

**II. Le brassage des allèles à chaque
génération lors de la reproduction sexuée**

Histoire des sciences : Les étapes clés de la découverte des principes de la transmission des caractères héréditaires



Oscar Hertwig observe l'union du noyau d'un gamète mâle avec le noyau d'un gamète femelle lors de la fécondation chez l'Oursin.



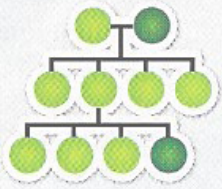
Édouard Van Beneden observe 4 chromosomes dans l'œuf d'As caris et 2 dans ses gamètes.

Travaux du français **Lucien Cuénot** sur la transmission des caractères chez les animaux.



1866

Travaux sur les Pois de **Gregor Mendel**.



1875



Walther Flemming : dessin de chromosomes dans le noyau.

1880

Sutton et Boveri montrent la séparation des paires de chromosomes en méiose.



1883

1902

Travaux de **Thomas Morgan** sur la Drosophile.



1909

1) Les travaux de Johann Mendel en 1866 : les débuts de la génétique

Johann Gregor Mendel (moine et botaniste de nationalité autrichienne), 1854



A Johann Mendel.

À Brno (actuellement en République tchèque), en 1854, Johann Mendel (1822-1884), moine botaniste possédant une solide formation scientifique, mène des recherches dans le but d'améliorer les plantes comestibles et d'agrément. Il choisit le pois comme plante modèle.

- **La réalisation de croisements**

Pour Mendel, un caractère de la plante peut prendre deux « traits » différents (graine lisse ou ridée, graine jaune ou verte, etc.). Mendel sélectionne des lignées pures*, c'est-à-dire des plantes dont les caractères sont stables sur plusieurs générations.

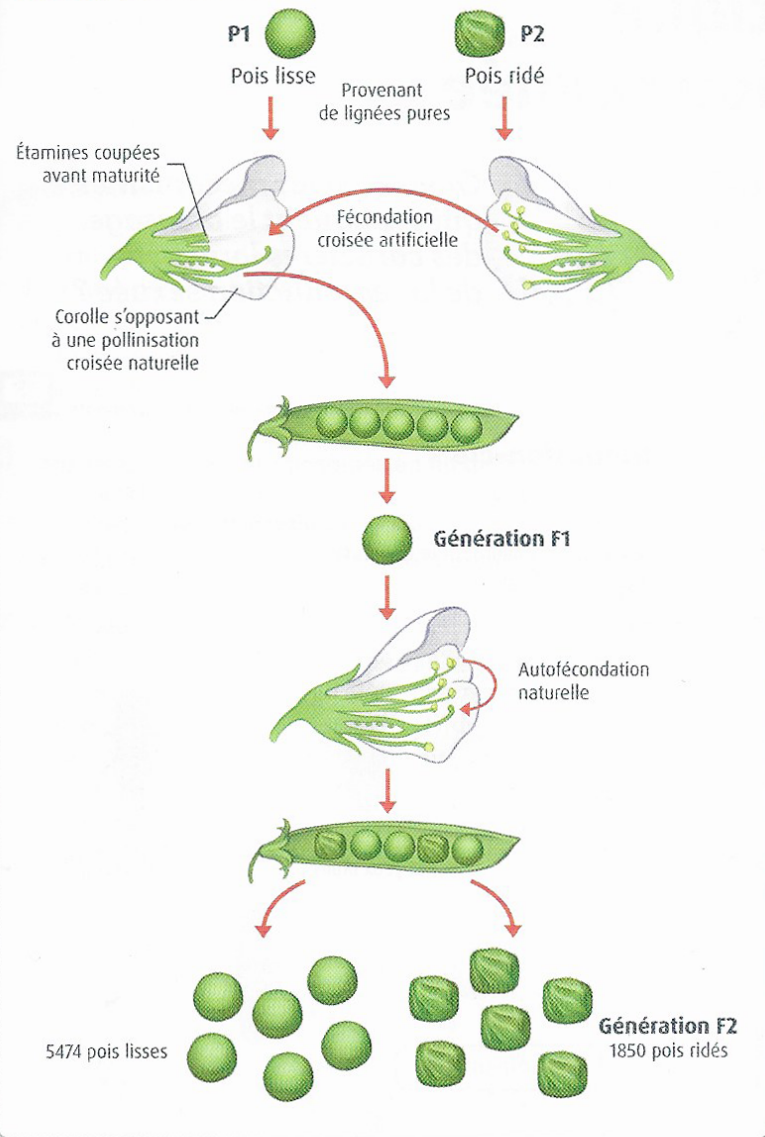
Il réalise de nombreux croisements entre plantes qui diffèrent par un ou deux caractères et étudie de manière statistique la descendance sur deux ou trois générations successives. Les croisements sont réalisés en pratiquant une pollinisation artificielle : du pollen* d'une plante est déposé sur le pistil* d'une autre plante.

- **Une nouvelle conception de l'hérédité**

À l'époque de Mendel, la reproduction des plantes est mal connue. On ignore tout de la mitose et de la méiose, chromosomes et ADN sont inconnus, la notion de gène n'existe pas. On admet une « hérédité par mélange » : les caractères d'un descendant seraient intermédiaires entre ceux de ses parents.

Expérience de Mendel avec 1 caractère phénotypique

Histoire des sciences



4 Une expérience réalisée par Mendel.

Les travaux de Mendel vus par la génétique actuelle

Définitions-clés

- * Quand un individu possède deux mêmes allèles d'un gène donné, il est **homozygote** pour ce gène.
- * Quand un individu possède deux allèles différents pour un gène donné, il est **hétérozygote** pour ce gène.
- * Dans une **lignée pure**, les individus ont le même génotype et sont homozygotes pour les gènes responsables des caractères étudiés.

Conventions d'écriture

- * Pour le **génotype** d'une cellule diploïde, les allèles sont séparés par une double barre oblique et entre parenthèses. Exemple : (L//L)
- * Le **phénotype** s'écrit toujours entre crochets. Exemple : [L]

6 L'expérience de Mendel vue par la génétique

actuelle. Grâce aux avancées de la génétique au cours du 20^e siècle, on sait aujourd'hui que le caractère lisse ou ridé de la graine est gouverné par un gène possédant deux allèles : l'allèle dominant L donne un pois lisse, l'allèle récessif r donne un pois ridé. Par ailleurs, depuis la fin du 19^e siècle, on sait que la fécondation correspond à la fusion des gamètes. L'échiquier de croisement est un tableau à double entrée permettant de déterminer théoriquement le patrimoine génétique des descendants issus d'un croisement.

$P_1 [L] (L//L) \times P_2 [r] (r//r)$

↓ 1^{er} croisement

$F_1 \text{ (lisse) } [L] (L//r)$





$F_1 [L] (L//r) \times F_1 [L] (L//r)$

↓ 2^e croisement





$F_2 \text{ (lisse) } [L] (L//r) \text{ ou } (L//L)$
 $F_2 \text{ (ridé) } [r] (r//r)$

ÉCHIQUIERS DE CROISEMENT

Croisement 1

		Gamètes P_1	
		/L	/L
Gamètes P_2	/r	(L//r)  [L]	(L//r)  [L]
	/r	(L//r)  [L]	(L//r)  [L]

Croisement 2

		Gamètes F_1	
		/L	/r
Gamètes F_2	/L	(L//L)  [L]	(L//r)  [L]
	/r	(L//r)  [L]	(r//r)  [r]

En 1866, Mendel publie son mémoire intitulé *Recherche sur les hybrides végétaux* dans lequel il déduit de ses travaux que les « traits » des caractères sont déterminés par des « éléments transmissibles ». Selon lui, ces particules héréditaires - dont il ignore la nature - sont présentes en deux exemplaires chez une plante, mais en un seul chez les ovules et les grains de pollen. Les plantes hybrides (F1) possèderaient donc les deux traits, même si un seul se manifeste. Il nomme ce trait exprimé « trait **dominant*** ».

Il fait de plus les hypothèses suivantes :

- Les deux « éléments transmissibles » se sépareraient au moment de la formation des cellules sexuelles.
- Les cellules sexuelles se combineraient au hasard au moment de la fécondation.

Les lois de Mendel :

1^{re}
loi

Si l'on croise deux lignées pures (homozygotes pour les gènes considérés) distinctes par un seul caractère, tous les descendants de la première génération, qui seront appelés des hybrides F1, sont identiques.

Loi d'uniformité des hybrides

2^e
loi

Les gamètes ne possèdent qu'un seul allèle pour chacun des caractères.

Loi de pureté des gamètes

3^e
loi

La distribution/disjonction des couples de gènes dans les gamètes se fait de façon indépendante.

Exercice

Expérience de Mendel sur le pois
avec 2 caractères phénotypiques

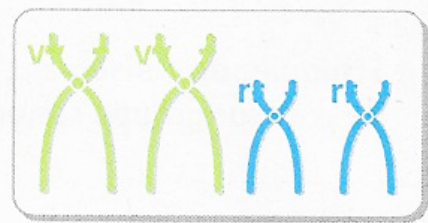
Couleur du pois et Forme du pois



P1

Parents de lignée pure (homozygotes)

P2



Méiose

Germination

Germination

Méiose

Gamètes P₁
100 %



Étamines coupées avant maturité



Prélèvement des grains de pollen sur les étamines

Gamètes P₂
100 %



Fécondation croisée artificielle

1^{re} génération fille

Fécondation (et réplication)

F1
100 % de graines jaunes et lisses



100 % de
graines jaunes
et lisses



Germination



Autofécondation sur plusieurs plants



2^e génération fille

Résultat de comptage :

F2



315

101

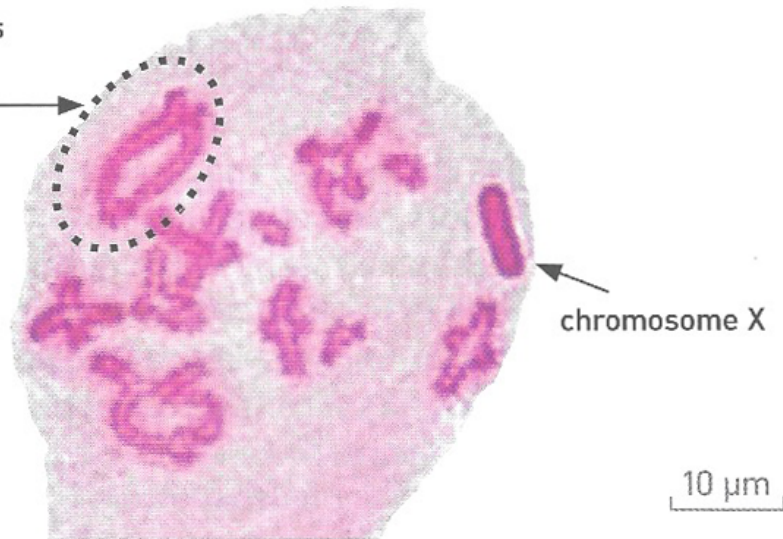
108

32

Walter Sutton (médecin américain), 1903

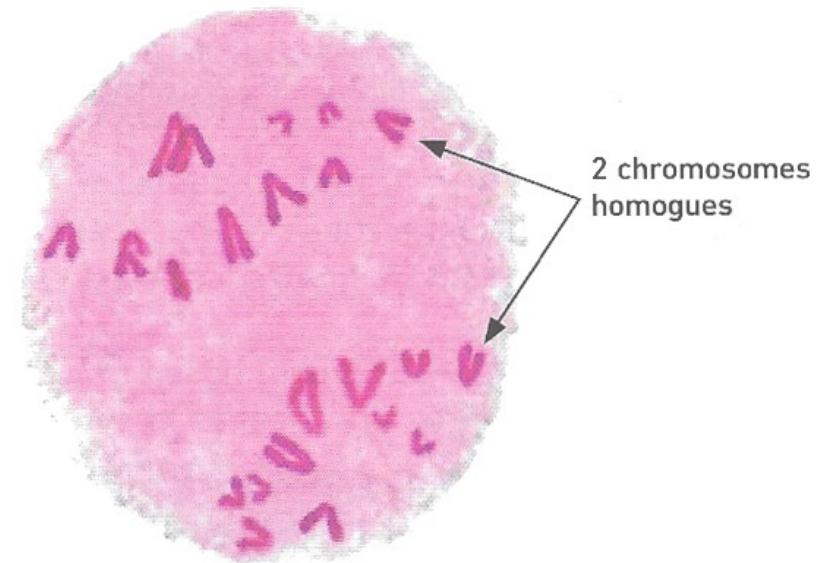
En 1903, W. Sutton est le premier à établir une corrélation entre le comportement des chromosomes lors de la méiose et celui des éléments transmissibles, supposés par Mendel, lors de la formation des gamètes. Chez les criquets, le nombre de chromosomes est de 24 chez la femelle (22 autosomes* + 2 chromosomes sexuels X), tandis que le mâle ne possède qu'un seul chromosome sexuel (X), donc 23 chromosomes au total.

2 chromosomes homologues appariés = un bivalent



A Prophase 1 de méiose chez le criquet ($2n = 22 + X$).

En étudiant la formation des cellules sexuelles de criquets mâles, Sutton observe la prophase 1 de la méiose et compte 11 « amas chromosomiques » (en plus du chromosome X), qu'il dénomme bivalents*. Il en conclut que chaque bivalent correspond à l'association d'un chromosome paternel et d'un chromosome maternel. Les gamètes finalement formés ne comportent qu'un seul chromosome de chaque type, avec ou sans chromosome X.



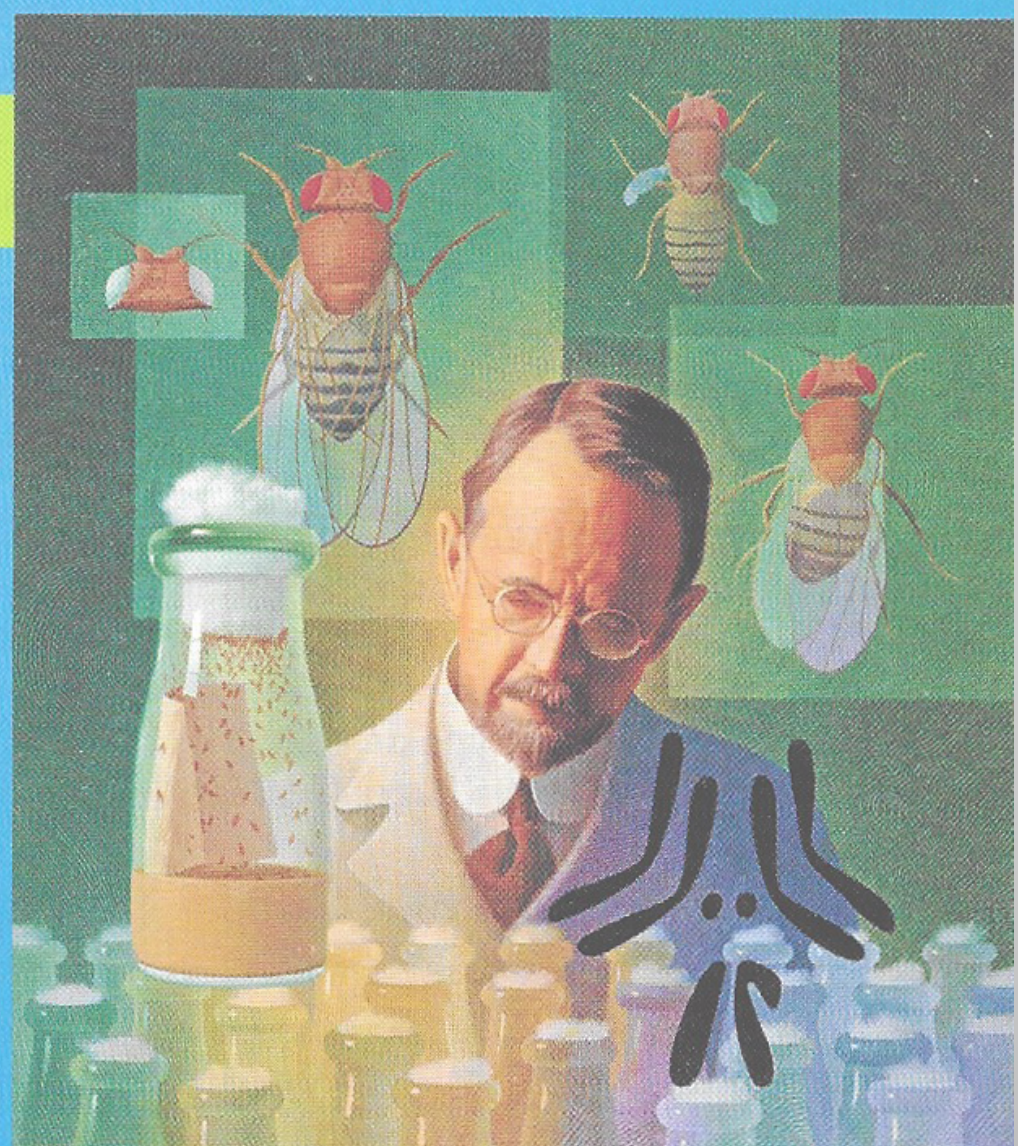
B Anaphase 1 de méiose chez le criquet ($2n = 22 + X$).

À la suite de ses observations de la méiose, Sutton affirme, sans toutefois pouvoir le prouver : « le chromosome maternel et le chromosome paternel de chaque bivalent se dirigent au hasard vers un des deux pôles de la cellule ».

Thomas MORGAN (zoologiste, embryologiste, généticien américain), 1933

● **Morgan, le père de la théorie chromosomique de l'hérédité**

Né l'année de la publication par Mendel des trois lois qui, selon lui, gouvernent l'hérédité, Thomas Hunt Morgan (1866-1945) est le chercheur qui démontra expérimentalement par ses travaux sur la drosophile que les chromosomes sont bien les supports de la transmission des caractères héréditaires. Ses travaux lui valurent le prix Nobel de physiologie ou médecine en 1933.



Histoire des sciences : Les étapes clés de la découverte des principes de la transmission des caractères héréditaires



Oscar Hertwig observe l'union du noyau d'un gamète mâle avec le noyau d'un gamète femelle lors de la fécondation chez l'Oursin.



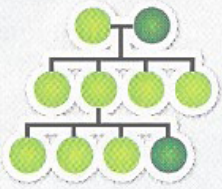
Édouard Van Beneden observe 4 chromosomes dans l'œuf d'As caris et 2 dans ses gamètes.

Travaux du français **Lucien Cuénot** sur la transmission des caractères chez les animaux.



1866

Travaux sur les Pois de **Gregor Mendel**.



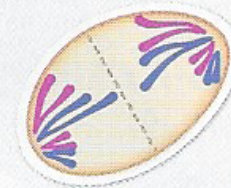
1875



Walther Flemming : dessin de chromosomes dans le noyau.

1880

Sutton et Boveri montrent la séparation des paires de chromosomes en méiose.



1883

1902

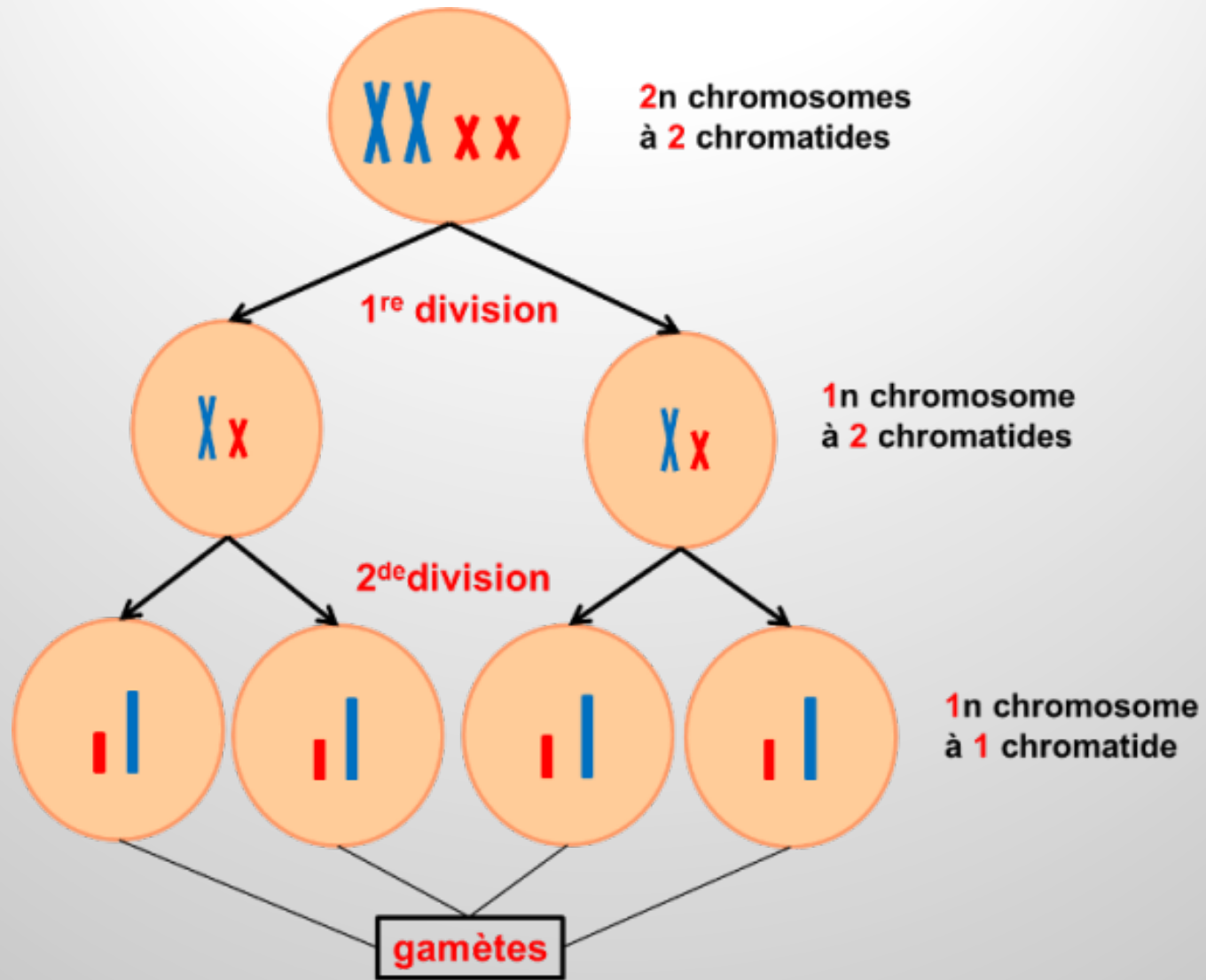
Travaux de **Thomas Morgan** sur la Drosophile.



1909

2) Le brassage des allèles lors de la reproduction sexuée

MEIOSE

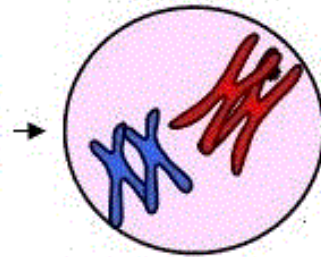


Méiose

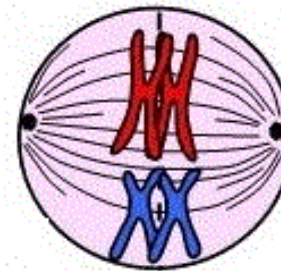
Interphase

Phase G1
Phase S
Phase G2

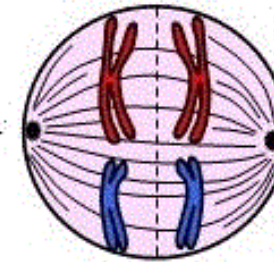
Prophase I



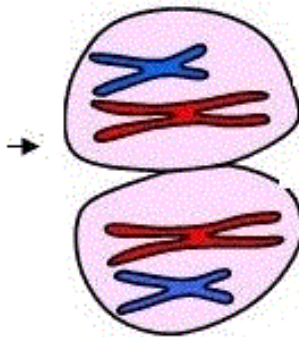
Metaphase I



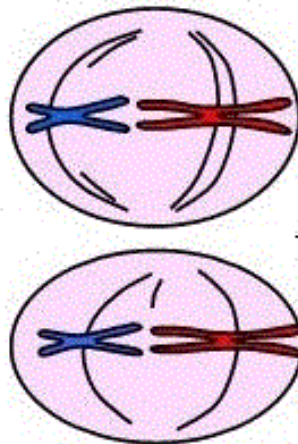
Anaphase I



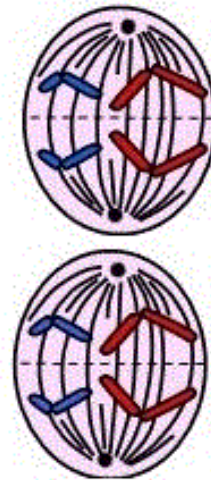
Télophase I
Prophase II



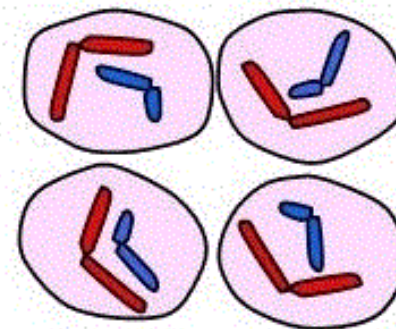
Metaphase II



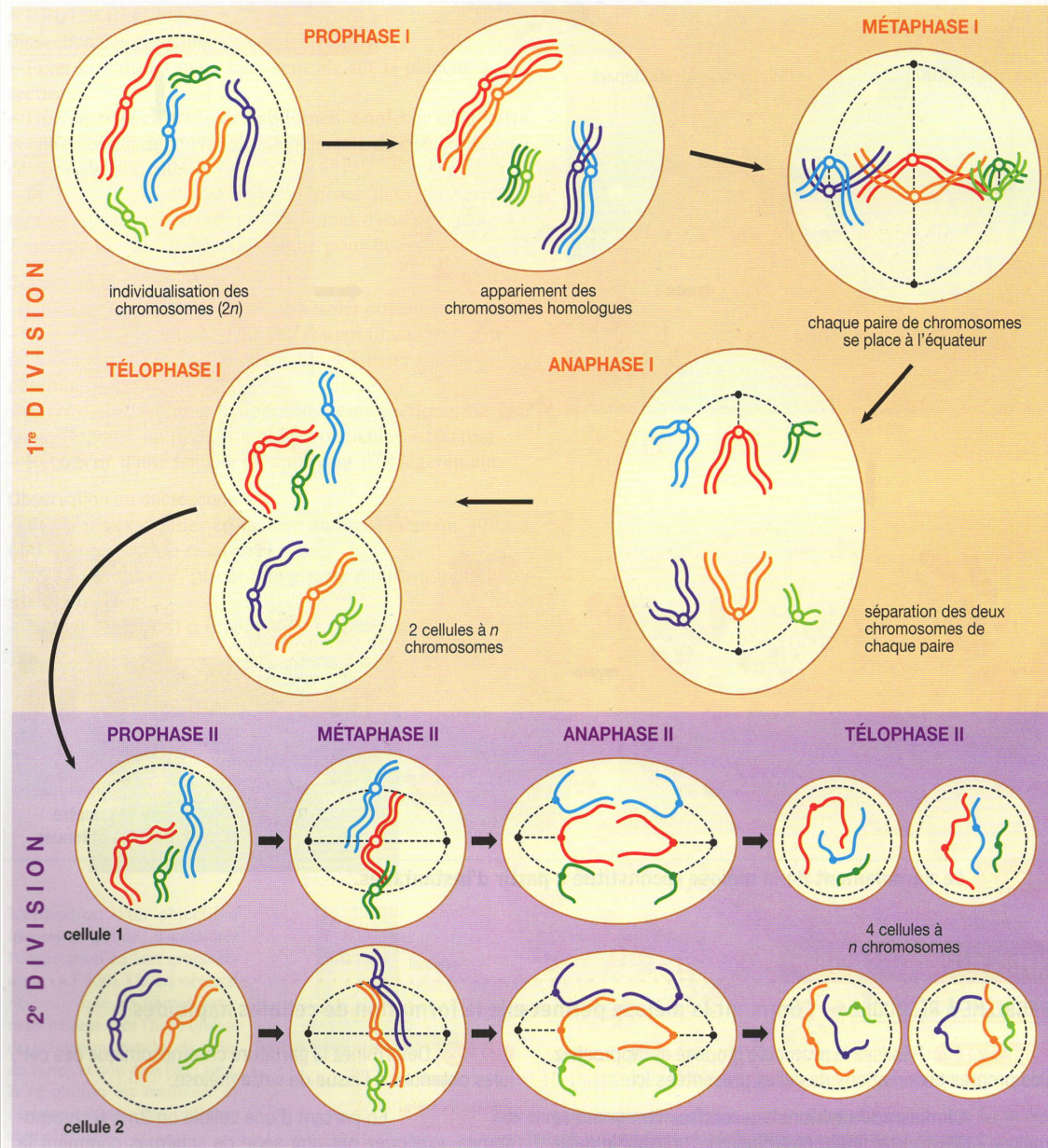
Anaphase II



Télophase II

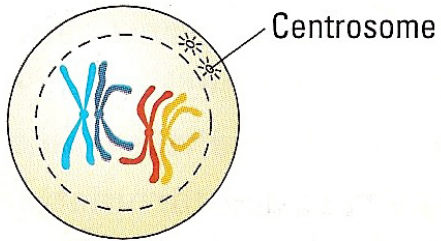


Etapes de la méiose

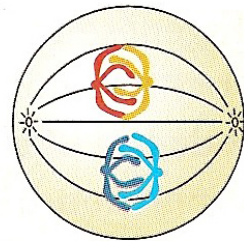


Les étapes de la méiose

1 cellule à $2n$ chromosomes
à 2 chromatides



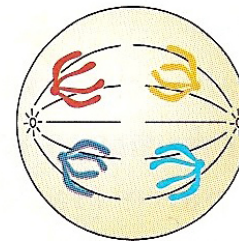
Prophase 1



Métaphase 1

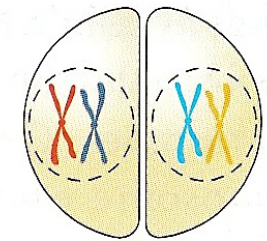
1^{re} division méiotique

Séparation
des chromosomes
homologues



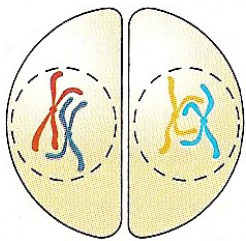
Anaphase 1

2 cellules à n chromosomes
à 2 chromatides

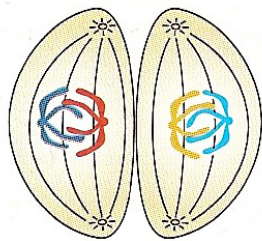


Télaphase 1

4 cellules à n chromosomes
à 1 chromatide

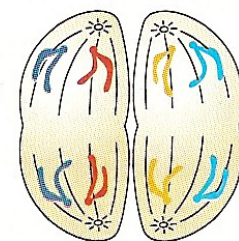


Prophase 2

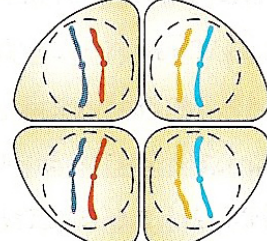


Métaphase 2

Disjonction
des chromatides
de chaque chromosome



Anaphase 2



Télaphase 2

2^e division méiotique

Les différentes étapes de la méiose.

Le rétablissement de la diploïdie lors de la fécondation

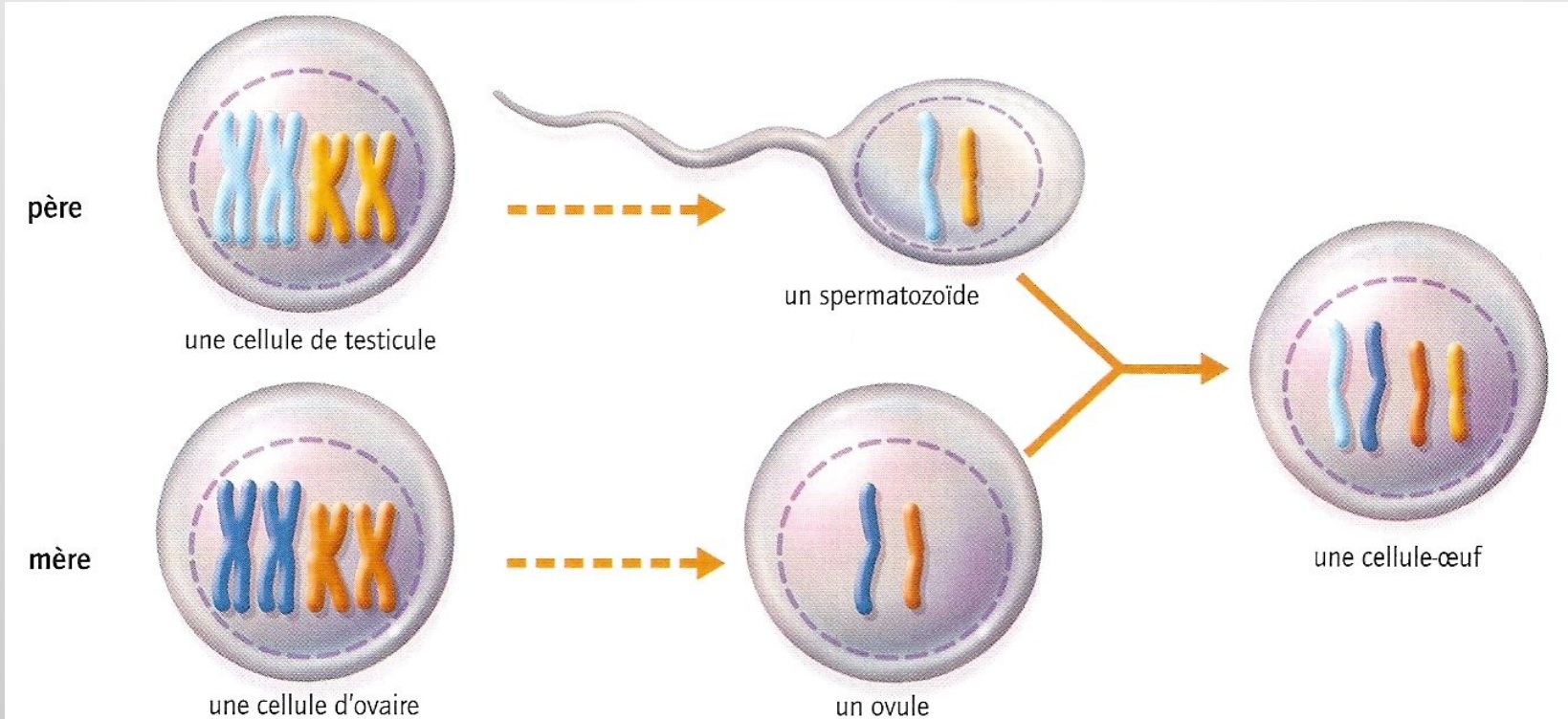


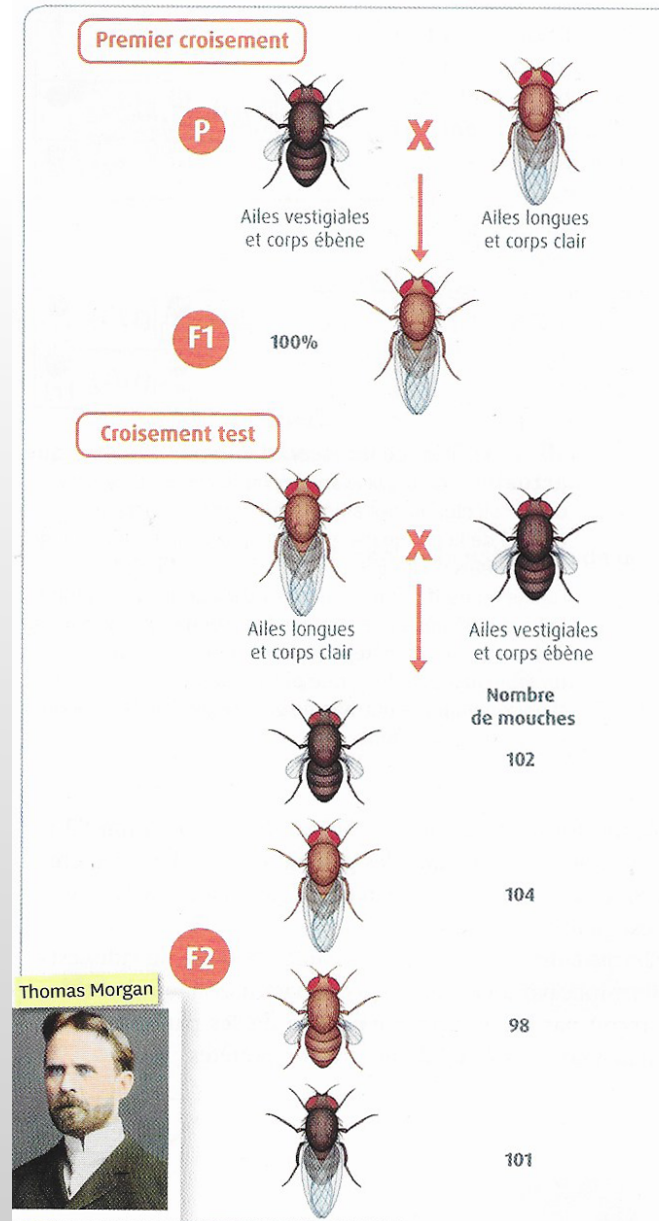
Schéma du devenir des chromosomes lors de la fécondation. Pour faciliter la lecture, seules deux des 23 paires de chromosomes de l'espèce humaine sont représentées.

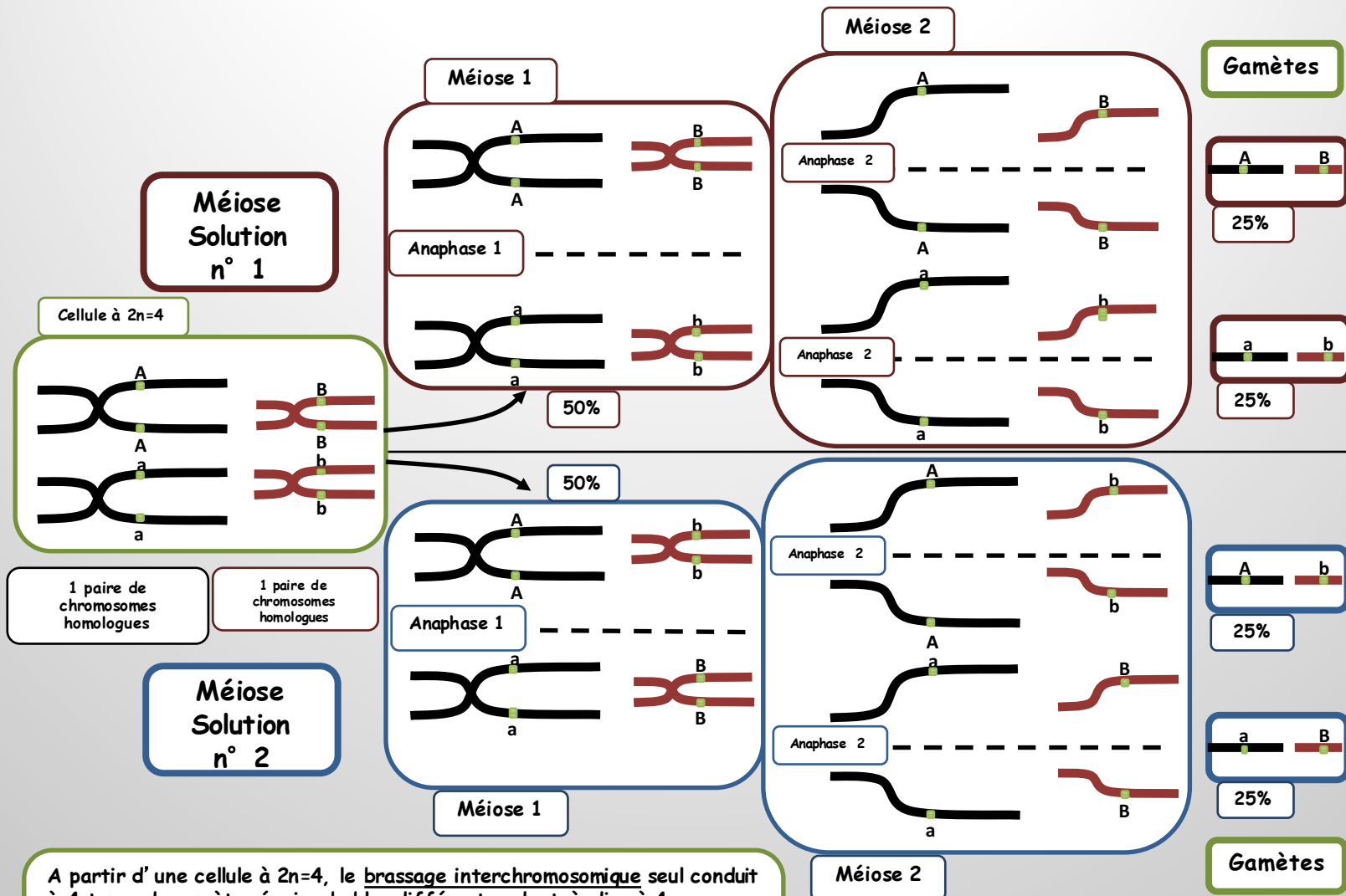
Exemple 1 : Cas de gènes indépendants

1 Une première étude de la transmission des caractères chez des drosophiles. La drosophile est une petite mouche. Au début du 20^e siècle, l'équipe du généticien américain Thomas Morgan (1866-1945) a réalisé de nombreux croisements avec des lignées pures différant par des caractères aisément observables. Dans le croisement présenté ici, on étudie la transmission de deux caractères : la couleur du corps (clair ou noir ébène) et la taille des ailes (longues ou vestigiales, c'est-à-dire courtes) gouvernés par les gènes *vg* (longueur des ailes) et *eb* (couleur du corps).

Définition-clé

Le croisement d'un individu hybride avec un individu double homozygote récessif est appelé « **croisement-test** ». Il permet de déterminer facilement le génotype des gamètes produits par les individus hybrides.



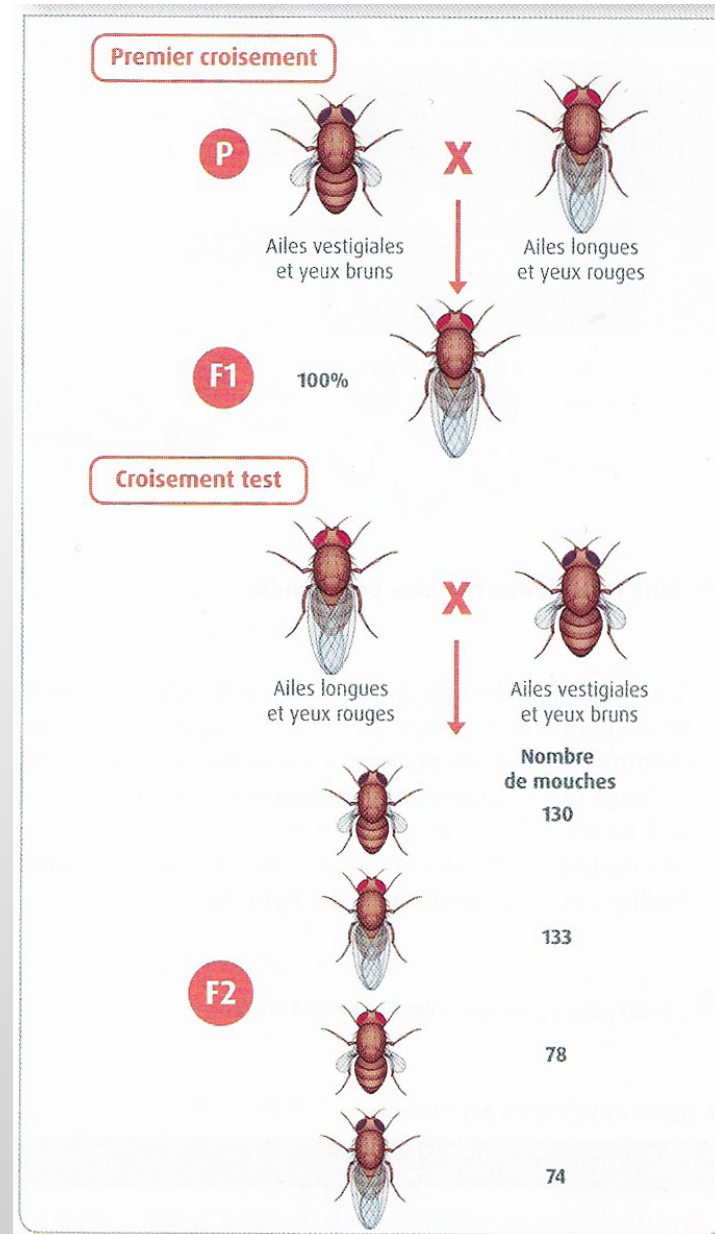


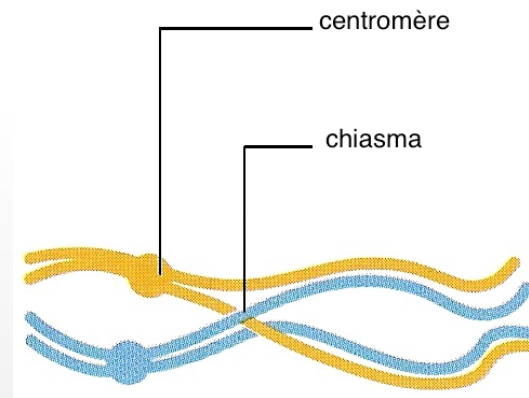
A partir d'une cellule à $2n=4$, le brassage interchromosomique seul conduit à 4 types de gamètes équiprobables différents, c'est-à-dire à 4 combinaisons alléliques différentes.

La méiose et le brassage interchromosomique

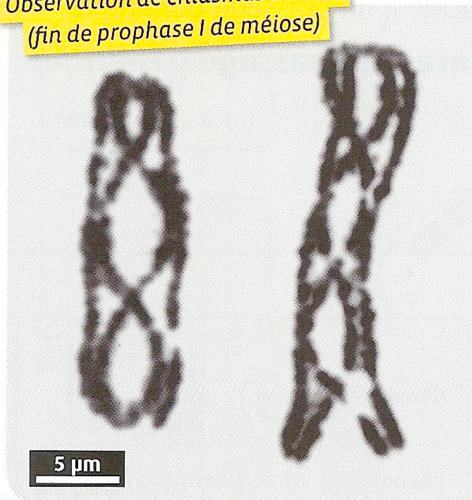
Exemple 2 : cas de gènes liés

2 Une seconde étude de la transmission des caractères chez des drosophiles. On étudie la transmission de deux caractères : la couleur des yeux (rouge ou brune) et la taille des ailes (normale ou vestigiale, c'est-à-dire courte) gouvernés par des gènes liés *vg* (longueur des ailes) et *bw* (couleur des yeux).

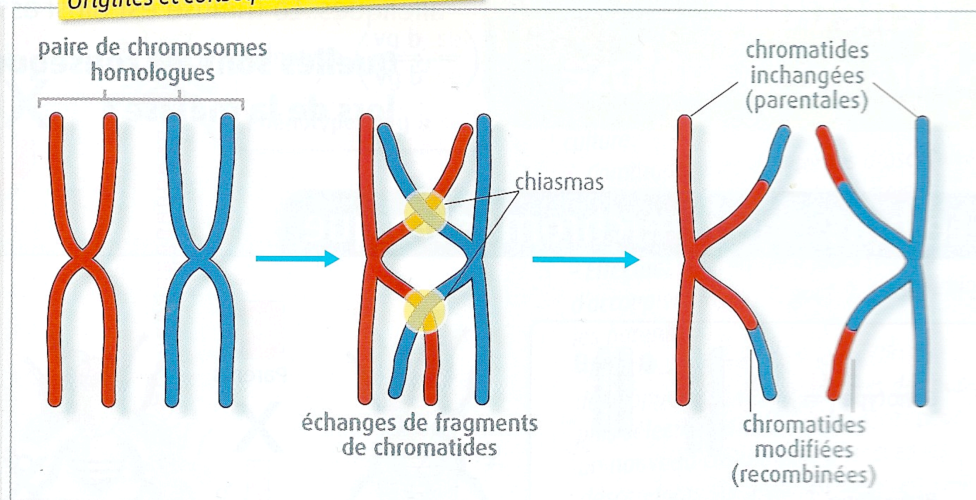




Observation de chiasmas au MET
(fin de prophase I de méiose)



Origines et conséquences d'un chiasma



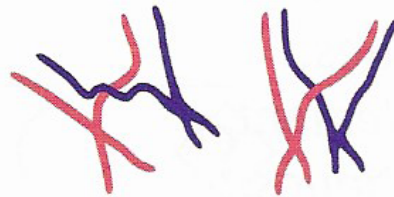
3 Les **crossing-over** entre chromosomes chez une drosophile femelle. Au cours de la prophase de la première division de méiose, les chromosomes homologues, étroitement appariés, laissent apparaître des figures en forme de X, appelées **chiasmata**, au niveau desquelles les chromatides s'enchevêtrent. Des portions de chromatides peuvent alors s'échanger d'un chromosome à l'autre: c'est le **crossing-over** (ou **enjambement**).

Au cours de la prophase de la première division de méiose, les chromosomes homologues sont étroitement appariés, et leurs chromatides s'entremêlent. Ces zones de contact sont appelées chiasmas. Des portions de chromatides et les allèles qu'elles portent peuvent alors s'échanger d'un chromosome à l'autre : ce phénomène est appelé « crossing-over » et donne naissance à des recombinaisons alléliques.

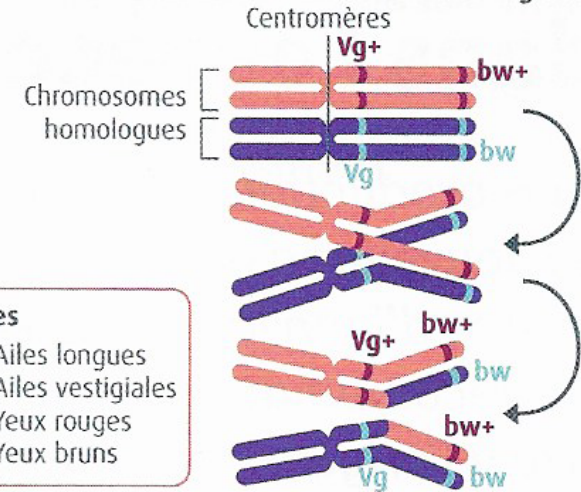
Photo de chromosomes en fin de prophase I de méiose



Schéma d'interprétation



Mécanisme et résultat du crossing-over

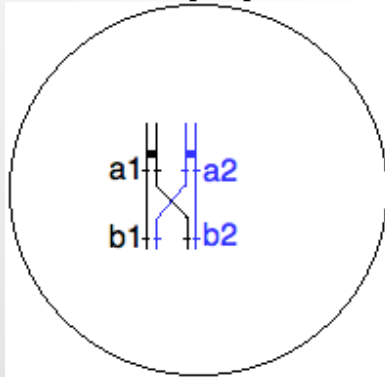


Allèles

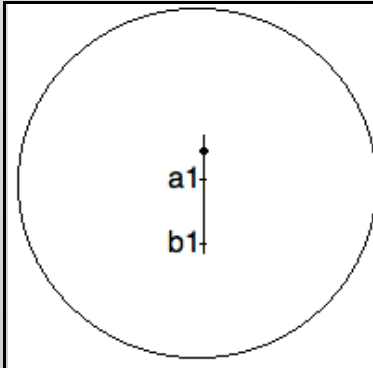
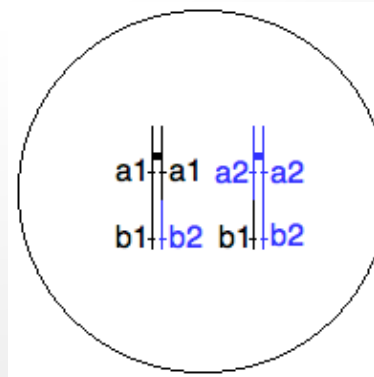
- Vg+** Ailes longues
- Vg** Ailes vestigiales
- bw+** Yeux rouges
- bw** Yeux bruns

3 Observation des chromosomes en fin de prophase I de méiose, schéma interprétatif et mécanisme explicatif.

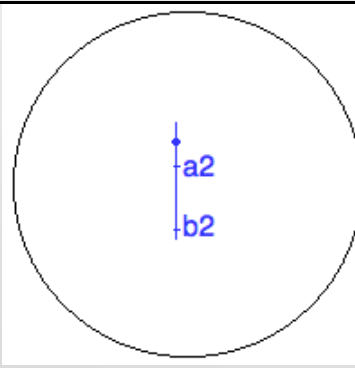
Le CO en prophase I.



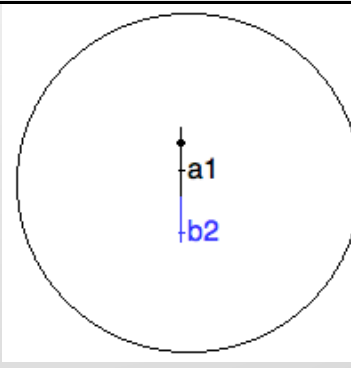
Résultat du CO



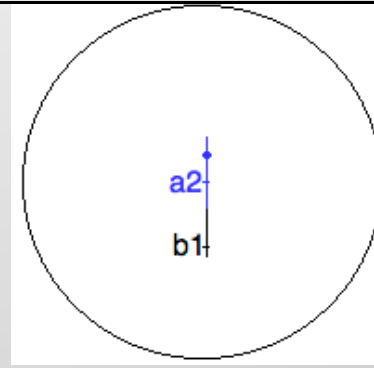
Parental 1



Parental 2



Recombiné 1



Recombiné 2

Schéma bilan des brassages génétiques lors de la méiose

