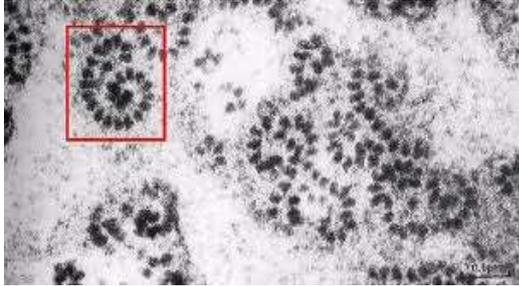


Les organites

Les ribosomes



Ce sont les derniers organites découverts grâce au microscope électronique. Ils sont en forme de minuscules grains. Leur structure est, curieusement, mieux connue que celle des autres organites pourtant plus « grands ».

Ils sont composés par :

- Une cinquantaine de protéines ;
- 3 ou 4 molécules d'ARN (acide ribonucléique) lui-même composé d'acide phosphorique et d'un sucre : le ribose. Ils sont très nombreux et flottent dans le cytosol.
- Les ribosomes sont formés de deux sous-unités.

On les trouve également sur la paroi du « réticulum endoplasmique rugueux » (le RER). La synthèse artificielle de ribosomes fonctionnels a été réalisée en laboratoire. Ils permettent la synthèse des protéines, substances qui sont à la base du fonctionnement des cellules.

Quelques exemples :

- L'amidon est formé de molécules de glucose rassemblées par des protéines (des enzymes) ; les protéines sont des molécules complexes constituées par l'assemblage de molécules plus petites nommées acides aminés. Il existe 20 acides aminés différents ; par exemple l'insuline est une protéine composée de 51 molécules d'acides aminés soudés entre elles (on retrouve bien sûr plusieurs fois certains acides aminés puisqu'il n'en existe que 20 sortes différentes).
- Les acides aminés des protéines se soudent entre eux grâce à l'action des ribosomes.

Chez l'homme, les 20 000 gènes environ qui constituent son patrimoine génétique fabriquent, grâce aux ribosomes, environ 20 000 protéines différentes.

Le réticulum endoplasmique



Réticulum rugueux

De formes très variées, il présente de nombreuses ramifications qui forment un réseau de cavités. Il parcourt tout le volume de la cellule.

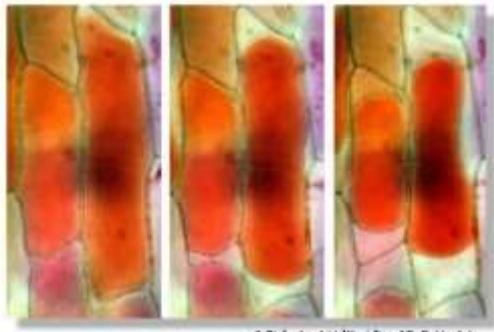
Sa membrane est constituée d'eau, de protéines et de lipides.

Il existe deux types de réticulum :

- Le réticulum rugueux couvert, sur sa face externe, de ribosomes ;
- Le réticulum lisse, dépourvu de ribosomes.

Le réticulum endoplasmique permet la circulation et les échanges au sein de la cellule de diverses molécules.

Les vacuoles



L'observation des vacuoles est facilitée par la coloration au rouge neutre.

Certaines cavités du réticulum endoplasmique s'élargissent chez les végétaux formant les **vacuoles** qui contiennent de l'eau et diverses substances dissoutes dans cette dernière. Elles ne contiennent pas d'organites.

Chez les végétaux, on trouve entre une et plusieurs vacuoles, ces dernières peuvent fusionner pour former une ou plusieurs vacuoles plus volumineuses qui occupent un volume de plus en plus important dans l'espace de la cellule.

Un exemple :

- Les pétales, dont la coloration est due à un ou plusieurs pigments contenus dans les vacuoles, présentent des couleurs variées. Les anthocyanes sont des pigments bleus.

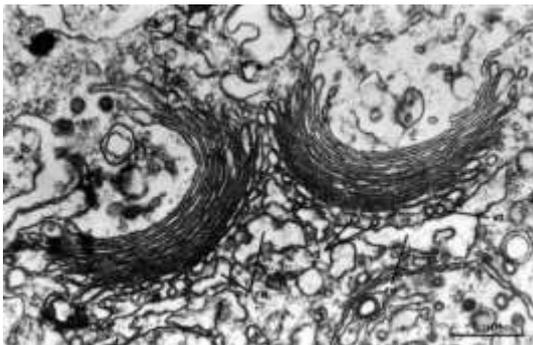
Les vacuoles permettent les échanges d'eau avec l'extérieur et donnent une certaine tonicité aux tissus. On parle de :

- **turgescence** lorsque les vacuoles sont pleines d'eau (elles sont turgescents) ;
- **plasmolyse** lorsqu'en en cas de manque d'eau, les vacuoles se vident.

Plus la vacuole est grosse moins il y a d'activité métabolique dans la cellule.

Leur rôle : entre autre, échanges d'eau entre les cellules de la plante et l'air ou le sol.

Corps de Golgi (du nom biologiste italien du XIX^e siècle) ou **dictyosomes**



Un corps de Golgi est un empilement de sacs aplatis (sacculés) dont les renflements qui se forment à l'extrémité produisent des bourgeons : les **vésicules** qui peuvent s'échapper à l'extérieur, dans le cytosol de la cellule.

Les dictyosomes achèvent la synthèse des protéines commencée avec les ribosomes.



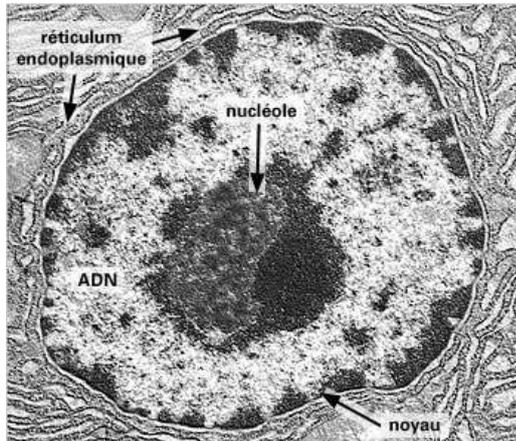
Micros filaments de cellule musculaire de type 1

On remarquera, dans les cellules, la présence de microfilaments visibles avec un colorant fluorescent. Ils sont moins nombreux chez les végétaux que chez les animaux.

Ces microfilaments peuvent être pleins ou creux ; dans ce dernier cas, on emploie le terme de microtubules.

Par exemple, les cellules musculaires (nous sommes ici chez les animaux : petite digression !) sont remplies de microfilaments de deux tailles (diamètres) différentes (en somme des sortes de spaghettis ± épais).

Le noyau



C'est le chef d'orchestre de la cellule.

Chaque cellule comporte un noyau de forme \pm sphérique composé de plusieurs parties :

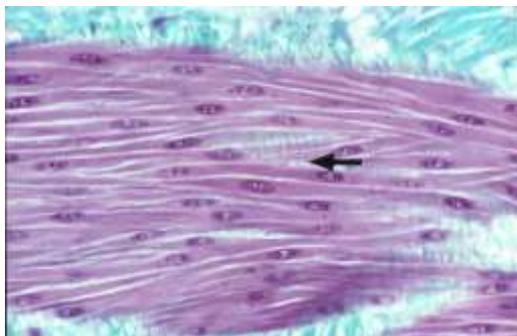
- La **membrane nucléaire** (en fait il y en a deux) ;
- Un liquide ou **nucléoplasme** ;
- Des masses de **chromatine** (que l'on met en évidence par des colorants spéciaux) composées par de l'ADN et des protéines ;
- Une ou plusieurs masses : le ou les **nucléole(s)** formé principalement d'ARN.



INSTITUT JACQUES MONOD - PARIS
© C. MASSON, CNRS

Pour étudier la structure et la composition chimique du noyau, on travaille sur des « fractions » de noyaux obtenus en mettant, par exemple, des globules blancs (un type de cellules sanguines) dans l'eau : ils gonflent (par turgescence) puis éclatent. Par centrifugation on obtient des fractions d'organites et de noyaux qui se regroupent en fonction de leur densité, permettant de les isoler afin de prélever la partie à étudier (ici les noyaux).

La membrane externe du noyau est percée de pores (dits « **pores nucléaires** ») qui permettent les échanges du noyau avec le cytoplasme. Ils sont mis ici, sur la photographie, en évidence par le microscope électronique à balayage.



Un exemple d'exception : on trouve plusieurs noyaux dans une cellule musculaire car lors de sa formation, les cellules souches (**myoblastes**) ont fusionnées donnant un **myocyte** (= une cellule musculaire) à plusieurs noyaux.



Le rôle du noyau a été démontré grâce à une étude sur deux espèces d'algues vivant en mer méditerranée : les *Acetabularia*, à cellules en forme d'ombrelle d'un centimètre environ.

Des expériences à partir de croisements entre deux espèces (*A. mediterranea* et *A. crenulata*) ont permis de démontrer que l'information génétique se trouvait dans le noyau.

L'ADN est un des constituants (le principal !) de la chromatine des noyaux.

On trouve 46 molécules d'ADN dans les cellules humaines, 16 dans celles de l'ail... Le nombre est constant pour chaque espèce (en théorie ; en fait, chez les végétaux, nombreuses exceptions !).

Les chromosomes

Lors de la division cellulaire, les masses de chromatine se transforment en chromosomes.

Dans les cellules en « repos » il n'y a pas de chromosomes (on peut voir seulement les masses de chromatine qui flottent dans le nucléoplasme des noyaux) : on ne les voit que dans les cellules en **mitose** (division cellulaire)



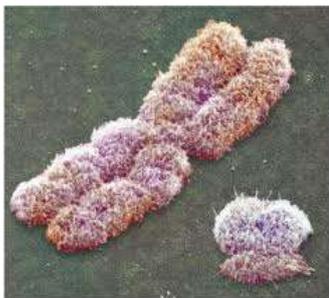
La cellule mère donne deux cellules filles deux fois plus petites qui vont grandir pour donner deux cellules identiques à la cellule mère.

Tout être vivant est issu d'une cellule-œuf ou **zygote** qui subit une succession de mitoses.

Un ovocyte + un spermatozoïde forment un zygote.

Quelques définitions :

- Les cellules sexuelles sont encore nommées **gamètes** ; **elles contiennent** moitié moins de chromosomes que les autres cellules.
- Les cellules non sexuelles sont appelées cellules **somatiques** ;
- L'ensemble des cellules non sexuelles d'un organisme forme le **soma** ;
- L'ensemble des cellules sexuelles forme le **germen**.



Les cellules sont soit :

- **diploïdes** ($2n$) ; c'est le cas des cellules somatiques ;
- **haploïdes** (n) ; c'est le cas des gamètes.

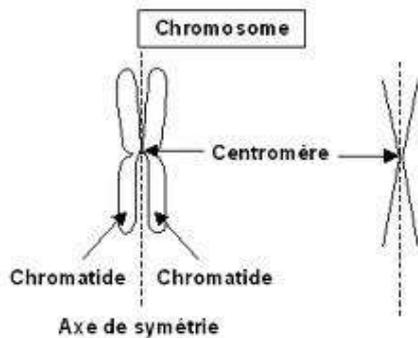
Les chromosomes apparaissent comme des filaments épais à l'emplacement du noyau.

Pour compter les chromosomes il, faut observer des cellules qui se divisent (= cellules en mitose) :

- les **méristèmes** chez les végétaux (extrémité des racines ou des tiges ou certaines parties des fleurs (étamines et ovaire) ;
- La moelle osseuse ou certaines cellules du sang chez l'homme.

En dosant la quantité d'ADN on peut déduire le nombre de chromosomes (ce qui est plus rapide que l'observation directe de ces derniers) ; cette méthode est très utilisée en **cytotaxonomie**, un domaine de la biologie qui étudie, pour simplifier, les rapports entre le nombre de chromosomes et la taxonomie (= la distinction des espèces et leur classification).

Pour étudier les chromosomes, on fait éclater la cellule en métaphase et on obtient des chromosomes bien séparés les un des autres, ce qui permet de voir leur forme et de bien les compter.



Les chromosomes sont formés de deux parties : les **chromatides** réunies en un point : le **centromère**.

Les chromatides présentent 2 bras supérieurs et 2 bras inférieurs qui n'ont pas, le plus souvent, la même longueur.

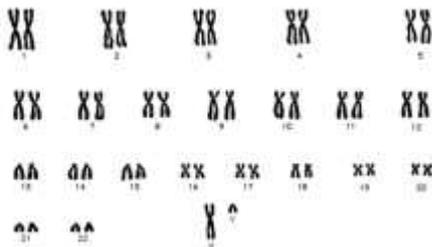
Le centromère présente donc une disposition variable.

Une chromatide n'a pas de membranes, elle est formée de filaments d'ADN et de protéines.

Les 2 molécules d'ADN (une dans chaque chromatide) sont rigoureusement identiques.

Les chromosomes homologues forment une paire, leurs molécules d'ADN sont *presque* les mêmes. Un des chromosomes est d'origine maternelle l'autre d'origine paternelle.

Le caryotype :



Les chromosomes sont classés par paires et numérotés.

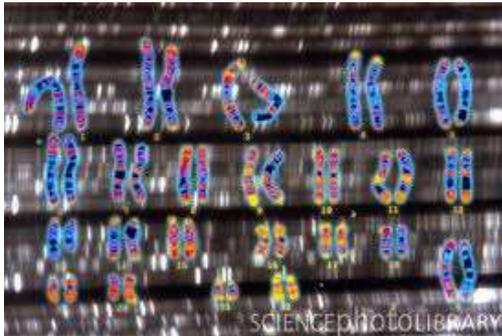
Chez l'homme (le mâle, pas l'homme en général), deux chromosomes sur les 46 n'ont pas d'homologues et sont très différents : l'un, assez grand (pour un chromosome !) est nommé le chromosome X, l'autre, bien plus petit, le chromosome Y. Ces deux chromosomes, qui déterminent le sexe sont nommés chromosomes sexuels ou encore **gonosomes**.

Chez la femme, il y a dans le noyau de chaque cellules 44 chromosomes + 2 chromosomes X et chez l'homme (mâle) 44 chromosomes + un X et un Y.

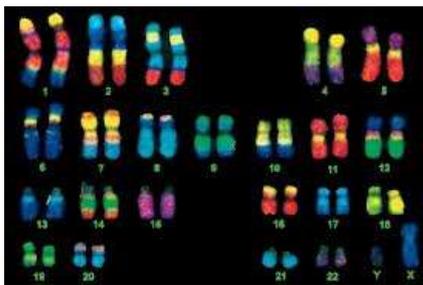
Formule chromosomique : 44+XY chez l'homme (mâle) et 44+XX chez la femme. Le **gonosome Y** est masculinisant.

Les chromosomes non sexuels (44 chez les humains, soit 22 paires de chromosomes homologues) sont nommés **autosomes**.

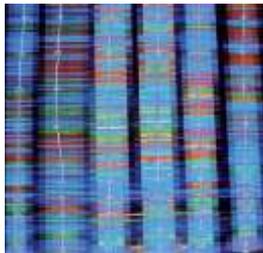
Les techniques de différenciation des chromosomes (ou comment reconnaître les différents chromosomes) :



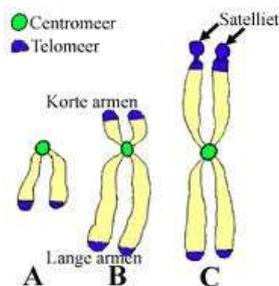
La technique du **banding** par coloration des chromosomes fait apparaître des bandes transversales ce qui améliore la comparaison entre eux permettant de retrouver plus facilement les paires.



La technique du **painting**, fait apparaître des bandes colorées. Cette technique est maintenant automatisée.



Localisation des gènes par colorant fluorescent.



Présence de **satellite** sur certains chromosomes qui présentent un renflement à leur extrémité (ATTENTION ! LEGENDES EN SUEDOIS OU EN MOLDAVO-VALAQUE !

Le nombre de chromosomes

Leur nombre varie d'une espèce à l'autre :

- Le plus petit nombre connu $2n = 2$ chez une fourmi australienne ;
- L'ascaris du cheval (un ver intestinal parasite) : $2n = 2$;
- $2n = 4$ chez 6 espèces de plantes (mais il doit y en avoir d'autres !) ;
- $2n = 46$ chez une pyrole (donc le même nombre que chez l'homme) ;
- $2n = 36$ chez beaucoup d'ophrys ;
- $2n = 40$ chez *Orchis pallens* ;

- $2n = 16$ chez l'ail ;
- $2n =$ environ 1440 chez une fougère du genre *Ophioglossum*, c'est le nombre le plus élevé connu !

Les Cytotypes :

Les plantes **polyploïdes** présentent 3, 4, 5...12 chromosomes homologues et non deux (il n'y a plus de paires de chromosomes homologues mais des trios, des quatuors, etc. ! avec 3 chromosomes homologues, on emploie le terme de **triploïdes** ($2n=3x$ chromosomes), avec 4 de **tétraploïdes** ($2n=4x$ chromosomes), etc. ;

- $2n = 12x =$ maximum connu ;
- Il est possible que l'*Ophioglossum* évoqué plus haut soit un polyploïde ;
- *Gymnadenia conopsea* possède jusqu'à $2n=8x$ chromosomes (donc un cytotype octoploïde) chez certains individus (entre $2n=2x$ et $8x$), ceci sans différences morphologiques détectées ! (inimaginable chez la plupart des animaux !).

Les stomates grandissent avec le degré de ploïdie ($2x, 3x, 4x...$) et pour des espèces *déjà étudiées*, il est théoriquement possible de déterminer le cytotype ($2x, 3x, 4x...$) en mesurant les dimensions des stomates.

Les deux blés les plus cultivés sont des polyploïdes : *Triticum durum* (blé dur), $2n=4x=28$ (un tétraploïde) ;

- *Triticum aestivum* (blé d'été) : $2n=6x=42$ (un hexaploïde) ;

Ce sont des hybrides naturels entre espèces ou même genres différents (on qualifie ces hybrides polyploïdes d'**allopolyploïdes**) qui ont des chromosomes qui proviennent pour moitié d'un blé (genre *Triticum*) et pour l'autre moitié d'un autre genre de graminées (genre *Aegilops*). Dans ce cas, ces hybrides sont fertiles.

La **polyploïdie** peut se former au sein de la même espèce : on emploie alors le terme d'**autopolyploïdes**.

La colchicine bloque les mitoses et est utilisé pour créer des **autotetraploïdes**.

Aneuploïdie : nombre anormal de chromosomes +/- compatible avec la vie chez les espèces animales mais compatibles chez les plantes.

Détermination du sexe chez les plantes :

Chez les végétaux, généralement pas de distinction sexuelle car les plantes sont dans la plupart du temps bisexuées (= hermaphrodites) :

- Sur un même individu : male + femelle, mais dans des fleurs différentes : plante **monoïque** ;
- Mâle et femelle sur des pieds séparés : plantes **dioïques**.

Chez certaines plantes dioïques les pieds femelles sont XX et les pieds mâles XY (par exemple chez *Silene latifolia* et *S. dioica*).

Chez ces plantes à fleurs, le chromosome Y est plus grand que le chromosome X (c'est l'inverse de ce qui s'observe chez les mammifères par exemple) :

Les silènes sont apparus il y a 20 millions d'années environ ; leur chromosome Y n'a pas encore dégénéré, contrairement à celui des mammifères... alors que Les mammifères sont apparus plus tôt, il

Il y a environ 300 millions d'années (le chromosome Y a donc eu le temps d'évoluer, en fait de dégénérer !).

Dans certains cas, c'est la femelle qui présente deux gonosomes différents. Ces derniers se différencient alors comme suit :

- Chez la femelle ZW ;
- Chez le mâle est ZZ.

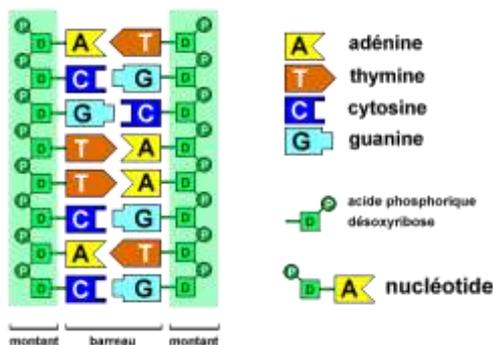
Chez les *Rumex acetosa* et *R. acetosella*, les sexes sont séparés mais avec des gonosomes Y différents : (XX et XY1) et (XX et XY2) respectivement.

La molécule d'ADN est un long filament (à l'échelle des molécules !) de deux nanomètres de large ; elle est enroulée autour de molécules de protéines nommées **histones** qui servent de support et permettent le fonctionnement de certains gènes (activation, blocage...)

Un gène est une partie de la molécule d'ADN responsable de la production d'une protéine. Il se situe toujours au même endroit dans la molécule d'ADN.

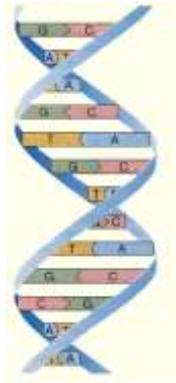
Structure de l'ADN

Ce sont des macromolécules de forme linéaire. Pour l'analyser, il faut la démonter « morceau par morceau » après son extraction.



Des enzymes cassent la molécule. On obtient 6 molécules différentes que l'on peut répartir en trois catégories :

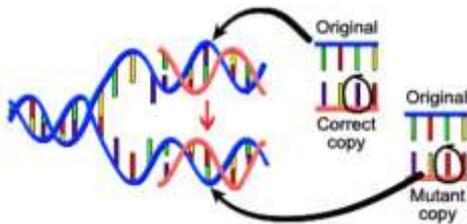
1. l'Acide phosphorique (H_3PO_4)
2. le Désoxyribose (c'est un sucre) $C_5H_{10}O_4$
3. des Bases azotées :
 - ✓ Adénine (A)
 - ✓ Cytosine (C)
 - ✓ Guanine (G)
 - ✓ Thymine (T)



La structure de l'ADN est en forme d'échelle :

- l'acide phosphorique se soude au désoxyribose sur lequel se soude une base azotée : l'ensemble de cette nouvelle structure est nommé un nucléotide. Comme il y a quatre sortes de bases azotées, il y a donc quatre sortes de nucléotides.
- Les deux montants de l'échelle sont reliés par des barreaux formés par deux bases azotées ; les deux bases azotées qui s'unissent ainsi sont toujours les mêmes (quatre possibilités ; ceci dépend uniquement des propriétés chimiques de ces bases) :
AT ; TA ; GC et CG

L'ordre de disposition des bases azotées forme une **séquence**.



Mutation = modification dans la séquence d'un gène

Le séquençage :

Avant le séquençage, les deux brins d'ADN sont séparés par chauffage. Une faible chaleur suffit.



Le processus de séquençage a été mis au point par un anglais, Frederick SANGER qui avait déjà séquencé les protéines dans les années 50.

Le séquençage humain a été réalisé entre 1990 et 2001, et a abouti à un total de 3 milliards de paires de bases azotées pour l'ensemble du génome (= l'ensemble de l'ADN contenu dans le noyau de chaque cellule).

La fin de la décennie 2000 – 2010 a vu l'apparition de nouvelles générations de séquenceurs (les NGS) qui permettent de faire un séquençage humain en environ 3 semaines !

Le séquençage du génome chez les plantes

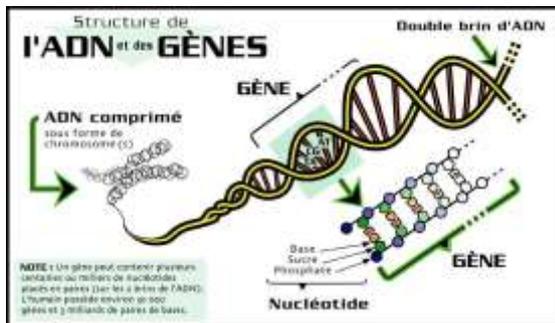


Arabidopsis thaliana (photo) est la plante la plus étudiée, elle fut donc la première séquencée.

Le plus petit génome connu chez les plantes à fleurs se trouve chez une grasette (une plante carnivore) : *Genlisea* plante originaire des Caraïbes, d'Amérique du sud et d'Afrique australe.

Le plus grand génome connu chez les plantes à fleurs se rencontre chez les fritillaires et les parisettes.

Les gènes

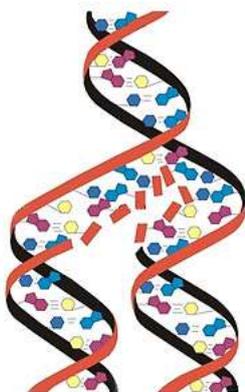


NOTE : Un gène peut comporter plusieurs centaines ou milliers de nucléotides placés en paires (sur les 2 brins de l'ADN). L'humain possède environ 30 000 gènes et 3 milliards de paires de bases.

Les gènes (= portions d'une molécule d'ADN) sont séparés entre eux par des espaces importants de la molécule d'ADN, les **espaceurs** (encore nommés « ADN poubelle », espaceurs qui représentent 95 à 98 % de l'ADN et dont on ignore l'utilité !

Ces espaceurs sont parfois issus d'une partie du génome de virus qui un jour ont pénétré le génome ; certaines séquences de ces espaceurs sont des répétitions multiples de combinaisons de nucléotides. Ils relatent vraisemblablement une part de notre histoire évolutive passée.

Seuls 2,5-5 % environ de l'ADN est donc fonctionnelle (= permettant la production de protéines).



Avant la division cellulaire ou **mitose**, les molécules d'ADN se dédoublent en deux brins (= deux demi-échelles). Puis il se produit une duplication (formation de l'autre brin sur chacun des deux brins issus de la molécule d'ADN initiale).