

D' une génération à l 'autre

2 ème partie

ou :

comment les gènes sont-ils transmis et brassés ?

Chapitre 12 :La recombinaison intra-chromosomique étudiée chez la drosophile et chez l 'homme , organismes à phase diploïde prépondérante.

1. Exemples de liaisons génétiques chez la drosophile.

1.1. analyse d 'un cas simple.

1.2. conséquences de l 'absence de crossing-over chez le mâle.

2. Exemples de liaisons génétiques chez l 'homme.

3. Hérité « liée au sexe ».

3.1. chez la drosophile.

3.1.1. notion de croisements réciproques.

3.1.2. interprétation.

4. Cartes génétiques.

5. Conclusions.

Chapitre 12 : Troisième conséquence de la méiose : la recombinaison intra-chromosomique dans le cas de la drosophile et de l'homme, organismes à phase diploïde prépondérante.

Nous avons vu au cours des chapitres 8 à 11 que la génétique des organismes à phase diploïde prépondérante est rendue difficile par l'impossibilité d'une analyse directe de leurs gamètes. Cette difficulté se retrouve bien évidemment quand on analyse la liaison génétique.

Nous allons voir qu'il est cependant possible de construire des cartes génétiques, de manière plus ou moins aisée, lorsqu'on s'intéresse à la drosophile ou à l'homme. Chez ces deux organismes, nous envisagerons par ailleurs, le cas particulier de l'hérédité dite « liée au sexe ».

1. Exemples de liaisons chez la drosophile

1.1 Analyse d'un cas simple.

Une souche de drosophile présente deux différences phénotypiques par rapport à la souche de référence : elle possède une coloration noire du corps et des yeux de couleur pourpre alors que la souche de référence a le corps gris et les yeux rouge brique. Les individus F1 ont un corps gris et des yeux rouge brique.

Des femelles F1 sont croisées avec des mâles doubles mutants (1) notés D.M. et l'on obtient 4 catégories de mouches :

192 avec le corps noir et les yeux pourpre	199 avec le corps gris et les yeux rouge brique
8 avec le corps gris et les yeux pourpre	5 avec le corps noir et les yeux rouge brique

Examinons les résultats, classiquement, tout d'abord caractère par caractère.

Faisons l'hypothèse la plus simple : la différence de couleur du corps est sous la dépendance d'un seul gène A avec ses allèles a et a+. Les croisements réalisés peuvent s'écrire :

$$P1 \times P2 : a / a \times a+ / a+ \rightarrow F1 \ a / a+$$

le phénotype « corps gris » de la F1 indique que le caractère corps noir est récessif.

$$F1 \times D.M. : a / a+ \times a / a \rightarrow 192+5 = 197 \text{ individus à corps noir et } 199+8 = 207 \text{ individus à corps gris}$$

ces résultats ne sont pas significativement différents de 50% / 50% : l'hypothèse peut être conservée.

De même, faisons l'hypothèse d'une seule différence génétique existant entre la souche mutante et la souche de référence en ce qui concerne la couleur des yeux. Soit B le gène en cause, avec ses allèles b et b+. Les croisements peuvent s'écrire :

$$P1 \times P2 : b / b \times b+ / b+ \rightarrow F1 \ b / b+$$

le phénotype « yeux rouge brique » de la F1 indique que le caractère « yeux pourpres » est récessif.

$$F1 \times D.M. \ b / b+ \times b / b \rightarrow 192+8 = 200 \text{ individus à yeux pourpre et } 199+5 = 204 \text{ individus à yeux rouge brique}$$

ces résultats ne sont pas significativement différents de 50% / 50% : l'hypothèse peut être conservée.

(1) : on remarquera que l'on est dans la situation favorable déjà rencontrée dans le chapitre 10.

Lorsqu'on étudie les deux différences phénotypiques à la fois, on constate qu'il existe une recombinaison des caractères : les gènes A et B sont donc différents, ce qui permet d'écrire les croisements de la manière suivante:

$$\frac{a \dots b}{a \quad b} \times \frac{a+ \dots b+}{a+ \quad b+} \rightarrow F1 \frac{a \dots b}{a+ \quad b+}$$

Si les deux gènes sont indépendants, cette F1 produit 4 catégories de gamètes en fréquence égales :

$$ab = a+b+ = ab+= a+b,$$

Lorsqu'on effectue un croisement avec le DM, producteur de gamètes ab, les gamètes du double hétérozygote conduisent à 4 types d'individus en F2 également en fréquences égales,

$$ab/ab; a+b+ / ab; ab+ / ab \text{ et } a+b / ab$$

Ce n'est manifestement pas le cas : les individus correspondant à des gamètes parentaux (192 et 199) sont en nombre nettement plus important que les individus correspondant à des gamètes de types recombinés (8 et 5).

On est donc conduit à faire l'hypothèse de deux gènes liés :

$$\frac{a \quad b}{ab} \times \frac{a+b+}{a+b+} \rightarrow F1 \frac{a \quad b}{a+b+} \text{ qui produit 4 types de gamètes:}$$

les gamètes ab et a+b+ (parentaux) qui donnent des **individus F2** qui sont respectivement

ab / a b (de génotype et de phénotype identiques à ceux de la souche double mutante)

a+b+ / ab (de génotype et de phénotype identiques à ceux de la F1)

les gamètes ab+ et a+b (recombinés) qui donnent des individus F2 qui sont respectivement

ab+ / ab (yeux pourpre, corps gris)

a+b / ab (yeux rouge brique, corps noir).

La fréquence des gamètes recombinés est facile à calculer:

$$\frac{\text{nombre de } ab+ \text{ et } a+b}{\text{nombre total de gamètes}} = \frac{8+5}{192+199+8+5} = \frac{13}{404} = 0,03$$

Les deux gènes, repérés par leur mutation respective, sont donc séparés par 3 centimorgans, puisque, par convention, une unité de recombinaison est égale à 1% de recombinés.

1.2. Conséquences de l'absence de crossing over chez les mâles de drosophile.

Les résultats que nous venons d'analyser proviennent, nous l'avons précisé, d'un croisement entre des femelles F1 par des mâles doubles-mutants.

Lorsqu'on croise des mâles F1 par des femelles doubles mutantes, on constate que la F2 ne comporte que deux catégories d'individus, correspondant à la production des deux types de gamètes parentaux, a b et a+b+.

On en conclut qu'il n'y a pas de recombinaison chez le mâle de la drosophile.

Chez la drosophile l'étude de la fréquence de recombinaison ne peut donc concerner que la méiose des femelles (encarts 32 et 33).

Encart 32 : conséquences de l'absence de crossing-over chez le mâle de la drosophile.

L'étude de la recombinaison dans un croisement F1 X F1 est particulière. Elle est possible, si l'on reprend les deux souches que nous avons étudiées. Dans ce cas, les individus de référence proviennent de gamètes femelles parentaux ou recombinés et ne peuvent donc pas être utilisés pour étudier la recombinaison.

femelles	$a\ b$	X	mâles	$a\ b$
	-----			-----
	$a+b+$			$a+b+$

gamètes des femelles F1			
ab	$a+b+$	$ab+$	$a+b$
ab/ab [D.M.]	$a+b+/ab$ [ref]	$ab+/ab$ [1]	$a+b/ab$ [2]
$a+b+/ab$ [ref]	$a+b+/a+b+$ [ref]	$a+b+/ab+$ [ref]	$a+b+/a+b$ [ref]

La fréquence de recombinés peut être estimée par l'observation des autres descendants car les individus a/a et b/b représentent la moitié des recombinés. La fréquence de recombinés est donc :

$$\frac{2(a/a + b/b)}{\text{total}}$$

En revanche, si le croisement d'origine est P1 : $ab+/ab+$ X P2 : $a+b/a+b$, l'étude de la recombinaison n'est pas possible. En effet, la F1 est alors $ab+/a+b$ et le tableau de rencontre des gamètes qui en découle est

gamètes des femelles				
	$ab+$	$a+b$	ab	$a+b+$
gamètes des mâles	$ab+ / ab+$ [P1]	$ab+ / a+b$ [ref]	$ab+ / ab$ [P1]	$ab+ / a+b+$ [ref]
	$a+b / ab+$ [ref]	$a+b / a+b$ [P2]	$a+b / ab$ [P2]	$ab+ / a+b+$ [ref]

Les individus correspondant à des gamètes parentaux ou remaniés ne peuvent alors être distingués.

On remarquera qu'il n'y a pas d'individus [double mutant] dans cette descendance (2). Il en découle qu'il n'existe pas ici le doute que nous avons constaté chez la levure : lorsque la distance physique est très grande, nous avons vu que l'on peut atteindre une fréquence de recombinaisons de 0,50. Cela laisse persister un doute lorsqu'on observe une telle fréquence. En effet deux hypothèses restent possibles : soit les gènes sont sur des chromosomes indépendants, soit ils sont sur le même chromosome mais très éloignés.

Chez la drosophile, l'absence de crossing-over chez le mâle permet de conclure très facilement, par la simple analyse qualitative des individus [double mutant] dans le cas de ce croisement F1 X F1 : s'ils existent, les gènes sont sur des chromosomes différents ; s'ils sont absents, les gènes sont liés.

(2) : si vous vous posez la question de savoir comment on peut néanmoins disposer d'individus doubles-mutantsil suffit de croiser les individus F2 de [P1] avec des individus de [P2] : certains de ces croisements seront $ab+ / ab$ X $a+b / ab$, et donneront donc des individus ab / ab .

2. Etude des gènes des globines α et β de l'homme.

L'anémie falciforme est une maladie très étudiée. Elle est due à une mutation d'un seul nucléotide du gène codant pour la globine β . L'effet est assez spectaculaire : le remplacement d'un acide glutamique par une valine conduit à une impressionnante série de symptômes, se traduisant par une anémie très sévère, conduisant la plupart du temps au décès des homozygotes. Au niveau cellulaire, on constate que les globules rouges des malades ont une forme de faux, très spectaculaire : le nom de la maladie en est issu. Notons l'allèle mutant b et l'allèle de référence $b+$. Les hétérozygotes $b / b+$ produisent les deux types de globines et ne présentent pas d'anémie (le phénotype anémié est donc récessif).

Il existe par ailleurs une autre globine, appelée δ (4). Un variant de ce polypeptide a été découvert et appelé δ' . Notons l'allèle de référence $d+$ et l'allèle mutant d . Les hétérozygotes $d / d+$ produisent les deux types de globines (5).

On analyse une famille (H), originaire de Géorgie, issue d'un homme $b / b+$ ayant épousé une femme $d / d+$ (figure 89). Ils ont une fille qui produit 4 types de globines, β^S et $\beta+$, δ et δ' . Cette femme épouse successivement trois hommes sans particularité, produisant classiquement 2 types de globines, β et δ .

Les trois unions donnent 7 enfants : 4 produisent β^S , β et δ ; trois produisent β , δ et δ' .

Ce type de résultat est retrouvé dans d'autres familles présentant les mêmes caractéristiques. Aucun mariage entre double hétérozygote et homozygote de référence ne donne d'enfant produisant les 4 types de globines, ni d'enfant ne produisant que des globines β et δ .

Imaginons que les deux gènes (6) contrôlant β et δ soient indépendants :

le premier mariage s'écrit alors

$b^+ d^-$	$b^- d^+$	X	$b^+ d^-$
---	---	---	---
$b^+ d^+$	$b^+ d^+$		$b^- d^+$

Elle produit des gamètes parentaux de type b^+d^- ou b^-d^+ . Leur rencontre avec des gamètes b^+d^+ , fournis par des hommes de la population générale, donne deux types d'individus :

b^+d^-	-----	producteurs de globines β , δ et δ'
$b^+ d^+$		
$b^- d^+$	-----	producteurs de globines β^s , β et δ .
$b^+ d^+$		

Elle produit également des gamètes recombinés de type bd^- ou b^+d^+ ; Leur rencontre avec des gamètes b^+d^+ , fournis par des hommes de la population générale, donne deux types d'individus :

$b^- d^-$	---	---	producteurs de globines β et β^s , δ et δ'
$b^+ d^+$			
$b^+ d^+$	---	---	producteurs de globines β et δ
$b^+ d^+$			

Puisque ces deux derniers types d'individus possibles ne figurent pas dans les descendances c'est que l'hypothèse de deux gènes indépendants n'est pas la bonne : en réalité les gènes gouvernant β et δ sont liés

Comme les gamètes bd^- ou b^+d^+ ne sont pas produits par d'autres mariages du type de ceux que nous venons d'analyser, les gènes contrôlant β et δ doivent être très proches (7).

Encart 33 : la drosophile est un mauvais outil pédagogique pour les débutants.

La commodité de son élevage et la notoriété de la drosophile, en font un outil très utilisé dans les travaux pratiques et dans tous les ouvrages de génétique, à commencer par ceux des lycées. Pourtant, l'absence de crossing-over chez le mâle interdit de généraliser les observations. Par exemple, on ne peut pas discuter le « fameux » tableau à 16 cases (3). Il est pourtant intéressant de le faire, même rapidement.

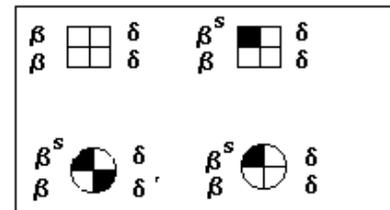
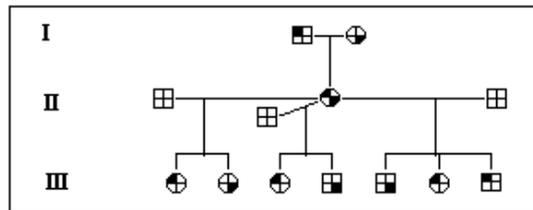
Toutes ses cases sont équiprobables lorsque les deux gènes en cause sont physiquement indépendants (chapitre 11). Si l'on étudie 2 gènes liés, il faut être conscient que rien ne change qualitativement s'il y a des crossing over dans les deux sexes: il y a 16 cases, correspondant à 16 possibilités de rencontre des gamètes des deux sexes, donnant 9 génotypes différents et 4 types de phénotypes lorsque les caractères mutants sont récessifs. On trouve des doubles-mutants (génotype 16) des simples mutants d'un type (génotypes 1,4,13), des simples mutants de l'autre type (génotypes 6, 8, 14) des individus semblables à la souche de référence (tous les autres génotypes, à condition que les deux caractères étudiés soient récessifs.) La probabilité de rencontre des gamètes donnant des doubles mutants est de $(x/2)^2$. Leur fréquence permet donc de déduire la fréquence de gamètes recombinés. Ce n'est pas le cas chez la drosophile, puisque les cases 9 à 16 n'existent pas.

gamètes de femelles F1					
(1-x) Parentaux					
Recombinés					
		ab+	a+b	a+b+	ab
gamètes	ab+	1	2	3	4
(1-x) Parentaux					
de	a+b	5	6	7	8
(x) Recombinés					
mâles F1	a+b-	9	10	11	12
	ab	13	14	15	16

Figure 88 : globines produites par les membres de la famille H.

généalogie

légendes



(3):

Gamètes
ab

pourquoi diable parler d 'échiquier , comme on le trouve écrit un peu partout...la génétique n 'est pas un jeu avec ses mystères.....

(4) : *δ existe surtout chez l 'embryon . Sa séquence est assez proche de celle de l 'hémoglobine β . Ici , comme souvent chez l ' homme , on ne peut pas vérifier qu ' un seul gène est en cause , grâce aux résultats génétiques.*

(5) : *l 'état homozygote d / d ne donne pas de phénotype particulier.*

(6) : *mais ici , on peut appliquer le dogme simple qui relie un polypeptide et un gène : puisqu ' on s 'intéresse au polypeptide β et au polypeptide δ , deux gènes sont en cause.*

(7) : *on le vérifiera plus loin , grâce aux analyses moléculaires.*

3. Hérité « liée au sexe ».

Pour des raisons actuellement plus psychologiques que scientifiques (8), l'un des aspects les plus populaires de la transmission des caractères héréditaires concerne un cas très particulier. Il s'agit des conséquences de l'existence chez de nombreuses espèces, de chromosomes qui peuvent se présenter sous deux formes différentes, appelées X et Y par les cytologistes.

3.1. *Observation de croisements réciproques chez la drosophile.*

On dispose d'une souche mutante à yeux blancs. On étudie une F1 obtenue en mettant en présence des femelles de cette souche avec des mâles de la souche de référence et une deuxième F1 obtenue en mettant en présence des mâles mutants et des femelles de la souche de référence.

On constate que dans la première descendance les mâles F1 ont les yeux blancs tandis que les femelles ont les yeux rouge sombre identiques à ceux de la souche de référence. Dans la deuxième descendance, tous les individus, mâles et femelles ont les yeux rouge sombre.

Les deux F1, qui constituent des **croisements réciproques**, ne sont donc pas identiques (figure 90).

Dans ce cas (9) l'interprétation est la suivante : imaginons tout d'abord que la mutation d'un seul gène détermine la couleur mutante (10), caractère qui est récessif. Une hypothèse supplémentaire permet de rendre compte des résultats : admettons que ce gène soit situé sur le chromosome X et absent du chromosome Y (11).

Les croisements F1 sont représentés ci dessous :

Lorsqu'il y a hétérogénéité de la F1, comme ici, il est donc possible (9) que le caractère étudié soit sous la dépendance d'un gène du chromosome X et absent du chromosome Y.

Encart 34 : La base génétique de la construction d 'un individu mâle ou femelle repose souvent (pas dans le cas de tous les êtres vivants sexués) sur une différence chromosomique importante entre les deux sexes. Alors que , quasi par définition, les cellules diploïdes possèdent des paires de chromosomes homologues qui sont identiques (ce sont les **autosomes**), il existe une paire de chromosomes plus ou moins dissemblables (ce sont les **hétérochromosomes**). Dans le cas de la drosophile et de l 'homme , les femelles ont deux chromosomes identiques, nommés X alors que les mâles ont un chromosome X et un chromosome appelé Y .

	gamètes produits par les femelles 100% X	
gamètes produits par les mâles 50 % X		50 % XX , donc femelles
	50 % Y	50 % XY , donc mâles

Il existe sur ces bases simples bien des variations. Certains individus ont des constitutions génétiques différentes : pas de chromosome Y -notés XO- , XXY...) conduisant à divers phénotypes sexuels. Chez certaines autres espèces , la construction d 'un mâle ou d 'une femelle dépend des conditions extérieures (exemple , sexe modulable par la température chez les tortues ...). L 'analyse détaillée de la génétique du déterminisme du sexe sort du cadre de cet ouvrage .

Figure 90 : exemple d 'analyse de F1 « réciproques ».

analyse de la première F1	analyse de la deuxième F1				
femelles X _a / X _a et mâles X _a ⁺ / Y	gamètes mâles		gamètes mâles		
			femelles X _a ⁺ / X _a ⁺ et mâles X _a / Y		
	50 % X _a ⁺	50 % Y		50% X _a	50% Y
gamètes femelles 100% X _a	femelles [ref]	mâles [oeil blanc]	gamètes femelles 100% X _a ⁺	femelles [ref]	mâles [ref]

(8) : historiquement , la liaison au sexe a été un argument essentiel de la localisation des gènes sur les chromosomes . L 'argumentation est en effet très simple : le généticien constate qu 'un ensemble de gènes se comportait d 'une manière particulière tandis que le cytologiste observe les hétérochromosomes ... la rencontre entre les deux démarches permet donc une solide hypothèse.

(9) : d 'autres situations biologiques peuvent conduire à des croisements réciproques donnant des résultats différents . Par exemple , cela peut être dû à un déterminisme génétique mitochondrial : cette situation originale constitue tout un pan de la génétique qui dépasse le cadre de cet ouvrage.

(10) : nous n 'avons ici aucune information expérimentale permettant de conserver ou de rejeter cette hypothèse : il faudrait observer une deuxième génération pour en être capables.

(11) : le chromosome Y porte un certain nombre de gènes fonctionnels . Certains existent sur le chromosome X (les deux chromosomes ont une partie commune), d 'autres n 'existent que sur le chromosome Y : ils contrôlent des caractères limités aux mâles.

3.2. Exemple d 'un caractère lié au sexe chez l 'homme.

Il n 'est pas question ici de réaliser des croisements réciproques !! On se contente donc d 'étudier les descendance de mariages , en espérant pouvoir trancher entre diverses hypothèses.

La figure 91 regroupe deux généalogies (familles NEU et DAN) , présentant des individus atteints de cécité aux couleurs , qui est un caractère rare (10⁻⁵) On admettra que ce caractère est dû à la mutation d 'un seul gène et que le gène affecté dans les deux familles est le même.

La très grande proportion d 'individus atteints dans les deux familles permet d 'envisager que la différence est de nature héréditaire. Par ailleurs , on constate que plusieurs enfants atteints ont des parents sains : le caractère mutant est donc récessif. On observe que la grande majorité des individus atteints sont de sexe mâle : cela conduit à faire l 'hypothèse que le gène considéré est porté par le chromosome X.

Trop souvent , cette hypothèse est acceptée sans autre considération . En réalité , les choses ne sont pas si simples : il est nécessaire de considérer les faits avec attention, pour trancher avec l 'hypothèse d 'un gène porté par un autosome. La figure 92 résume la démarche critique indispensable. Elle tient compte de la rareté des individus mutants dans la population (10^{-5}) et de la fréquence des hétérozygotes (6×10^{-3}) que l 'on peut en déduire (12).

La femme II¹⁰ de la famille DAN (fléchée) est un exemple de femme homozygote mutante , dont la fréquence est très faible. Elle descend d 'un mariage [ref] x [céc] qui pourrait être a / Y x a / a + , I 4 étant hétérozygote. Le fait que son frère I⁵ soit [céc] (il serait a / Y) , plaide pour l 'existence d 'un allèle muté dans cette partie de la famille (13).

(12) : on peut estimer la fréquence des hétérozygotes d 'une manière très simple qui sera envisagée dans le chapitre 21 (encart 146+).

(13) : noter que dans le cadre de cette hypothèse le mariage I 3-4 qui donne une fille [céc] permet de savoir que le gène muté dans I 3 et I 5 est le même.... c 'est une sorte de révision du test de complémentation !!

Figure 91 : deux généalogies comportant des individus atteints de cécité aux couleurs.

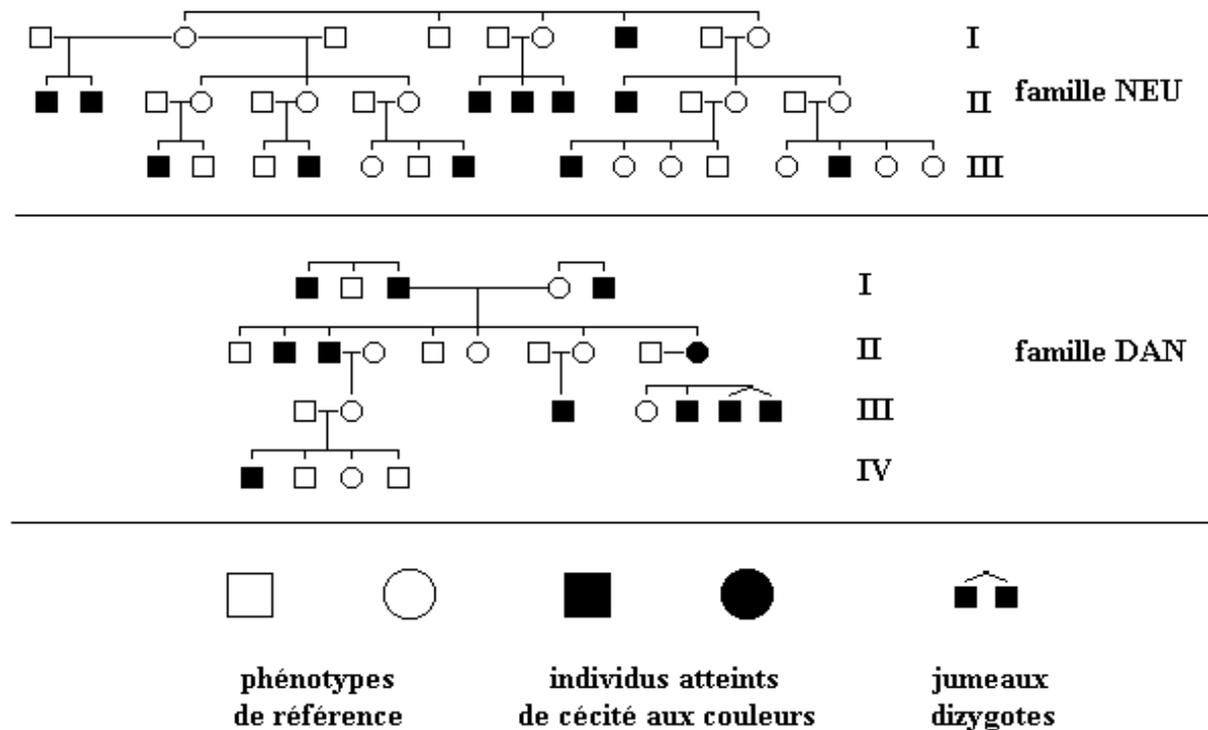


Figure 92 : comment distinguer l' hypothèse n° 1 d 'un gène autosomal et l' hypothèse n° 2 d 'un gène hétérochromosomal .

étude des mariages « homme [ref] X femme [ref] » par exemple dans la famille NEU.

hypothèse 1 $a+ / a \times a+ / a \rightarrow$ filles et garçons [ref] et [céc].

hypothèse 2 $a+ / Y \times a+ / a \rightarrow$ filles [ref] ; garçons [ref] et [céc].

la présence d 'une seule fille [céc] éliminerait l 'hypothèse 2 .

Estimons la probabilité de l' absence de fille [céc].

Dans le cas de la famille NEU les mariages I 1-2 ; I 5-6 ; I 8 -9 ; II 3-4 II 5-6 II 7-8 II 13-14 II 15-16, qui donnent des individus [céc] ont un conjoint issu de la population générale . Ces 8 hommes devraient être $a+ / a$ dans l 'hypothèse 1. La probabilité que ce soit le cas est de $(6 \cdot 10^{-3})^8$ soit donc $1,7 \cdot 10^{-18}$!

Par contre , dans l 'hypothèse n°2 , les hommes I-1 ; I -5 ; I -8 ; II -3 ; II-5 ; II-7 ; II-13 ; II-15 seraient $a+ / Y$: la probabilité qu 'il en soit ainsi est de $(1-10^{-5})^8$ soit 0,9999. Il est donc très raisonnable de conserver l 'hypothèse n° 2 .

étude du mariage homme [ref] x femme [céc] : II 9-10 de la famille DAN:

hypothèse 1 $a+ / a+ \times a / a \rightarrow$ filles et garçons [ref]

hypothèse 2 $a+ / Y \times a / a \rightarrow$ filles [ref] ; garçons [céc]

La présence de garçons [céc] élimine ici l 'hypothèse 1.

4. Cartes génétiques.

On constate chez l'homme et chez la drosophile, comme chez la levure, que le nombre de groupes de liaison déterminés par les généticiens est le même que le nombre de chromosomes observés par les cytologistes (14).

On trouve 4 groupes de liaison chez la drosophile, dont la forme diploïde possède 4 paires de chromosomes (dont la paire XY). La figure 93 illustre tout cela.

Chez l'homme, on observe 46 chromosomes, (dont la paire d'hétérochromosomes) (15). Si on en reste à l'analyse classique des généalogies, on peut facilement imaginer que l'établissement des groupes de liaison est ici un travail encore plus laborieux que chez la levure ou même la drosophile. En réalité, l'établissement de la carte génétique de l'homme nécessite la conjonction de nombreuses méthodes : dosage d'enzymes chez des sujets dotés d'anomalies chromosomiques, observation d'hybrides cellulaires avec d'autres espèces, génétique moléculaire, séquençage de l'ADN etc... Le travail est bien avancé mais non terminé. On en trouvera l'illustration plus loin.

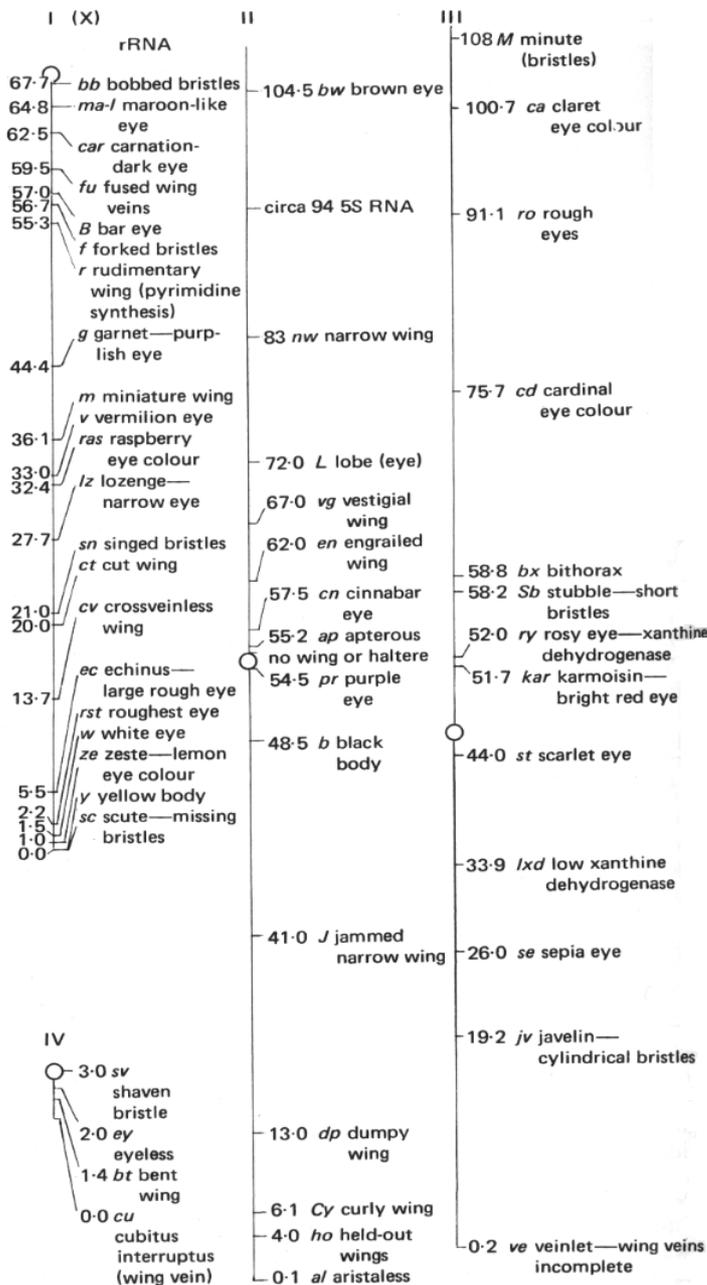
5. Conclusions.

C'est assez paradoxal : ce chapitre ne nous a rien appris de neuf !

En effet, nous n'avons fait qu'**appliquer** les conclusions dégagées chez la **levure**.

Bien sûr, les particularités biologiques diverses des deux organismes étudiés obligent à des analyses plus complexes, ne serait-ce qu'à cause de la diploïdie. Mais l'idée générale subsiste : deux gènes situés "pas trop loin" sur le même chromosome ont des destinées (des répartitions) souvent identiques lors de la méiose. Cette destinée commune n'est cependant pas systématique, à cause du crossing-over, d'autant plus fréquent que les gènes sont (relativement) éloignés.

Finalement, la meilleure illustration du peu de chemin nouveau parcouru dans ce chapitre est le fait qu'il se termine de la même manière que le précédent, par les cartes génétiques des deux organismes étudiés. Décidément, la génétique utilise un arsenal conceptuel assez réduit. Mais **il faut être très attentif à l'organisme étudié** sous peine de tout confondre...



(14) : on parle souvent de cyto-généticiens.

(15) : il existe d'assez nombreux cas d'anomalies chromosomiques, certains individus possédant de 45 à 49 chromosomes (les cas extrêmes concernent l'X). La plus célèbre est responsable du « mongolisme » : les personnes qui en sont atteintes ont trois chromosomes 21, constitués de diverses manières, la plus simple étant l'existence de trois chromosomes à l'état libre. Cet accident de la méiose est très facilement repérable par amniocentèse précoce.