

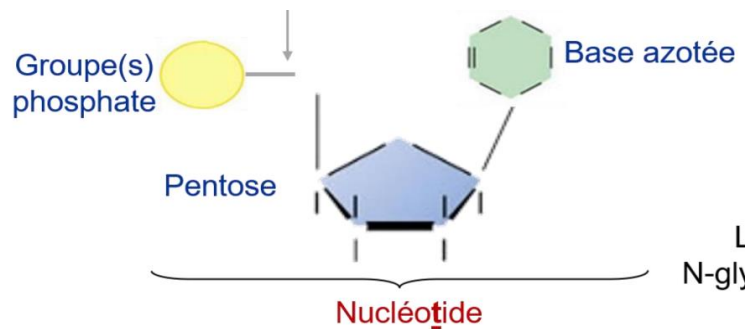
I) Structure des acides nucléiques

Disclaimer : Ceci n'est pas une fiche complète, il s'agit d'une fiche abordant les aspects les plus importants du cours. Et ne vous inquiétez pas face au nombre de pages, les pages sont espacées en fonction des parties et l'écriture est assez grande. Plus les dédis à la fin du cours

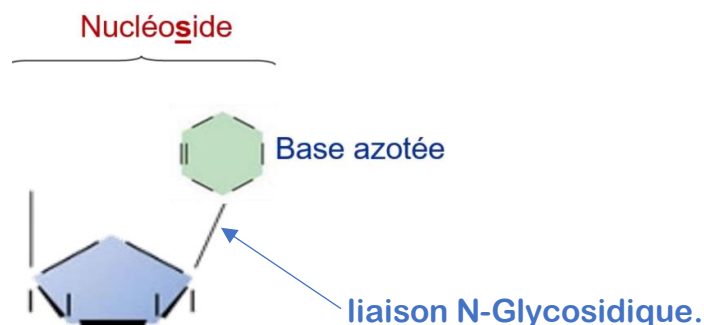
a) Structure primaire des acides nucléiques

Définitions :

- Les acides nucléiques sont constitués de **lettres** : les **nucléotides**
- Chaque **nucléotide** comprend **3 éléments** :
 - 1 à 3 **groupements phosphate**
 - Un **sucré à 5 coté (pentose)**
 - **Base azotée** variable d'un nucléotide à un autre



Lorsqu'un **pentose** est relié à une **base azotée**, cela va former un **nucléoside** : la liaison formée est alors appelée **liaison N-Glycosidique**.

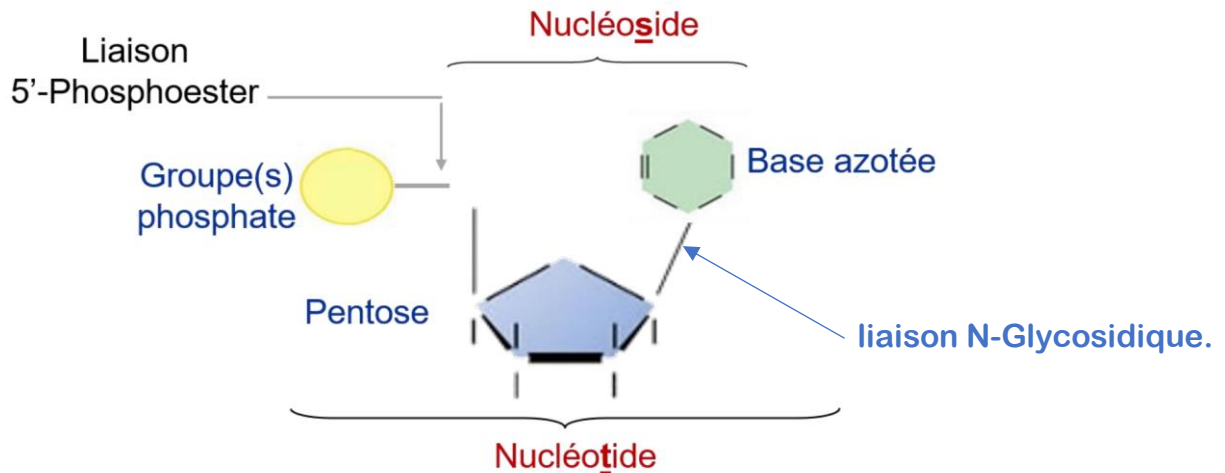


Alerte Piège QCM (merci à mes vieilles pour l'idée) :

- Faites gaffe à pas mélanger **nucléotide** et **nucléoside** c'est bien deux choses différentes.

Mnémono pour vous aider : le **T** dans **nucléotide** ça fait penser à **trois**, donc un nucléotide est constitué de **3 éléments**.

Pour former un **nucléoTide**, le **nucléoSide** se lie à un ou plusieurs **groupements phosphate** par l'intermédiaire d'une **liaison 5'-phosphoester**.



Alerte Piège QCM (encoreeee, désolé mais ça ca tombe vraiment) :

- Faites bien la différence entre les **liaisons** et les **éléments qu'elles impliquent**, après c'est vraiment logique :

Liaison 5'-Phosphoester : Phospho comme phosphate donc c'est la liaison entre le pentose et le(s) groupe(s) phosphate

Liaison N-Glycosidique : N comme Azote (sorry pour les Haters de la chimie) donc ça relie la base azotée au pentose.

b) Base azotée et pentose

Les nucléotides vont différer entre eux par la **base azotée** qui les constituent.

Il existe cinq bases azotées **majeures** se répartissant en **deux groupes** :

1) Les bases azotées puriques (purines) :

Adénine (A), Guanine (G)

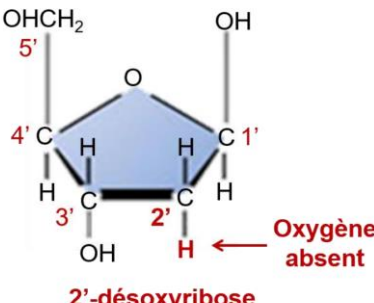
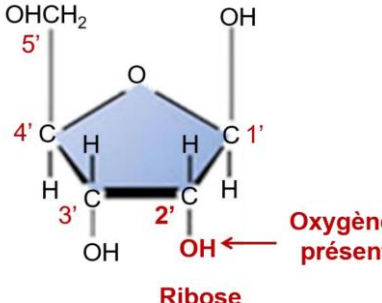
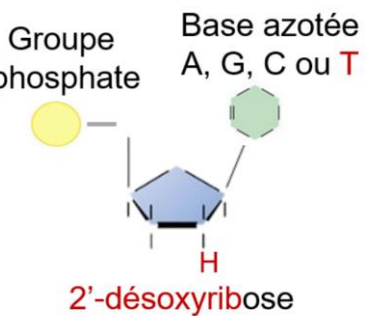
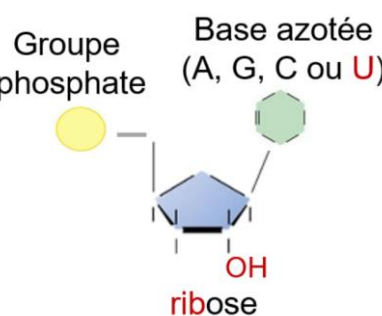
2) Les bases azotées pyrimidiques (pyrimidines) :

Cytosine (C), Thymine (T), Uracile (U)

Sorry mais je remets un mnémo méchants de mes vieux pour retenir les bases azotées puriques : les personnes âgées (comme A et G) puent (comme purines). Et le reste des bases azotées (C, T, U) sont les pyrimidines.



c) Les différences entre les nucléotides constituant l'ADN et l'ARN :

Différences	ADN	ARN
Le pentose	 <p>2'-désoxyribose</p> <p>Le pentose de l'ADN est dénué d'oxygène et c'est la raison pour laquelle on va l'appeler le 2'-désoxyribose</p>	 <p>Ribose</p> <p>Le pentose de l'ARN possède cet oxygène sur le carbone en position 2' on l'appellera tout simplement ribose</p>
Le choix des bases azotées	<p>Désoxyribonucléotide (ADN)</p>  <p>2'-désoxyribose</p> <p>Le choix des bases pour former un désoxyribonucléotide de l'ADN se fera entre : A, G, C ou T</p>	<p>Ribonucléotide (ARN)</p>  <p>ribose</p> <p>Le choix des bases pour former un ribonucléotide de l'ARN se fera entre : A, G, C ou U</p>

Attention :

Ça ne veut pas dire non plus qu'on ne retrouvera pas de Thymine dans l'ARN (au contraire).

En effet, certains ARN (notamment les ARN de transferts) vont pouvoir être constitué de Thymine.



d) La nomenclature :

Bon cette partie à l'air compliquée mais franchement c'est super logique, ne perdez pas trop de temps là-dessus. Je vous ai fait une explication détaillée pour que vous compreniez, mais pas besoin d'apprendre l'explication si vous avez compris.

La nomenclature des **nucléoSides** et des **nucléoTides** dérive du nom des bases qui les constituent.

1) Pour les nucléoSides :

Pour différencier les **nucléoSides puriques** des **nucléoSides pyrimidiques**, il existe une différence au niveau du suffixe :

- **Osine** pour les nucléosides **puriques** (Adénosine, Guanosine)
- **Idine** pour les nucléosides **pyrimidiques** (Cytidine, Thymidine, Uridine)

A noter qu'on rajoutera un (D) entre parenthèse s'il s'agit d'un **déoxynucléoside (ADN)**.

Bases azotée	Nucléoside (ARN) ou déoxynucléoside (ADN)
Purines	
Adénine	(d)Adénosine
Guanine	(d)Guanosine
Pyrimidines	
Cytosine	(d)Cytidine
Thymine	(d)Thymidine
Uracile	Uridine



2) Pour les nucléotides :

Pour différencier les **nucléotides puriques** des **nucléotides pyrimidiques**, il existe une différence au niveau du suffixe :

- **Ylique** pour les nucléosides **puriques**
- **Idylique** pour les nucléosides **pyrimidiques**.

A noter qu'on rajoutera toujours le préfixe **Acide 5'** avant la base azotée pour désigner les **nucléotides** et que s'il s'agit d'un **déoxynucléotide** on rajoutera entre parenthèse **désoxy** juste après Acide 5'.

On précisera s'il s'agit de **nucléotides mono-, di- ou triphosphate**.

Bases azotée	Nucléotide mono-, di-, triphosphate (d)NMP, (d)NDP ou (d)NTP
Purines	
Adénine	Acide 5'-(désoxy)adénylique
Guanine	Acide 5'-(désoxy)guanylique
Pyrimidines	
Cytosine	Acide 5'-(désoxy)cytidylique
Thymine	Acide 5'-(désoxy)thymidylique
Uracile	Acide 5'-uridylique

Le tableau complet de la nomenclature (surtout ça qu'il faut retenir si vous avez compris les explications du haut) :

Bases azotée	Nucléoside (ARN) ou déoxynucléoside (ADN)	Nucléotide mono-, di-, triphosphate (d)NMP, (d)NDP ou (d)NTP
Purines		
Adénine	(d)Adénosine	Acide 5'-(désoxy)adénylique
Guanine	(d)Guanosine	Acide 5'-(désoxy)guanylique
Pyrimidines		
Cytosine	(d)Cytidine	Acide 5'-(désoxy)cytidylique
Thymine	(d)Thymidine	Acide 5'-(désoxy)thymidylique
Uracile	Uridine	Acide 5'-uridylique



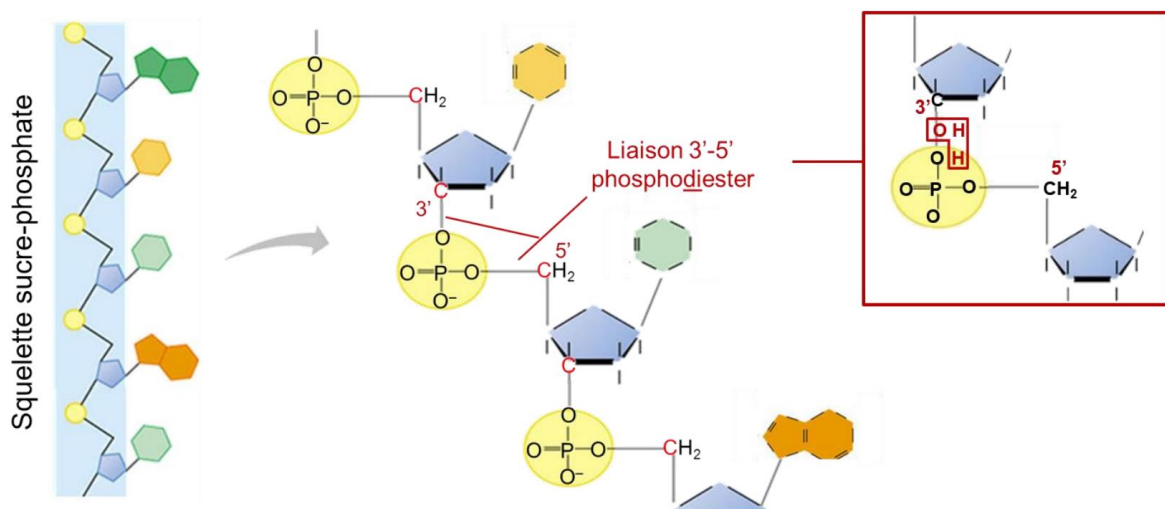
e) ADN et l'ARN forment une suite de lettres

Les **nucléotides** vont être reliés entre eux pour former un **enchaînement** soit un brin **d'ADN**, soit un brin **d'ARN** selon les nucléotides qui sont utilisés.

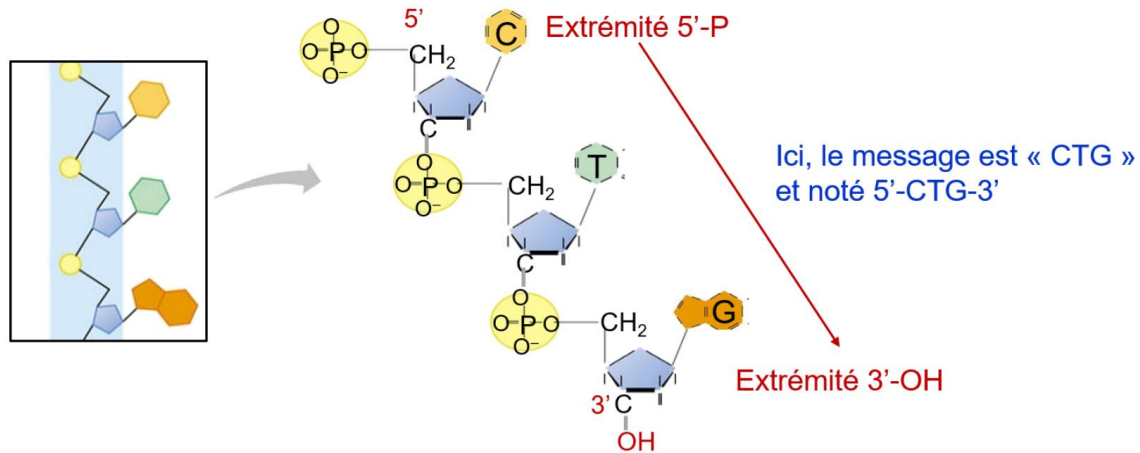
La **liaison** qui va permettre de relier entre eux ces différents nucléotides va être appelée **liaison 3'-5' phosphodiester**.

Cette **liaison** va impliquer la fonction hydroxyle du carbone situé en position **3'** du pentose et la fonction acide du groupe phosphate qui est lié au carbone 5' d'un autre nucléotide.

L'ensemble des **pentoses** reliés par les **groupes phosphate** va former ce qu'on appelle le **squelette sucre-phosphate**.



f) ADN ou ARN ont un sens et sont polarisés



L'extrémité du brin à laquelle on va trouver un **groupement phosphate** qui est **libre et non relié** à un autre nucléotide va être appelée **extrémité 5'-phosphate** et l'extrémité à laquelle se trouve un **groupement OH** qui est libre sera appelé **l'extrémité 3'-OH**.

Ainsi, **l'enchainement variable** des bases le long d'un brin d'ADN ou d'ARN va former un message qui se lira **TOUJOURS** dans le sens **5'-3'**, c'est à dire de **l'extrémité 5'-phosphate libre** vers **l'extrémité 3'-OH libre**.

Dans cet exemple, le message qu'on va lire sera **CTG** et on le notera **5'-CTG-3'**

Structure secondaire de l'ADN

a) Travaux préliminaires (partie un peu plus historique mais super importante)

La structure secondaire de l'ADN a pu être élucidée grâce aux travaux préalables de deux chercheurs :

1) L'étude de la composition en bases de l'ADN par Erwin Chargaff (1950) :

Son étude a révélé des **constantes universelles** dans les proportions respectives des bases.

Quelle que soit l'espèce étudiée :

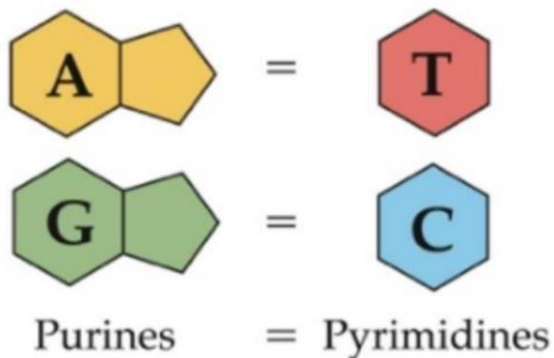
L'ADN contient autant de **l'adénine** que de **thymine** : $A = T$ et $A/T = 1$.

L'ADN contient autant de **guanine** que de **cytosine** : $G = C$ et $G/C = 1$.

Cependant, dans cette étude le rapport $(A+T)/(G+C)$ s'est montré être **spécifique d'une espèce donnée**.

Et ces deux constantes $A=T$ et $G=C$ sont appelées les **règles de Chargaff**.

Règles de Chargaff



2) L'étude de la diffraction des rayons X par l'ADN de Rosalind Franklin (1952)

Cette étude a permis de révéler que :

- l'ADN a une **structure en hélice** ;
- Le **squelette sucre-phosphate** est à l'**extérieur de l'hélice** tandis que les **bases** sont situées à l'**intérieur** ;
- Le **diamètre de l'hélice** est constant : **2 nm**

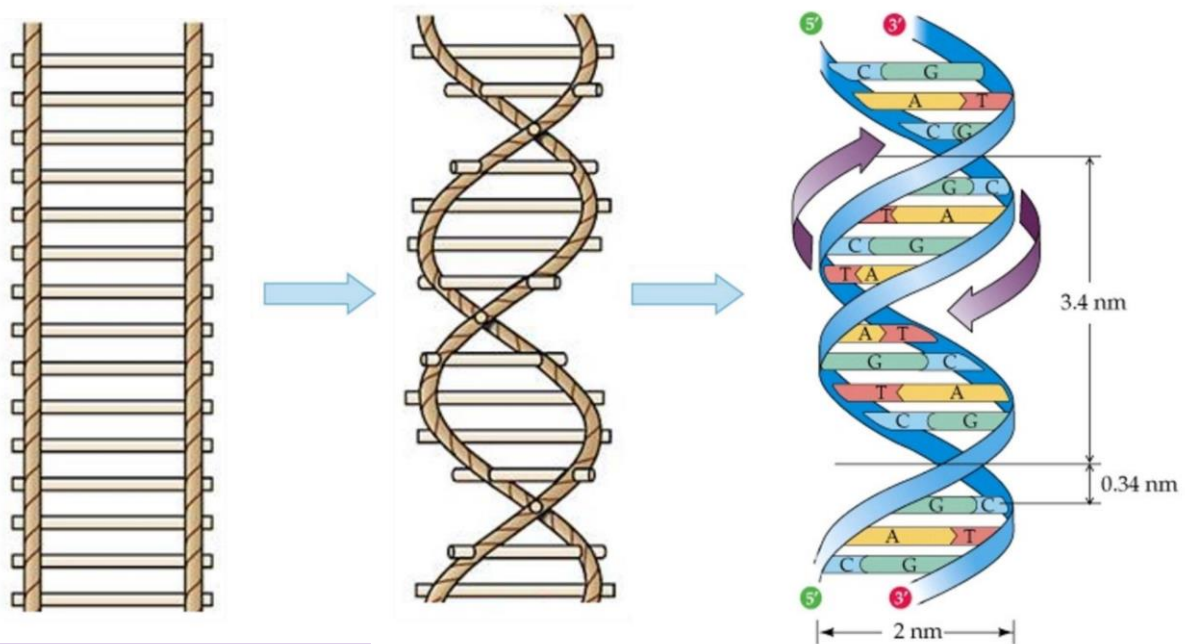
En revanche, **cette étude n'a pas permis de préciser le nombre de brins d'ADN qui forment cette hélice +++++**



C'est à partir de ces 2 travaux préliminaires que les chercheurs **Watson et Crick** ont proposé le **modèle de la double hélice** en 1953 pour décrire la structure secondaire de l'ADN.

3) Le modèle de la double-hélice de Watson et Crick (1953)

Dans ce modèle, ils proposent que deux brins d'ADN vont s'associer entre eux en formant des paires de bases et s'enrouler hélice droite.



On peut comparer l'ADN dans sa structure secondaire à une **échelle** dans laquelle les **montants** représenteraient le **squelette sucre-phosphate** et les **barreaux** représenteraient les paires de bases qui permettent à ces deux brins de **s'associer entre eux**.

Et en faisant subir une **rotation** à cette échelle, on obtient la **représentation de la structure secondaire** de l'ADN qui est montrée ici.

Sur ce schéma, on peut notamment retrouver l'extrémité **5'-phosphate** et l'extrémité **3'-OH** de chacun des brins.

On peut également retrouver le **diamètre de l'hélice**, qui est constant : **2 nanomètres**.

Chaque **tour d'hélice** va être d'une longueur de **3,4 nanomètres** et les **paires de bases** vont être distantes entre elles de **0,34 nanomètre**.

Watson et Crick vont s'appuyer sur les travaux précédents pour proposer un **principe fondamental** qui est le **principe de complémentarité des bases**.

C'est ce principe qui va permettre **aux deux brins d'ADN** de s'associer entre eux.

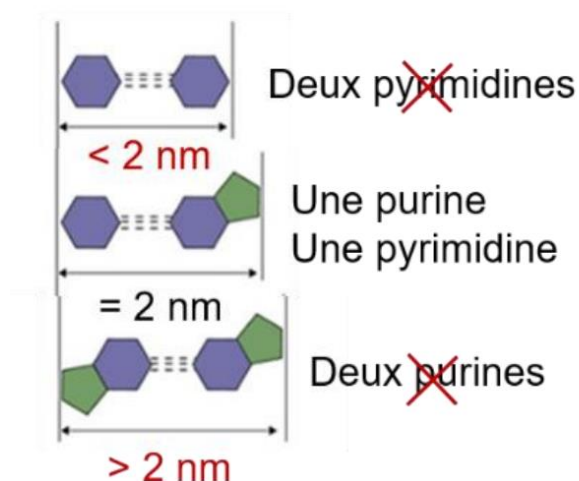
Ce principe postule que **les bases ne vont pas s'associer de façon aléatoire entre elles pour former des paires de bases**.

En effet, pour obtenir un diamètre de l'hélice de **2 nanomètres**, une **purine** va **TOUJOURS** s'associer à une **pyrimidine**.

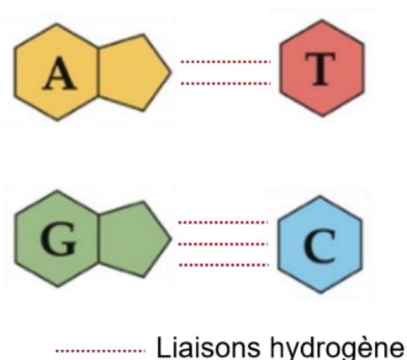
En effet, d'après la structure des **pyrimidines**, en associant entre elles deux **pyrimidines**, on obtiendrait un diamètre de l'hélice **inférieur à 2 nanomètres**.

En associant entre elles deux **purines**, on obtiendrait cette fois ci un diamètre de l'hélice qui **serait supérieur à 2 nanomètres**.

Ce n'est qu'en associant une **purine** avec une **pyrimidine** qu'on obtiendra le **diamètre correct de l'hélice, à savoir 2 nanomètres**.



De plus, d'après **les règles de Chargaff**, **A=T** et **G=C**, **l'adénine** devra s'apparier obligatoirement avec la **thymine** et la **guanine** avec la **cytosine**.

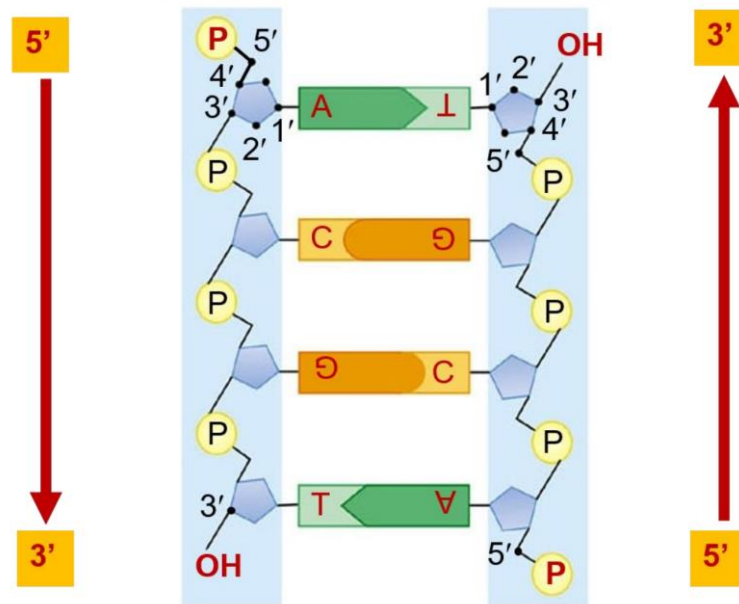


On voit sur cette représentation des paires de bases qui vont se former que **l'adénine** va s'apparier avec la **thymine** par l'intermédiaire de **deux liaisons hydrogène** et la **guanine** va s'apparier avec la **cytosine** par l'intermédiaire de **trois liaisons hydrogène**.

L'intérêt majeur du **modèle de Watson et Crick** a été de confirmer **que l'ADN est la molécule (substrat biochimique) de l'hérédité**.

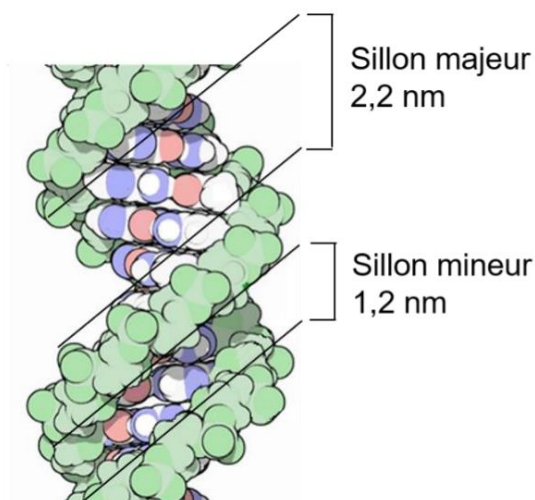
b) Le principe des brins antiparallèles

Une caractéristique de la **double hélice** va être que les brins qui la constituent sont **orientés en sens inverse**. On dira qu'ils sont **antiparallèles**. Dans la molécule d'**ADN**, lorsque l'on a sur un brin l'**extrémité 5'**, on aura toujours en regard l'**extrémité 3'** (et inversement).



c) La double hélice d'ADN est une structure non homogène

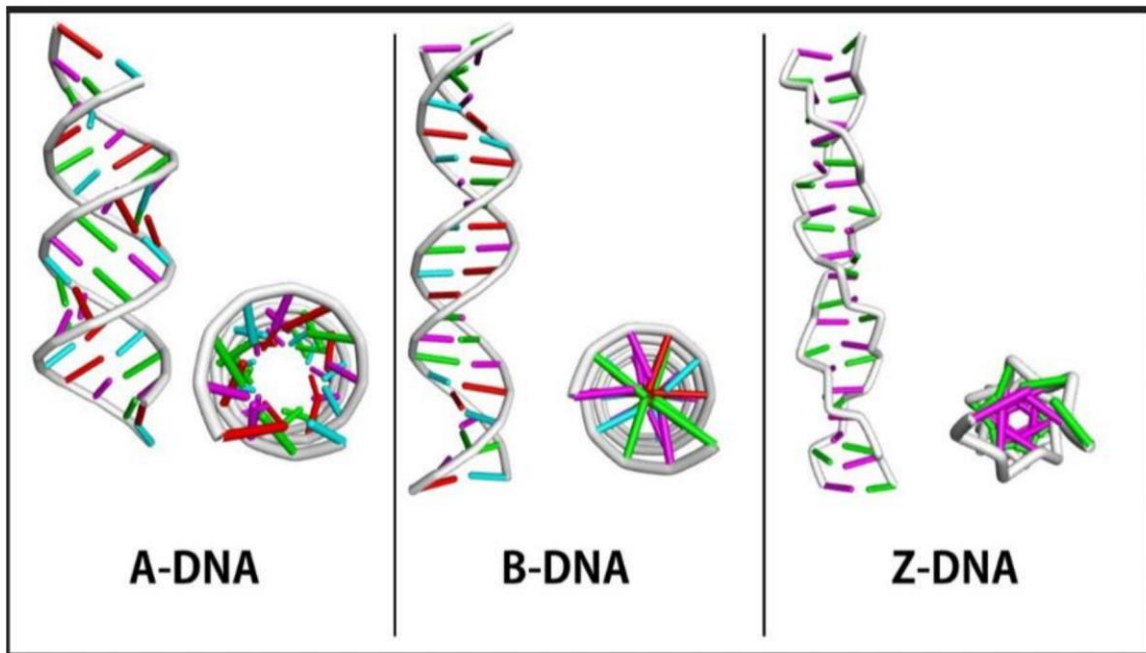
Une caractéristique de la **double hélice d'ADN** est que sa structure n'est **pas homogène**. En effet, elle va présenter ce qu'on appelle des **sillons** au niveau desquels les **bases sont exposées**, ces **bases** pouvant alors établir avec d'autres molécules des **interactions diverses**.



On va ainsi distinguer un **sillon majeur** dont la largeur est de **2,2 nanomètres** et un **sillon mineur** dont la largeur est de **1,2 nanomètres**.

d) La structure tertiaire de l'ADN

L'ADN va pouvoir adopter **trois formes différentes** dans sa structure tertiaire : les conformations **A, B et Z**.



Ces trois conformations vont **différer entre elles**, selon **quatre aspects** :

- **Le sens d'enroulement de l'hélice**
- **Hélice droite ou gauche**
- **La longueur d'un tour d'hélice**
- **Le nombre de paires de bases par tour d'hélice et les différences de taille des sillons majeur et mineur.**

Et l'adoption de l'une ou l'autre de ces **conformations** va dépendre de **deux paramètres** :

- **L'état d'hydratation**
- **la présence de sel.**

La **conformation B** représente la structure décrite par **Watson et Crick** et qui est la **plus abondante dans la cellule**.

e) Structure quaternaire de l'ADN

Des **protéines** peuvent s'associer à l'ADN **au niveau des sillons** et en particulier les **histones** sont des protéines qui vont pouvoir interagir avec l'ADN au niveau du **sillon mineur**. Ces interactions très importantes vont **permettre de moduler la compaction de l'ADN selon différents niveaux**. (no worries on voit la compaction dans quelques instants).

f) Structure de l'ARN

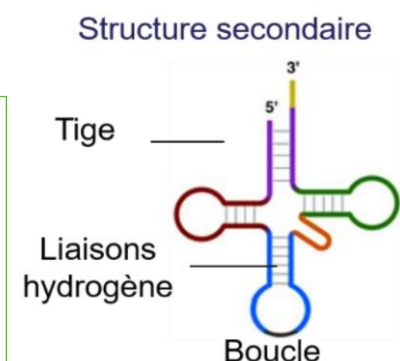
Concernant la **structure primaire de l'ARN** celle-ci ressemble de très près à celle de l'**ADN**. Mais comme nous l'avons vu, au niveau du **pentose**, il existe au niveau de carbone 2' un groupement **OH** et ce groupement **OH** du ribose va lui conférer **des propriétés propres**.

Il pourra également être **donneur ou accepteur d'hydrogène** et former des **liaisons hydrogène** qui sont impliquées dans la formation de la structure **secondaire, tertiaire et quaternaire** des **différents sous-types d'ARN** (la structure des ARN étant très variée).

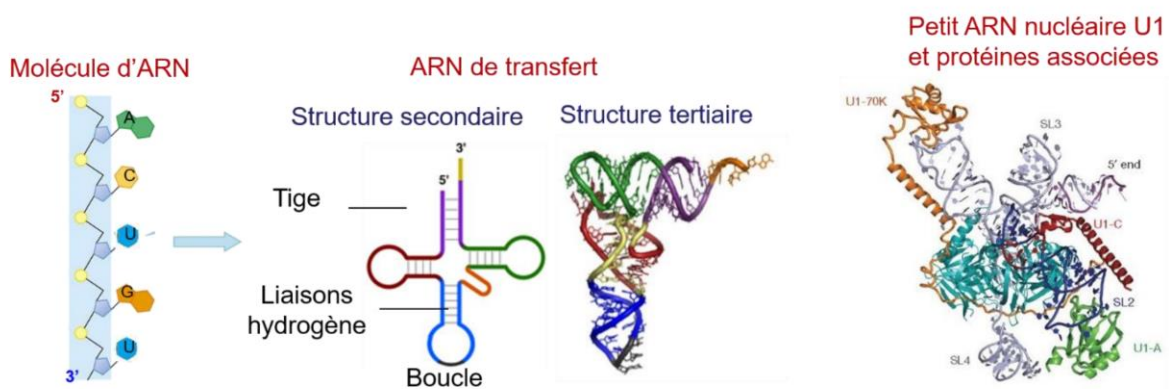
Il faut vraiment bien retenir **qu'une molécule d'ARN** n'est formée que **d'un seul brin de ribonucléotides ++++++**, contrairement à la molécule **d'ADN** qui, elle, est formée de **deux brins reliés entre eux**.

Le brin qui constitue **une molécule d'ARN** va pouvoir se **replier sur lui-même** par appariement intramoléculaire de bases complémentaires pour former par exemple de façon localisée une **hélice (duplex d'ARN)** de caractéristiques différentes de celle de la double hélice d'ADN.

Finalement, les **ARNs** vont pouvoir contenir des **régions qui sont appariées** qu'on va appeler des **tiges** et d'autres **régions non appariées** et qui vont former des **boucles**.

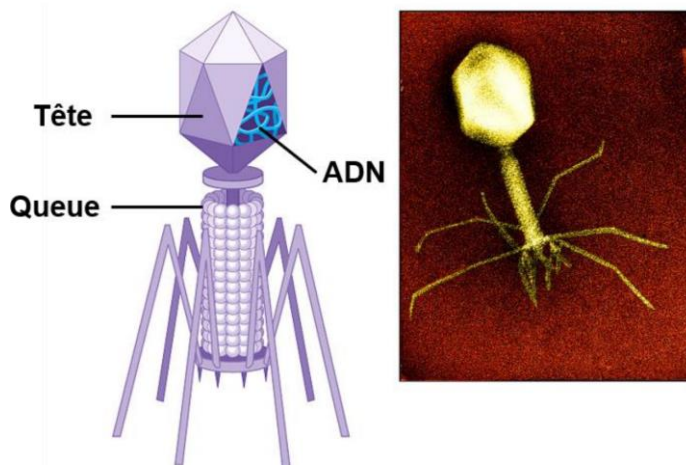


L'ensemble de **combinaisons de tiges et de boucles** va pouvoir former des structures tertiaires et quaternaires **très complexes** associées à des **protéines**.



II) Organisation et compaction du génome

a) L'organisation du génome viral



Les virus ne sont généralement **pas considérés comme des organismes vivants**, même s'ils possèdent un génome.

En effet, ce sont des **parasites cellulaires** qui sont **incapables de réplication autonome**.

Concernant leur **génome**, ses caractéristiques sont **variables selon les espèces de virus** :

- Il peut être constitué **d'ADN (simple brin ou double brin)**
- Il peut être constitué **d'ARN simple brin (rétrovirus)**.
- Il peut être formé d'une **unique molécule ou peut être segmentée (génome en pièce)**.
- Il peut être **linéaire ou circulaire**.

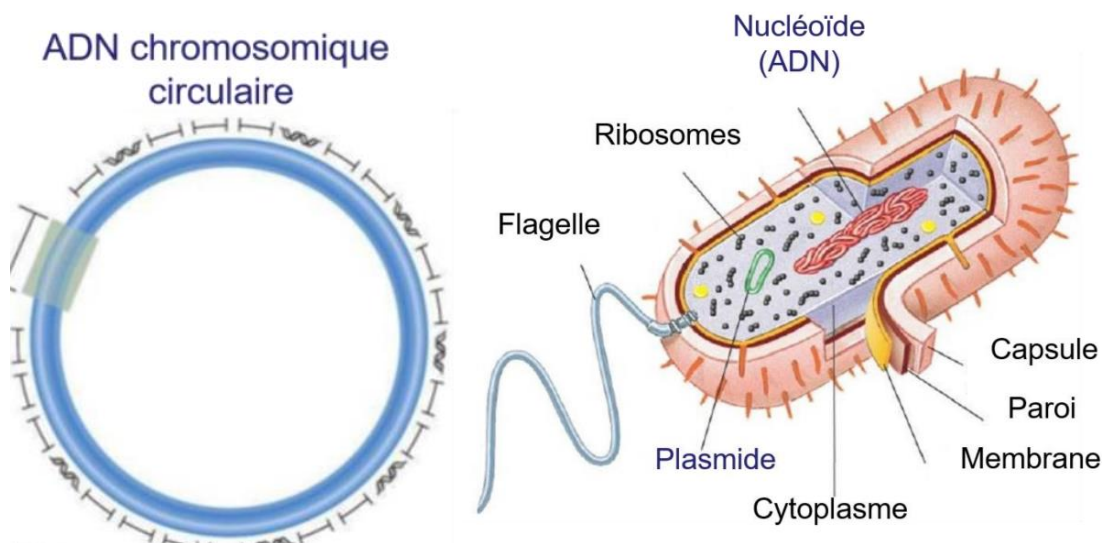
D'une façon générale, ce génome va être contenu dans une **capside protéique sans organisation particulière**.

b) L'organisation du génome procaryote

Concernant l'organisation du génome de **procaryotes**, les **bactéries** sont bien des organismes considérés comme **vivants**, puisqu'elles sont **capables de répliquer leur ADN**.

Les **bactéries** ne **possèdent pas de noyau** et leur génome est organisé par une **structure lâche** qu'on appelle le **nucléoïde**.

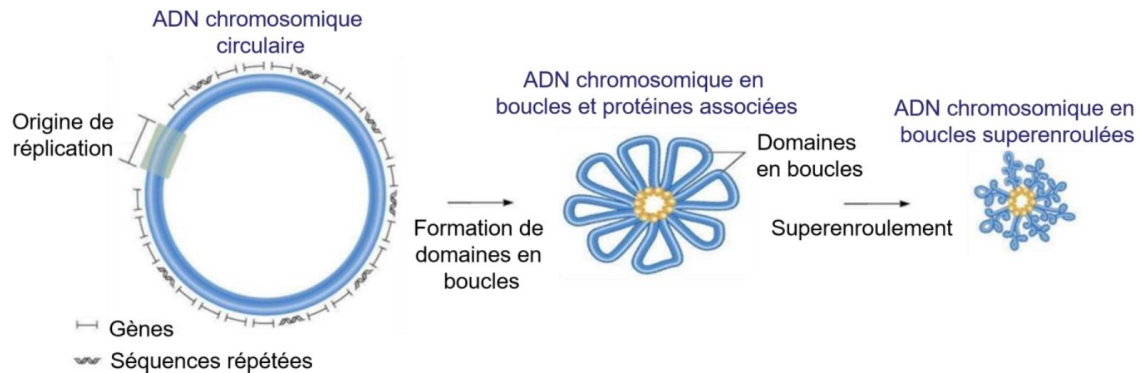
Elles possèdent **un unique chromosome** qui est circulaire et formé **d'ADN double brin**.



Par ailleurs, les **bactéries** peuvent posséder **une ou plusieurs molécules d'ADN accessoire** qu'on appelle des **plasmides**.

Ces **plasmides** peuvent contenir certains **gènes**, comme notamment des **gènes de résistance aux antibiotiques**.

c) Compaction du génome procaryote



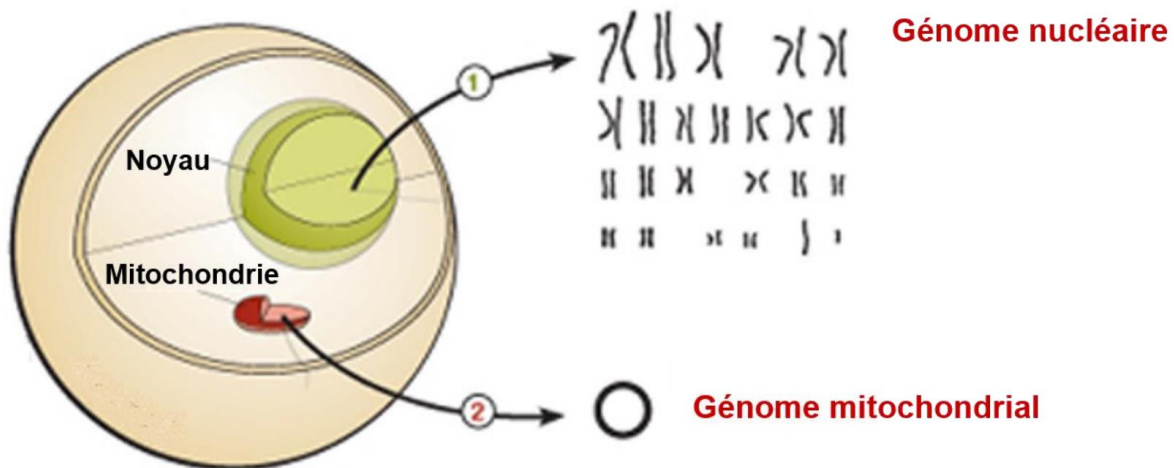
Sur ce schéma, nous voyons le **contenu d'un ADN chromosomique** avec une **origine de réplication** qui va être importante pour la **duplication de l'ADN**, puis **différents gènes** qui sont interrompus par des **régions d'ADN non codantes** constituées de séquences **répétées**.

Le **chromosome des bactéries** va pouvoir être sous une forme **relâchée** ou **compacté** par **deux mécanismes successifs (comme sur le schéma)** :

- 1) La formation des domaines en boucle associés à des protéines
- 2) Et le super enroulement de ces boucles.

d) Organisation du génome eucaryote

Les **eucaryotes** sont des êtres qui peuvent être **uni ou multicellulaires**.

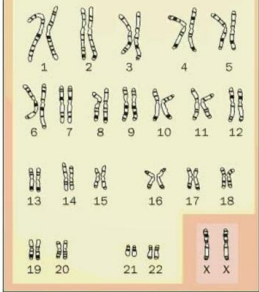
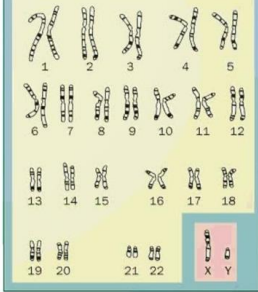
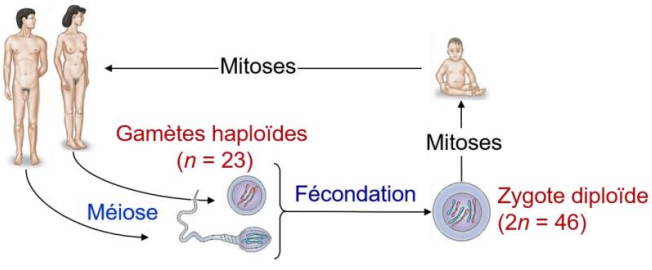


Le génome eucaryote a une **double origine** :

- **Le génome nucléaire** : les cellules eucaryotes possèdent bien un véritable **noyau** qui contient de l'**ADN double brin** qui est **segmenté** sous la forme de **chromosomes linéaires** et **associé à des protéines**.
- **Le génome mitochondrial** : les cellules eucaryotes possèdent également des **mitochondries** qui contiennent **leur propre génome+++** lui aussi constitué d'**ADN double brin** mais formant **un unique chromosome circulaire** qui est apparenté à celui des bactéries.

e) Pléidie des cellules eucaryotes

Les cellules eucaryotes humaines sont de deux types et ont des pléidies différentes :

Les cellules somatiques : diploïdes car elles possèdent deux jeux de chromosomes	Les cellules gamétiques : haploïdes car elles ne possèdent qu'un seul jeu de chromosome
<ul style="list-style-type: none"> - Les chromosomes des cellules somatiques sont quasi identiques deux par deux et vont former des paires de chromosomes qu'on appelle homologues. - Ces cellules possèdent $2n=46$ chromosomes avec n étant égal à 23 paires chez l'homme. - Dans chacune des paires de chromosomes homologues un chromosome est hérité du père et un autre est hérité de la mère. - On va distinguer 22 paires d'autosomes et une paire de gonosomes (XX chez la femme, XY chez l'homme). <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Caryotype humain féminin</p>  <p>Autosomes Gonosomes</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Caryotype humain masculin</p>  <p>Autosomes Gonosomes</p> </div> </div>	<ul style="list-style-type: none"> - Les gamètes sont formés à partir de cellules diploïdes grâce au processus de méiose (mécanisme permettant de réduire de moitié le nombre de chromosomes). - les spermatozoïdes et les ovocytes ne posséderont plus qu'un seul chromosome de chaque paire de chromosomes homologues (soit maternelle, soit paternelle). - Ils ne possèdent alors plus que $n=23$ chromosomes, à savoir 22 autosomes et 1 gonosome (X ou Y). - La fécondation permet de reformer une cellule diploïde : le zygote. <div style="text-align: center;">  <p>Mitoses</p> <p>Gamètes haploïdes ($n = 23$)</p> <p>Méiose</p> <p>Fécondation</p> <p>Zygote diploïde ($2n = 46$)</p> </div>

Attention :

cellules germinales (diploïdes) \neq cellules sexuelles (=gamètes haploïdes)



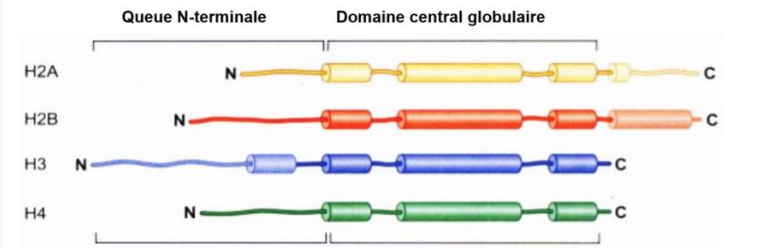
f) La compaction du génome eucaryote

L'ADN dans une cellule **eucaryote** existe sous **différents niveaux de compaction**, et notamment les **chromosomes** qui constituent le **niveau maximal de compaction de l'ADN**.

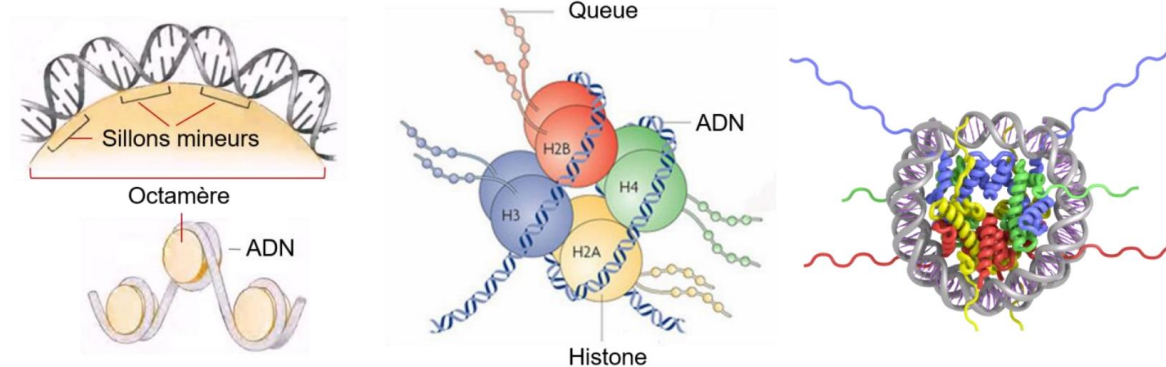
Cette compaction va remplir de multiples **fonctions** :

- **Stockage** de l'ADN dans le noyau
- **Protéger** l'ADN contre d'éventuels dommages
- Être indispensable pour sa **transmission** correcte durant la division cellulaire
- Permettre une **organisation** qui va faciliter **l'expression** des gènes.

La compaction de l'ADN va faire intervenir de nombreuses **protéines** et les protéines qu'on appelle **histones** sont celles qui vont **initier le processus de compaction**.

Les Histones forment une famille	
Principaux Membres	H1, H2A, H2B, H3 et H4
Structure	<p>Leur structure commune comprend :</p>  <ul style="list-style-type: none"> - domaine globulaire central - extrémité N-terminale variable appelée queue des histones (dont les modifs régulent la compaction de l'ADN) - Protéines riches en acides aminés basiques (ex : lysine et arginine) dont la charge positive va faciliter l'interaction avec l'ADN (chargé négativement de part de la présence des groupements phosphate).

1) Initiation du processus de compaction :



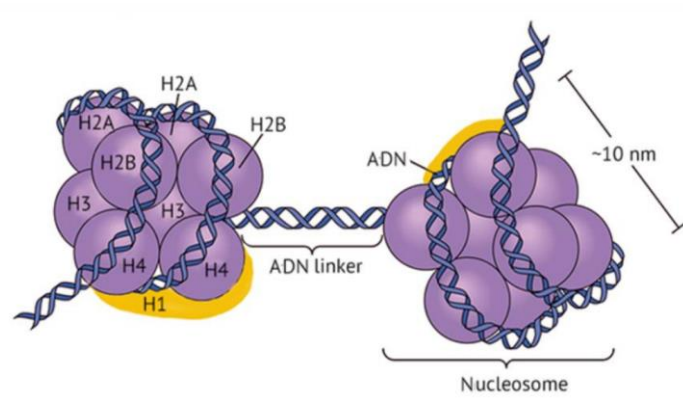
Pour initier le processus de compaction, les histones **H2A, H2B, H3 et H4** (**PAS H1 attention**) vont tout d'abord s'associer entre elles **deux par deux** (en paires), comme on peut le voir sur le schéma pour former un **cœur protéique globulaire**.

Ce **cœur protéique** va donc être constitué de **huit molécules histones** et sera pour cette raison appelée **octamère**.

À **l'extérieur** de ce cœur protéique, va se trouver la **queue N-terminale** variable des histones. Et c'est **autour de ce cœur protéique** que l'ADN va venir **s'enrouler** (tout en faisant deux tours) pour son **premier niveau de compaction**.

On voit sur le schéma que l'interaction de **l'ADN avec un octamère d'histones** se fait par l'intermédiaire des **sillons mineurs de l'ADN**.

2) Le 1^{er} niveau de compaction : La fibre de chromatine de 10nm de diamètre.



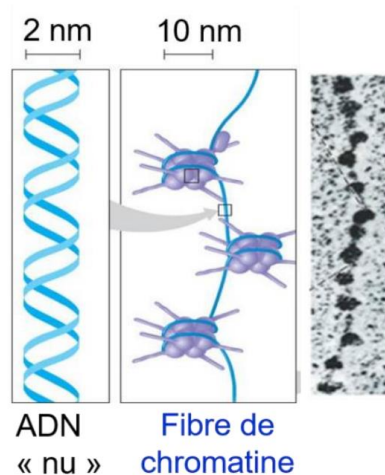
L'ADN enroulé autour de l'octamère va former l'unité de base qu'on appelle un **nucléosome**.

A ce **nucléosome** va se rajouter une autre molécule d'**histone**, l'**histone H1** qui va permettre de **stabiliser l'ensemble**.

Petit Aparté : L'Histone H1 n'intervient donc pas directement dans ce premier niveau de compaction, comme elle joue uniquement un rôle de stabilisation, et pas de protéine compactrice.

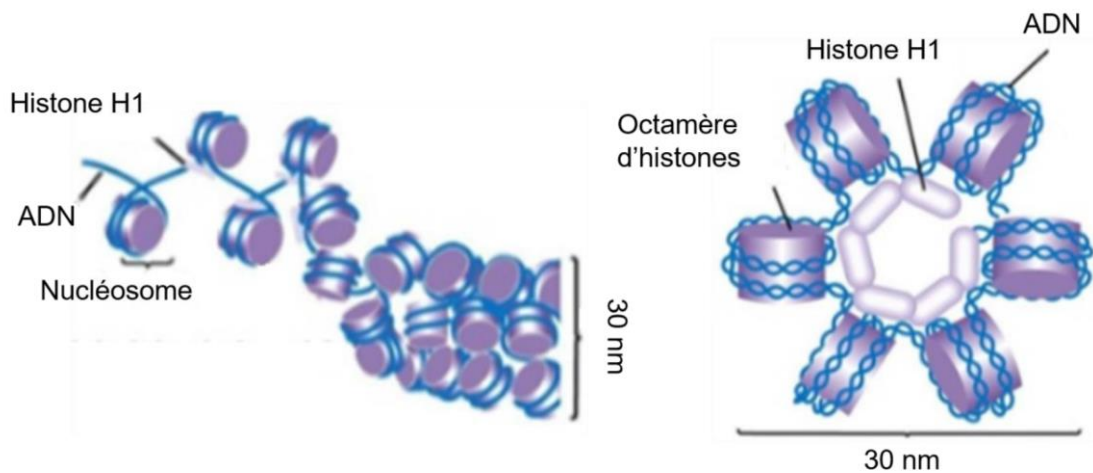
Et les différents nucléosomes vont être reliés entre eux par de l'**ADN qui reste nu** et qui est appelé **ADN linker**.

Le diamètre d'un nucléosome ainsi formé va être de **10 nanomètres** et cet **ensemble de nucléosomes** reliés entre eux par l'**ADN linker** va former une **structure en collier de perles** qu'on appelle la **fibre de chromatine**.



Cela correspond donc au **premier niveau de compaction** permettant de passer de l'**ADN nu**, qui possède un diamètre de **2 nanomètres**, à la **fibre de chromatine** dont le diamètre est de **10 nanomètres**.

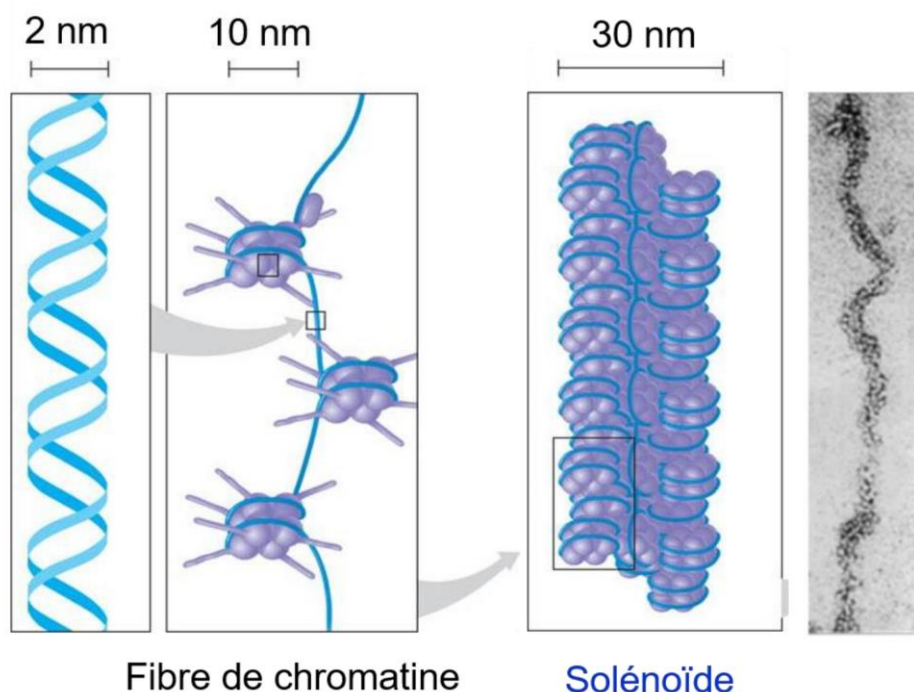
3) Le 2^{ème} niveau de compaction : Le solénoïde de 30nm de diamètre



La **compaction** va ensuite poursuivre lorsque la **fibre de chromatine** va à son tour **s'enrouler en une hélice**.

Ce nouvel **enroulement** va faire intervenir les **monomères d'histone H1** qui sont **associés aux nucléosomes**. (c'est vraiment à ce niveau que les monomères d'histone H1 interviennent donc dans le processus de compaction).

Ces différents **monomères** vont interagir **ensemble** et **s'enrouler en une hélice**, pour que l'ensemble forme une **fibre de 30 nanomètres de diamètre** qu'on appelle le **solénoïde**.



On est donc passé de la **fibre de chromatine** de 10 nanomètres de diamètre au **Solénoïde** de 30 nanomètres de diamètre.

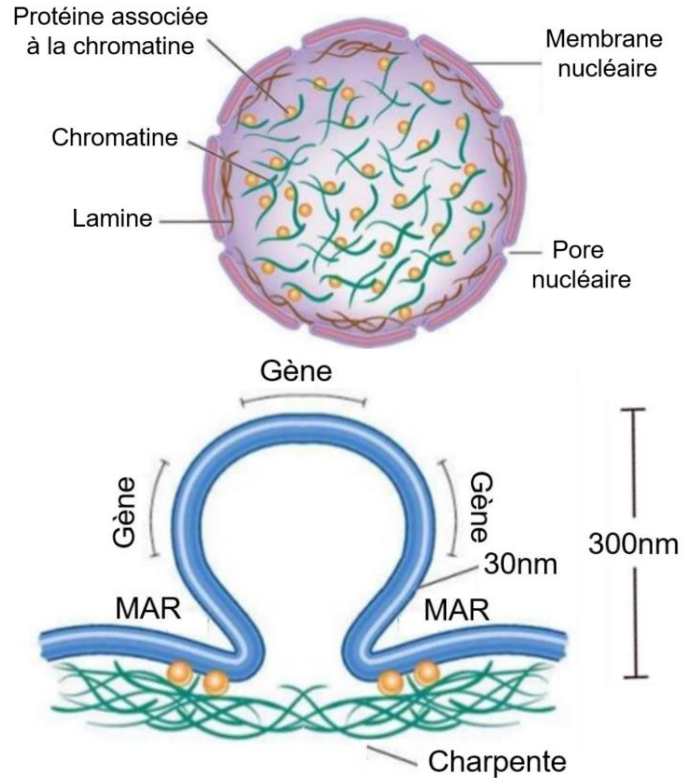
4) Le 3^{ème} niveau de compaction : L'euchromatine de 300 nm de diamètre

Pour atteindre cet état, le **solénoïde** va venir former des **boucles amarrées** (accrochées, attachées) sur une **charpente protéique**.

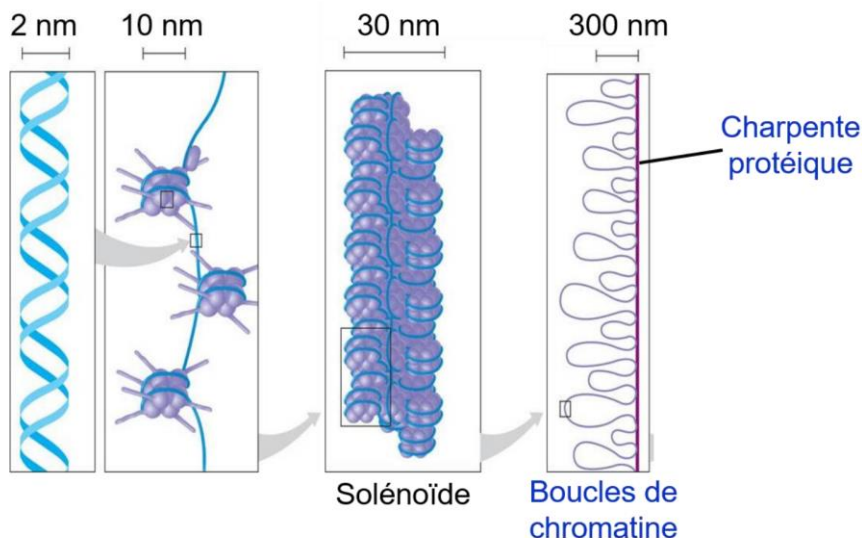
Cette étape de compaction va faire intervenir **deux types de protéines**, la **lamine** (accolée à la face interne de la membrane nucléaire) et des **protéines de la matrice nucléaire** qui sont associées à la **chromatine**.

Ces **protéines** sont associées à la chromatine au niveau de **séquences d'ADN particulières** qu'on appelle les **séquences MAR** pour **Matrix Attachment Regions**.

Pour former ces **boucles**, les protéines qui sont associées à la chromatine au niveau des **séquences MAR** vont se fixer à la **lamine** et entraîner la **formation de domaines en boucle**.



L'intérêt de ces **domaines en boucles** est qu'ils vont permettre **d'isoler les gènes** qui sont contenus dans la boucle d'éventuels **éléments régulateurs** qui seraient situés **en dehors de cette boucle**.



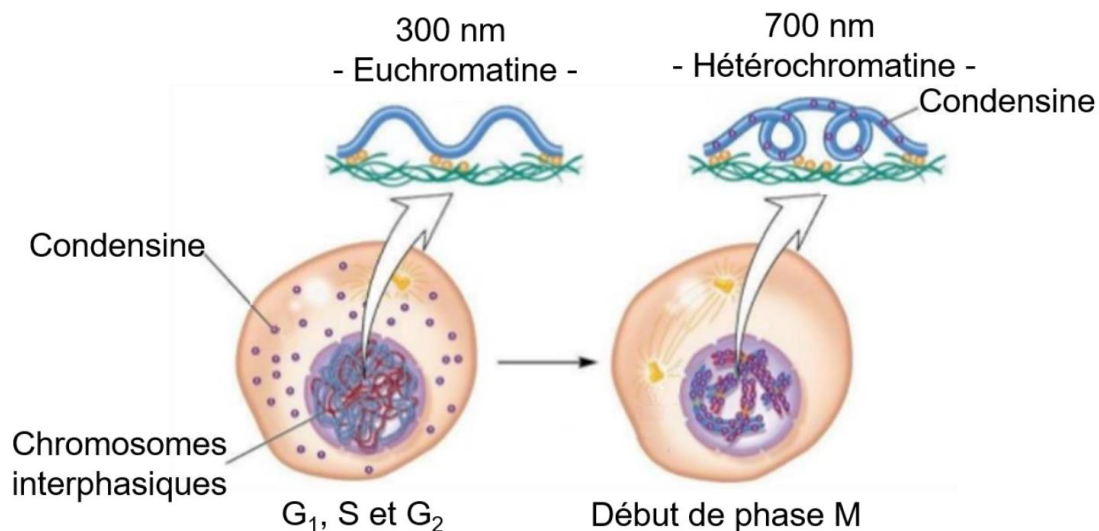
Au final, ce **niveau de compaction** supérieur va donner à l'ensemble de la structure un **diamètre de 300 nanomètres**.

5) Le 4^{ème} et dernier niveau de compaction : Hétérochromatine de 700 nm de diamètre

Le **dernier niveau** possible de compaction de l'ADN va former ce qu'on appelle l'**hétérochromatine**. C'est à partir de cette hétérochromatine que sont formés les **chromosomes**.

Cette compaction va dépendre d'une protéine qu'on appelle la **condensine**.

En début de mitose, cette condensine rejoint le noyau, va venir **s'associer aux domaines en boucle de l'euchromatine** et induire une compaction supplémentaire de ces domaines pour former l'**hétérochromatine** dont le diamètre est de **700 nanomètres**.

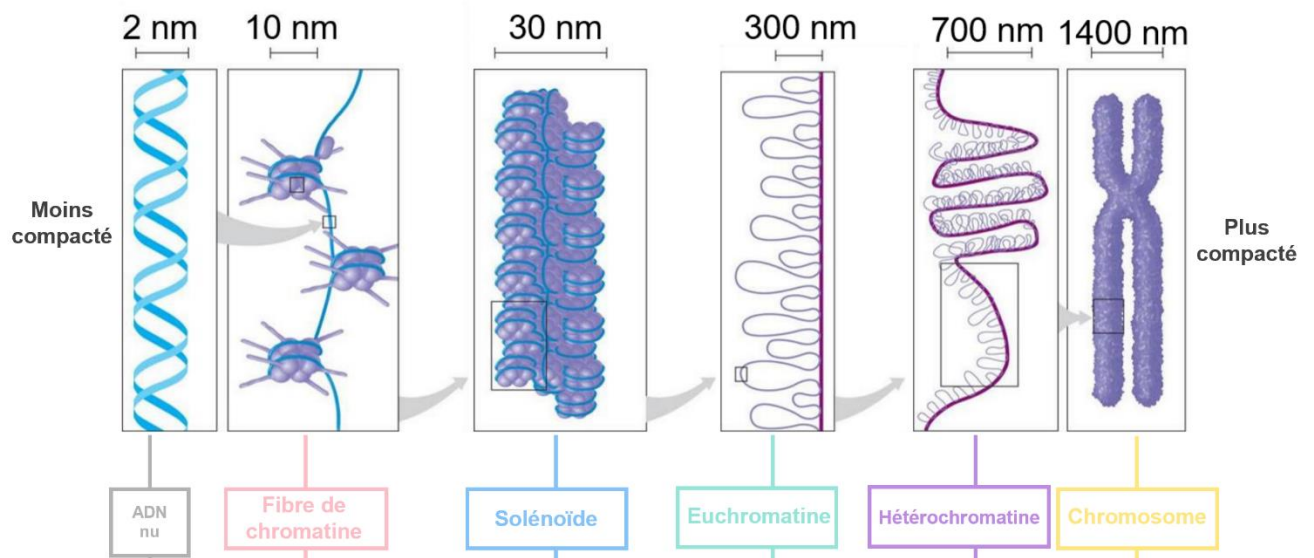


Les **chromosomes interphasiques** (G₁, S, G₂) sont situés dans le noyau sous la forme d'**euchromatine** dont le diamètre est de **300 nanomètres** et la **condensine** est quant à elle située dans le **cytosol**.

Et cette **hétérochromatine de 700 nanomètres** est ce qui constitue la **chromatide** d'un **chromosome**.

Lorsqu'un **chromosome** sera constitué de **deux chromatides**, son diamètre final sera de **1400 nanomètres**.

Voici un Maxi'Récap pour que tu retiennes le plus important :



La compaction de l'ADN repose sur 4 niveaux de compaction successifs :

1^{er} niveau : Fibre de chromatine de 10 nm de diamètre issu de l'association des différents nucléosomes par l'ADN linker

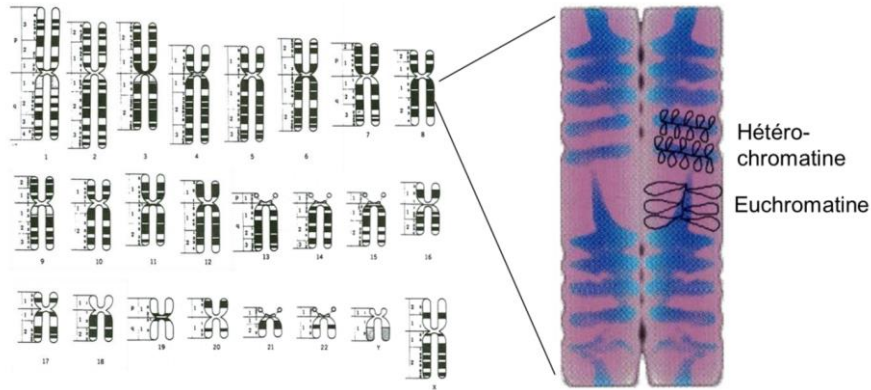
2^{ème} niveau : Solénoïde de 30 nm de diamètre issu de l'enroulement de la fibre de chromatine en une hélice grâce à l'histone H1

3^{ème} niveau : Euchromatine de 300 nm de diamètre issu de de l'attachement du Solénoïde sur une charpente protéique formant des boucles

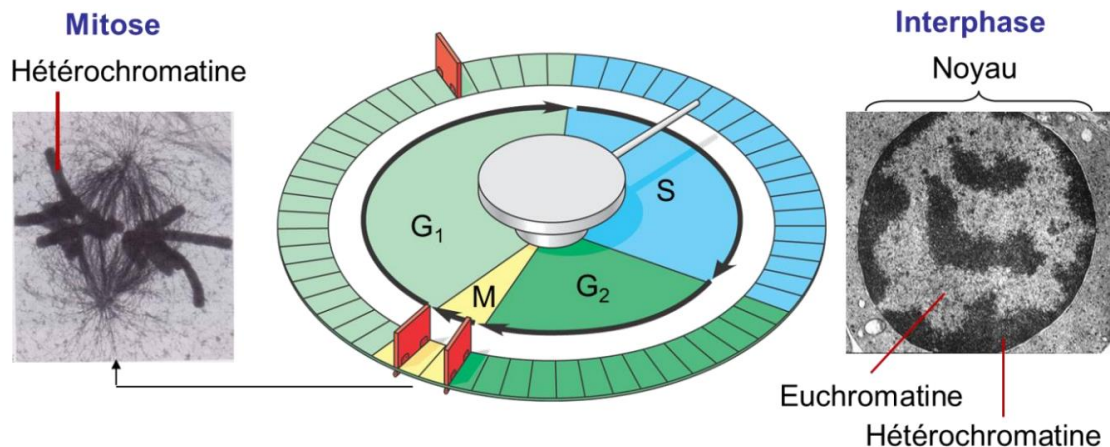
4^{ème} niveau : Hétérochromatine de 700 nm de diamètre issu de la compaction supplémentaire des domaines en boucles de l'euchromatine grâce à la condensine

g) En réalité, les chromosomes sont constitués d'une alternance de régions hétérochromatiques et euchromatiques.

Cette **alternance** peut être directement mise en évidence sur le **caryotype** après **coloration des chromosomes**, cette coloration faisant apparaître une **alternance de zones sombres** qui correspondent à de l'**hétérochromatine** et de zones plus claires qui correspondent à de l'**euchromatine**.



h) La compaction de l'ADN est variable au cours du cycle cellulaire



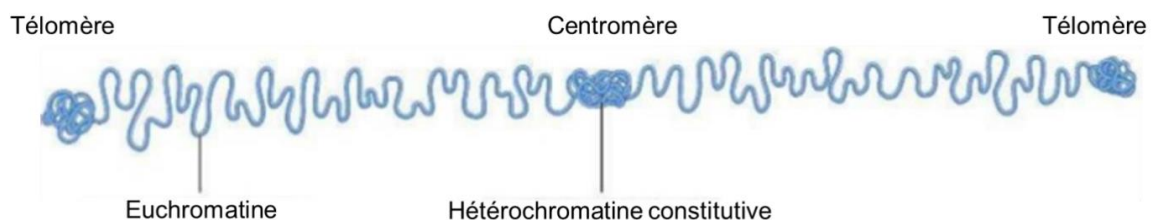
Stade du Cycle Cellulaire	Phase M	Interphase (G1, S, G2)
Niveau de compaction	Hétérochromatine	Euchromatine
Expression des gènes	Répressive (inaccessible)	Permissive (accessible)
Localisation	Périphérie du noyau (Hétérochromatine)	Millieu du noyau (Euchromatine)

i) Certaines régions de chromosomes vont en permanence rester sous forme compacté

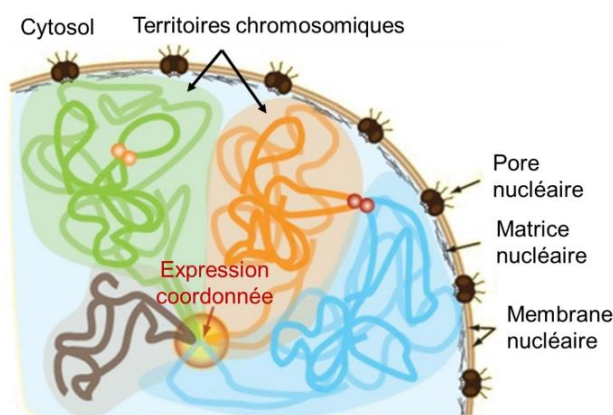
Ces régions sont formées d'hétérochromatine qui est dite **constitutive** par opposition à l'hétérochromatine **facultative** des régions dans la compaction va pouvoir **varier** entre l'interphase et la mitose.

La particularité de ces régions formées d'hétérochromatine **constitutive** est qu'elles sont constituées de **séquences d'ADN très répétées ++** et qu'elles ne **contiennent pas de gènes++++**.

Ces régions d'hétérochromatine **constitutive** vont jouer un rôle **structural**, comme par exemple les **centromères** qui maintiennent la cohésion des chromatides ou encore les **télomères** qui vont protéger l'extrémité des chromosomes.



j) L'organisation spatiale du génome n'est pas aléatoire



Durant l'**interphase**, chaque chromosome va occuper un **territoire défini dans le noyau**.

Cette **organisation spatiale** va permettre de faciliter l'**expression coordonnée** de gènes qui sont impliqués dans une **même fonction**, mais situés sur les **chromosomes différents**.

C'est fini pour cette partie assez longue concernant la structure des acides nucléiques ainsi que l'organisation et la compaction du génome chez procaryote et eucaryote.

Malheureusement ce n'est pas la fin, on termine sur une partie concernant la réplication, je te promets c'est easy, je crois en toi et je sais que tu vas réussir 😊

Prends une petite pause pour recharger tes batteries, et prépare-toi à kiffer ce cours parce que la biomol c'est que de la kiffance. 😄😄😄😄😄😄😄

III) La réplication de l'ADN

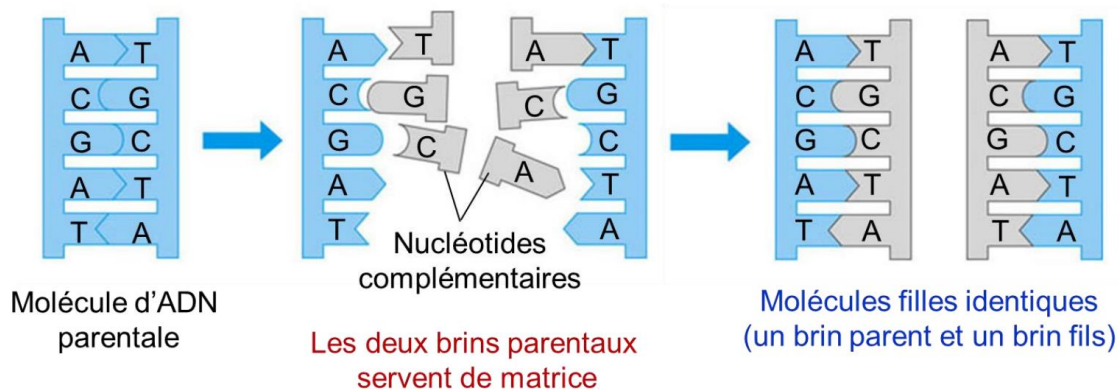
a) Définition

La **réplication de l'ADN** est un processus qui va permettre la **transmission du génome aux générations suivantes**.

Chez les **procaryotes et les eucaryotes**, le principe général de la réplication est **similaire**. Elle va reposer sur le **principe de complémentarité des bases** et aboutir à **deux nouvelles molécules** qui vont être ensuite réparties entre **deux cellules génétiquement identiques** entre elles.

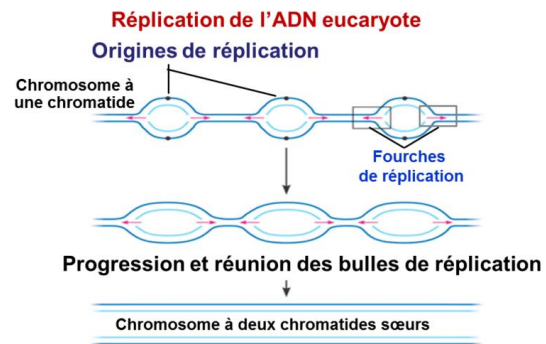
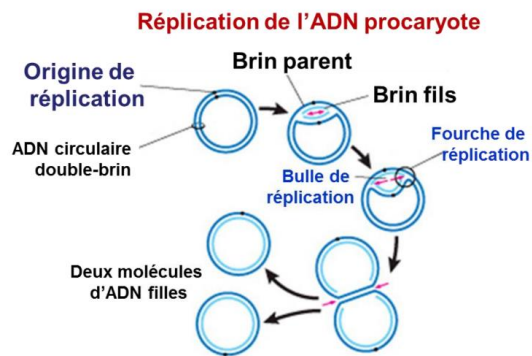
Les caractéristiques de la réplication :

- Elle va débuter au niveau **d'origines de réplication** qui sont situées sur le ou les **chromosomes**.
- Elle va nécessiter **l'ouverture de la double hélice** et la formation de **bulles** et de **fourches de réplication**.
- Elle va devoir respecter **l'orientation** des brins et nécessiter un **amorçage**.
- Elle va comprendre **trois phases d'initiation, d'élongation et de terminaison**.
- Elle va également comprendre des **phases de vérification de l'ADN** et, si besoin sa **réparation** afin d'assurer la **fidélité** du processus.



La réplication va être un **processus semi-conservatif+++++++**.

En effet, **chaque brin** de l'ADN parental va servir de **matrice** pour synthétiser un **brin fils** et chaque **nouvelle molécule** qui va être synthétisée va comprendre à la fois **un brin parental et un brin fils**. C'est ce que l'on appelle la **semi-conservativité**.

b) La réplication est similaire entre procaryote et eucaryote :

Chez les **eucaryotes** la réplication mène à la formation d'un **chromosome** qui va être **constitué de deux chromatides sœurs**.

c) Les 3 étapes de la réplication

1) La phase d'initiation :

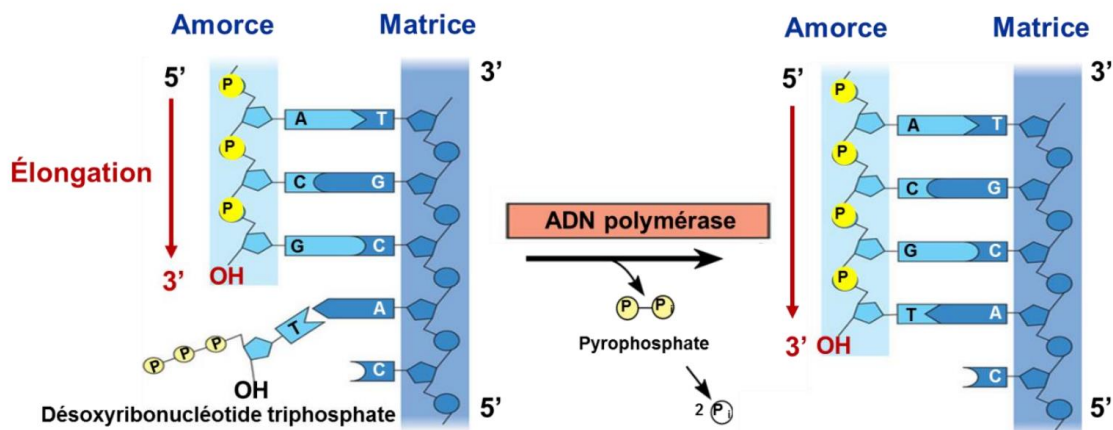
La phase d'initiation va correspondre à l'ouverture de la double hélice au niveau d'une ou plusieurs origines de réplication (plusieurs chez les eucaryotes) assurée par une enzyme : l'hélicase.

Au niveau de ces origines, donc, la double hélice va être ouverte et former ce qu'on appelle une bulle de réplication.

Chacune de ces bulles de réplication va comprendre à ses deux extrémités ce que l'on appelle une fourche de réplication.

C'est à partir de ces fourches de réplication que la réplication va progresser de façon bidirectionnelle++++++.

2) La phase d'élongation



Cette phase d'élongation va correspondre au début de la synthèse des brins fils après l'ouverture de la double hélice au niveau des origines de réplication.

Ce processus va être assuré par une enzyme qu'on appelle une ADN polymérase.

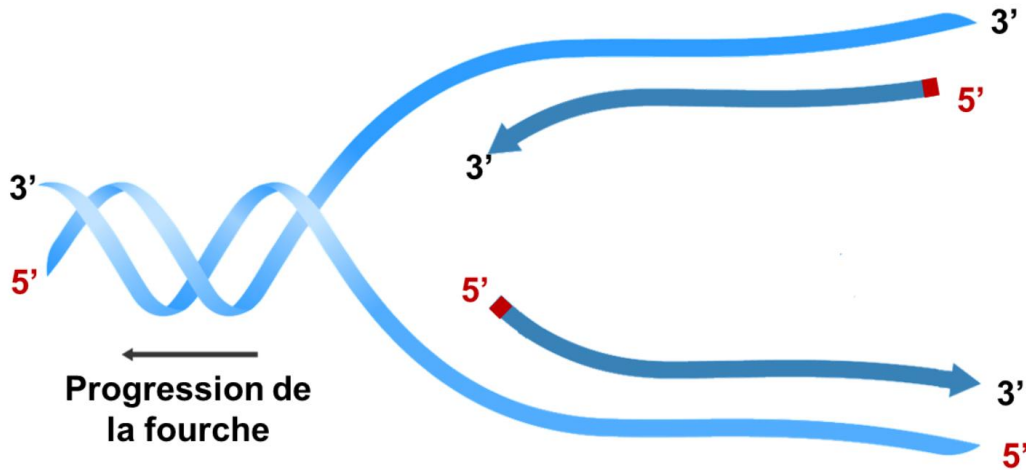
Cette enzyme va utiliser des désoxyribonucléotides triphosphate (DNTPs) qui seront complémentaires du brin parent, qu'on appelle également le brin matrice, pour synthétiser le nouveau brin fils en respectant la polarité de ce brin, c'est à dire dans le sens 5'-3'.

La particularité de cette étape de synthèse est que l'enzyme va devoir nécessiter ce qu'on appelle une amorce pour pouvoir débuter.

Cette amorce va en effet fournir une extrémité 3'-OH à laquelle elle va ajouter un à un les différents nucléotides qui sont complémentaires du brin matrice.

C'est une autre enzyme qu'on appelle une **primase**, qui va synthétiser cette courte amorce **complémentaire** du brin matrice sous la forme **d'ARN+++++** (ça tombe piège)

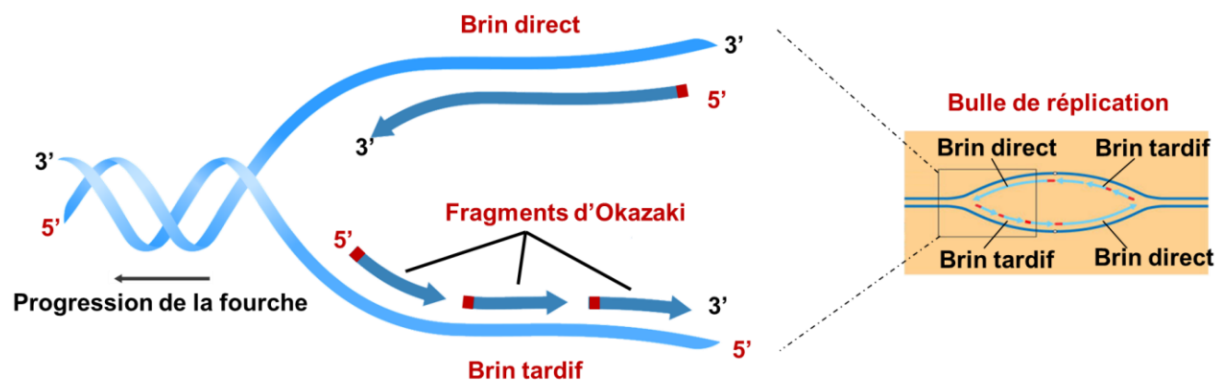
Détails du processus d'élongation au niveau des fourches :



Le processus d'élongation est un peu plus **complexe** que les autres comme il doit respecter **2 contraintes** :

- 1) Les brins de l'hélice sont **antiparallèles+++** (l'extrémité 5' correspond à l'extrémité 3' de l'autre brin et vice-versa).
- 2) L'élongation ne peut se faire que dans le **sens 5'-3'**. Chaque brin parent va donc être **répliqué** dans une direction **opposée** par rapport au **sens de progression de la fourche**.

En pratique, du fait de ces contraintes, la réplication d'une fourche va être **asymétrique, semi-discontinue et rétrograde+++++++** (ça vraiment vous le gardez dans un coin de votre tête c'est super important).



Il existe comme on vient de le voir un brin qui va être **synthétisé dans le sens de progression de la fourche**, et ce brin va être appelé **brin direct**.

Ce brin va pouvoir être synthétisé en **continu** à partir d'une **seule et unique amorce** qui aura été fabriquée par la **primase** au niveau de **l'origine de réplication**.

L'autre brin va être synthétisé dans le **sens opposé à la progression de la fourche** et sera appelé **le brin tardif**. Ce brin va devoir être synthétisé de façon **discontinue** et **rétrograde** en fragments qu'on appelle des fragments d'**Okazaki**, et ce, à partir de **multiples d'amorces**.

Ainsi donc, entre le **brin direct** et le **brin tardif**, la réplication va être **asymétrique**.

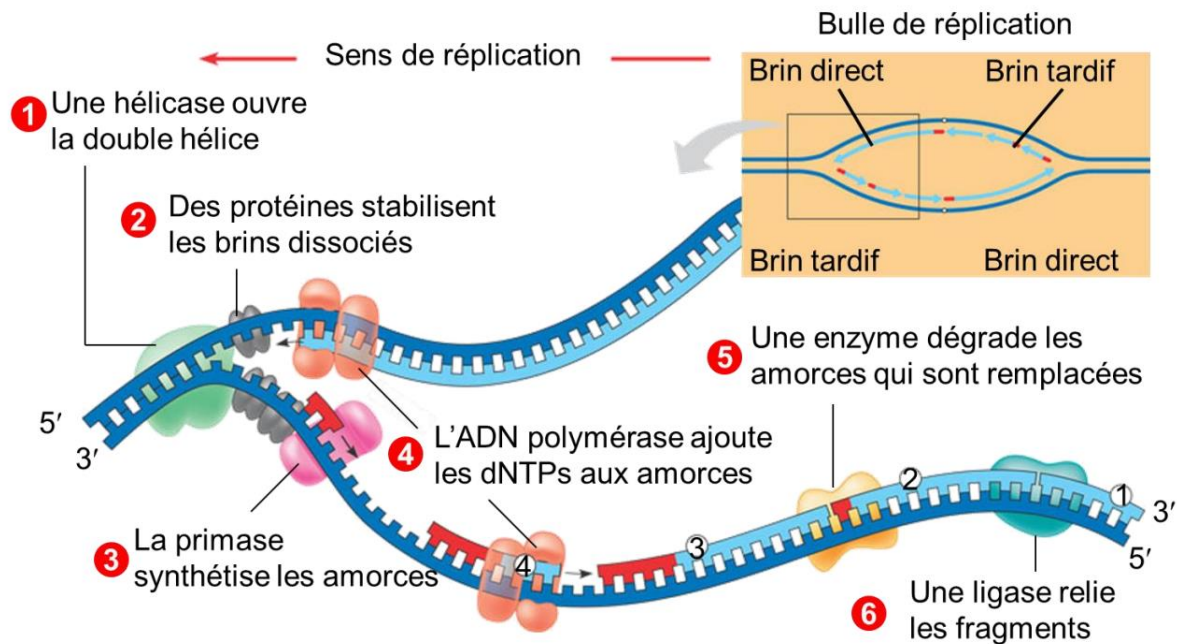
Ce qu'il faut noter, c'est que la situation va être **inversée entre les deux fourches d'une bulle de réplication**. Étant donné que ces fourches de réplication progressent dans **deux directions opposées**, le **brin direct** d'une fourche va devenir le **brin tardif** de l'autre et inversement.

3) La phase de terminaison

Une fois que les différents fragments d'**Okazaki** vont être **synthétisés**, à leur jonction, une **enzyme** va venir **dégrader les amorces** qui sont constituées d'**ARN**.

Celles-ci vont être ensuite remplacées par de **l'ADN** par une **ADN polymérase**. Et une fois que le brin tardif ne sera constitué que de **fragments d'ADN**, une **ligase** va venir les relier entre eux pour que le brin fils soit **ininterrompu**.

Récap de la réplication :



Initiation :

- 1) Ouverture de la double hélice : réalisée par une enzyme : l'hélicase.
- 2) Ensuite, des protéines vont venir s'associer aux brins parents pour éviter qu'ils ne se réassocient immédiatement.
- 3) Puis la primase va venir synthétiser les amorces qui sont indispensables à l'élongation.

Elongation :

- 4) L'ADN polymérase va donc pouvoir commencer le processus de synthèse des brins fils à partir de l'extrémité 3'-OH fournie par ces amorces.
- 5) Au niveau du brin direct, cette synthèse va se faire en continu à partir d'une seule et unique amorce et au niveau du brin tardif, cette synthèse va se faire de façon semi-discontinue et rétrograde.

Terminaison :

- 6) Une fois que les différents fragments d'Okazaki vont être synthétisés, à leur jonction, une enzyme va venir dégrader les amorces qui sont constituées d'ARN. Celles-ci vont être ensuite remplacées par de l'ADN par une ADN polymérase.
- 7) Et une fois que le brin tardif ne sera constitué que de fragments d'ADN, une ligase va venir les relier entre eux pour que le brin fils soit ininterrompu.

Sachez que j'ai attendu toute ma P1 (PASS + LAS2) pour écrire les dédis :

- Dédi à ma famille et à ma mère surtout (merci d'avoir été là pour nous durant ces deux années)
- Dédi à toute la promo de la LAS2 (celle de l'année dernière et celle de cette année), vous êtes des combattants soyez fière de vous peu importe l'issue de votre année
- Dédi aux LAS2 SV 2022-2023 je vous aime trop et je suis trop fière de vous parce que vous avez tenu jusqu'au bout. Je vous souhaite que le bien pour votre avenir
- Dédi au groupe 1 et au groupe 2 de la License
- Dédi aux merveilleuses rencontres que j'ai pu faire cette année : JP, Aurélio, Louisa, Aleyna, Jeanne (Kilian je te connais depuis l'année dernière)
- Dédi à Killian, ce BG qui nous quitte pour devenir le plus grand et meilleur pharmacien (tu me donneras des médicaments quand je serai en pls)
- Dédi à nos séances de révisions, séances QCM, et tous nos appels
- Dédi aux tuteurs de mon année primant (vous aurez toujours une place dans mon cœur, sachez-le)
- Dédi aux tuteurs de l'année dernière, même si je n'ai pas été trop proche de vous j'ai rencontré certains d'entre vous et vous êtes trop cool (cc Lisa et Juliette)
- Dédi aux Chefs Tuts qui font un Job de ouf malgré la charge de la D1, je vous aime trop, vous êtes mes modèles, j'espère devenir comme vous 1 jour
- Dédi aux tut's de cette année, je vous kiff de ouf et j'ai trop hâte de mieux vous connaître
- Dédi à l'équipe anat G je vous aime trop aussi
- Dédi à ma co-tut d'amour Pauline (t'as intérêt à te rétablir au plus vite)
- Dédi au patinage artistique et au club NBAA
- Dédi à tous mes potes du patin : Lola et Kelly (mes BFF), Thaison, Mael, Quentin
- Dédi à la L2 Bio et ses profs exceptionnels (Mme. García notamment)
- Dédi aux plantes (parce que j'ai découvert ce que c'était en L2 de bio)
- Dédi aux TP de bio de la L2 (surtout du S2) qui étaient incroyables et qui ont fait ressortir mon côté scientifique
- Dédi à vous les P1, vous avez fait un choix de taré et je sais que vous réussirez (ne vous négligez pas pls, croyez en vous parce que vous êtes les meilleurs)
- Dédi au grand livre des powers soins (si seulement je t'avais découvert au début de ma P1)
- Dédi à ma voyance à travers les cartes uno
- Dédi à Carla, Olivia, Marie-Sarah et à notre dernière soirée incroyable
- Dédi à Adèle Holterbach (ma nouvelle youtubeuse préf)
- Dédi à mes BeReal et à la fréquence très variable de ceux-ci
- Dédi à au compte qui est fan de moi
- Dédi à Point B (j'y suis parti toute l'année après le patin)
- Dédi à tous les animés qui m'ont accompagné ces deux années
- Dédi aux nocturnes à la patinoire (mon anti-stress)



- Dédi à Aela, tu me manques trop (snouf) t'as intérêt à rejoindre le club cette année
- Dédi à la Pologne (c'est un état qui existe) et à sa capitale Valrose City
- Dédi à Katharina Barchatta Baboushka
- Dédi à mes vieux et à toute ma dynastie (vous êtes les meilleurs)
- Dédi à toutes les filières médicales
- Dédi au meilleur chocolat chaud du distributeur (chocolat viennois)
- Dédi à Sarah (qui a gratté une dédi)
- Dédi à moi (parce que je ne sais pas comment j'ai fait pour arriver ici aujourd'hui)
- Dédi à dédi parce que les dédi c'est dédi dans mon dédi
- Dédi à mes soirées Roblox (parce que c'était trop amusant)
- Dédi à tous les fous rires que j'ai eu cette année
- Dédi au nombre incomptable de fois où je suis parti au musée océanographique de Monaco
- Dédi à Charles Leclerc parce que pourquoi pas
- Dédi à Jiafei (queen de la c-pop)
- Dédi à mes futur pioux
- Dédi à mes futur fillots (officieux)
- Dédi à la fin de cette dédi parce que j'ai plus d'inspi
- Dédi à la team d'origine (très controversée)
- Dédi à Lola, merci d'avoir été là dans les moments où j'étais le plus bas, merci de m'avoir accompagné et de m'avoir fais rire, merci de m'avoir corriger quand je faisais du n'importe quoi dans mes sauts, merci de m'avoir appris le saut de valse, merci de répondre quand je t'harcèle de vidéo tiktok, merci de prendre le train avec moi, merci pour les édits que tu m'as fait (c'est grâce à elle que vous avez les magnifiques photo de la tut), merci d'être là.
- Dédi aux photos qu'il y aura juste après cette (très) longue dédi de ma LAS2 SV





