

La méiose

« Je vous rappelle qu'elle est très différente de la mitose parce que même s'il s'agit d'une division cellulaire, elle ne concerne que les cellules de la lignée germinale, elle ne concernera jamais les cellules somatiques. Son objectif est d'obtenir in fine des **gamètes mâles ou femelles**. »

1) Vue d'ensemble de la méiose

Elle comprend 2 divisions cellulaires successives, avec 1 seule réplication d'ADN qui arrive sur la première division de la méiose. Le but de ces 2 divisions cellulaires avec 1 seule réplication d'ADN, c'est d'assurer le passage d'**1 cellule diploïde** ($2n$ chromosomes) à **4 cellules haploïdes** (n chromosomes). De fait, on parlera d'une division réductionnelle et d'une division équationnelle (terme fondé sur le nombre de chromosomes et pas sur le nombre de molécules d'ADN)

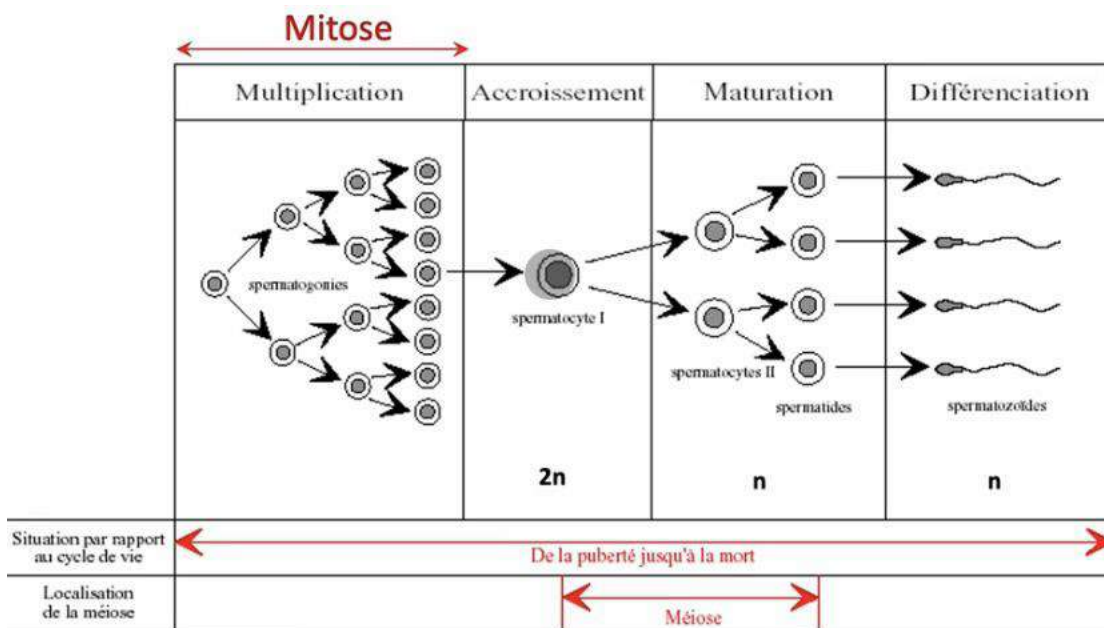
Conséquences de la méiose

- ➔ Réduction du contenu génétique des cellules (on passe de $2n$ chromosomes à n chromosomes)
- ➔ Transmission d'une information génétique (parcellaire car on ne transmet pas toute l'information génétique)
- ➔ Brassage extrêmement important de l'information génétique compte tenu des mécanismes mis en jeu (crossing-over, ségrégations possibles de segment d'ADN)

Méiose I	Méiose II
<u>réductionnelle</u>	<u>équationnelle</u>
Divise par 2 le nombre de chromosomes (on passe de 46 à 23)	Divise par 2 la quantité d'ADN
Précédée d'une phase S de réplication de l'ADN	Non précédée d'une phase S (pas de réplication)

Permet de distribuer de manière aléatoire les chromosomes homologues (répliqués et recombinaés) entre les 2 cellules filles sans les casser au niveau de leur centromère	Permet de donner des cellules à N chromosomes (qui vont être cassés au niveau de leur centromère) et chaque chromatide va se dispatcher aléatoirement dans les cellules filles (comme une mitose standard)
--	--

Ceci (la méiose) est possible uniquement après une première étape qui va conditionner la gamétogénèse : celle de la **multiplication des gonies**.



(ici c'est l'exemple pour le sexe masculin)

Méiose : différenciation de la gonie en -cyte primaire, puis -cyte secondaire, puis après -tides ou -zoïde dans le cas du sexe masculin.

➔ On verra plus tard que chez la femelle nous n'avons pas de méiose complète.

Pourquoi cette étape est indispensable ? Car sans elle, nous n'aurions pas de pool souche suffisamment grand de gonies (donc potentiellement pas assez de gamètes à utiliser pendant la vie génitale)

Attention : différences entre les 2 sexes

<i>Sexe masculin</i>	<i>Sexe féminin</i>
multiplication des gonies continue avec une division asynchrone qui va permettre de garder un <u>pool de cellules souches</u> (donc la spermatogenèse ne s'arrêtera jamais)	toutes les cellules souches vont entrer en mitose puis en méiose (donc <u>pas de pool souche</u>), ce qui explique que les règles vont s'arrêter à un moment de la vie des femmes (la ménopause)
commence pendant la vie intra-utérine et elle va continuer tout au long de la vie	pendant la vie intra-utérine

2) Description de la méiose I

On va étudier chacune des divisions successivement.

Il nous explique que on va passer beaucoup de temps sur la première division de méiose qui est la plus complexe à appréhender et qui conditionne toute la suite de la méiose.

a) la prophase I

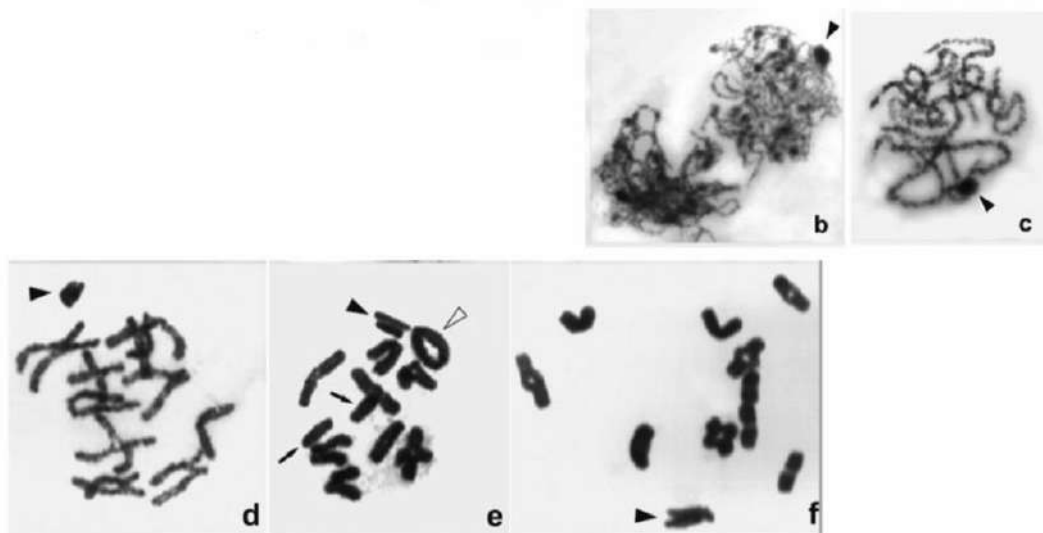
➔ Phase la plus longue de la méiose

➔ Systématiquement précédée d'une phase S de réplication de l'ADN qui permet de passer de 46 chromosomes à 1 chromatide à 46 chromosomes à 2 chromatides (on passe de n ADN à 2n ADN)

Cette prophase est subdivisée en 5 stades :

- leptotène
- zygotène
- pachytène
- diplotène
- diacinèse

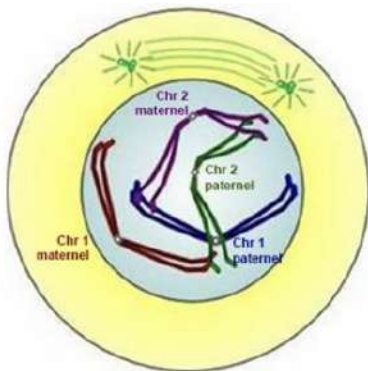
mémo 🐱 : Le Zizi du Pachyderme a des Dimensions Diaboliques



On voit qu'on a progressivement une condensation de l'ADN, pour les chromosomes puissent se former complètement et qu'ils s'accrochent les uns aux autres

➔ On a des formations en croix (avec à l'intérieur une sorte d'anneau central) ce qui correspond à l'appariement des chromosomes homologues pour les futurs crossing-over (on va voir plus tard ce que c'est 😊)

stade leptotène :

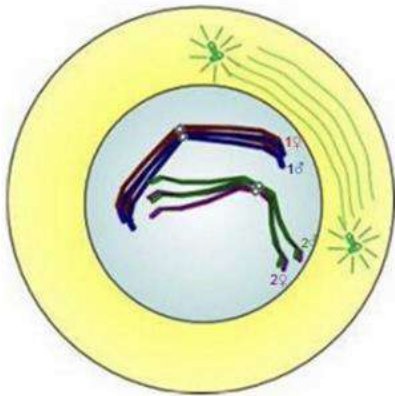


Les chromosomes deviennent vite apparents, ils sont dupliqués sous la forme de filaments irréguliers

➔ Chaque chromosome a 2 chromatides sœurs+++ (rappel : on est passé de n ADN à $2n$ ADN et artificiellement à « $4n$ chromosomes » grâce à la réplication de l'ADN en phase S)

Les chromosomes vont progressivement se rapprocher et puis les centrioles (les trucs verts) vont constituer le futur fuseau de division (donc se dupliquer puis migrer de chaque côté des chromosomes pour former le fuseau)

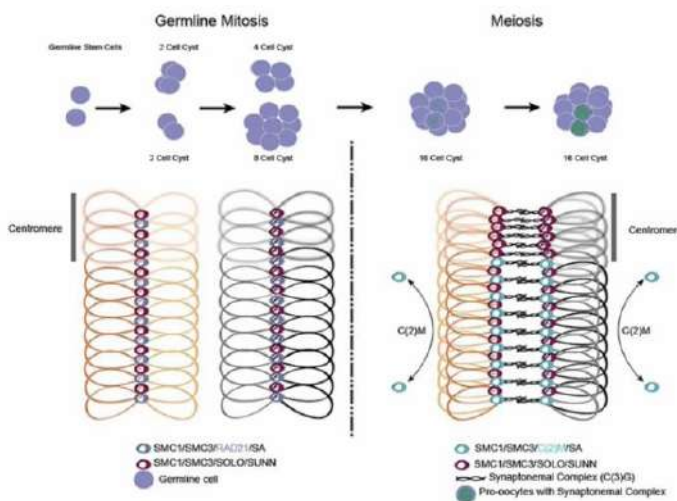
stade zygotène :



Les chromosomes homologues (donc de chaque paire) vont s'apparier sur toute leur longueur : phase de **synapsis**

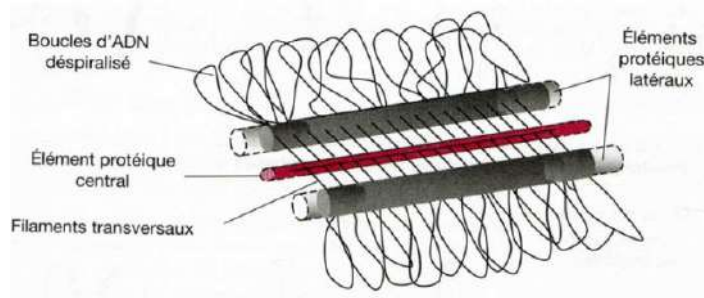
- ➔ On va avoir les chromosomes qui vont être côte à côte et la formation de ce qu'on appelle le **complexe synaptonémal**
- ➔ Pendant ce temps, les centrioles continuent de migrer aux pôles opposés de la cellule pour former le fuseau de division

Qu'est-ce qu'il se passe au niveau de ces chromosomes ?

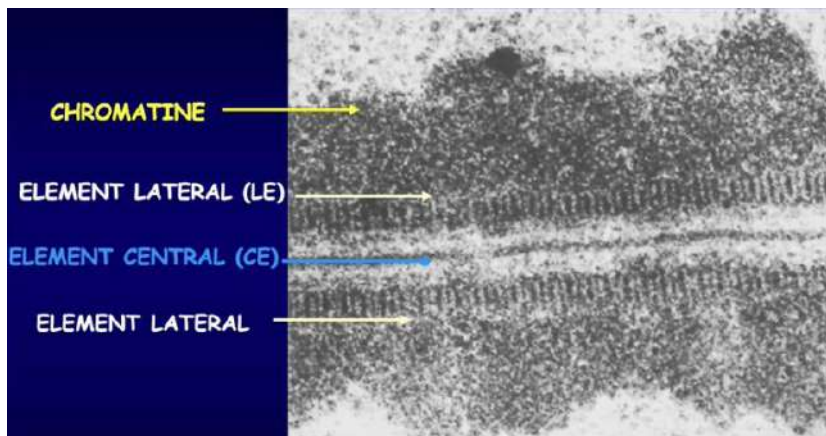


On voit ici que les 2 chromosomes vont se mettre côte à côte et que progressivement au milieu de ces chromosomes va se former ce qu'on appelle le **complexe synaptonémal** dont le but est de coller et de rapprocher les chromosomes (intérêt ++ dans les crossing over et l'échange de matériel chromosomique d'une chromatide à l'autre et donc de favoriser le brassage génétique)

Complexe synaptonémal :

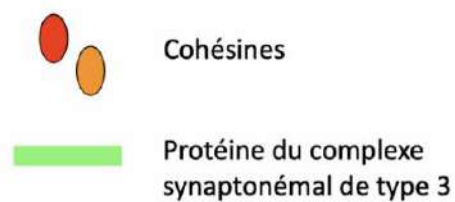
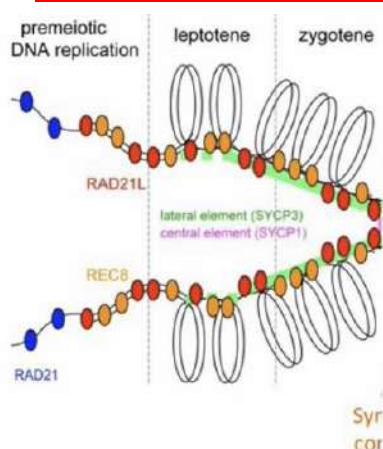


On a une partie **centrale (protéique)**, 2 éléments protéiques latéraux reliés par des filaments transversaux (ça ressemble à 2 échelles rassemblées par le bras du milieu). A l'extérieur, on trouve la boucle d'ADN qui est totalement déspiralisée puisqu'on est sur une phase où le chromosome est totalement encore ouvert.



On retrouve les éléments latéraux qui ressemblent à des échelles, une colonne centrale, on ne voit pas les barreaux mais on voit la chromatine autour qui correspond aux chromosomes

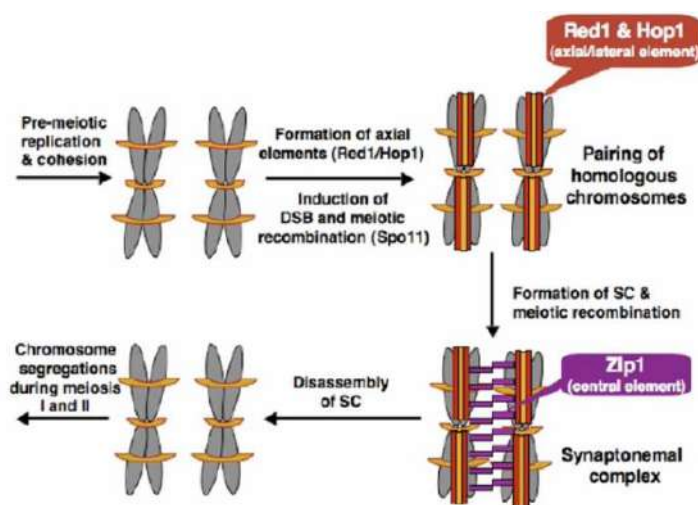
→ au niveau moléculaire :



On va avoir tout un tas de molécules qui appartiennent à la famille des cohésines qui vont venir se positionner sur la molécule d'ADN. Ces cohésines vont recruter les futures protéines du complexe synaptonémal :

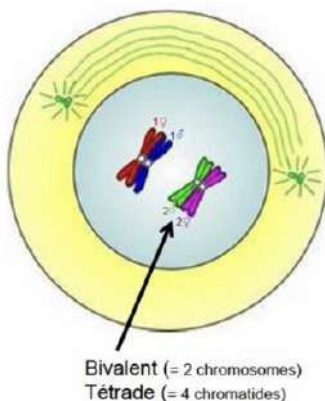
- **protéine de type 3 (SYCP3)** : protéine qui va être le long de la chromatine (élément latéral)
- **protéine de type 1 (SYCP1)** : vient se rajouter pour fermer le complexe synaptonémal (comparaison avec une fermeture éclair) (*ducoup elle est au niveau de l'élément central*)

In fine, on retrouve les 2 éléments latéraux (en rouge) et l'élément central (en jaune) et le **zippage** qui va venir grâce à **ZIP1** (pour totalement verrouiller le **complexe synaptonémal**). On a d'autres protéines comme **Red1** et **Hop1** vont rester au niveau de **SYCP3** (élément latéral on s'en souvient)



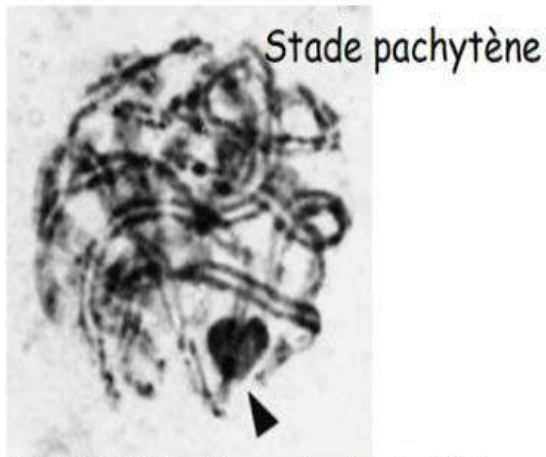
➔ On a un verrou total qui se forme entre les chromosomes qui vont eux-mêmes être extrêmement compactés, serrés les uns aux autres (on les verra de mieux en mieux lorsqu'on va les étaler dans une boîte de Pétri par exemple)

stade pachytène :



On passe à un stade où les chromosomes ne se baladent plus dans le noyau, mais un stade où ils sont **bivalents** (2 chromosomes collés l'un à l'autre) ou aussi appelées **tétrades** (4 chromatides collées les unes aux autres)

➔ valables pour **UNIQUEMENT** pour les autosomes + la paire de gonosomes (chromosomes X) dans le sexe féminin+++



Chemisquy et al 2008 *Genetics and molecular biology*

Par contre dans le sexe masculin :

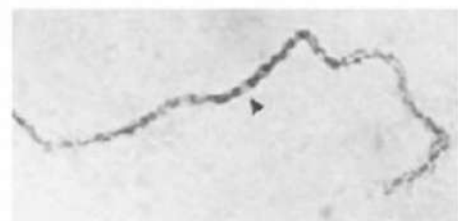
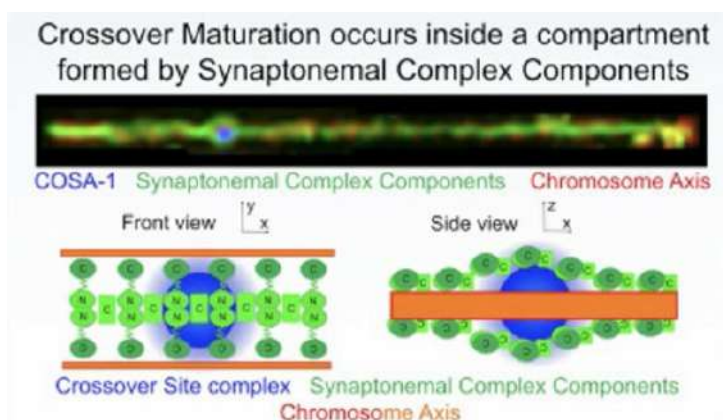
pour éviter qu'ils viennent se mêler dans cette machinerie, le chromosome Y et le chromosome X vont aller se loger dans ce qu'on appelle une **vésicule sexuelle** pour éviter qu'ils viennent s'apparier de manière aléatoire avec les autres chromosomes et donc donner des grandes translocations de matériel génétique qui seraient non viables pour la survie de l'espèce

Récap : on ne confond pas le sexe féminin où on aura des bivalents pour les gonosomes (donc les chromosomes X) et le sexe masculin où les gonosomes (chromosome X et chromosome Y) vont aller se loger dans une vésicule sexuelle.

Le **complexe synaptonémal** est totalement présent sur la longueur des chromosomes. On a donc le début des recombinaisons génétiques (**crossing-over**).

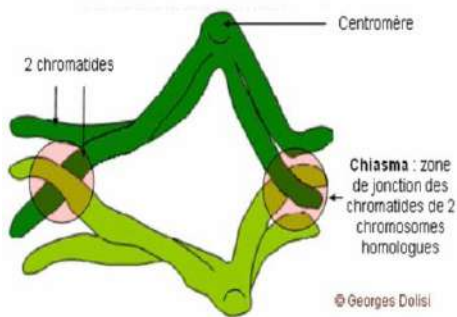
Il nous rappelle que le **stade pachytène** est le stade où apparaissent les **crossing-over**.

➔ pourquoi il y a des **crossing-over** ? parce que l'appariement ne va pas être complet sur toute la longueur du **complexe synaptonémal**, il peut donc exister des molécules qui s'insèrent et qui font déborder la molécule d'ADN et donc lorsque qu'on va avoir le débordement, on va avoir possiblement la réalisation d'un **crossing-over**



Brassage génétique :

Le **crossing-over** est vraiment le support du brassage génétique de la méiose.

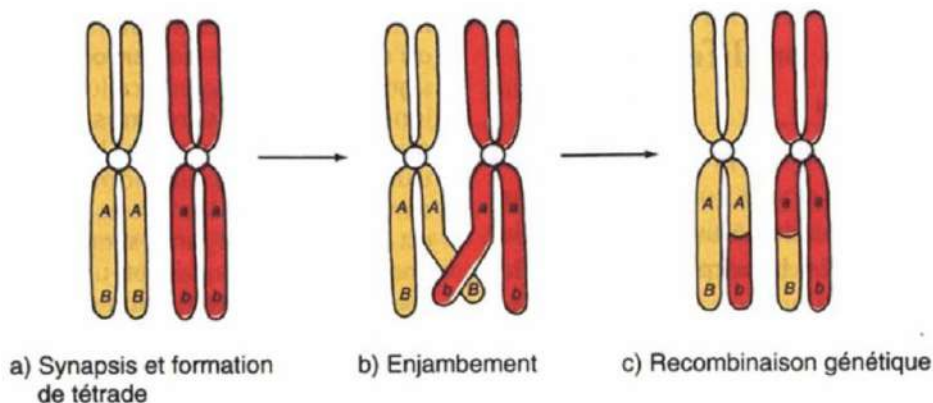


Un bivalent (ou tétrade) –
Prophase de 1^{ère} division de méiose

➔ en pratique : on a les bivalents qui sont accrochés et vu que le **complexe synaptonémal** va un peu dérailler, on a une « collision » entre les chromatides qui vont s'enchevêtrer (enchevêtrements qui peuvent être extrêmement complexes, on peut avoir l'impression d'avoir des tagliatelles totalement entortillées)

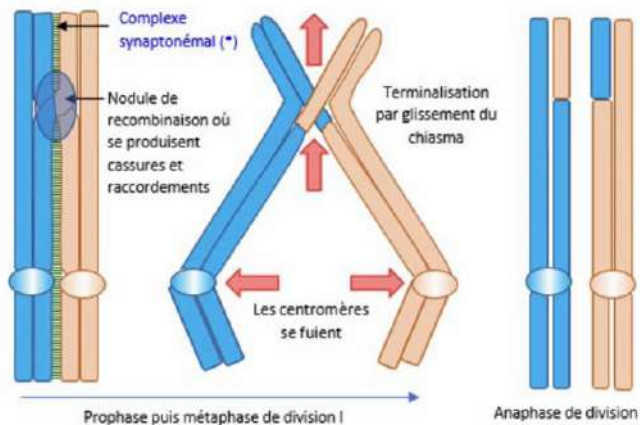
➔ entortillement qui favorise l'échange de matériel génétique

On a les tétrades qui sont l'une sur l'autre, et il va y avoir un gap et le chromosome rouge va échanger une partie de son bras long avec le chromosome jaune. On retrouve bien deux chromosomes qui ont la même taille in fine, on n'a pas perdu en termes de matériel génétique, on a juste échangé un bout avec l'autre



➔ par exemple si le jaune était le chromosome maternel et le rouge le chromosome paternel, si on forme une cellule fille, elle n'aura pas que du matériel génétique de la mère mais un petit bout du père aussi et vice-versa

On peut le représenter de diverses façons, et si on reprend le principe de la fermeture éclair et de la séparation.



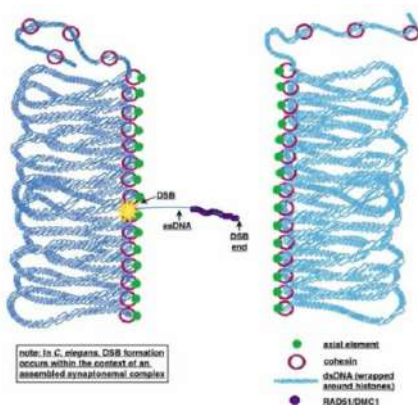
On a la fermeture éclair qui est totalement verrouillée et quand on va ouvrir la fermeture éclair, ça va bloquer parce que c'est là que le matériel s'est croisé et que les échanges ont commencé à se faire. Puis si on veut vraiment ouvrir notre braguette on va forcer, on va casser et la cassure va permettre l'échange définitif de matériel chromosomique.

In fine, on dit que tant qu'on n'est pas arrivé au stade de séparation du matériel chromosomique (qui commence à la métaphase et qui est totalement complète à l'anaphase), le changement ne peut pas se considérer comme complet. Il le sera qu'à partir de ce stade de l'anaphase et pas auparavant.

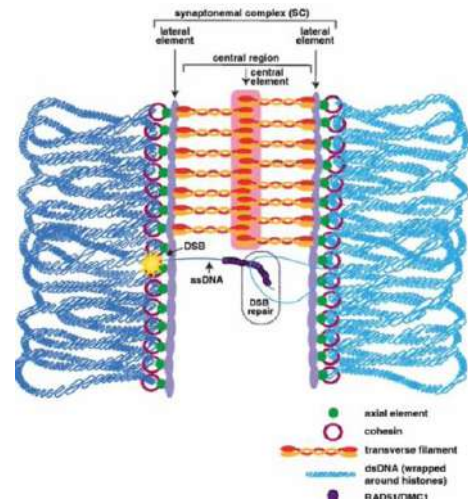
➔ *exemple de QCM* : l'échange de matériel chromosomique a lieu en prophase, en métaphase ou en anaphase ? il ne faut **PAS** répondre prophase parce que le matériel change totalement de chromosome que lorsqu'on est arrivés plus tardivement dans la première division de méiose (donc en anaphase)

Autre façon de représenter les choses :

➔ **stade leptotène** : les chromosomes vont commencer à se rapprocher

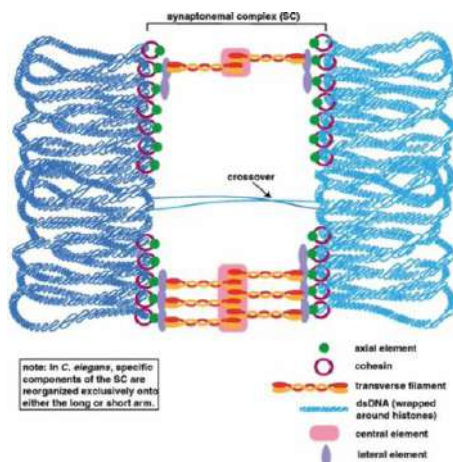
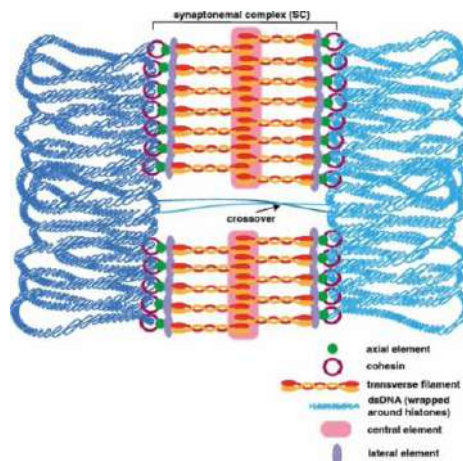


➔ **stade zygotène** : on a un début de formation du complexe synaptonémal (*représenté en rose*) et puis le complexe va se former et va buter parce que on a un petit morceau d'ADN qui a échappé à l'assemblage, on voit que ce petit morceau d'ADN va venir se greffer dans une boucle de l'autre chromosome homologue. On imagine que cette boucle, c'est exactement comme tout à l'heure avec la fermeture éclair :



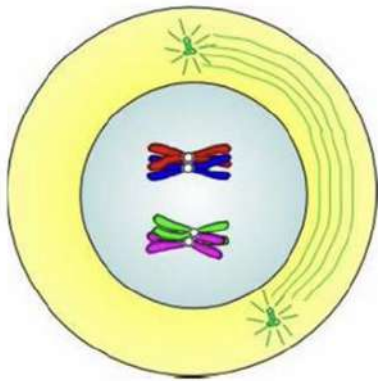
- soit on passe dessus et on l'accroche avec la fermeture éclair et au moment de séparer, on va tout casser et on échange
- soit on passe par-dessus, et si on passe par-dessus dans cette représentation au **stade pachytène**, on voit que la machinerie moléculaire va faire en sorte de réparer cette anomalie et elle va la réparer par la réalisation de ce crossing over

➔ **stade pachytène** :



➔ **stade diplotène** : où le **complexe synaptonémal** va commencer à disparaître et bien on va avoir ducoup ce **crossing-over** qui va définitivement se tirer et c'est là où on va voir finalement l'échange de matériel chromosomique se profiler (il sera effectif une fois qu'on aura passé au moins la métaphase)

stade diplotène :

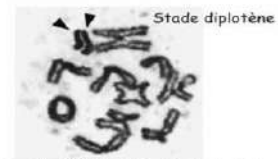


On va avoir une désintégration du **complexe synaptonémal** et de la **vésicule sexuelle** et ducoup les chromosomes homologues vont se séparer **SAUF** à un seul endroit :

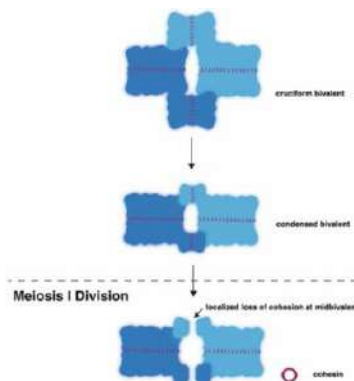
PAS au niveau des **chiasmata** ++++(= support physique de chaque **crossing-over**, c'est-à-dire là où le matériel chromosomique s'est enchevêtré et se profile pour être séparé)

en microscopie : on voit les points de jonction qui vont restés collé, alors que le reste des chromosomes commence à se séparer

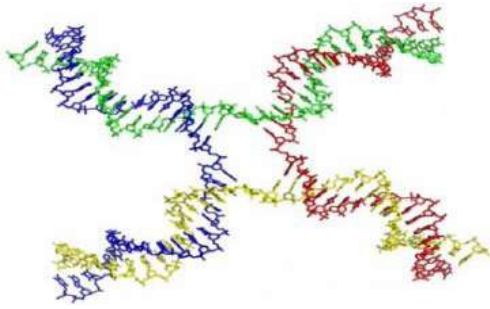
➔ on peut aussi avoir un aspect en croix avec un orifice à l'intérieur : c'est ce qu'on appelle les **jonctions de Holiday** qui correspondent à des bivalents ayant un aspect cruciforme condensé



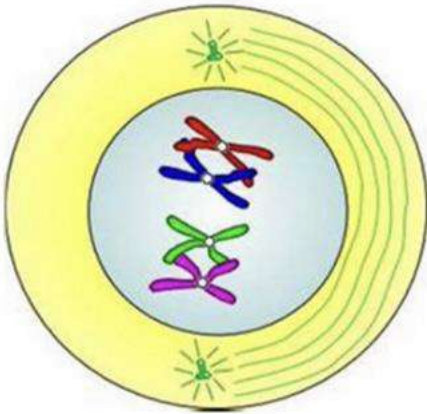
Cherniaky et al 2008 Genetics and molecular biology



→ au niveau moléculaire :

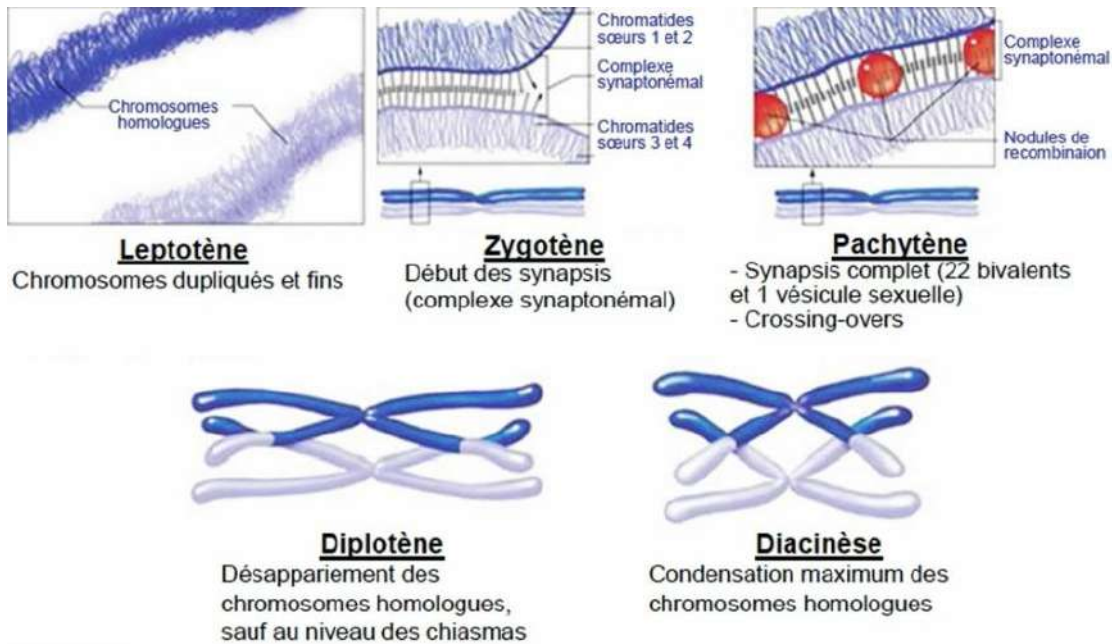


stade diacinèse :



Correspond à la phase de condensation maximale des chromosomes (toujours reliés entre eux par les **chiasmata**). On a une répartition de nos homologues et puis on a surtout progressivement l'enveloppe nucléaire qui va disparaître, on voit que les centrioles se sont déplacés et donc de part et d'autre de l'enveloppe nucléaire on a ce fuseau de division qui apparaît. Au stade suivant on imagine aisément qu'ils vont pouvoir se séparer.

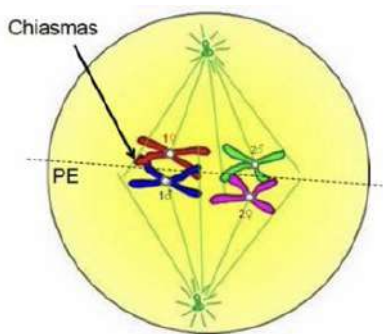
Recap :



➔ zygotène (zygos) : fusion comme fécondation (ça se rapproche)

➔ pachytène : synapsis complète avec apparition des nodules de recombinaison aux zones de **crossing-over**

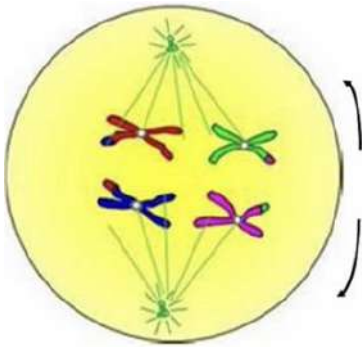
a) la métaphase I



Assez similaire à ce qu'on avait vu pendant la mitose, les chromosomes sont bien regroupés au centre du fuseau de division cellulaire, mais cette fois ci au lieu d'être alignés sur la plaque équatoriale par leur centromère, cette fois ci, ils vont se situer **DE PART ET D'AUTRE** de la plaque équatoriale et les seuls éléments que nous allons retrouver sur la plaque équatoriale ce sont les **chiasmata** (zones d'échanges du matériel génétique), ce sont eux qui vont permettre de former la plaque équatoriale.

*Recap : on fait bien la différence entre la mitose où les chromosomes sont situés **SUR** la plaque équatoriale et la métaphase de la méiose I où les chromosomes sont **DE PART ET D'AUTRE** de la plaque équatoriale (il y a juste les chiasmata sur la plaque++++)*

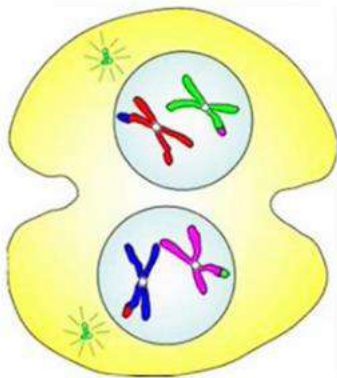
a) l'anaphase I



De la même façon qu'on avait une traction sur les filaments de microtubules, qui vont se dépolymériser progressivement dans la mitose, et bien on va avoir la même chose dans la méiose I. Et donc en tractant, on va faire céder les **chiasmata** et on aura de fait un échange définitif de matériel chromosomique entre les 2 homologues. C'est une première source de brassage génétique. La deuxième source est appelée la

ségrégation aléatoire des homologues, puisqu'indépendamment du côté de la plaque équatoriale, on va pouvoir retrouver des chromosomes d'origine maternelle ou paternelle avec un nombre qui n'est absolument pas régulier (on peut très bien avoir tous les chromosomes maternels d'un côté et tous les chromosomes paternels d'un côté ou bien un mélange sous diverses proportions)

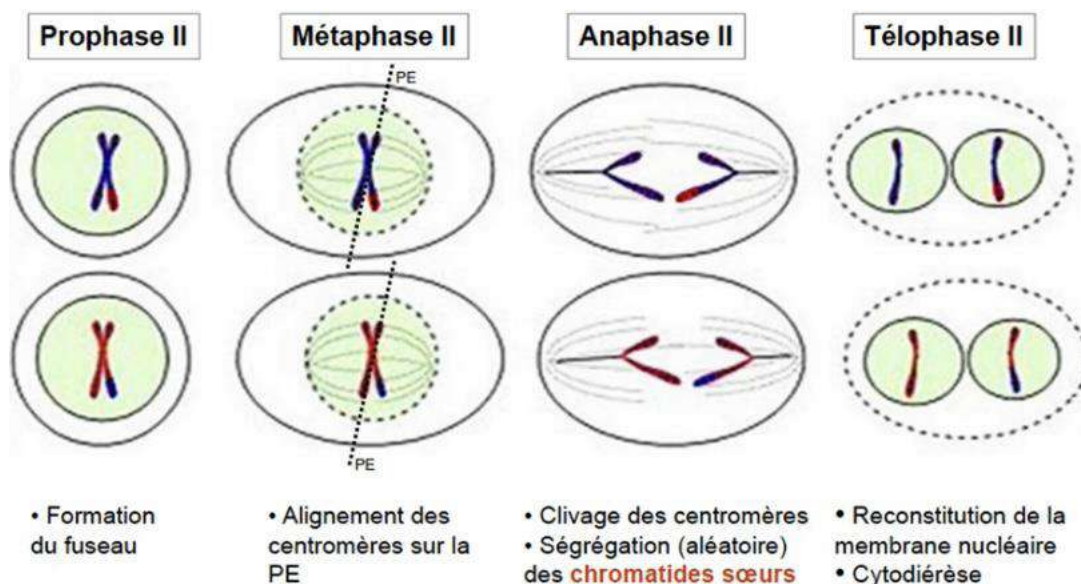
a) la télophase I

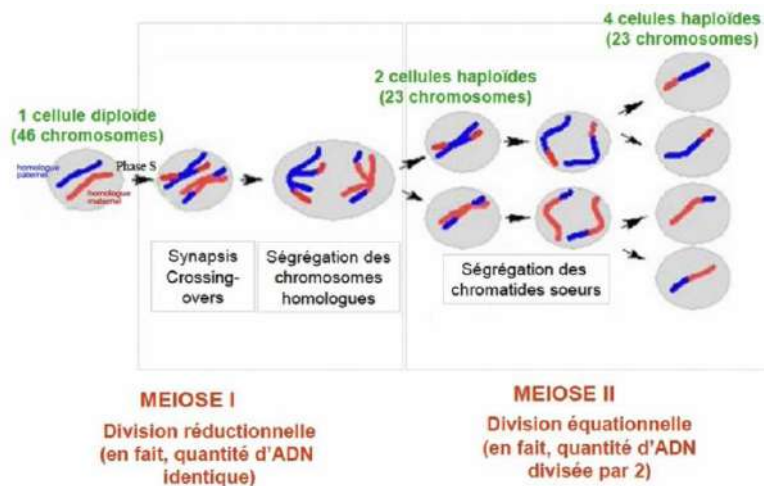


On passe à la phase de reconstitution de la membrane nucléaire (*c'est les ronds blancs qui sont apparus*) et de séparation des 2 cellules filles, qui vont avoir non plus 46 chromosomes mais chacune **23 chromosomes à 2 chromatides** (donc nous n'avons PAS réduit la quantité d'ADN mais **on a réduit la quantité de chromosomes**) et puis les cellules vont se séparer, il va y avoir une interphase extrêmement courte **sans phase S** (PAS de réplication d'ADN)

3) Description de la méiose II

On passe directement à une division équationnelle qui est une « mitose » **SANS phase répllicative**. Donc il s'agit d'exactly les mêmes points que nous avons vu dans le cours sur la mitose sauf qu'on parle de deuxième division de méiose (on parle de **prophase II, métaphase II, anaphase II et télophase II**). Les chromosomes vont donc s'aligner **SUR** la plaque équatoriale en **métaphase II**, vont être tractés par leur centromère par dépolymérisation des microtubules et donc chaque chromatide sœur va aller à un pôle de la cellule fille de manière totalement **ALÉATOIRE** (donc nouvelle source de brassage génétique). A l'issue de **l'anaphase II**, on va avoir une reconstitution de la membrane nucléaire, une cytotodièrese et donc la naissance de 4 cellules cette fois ci à n chromosome à 1 seule chromatide (réduction de la quantité d'ADN dans chaque cellule).





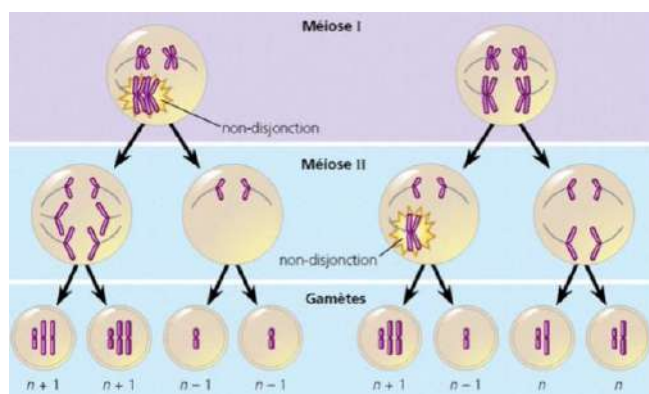
➔ On est passé d'une cellule diploïde à 46 chromosomes à 4 cellules haploïdes à 23 chromosomes en passant par une méiose I (division réductionnelle qui réduit le nombre de chromosomes mais PAS la quantité d'ADN), suivie d'une méiose II

(division équationnelle qui conserve le nombre de chromosomes mais qui réduit par 2 la quantité d'ADN) avec un brassage génétique extrêmement important aussi bien au niveau de la ségrégation aléatoire des chromosomes homologues et des chromatides sœurs, que au niveau des crossing-over (recombinaisons qui existent au niveau des homologues)

4) Les erreurs possibles

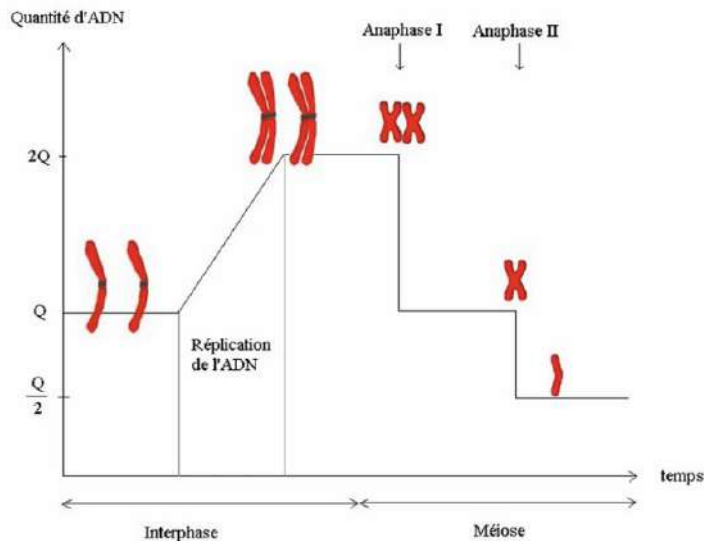
exemple : la non-disjonction

- soit des homologues : on va pouvoir aboutir à l'issue de la méiose II, à des cellules haploïdes à 1 chromosome supplémentaires et puis certaines avec 1 chromosome en moins
- soit des chromatides



➔ On pourra avoir de fait, au niveau de la descendance, soit une monosomie d'un chromosome, soit des trisomie (exemple : la trisomie 21 qui correspond à une non-disjonction le plus souvent sur une première division de méiose)

5) Évolution de la quantité d'ADN dans la cellule



Initialement : 1 cellule diploïde à 46 chromosomes à 2 chromatides (2n ADN)

A l'issue de la méiose I : 2 cellules à 23 chromosomes à 2 chromatides (n ADN)

In fine : 4 cellules haploïdes à 23 chromosomes à 1 chromatide (0,5 ADN)

Fin de cette fiche sur la méiose, un peu plus compliqué que la mitose quand même mais tranquille ça va le faire. Chaque année, les versions de ce cours changent (je ne comprends pas pourquoi d'ailleurs, il s'agirait de se décider mdr), donc pour l'instant apprenez celle là et si jamais il y a un changement je ferai une grosse annonce 📣 pour vous prévenir. D'ailleurs j'ai oublié de le dire dans la fiche précédente, mais vous pouvez aussi m'envoyer des messages si vous avez des questions (sur tout et n'importe quoi) ou même si vous avez juste besoin de parler, j'y répondrai avec plaisir ❤️

Bon courage à vous pour cette année, vous allez dead <3

Place au dédissss (j'ai plus trop de place 🤔) :

Dédi à Lola et Emma mes LAS2 préf (go girls vous allez tout déchirer)

Dédi à mon voyage en Albanie ducoup (c'est la suite de la dédi sur la fiche mitose si vous suivez un peu mes vies)

Dédi à votre tut de microbio l'exploité qui fait mes qcm pour l'EB

Pas dédi (je vous avez prévenu) :

Pas dédi à la clim à cause de laquelle je suis tombée malade (SJA faites quelque chose ca fait déjà 2 ans que vous mettez la clim a 15 ca ne va plus)

Pas dédi à la microflop

