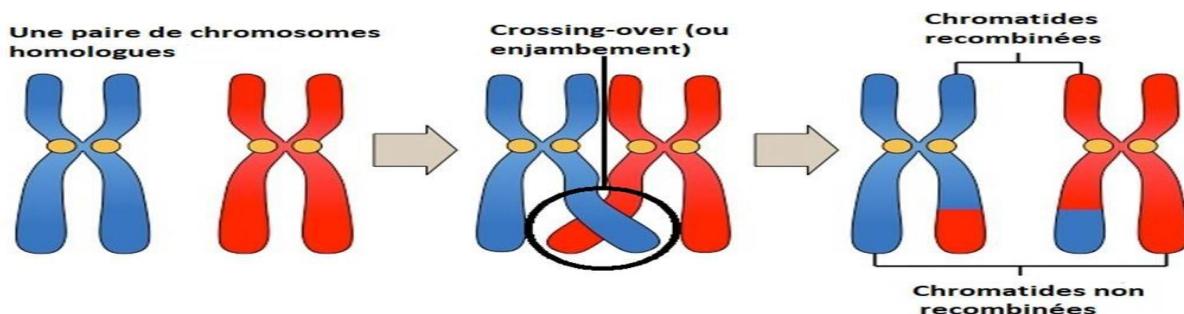


Figure 14 : Brassage intra chromosomique.

Conclusion : La distribution aléatoire des chromosomes permet d'augmenter le nombre de combinaisons chromosomiques possibles et, par conséquent, la diversité génétique des gamètes d'un individu. Le brassage intra chromosomique s'ajoute et amplifie le brassage inter chromosomique et donc l'augmentation de la diversité des gamètes obtenus en fin de méiose.

3.1.3 La Gamétogenèse

La gamétogénèse est le mécanisme biologique par lequel les gamètes sont formés dans l'organisme. Elle permet d'obtenir à partir de cellules diploïdes des cellules haploïdes. Dans le cas des mammifères, on parle plus précisément d'ovogénèse chez la femelle, et de spermatogenèse chez l'homme.

La division cellulaire qui a lieu pendant la gamétogenèse et qui fait passer la cellule de l'état diploïde à l'état haploïde est la **méiose**.

Un gamète est une cellule reproductrice de type haploïde qui a terminé la méiose et la différenciation cytoplasmique. Chez l'humain, comme la plupart des animaux, les gamètes femelles sont les **ovules** et les gamètes mâles les **spermatozoïdes** qui, associée à un autre gamète, donne naissance à un oeuf, ou zygote, à partir duquel un être se développera.

Les organes produisant les gamètes sont appelés **gonades** qui sont les **ovaires** chez la femelle et les **testicules** chez le mâle.

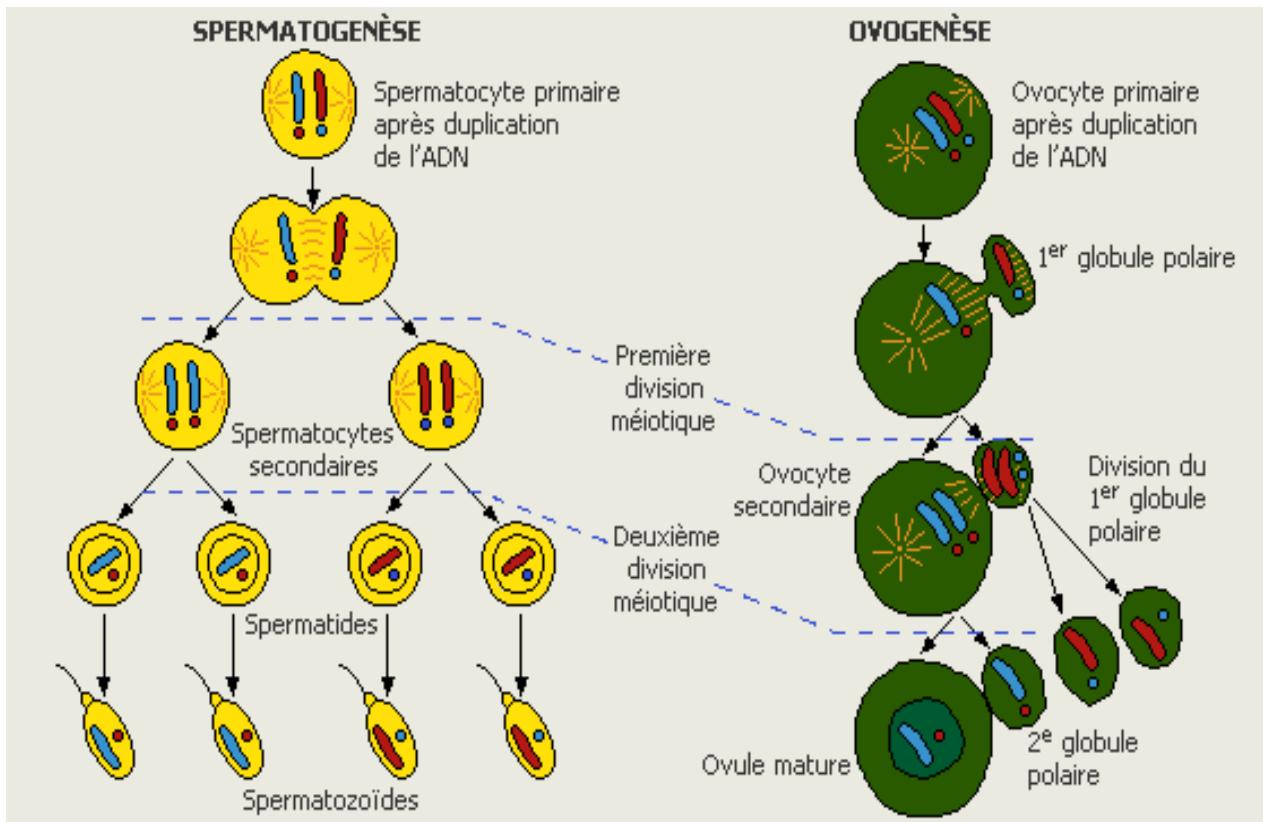


Figure 15 : La gamétogénèse(ovogénèse et spermatogenèse).