

LES VIRUS

Un virus est une particule contenant **une information génétique protégée – de petite taille** – capable de pénétrer dans une cellule vivante et de s'exprimer pour se faire reproduire.

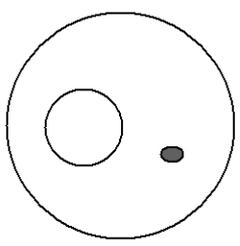
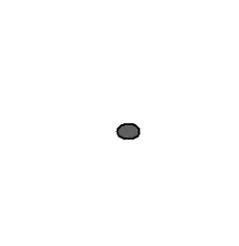
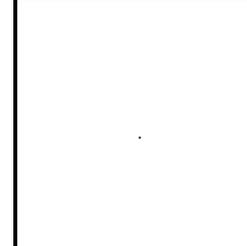
Un virus se présente donc sous deux formes :

1. une forme **extracellulaire** : le **virion** (la particule virale).
2. une forme **intracellulaire** variable.

Pour se reproduire, un virus doit introduire son matériel génétique dans une cellule et **c'est la cellule qui multiplie le virus** :

1. le virion se fixe à la surface d'une cellule vivante et introduit son génome dans le cytoplasme,
2. le génome est libéré de la protection,
3. la cellule réplique le génome viral,
4. la cellule synthétise les protéines virales,
5. les pièces détachées – génomes et protéines virales – **fabriquées par la cellule**, s'assemblent,
6. les nouveaux virions sont libérés de la cellule.

1° - La taille des virus

cellule animale	bactérie	VIRUS
<i>cellule</i>	<i>cellule</i>	particule
		
10 à 20 µm	1 à 3 µm	20 à 300 nm

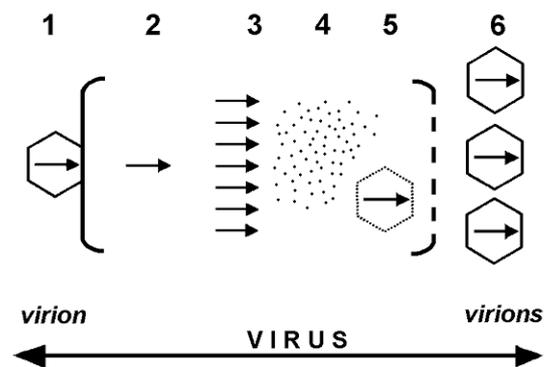
- les plus petits virus ont une taille voisine des ribosomes (*Parvovirus*, 20 nm – *parvus* = petit),
- les plus gros ont une taille légèrement inférieure à celle des plus petites bactéries (*Poxvirus*, 300 nm – *pox* = pustule).

Tous les organismes vivants sont la cible de virus qui leur sont spécifiques :

- les virus des animaux,
- les virus des végétaux,
- les virus des bactéries (bactériophages ou phages).

Un virus animal peut affecter plusieurs espèces (spectre **large** comme le virus de la **rage**) ou une seule (spectre **étroit** comme le virus de la **poliomyélite**, uniquement pathogène pour l'homme).

le cycle de multiplication d'un virus



2° - La structure des virus

1 - les virus nus

Un **virion** est obligatoirement constitué de **deux** éléments :

1° - le génome viral constitue l'information génétique qui est traduite en protéines virales par la cellule-hôte.

Le génome viral est **soit de l'ADN, soit de l'ARN**.

- on distingue donc : → **des virus à ADN**
→ **des virus à ARN**

2° - la capsid (*capsa*, « boîte ») constitue la **protection** du génome. De nature protéique, elle porte les **déterminants viraux** responsables de la fixation du virion à la cellule.

- génome et capsid forment la **nucléocapside**.

2 - les virus enveloppés

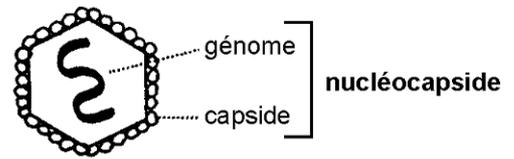
La nucléocapside de certains virus peut être entourée par un troisième élément :

3° - une enveloppe : c'est **une membrane** dans laquelle sont insérées **des spicules**. Ces spicules sont les **déterminants viraux** responsables de la fixation du virion à la cellule.

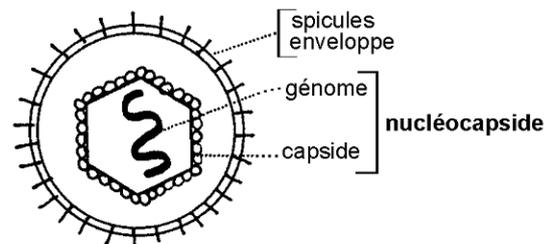
- on distingue donc :
 - **des virus nus,**
 - **des virus enveloppés.**

virus et virion

- le « **virus** » est l'agent infectieux à tous les stades du cycle viral, *extracellulaire* ou *intracellulaire*.
- le « **virion** » est la forme *extracellulaire* du virus.



un virus nu



un virus enveloppé

3° - Comment voir les virus ?

On utilise le microscope électronique. Mais comme les virus se laissent facilement traverser par les électrons, on doit – pour créer des contrastes – utiliser une méthode de "coloration"

- soit **l'ombrage métallique** :

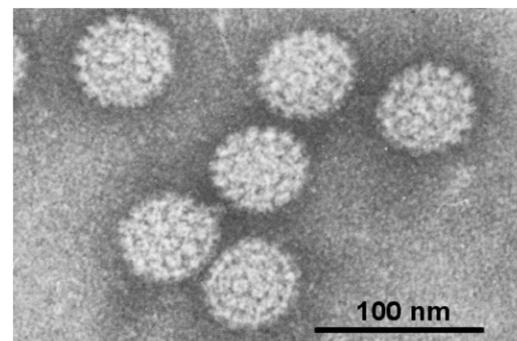
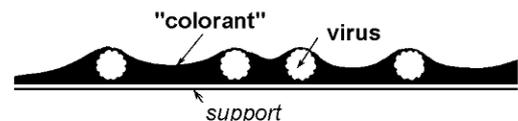
vaporisation (sous vide) de particules métalliques (d'or ou de tungstène) – sous un angle connu – sur la préparation.

→ *donne un aspect des virions en 3D*

- soit **la coloration négative** :

on dépose une goutte de solution d'un sel de métal lourd (tungstène ou uranium) qui remplit les cavités de la surface des virions et qu'on évapore.

→ *la couche de métal déposée révèle les cavités de la surface et les contours des virions.*



virus des verrues en coloration négative

I - La morphologie des virus : la capside

Comme l'information génétique d'un virus est très petite, **la capside ne peut pas être constituée d'une seule protéine géante**. En effet, le génome d'un virus code diverses protéines indispensables à d'autres fonctions que sa protection (protéines d'enveloppe, enzymes, protéines non structurales intervenant au cours du cycle...).

La stratégie – utilisée par tous les virus – consiste donc à utiliser **un grand nombre de copies** d'un ou plusieurs types d'**unités protéiques de petite taille**, capables de s'assembler spontanément pour former la capside.

L'agencement des unités protéiques est comparable à la formation d'un cristal, l'énergie nécessaire à l'assemblage provenant des interactions entre les sous-unités.

Ces interactions étant régulières, **l'assemblage doit posséder une symétrie élevée** (ce que suggère déjà la coloration négative des virus des verrues, page 2).

La symétrie des capsides

Suivant les virus, les unités de structure s'assemblent autour du génome selon deux types de symétrie :

- soit une capside tubulaire à **symétrie hélicoïdale**
- soit une capside icosaédrale à **symétrie cubique**
 - la symétrie de la capside est un critère utilisé pour la classification des virus.
 - la symétrie de la capside permet la cristallisation in vitro de certains virus.
- Toutefois, quelques virus animaux, comme les *Poxvirus*, et certains bactériophages ont des morphologies plus complexes.

1° - les virus à symétrie hélicoïdale

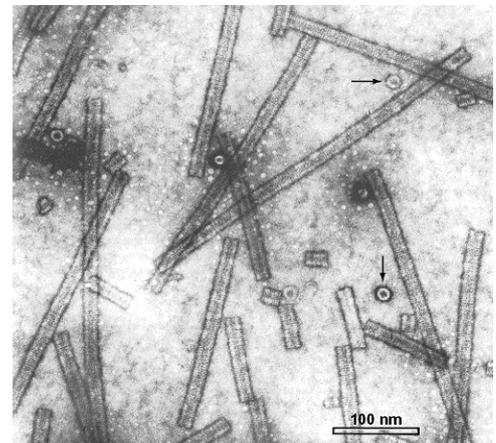
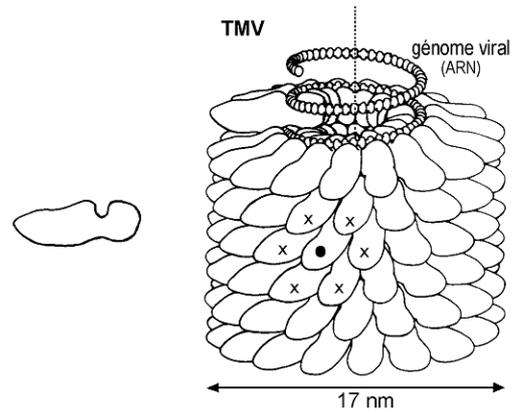
Les unités de structure, **toutes équivalentes**, s'empilent en colimaçon, maintenant l'acide nucléique enroulé entre deux tours de la spirale. La **nucléocapside** forme un tube qui peut être **rigide** ou **flexible** :

a – **le tube est rigide** chez certains virus des plantes : c'est le cas du premier virus découvert – **le virus de la mosaïque du tabac (TMV)** – qui se présente sous la forme d'un bâtonnet.

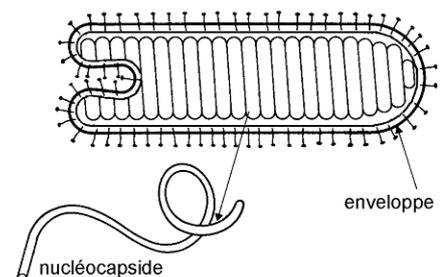
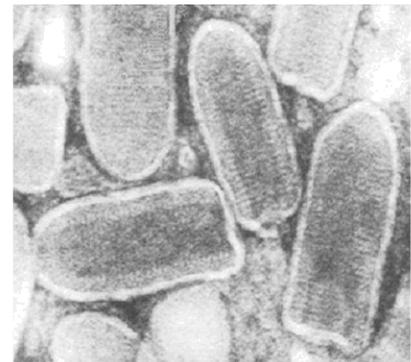
- la forme "en sabot" de chaque unité protéique ménage une *rigole* au sein de laquelle se loge l'acide nucléique.
- le génome (un ARN monocaténaire) possède une séquence particulière – un *signal d'emballage* – qui sert d'amorce à l'*auto-assemblage* de la capside.

b - **le tube est flexible** chez **tous** les virus animaux à symétrie hélicoïdale :

- la morphologie des **virus de la rage** est très originale par son allure de *balle de revolver* : la nucléocapside hélicoïdale est emboîlée en une hélice étroitement recouverte par l'enveloppe.



le virus de la mosaïque du tabac (TMV)
deux virions en coupe sont fléchés Gt = 240



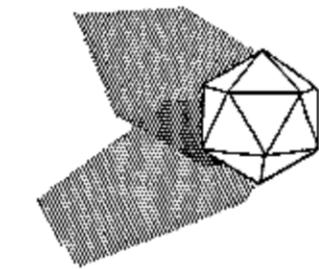
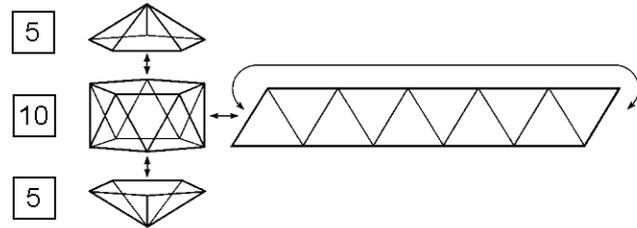
un virus de la rage

2° - Les virus icosaédriques¹

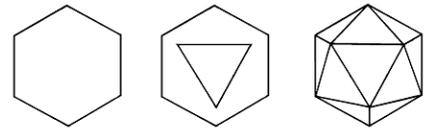
La plupart des virus "sphériques" (comme les virus des verrues, en page 2) révèlent en fait **un contour hexagonal** s'ils sont observés à des grossissements suffisants.

Un double ombrage métallique de ces virus (deux ombrages divergeant de 60°) forme une ombre *tronquée* et une ombre à *angle aigu*. De telles ombres sont caractéristiques de l'icosaèdre.

L'icosaèdre est **un assemblage de 20 triangles équilatéraux**, et possède **12 sommets, 20 faces et 30 arêtes** :



double ombrage d'un icosaèdre

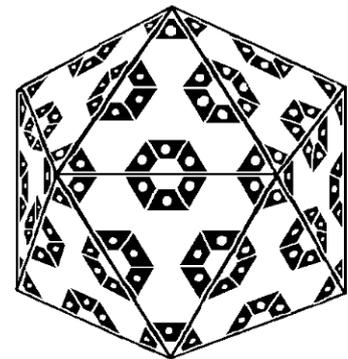


dessine-moi un icosaèdre !

Les unités protéiques (identiques ou différentes) sont généralement regroupées en unités morphologiques, les **capsomères**, régulièrement disposés sur la surface :

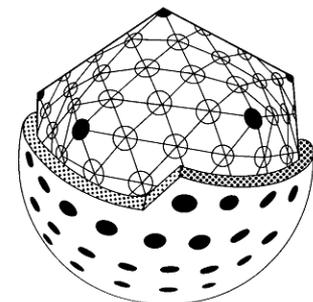
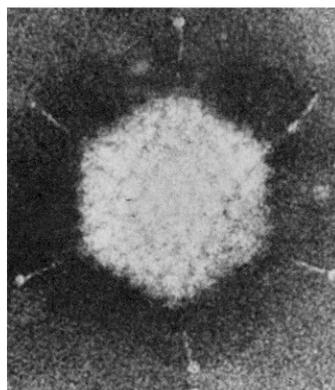
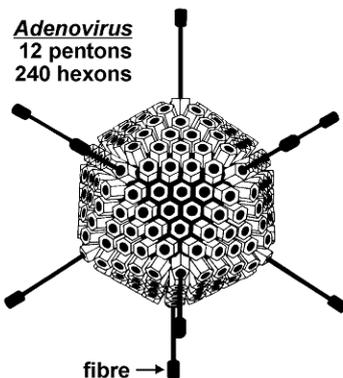
- des capsomères à **5** unités (= des **pentons**) sur chacun des 12 sommets,
- des capsomères à **6** unités (= des **hexons**) sur les faces et les arêtes.
- les virus icosaédriques se distinguent les uns des autres par **le diamètre de leur capside** et **le nombre de capsomères** :

les <i>Herpesvirus</i>	12 pentons 150 hexons	162 capsomères
les <i>Adenovirus</i>	12 pentons 240 hexons	252 capsomères



un virus icosaédrique

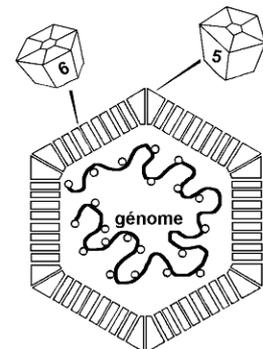
Adenovirus
12 pentons
240 hexons



capsides des *Reovirus*

- les *Reovirus* ont **une double capside**, ce qui leur confère une résistance exceptionnelle dans la nature.

À la différence de la symétrie hélicoïdale, la symétrie icosaédrale n'impose pas d'interactions aussi étroites entre la capside et l'acide nucléique. Ce dernier se trouve au centre de la capside sous une forme relativement indépendante. Souvent associé à des protéines basiques, l'ensemble génome + protéine constitue le « **core** » du virus.



¹ virus à symétrie **icosaédrale** (ou symétrie **cubique**)

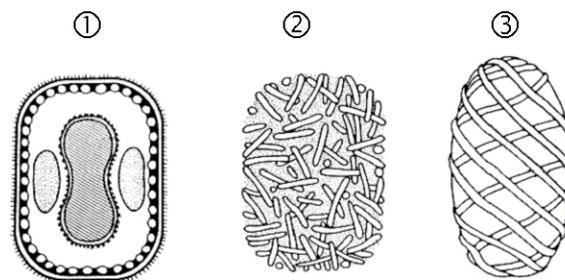
3° - Les virus complexes

a – les Poxvirus

Ce sont les plus gros virus animaux connus : on peut déjà les apercevoir au microscope photonique.

En coupe ①, le génome forme un nucléoïde central entouré d'une coque protéique, déprimée au centre par deux corps latéraux.

Dans le cas du virus de la variole ②, la surface des virus est recouverte d'une série de tubes composés d'une double rangée d'unités sphériques réparties au hasard et, chez le virus Orf du mouton ③, sous la forme d'un filament continu encerclant la particule.

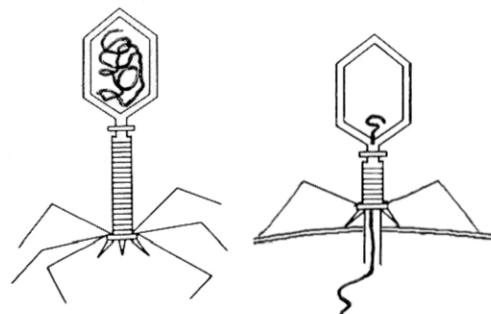


b – les phages caudés ont une symétrie "binaire"

Parmi les nombreux phages infectant les bactéries, certains possèdent une **queue de symétrie hélicoïdale** prolongeant la **capside icosaédrique** qui abrite le génome. Cette queue sert de seringue pour l'injection du génome viral dans la bactérie :

la queue est un **tube creux rigide** entouré d'une **gaine contractile**, terminée par une **plaque basale** portant des **fibres** qui sont responsables de la fixation (spécifique) à la bactérie.

La fixation déclenche la contraction de la gaine : le tube traverse la paroi de la bactérie et permet l'introduction du génome dans le cytoplasme.

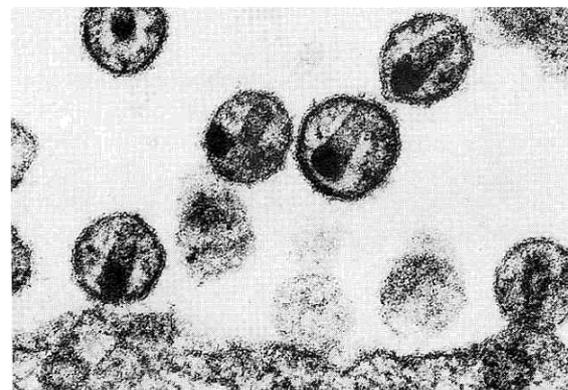


4° - Les virus à symétrie non déterminée

Les virus du sida (virus de l'immunodéficience humaine ou HIV) ont une capsidie en "*tronc de cône*", caractéristique, mais dont la structure est inconnue.

La raison de cette ignorance tient au fait que la nucléocapsidie des HIV n'a pas été cristallisée, ce qui rend impossible leur analyse par la diffraction des rayons X.

Après leur libération de la cellule, on observe une maturation des protéines de la capsidie sous l'action d'une **protéase** virale emportée par les virions. La maturation est indispensable pour que le virus soit infectieux.



II - L'enveloppe virale

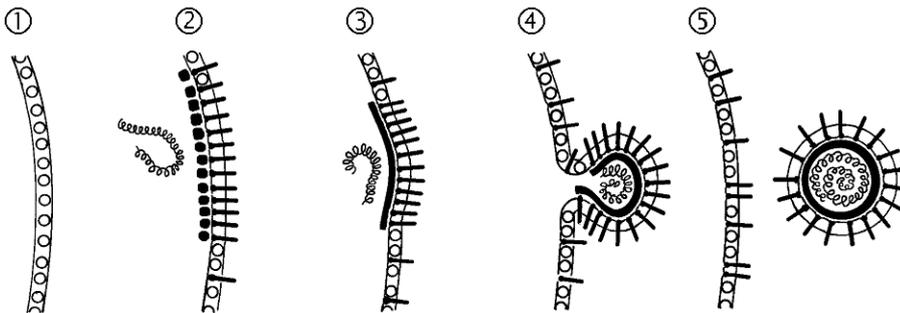
L'enveloppe virale, encore appelée **peplos** (= le manteau), entoure la nucléocapside des virus enveloppés.

1. L'enveloppe est acquise à la fin du cycle de multiplication par **bourgeonnement** de la nucléocapside à travers l'une des membranes de la cellule-hôte.

En général, il s'agit de la membrane cytoplasmique ; parfois de membranes intracellulaires (membrane de l'enveloppe nucléaire pour les *Herpesvirus*, réticulum endoplasmique pour les *Coronavirus*, appareil de Golgi pour les *Bunyavirus*...).

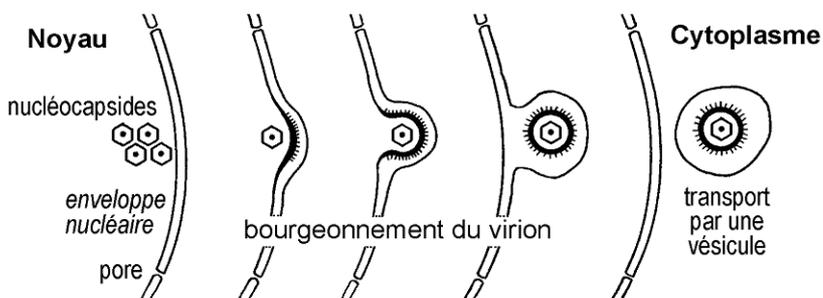
2. La cellule ne fournit que la double couche lipidique. Les protéines cellulaires sont en général complètement déplacées¹ par l'insertion de **spicules virales** (*spiculum* = dard).
3. Absentes chez les virus de petite taille, une ou plusieurs protéines virales vont se déposer sur la face interne de l'enveloppe, formant une couche intermédiaire entre l'enveloppe et la nucléocapside, **la matrice**.

1. à partir de la membrane cytoplasmique : le virus de la rougeole



- ① aspect de la membrane cytoplasmique d'une cellule avant l'infection virale (les ronds blancs sont des protéines cellulaires).
- ② la membrane est modifiée :
 - a - par l'insertion de **spicules** viraux faisant saillie vers l'extérieur, et qui déplacent les protéines membranaires.
 - b - par le dépôt, sur la face interne, de protéines virales donnant naissance à la **matrice**.
- ③ le génome reconnaît la matrice.
- ④ la particule virale bourgeonne puis ⑤ se sépare de la cellule-hôte.

2. à partir de la membrane nucléaire : les virus de l'herpès



Les nucléocapsides, assemblées dans le noyau, bourgeonnent à travers la face interne de l'enveloppe nucléaire modifiée par l'insertion des spicules et l'apposition de la matrice.

¹ une exception : les virus du sida *sélectionnent* des protéines cellulaires.

1° - les protéines de l'enveloppe

a - les spicules

Les spicules sont des **glycoprotéines virales** habituellement associées en oligomères (dimères, *trimères* ou *tétramères*). Ces spicules sont aussi appelées des **péplomères**.

Les spicules sont constitués de trois domaines :

- **extracellulaire** (partie glycosylée),
- **transmembranaire** (acides aminés hydrophobes),
- **intracellulaire** (domaine qui entre en contact soit avec la capsid, soit avec la matrice).

Au microscope électronique, certaines enveloppes ont un aspect caractéristique (*Coronavirus*, *Rhabdovirus*, virus de la grippe).

Fonctions des spicules

• la fixation des virus

les spicules portent les **ligands** qui reconnaissent les récepteurs cellulaires.

• la fusion de l'enveloppe avec la membrane cellulaire

certaines spicules permettent la **fusion** de l'enveloppe avec la membrane cellulaire ou la membrane de l'endosome grâce à des séquences d'acides aminés hydrophobes (la protéine F du virus de la rougeole).

Une même spicule peut exercer successivement la **reconnaissance** et la **fusion** (la protéine HA des virus de la grippe, les spicules des virus de l'immunodéficience humaine).

• l'exercice d'une activité enzymatique

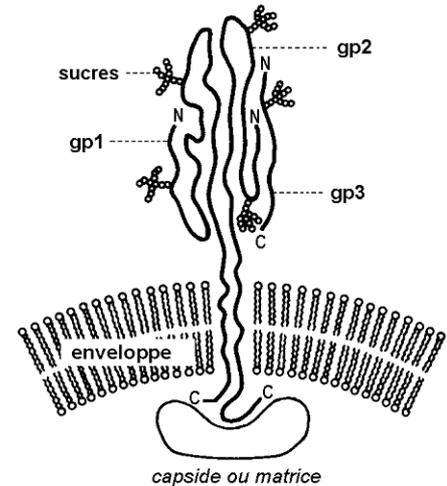
la glycoprotéine NA des virus grippaux est une **neuraminidase** qui détache les acides sialiques des membranes cellulaires. Elle "décolle" les nouveaux virions qui viennent de bourgeonner et sont retenus *via* HA par la membrane.

b - une autre protéine d'enveloppe

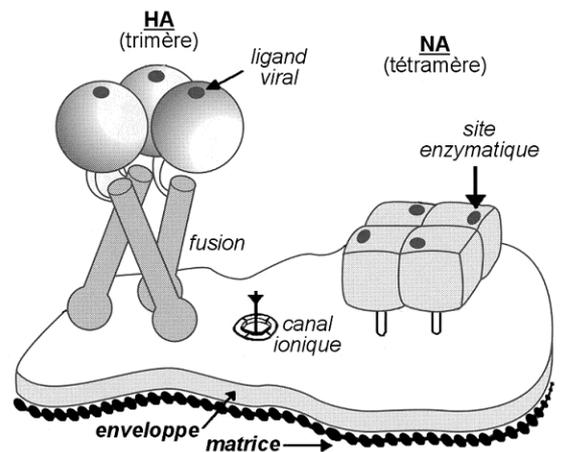
Dans l'enveloppe des *Influenzavirus* un tétramère d'une protéine hydrophobe (la protéine M2) s'insère pour former des **canaux ioniques** : l'entrée d'ions H^+ assure l'acidification indispensable pour dissocier la nucléocapside de la matrice.

Fonctions de la matrice

- la matrice **renforce** la double couche lipidique et **stabilise** la nucléocapside.
- par ses relations avec les spicules et avec la nucléocapside, la matrice intervient au cours de l'**assemblage** des futurs virions.



une spicule virale
(gp = glycoprotéine)
gp3 est située à l'extérieur du virion



Virus grippal : un fragment d'enveloppe
deux types de spicules : HA et NA
(HA, pour hémagglutinine)

HA se lie au récepteur, l'acide N-acétyl-neuraminique (ou acide sialique) fixé sur les glycoprotéines ou glycolipides de la membrane cellulaire.

Les virus enveloppés sont fragiles. La nature lipidique de l'enveloppe en fait une protection nettement moins efficace que la capsid des virus nus vis-à-vis de milieux hostiles tels que l'estomac (pH acide), l'intestin (sels biliaires), ou de solvants des lipides (les détergents, l'éther). Sans enveloppe un virus a perdu la possibilité de se fixer aux cellules.

Dans le tube digestif, les virus enveloppés sont généralement inactivés (il y a des exceptions notables : les *Coronavirus* sont responsables de gastroentérites et de diarrhées chez le porc ; les *Influenzavirus A* aviaires sont normalement responsables d'infections intestinales silencieuses.)

C'est pour cette raison que les virus enveloppés se transmettent souvent à l'occasion **de contacts rapprochés** : inhalation des gouttelettes de Flügge (virus de la grippe, *Paramyxovirus*, virus de la rage), **de contacts étroits**, cutanéomuqueux (transmission sexuelle du virus de l'herpès, du HBV). Les virus les plus fragiles sont inoculés par **voie transcutanée (piqûre d'insecte)** pour les arbovirus, **morsure** pour le virus de la rage, **aiguille souillée** des toxicomanes pour le virus du sida et le HBV.

III - Le génome des virus

Le génome des virus est constitué **soit** d'ADN **soit** d'ARN, ce qui permet de séparer les virus en deux groupes :

- les virus ADN
- les virus ARN

1°/ la nature du génome

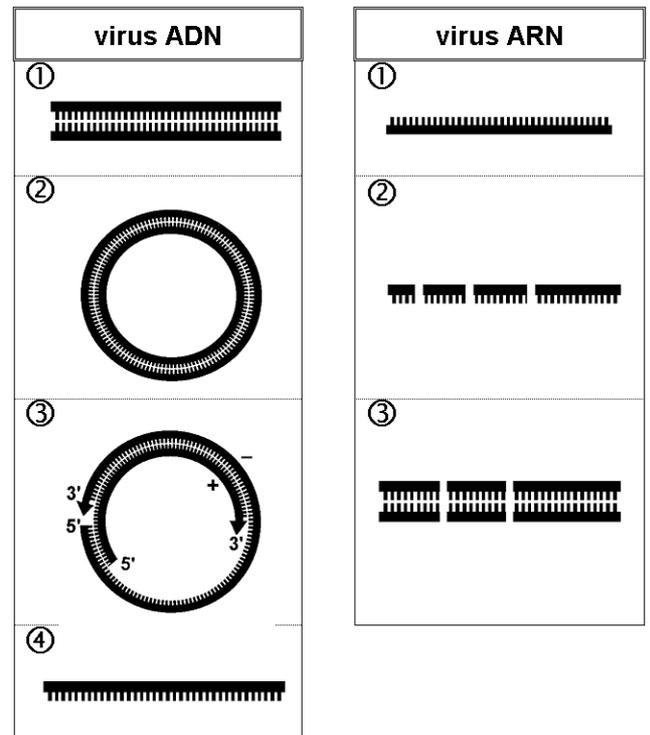
La nature des génomes est tellement variée qu'on l'a utilisée comme premier caractère de classification des virus :

les virus ADN

<u>le plus souvent</u>	
un ADN bicaténaire :	
⇒ soit linéaire	①
⇒ soit circulaire	②
<u>rarement</u>	
- partiellement bicaténaire <u>et</u> circulaire	③
- monocaténaire linéaire	④

les virus ARN

<u>le plus souvent</u>	
un ARN monocaténaire :	
⇒ soit linéaire	①
⇒ soit segmenté	②
<u>rarement</u>	
- bicaténaire segmenté	③



2°/ La taille du génome

L'information génétique est proportionnelle à la taille du virus.

On l'exprime en **kilobases** (kb) :

- 1 kilobase représente 1000 bases si le génome est monocaténaire ou 1000 paires de bases si le génome est bicaténaire.
- (1 kb représente la taille d'un gène codant **une protéine** d'environ 300 acides aminés).

D'après la taille du génome en kb on peut estimer le nombre de protéines virales :

	<u>génom</u>	<u>protéines</u>
petits virus	3 kb	environ 3
gros virus	300 kb	environ 300¹

La "pauvreté génétique" des virus explique leur taille et leur parasitisme intracellulaire obligatoire.

Mais il s'agit d'une estimation, car certains virus augmentent les capacités de codage du génome :

- pour un même transcrit primaire d'ARN, il peut exister des **épissages alternatifs**, conduisant à la formation d'ARN messagers différents et à autant de protéines différentes.
- certains gènes sont des **gènes chevauchants** : un même segment d'acide nucléique peut être transcrit *selon 2 ou 3 cadres de lecture différents* en ARN messagers qui sont traduits en autant de protéines.
- un ARN-m viral peut être lu par le ribosome en continu (codon par codon) ou avec un **décalage de phase** (sur un codon particulier, le ribosome avance ou recule d'un nucléotide ce qui modifie le cadre de lecture et génère une seconde protéine).

les gènes chevauchants

la séquence :

U U U A C G A U G U A

↓ ↓ ↓

1 2 3 (trois points de départ)

résultat :

1 - **UUU ACG AUG UA**

Phe Thr Met

2 - **UUA CGA UGU A**

Leu Arg Cys

3 - **UAC GAU GUA**

Tyr Asp Val

¹ une bactérie, le colibacille, code près de 4 000 protéines.

Virus à ADN et virus à ARN

Comparons la taille du génome des virus à ADN et à ARN capables d'affecter l'homme :

- le génome des virus à ADN varie de **5 à 300 kb**
- pour la plupart, le génome des virus à ARN ne s'écarte pas d'une taille moyenne de **10 à 15 kb**.

Pourquoi certains virus ADN ont-ils un grand génome ?

Parce que les virus ADN utilisent le système de réplication de la cellule qu'ils infectent :

- l'ADN polymérase cellulaire dispose d'une **fonction de relecture** : si le nucléotide qui vient d'être incorporé est incorrect, il est éjecté par l'enzyme.
- la cellule possède de **nombreux systèmes de réparation de l'ADN** dont les virus profitent : les erreurs apparues au cours de la réplication de leur génome peuvent être corrigées.

Conséquences :

1. les taux de mutation des virus à ADN sont analogues à ceux de l'ADN cellulaire, et sont donc **extrêmement faibles** : de $1/10^8$ à $1/10^9$, soit 1 nucléotide erroné pour 10 millions à 1 milliard de nucléotides copiés.
2. le faible taux des mutations ralentit la vitesse d'évolution des virus à ADN.

Pourquoi tous les virus ARN ont-ils un petit génome ?

1° - parce qu'un ARN monocaténaire est fragile

À cause de la fonction OH du ribose. Le risque de cassure d'un grand génome serait beaucoup plus important et toute cassure entraîne l'inactivation du virion.

Certains virus ARN ont contourné cette fragilité en **segmentant** leur génome. *Mais au moment de l'assemblage, il faut que chaque nouveau virion contienne au moins un exemplaire de chacun des segments...*

2° - parce que les ARN polymérases sont imprécises

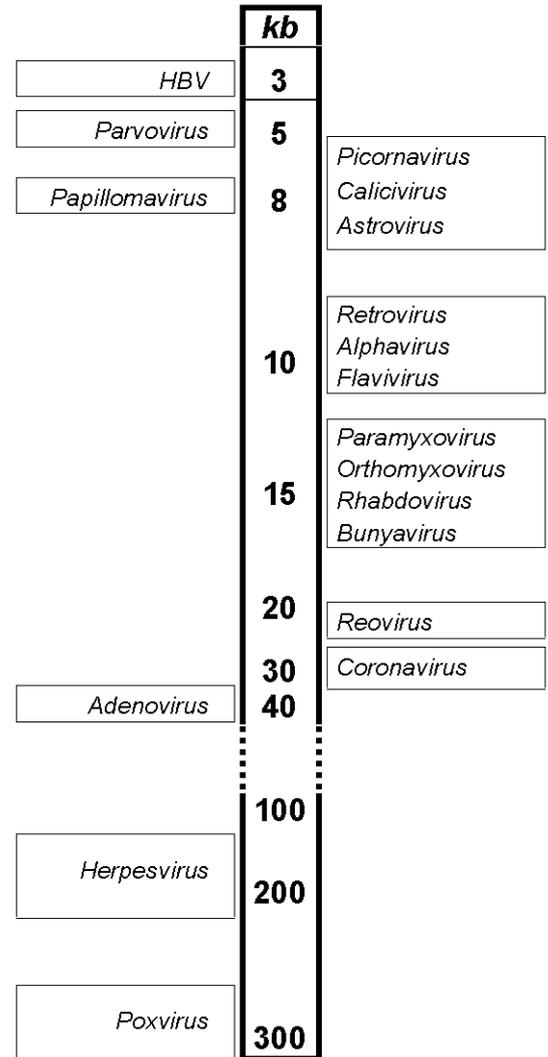
- l'ARN polymérase cellulaire ne peut transcrire que de l'ADN. Tous les virus ARN doivent donc synthétiser une ARN polymérase **ARN-dépendante** (une **réplicase**).
- cette ARN polymérase virale (comme l'ARN polymérase cellulaire) n'a **pas de fonction de relecture**,
- il n'existe **pas de système de réparation de l'ARN**.

Deux conséquences liées à cette infidélité :

1. la taille du génome

Les **taux de mutation** sont **très élevés** : en moyenne de $1/10^3$ à $1/10^4$ soit 1 nucléotide erroné pour 1000 à 10.000 nucléotides copiés.

À ces taux, un génome de 100 kb (10^5 bases) comporterait **10 à 100 mutations**, et de nombreuses mutations seraient létales : **les virions obtenus ne seraient pas viables**.



une mutation peut être avantageuse, désavantageuse ou neutre (une mutation peut être neutre dans un certain contexte et désavantageuse dans un autre...)

L'infidélité de l'ARN polymérase est responsable d'une vitesse d'évolution considérable. C'est probablement la raison pour laquelle 70 % des virus identifiés à ce jour sont des virus à ARN.

2. la variabilité des virus à ARN

Exemple : le génome des virus du sida a une taille de 10 kb. On peut s'attendre à trouver 1 à 10 mutations par génome recopié : une population virale est par conséquent un **mélange de variants moléculaires** constituant une "**quasi espèce**". La majorité de ces variants ont perdu leur pouvoir infectieux et disparaissent rapidement.

Néanmoins certains mutants ont acquis un avantage : **échapper au système immunitaire de l'hôte** ou **résister à l'action de thérapeutiques antivirales**.

Cette variabilité explique la difficulté de préparer un vaccin.

À cause de ces mutations fréquentes, deux familles de virus sont un sujet de préoccupation : les virus de la grippe ("**la dérive antigénique**") et les virus du sida.

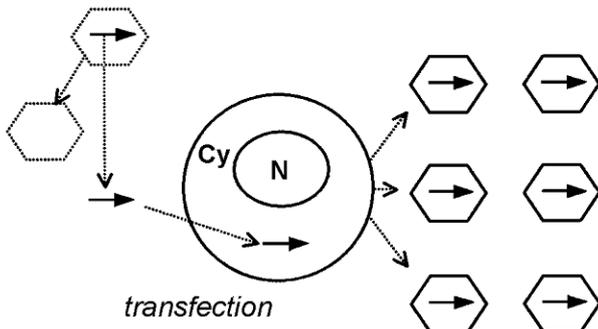
Les virus à ARN : 5 originalités

1^{ère} : des virus ARN + et des virus ARN -

Expérimentalement, il est possible d'introduire uniquement le génome d'un virus dans une cellule : c'est **une transfection**.

1^{er} cas - le virus de la poliomyélite : un virus à ARN +

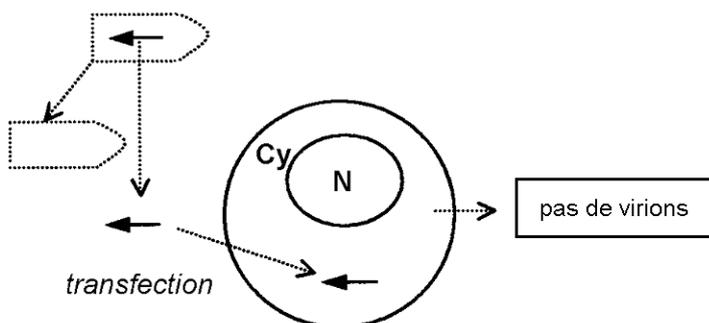
L'ARN **seul** du virus poliomyélique est introduit dans la cellule : *la cellule fabrique des particules virales complètes, comme si elle avait été infectée par le virus lui-même* :



L'ARN viral possède une polarité +

2^{ème} cas - le virus de la rage : un virus à ARN -

L'ARN **seul** du virus de la rage est introduit dans une cellule : *la cellule ne fabrique aucune particule virale*.



L'ARN viral possède une polarité -

⇒ le génome d'un virus ARN - **seul** n'est pas infectieux : il manque la transcriptase virale.

- l'ARN viral a été immédiatement **traduit par les ribosomes cellulaires** en protéines virales, dont une ARN polymérase qui a assuré **la réplication** du génome.
- l'ARN viral s'est comporté comme un ARN messager : les ribosomes ont pu s'assembler sur un **site d'initiation** et ont reconnu un codon d'initiation **AUG**.

- l'ARN viral n'a pas été reconnu par les ribosomes cellulaires : c'est un ARN "anti-messager".
- l'ARN viral doit d'abord être transcrit en ARN messagers par **une transcriptase**.
- le virion doit apporter cette enzyme en même temps que le génome.

2^{ème} : des virus ARN – segmentés

Les **Influenzavirus**, (virus de la grippe) ont un génome à ARN – linéaire formé de plusieurs segments (7 ou 8).

La segmentation d'un génome viral a une conséquence importante :

Deux virus de la grippe, *génétiquement différents*, peuvent infecter **simultanément** une même cellule et s'y multiplier (c'est une **co-infection**).

Au moment de l'assemblage des virions, le réassortiment des segments génétiques peut donner naissance à un **virus nouveau**.

La "cassure antigénique"

Si la recombinaison génétique porte sur les segments codant les **spicules HA** et/ou **NA**, les caractères antigéniques sont entièrement nouveaux, et le virus peut être à l'origine d'une **pandémie** de grippe, puisqu'il ne pas être neutralisé par les anticorps "anciens".

3^{ème} : des virus avec des segments ambisens

Certains virus ont un génome ARN monocaténaire segmenté, mais certains segments sont **ambisens** : une partie ARN – est **soudée** à une partie ARN + :

- le génome des **Arenavirus** est constitué de 2 segments ambisens.
 - le génome des **Phlebovirus** (un genre appartenant à la famille des **Bunyavirus**) est constitué de 3 segments : 2 segments d'ARN – et 1 segment ambisens.
- ⇒ **comme pour les virus ARN –**, une transcriptase est associée à la nucléocapside.

4^{ème} : le génome est un ARN bicaténaire segmenté

Les **Reovirus** possèdent un génome constitué par un ARN **bicaténaire** linéaire **segmenté** (10 ou 11 segments).

⇒ **une transcriptase** est associée à la nucléocapside. Elle transcrit le brin – de chaque segment en ARN messager.

5^{ème} : le génome ARN + est transcrit en ADN

Les **rétrovirus** (comme le HIV) ont un génome constitué de deux molécules d'ARN + monocaténaire identiques. Ces virus contiennent deux enzymes virales : une **rétrotranscriptase** et une **intégrase**

1. la **rétrotranscriptase** **transcrit l'ARN viral en ADN bicaténaire**.
2. l'ADN synthétisé migre dans le noyau de la cellule avec l'**intégrase** qui insère l'ADN viral **dans le génome de la cellule-hôte** :

cet ADN viral est appelé **le provirus** car il sera transcrit **par les ARN polymérases de la cellule-hôte** en **ARN messagers** (→ synthèse des protéines virales) et en **ARN génomiques** : l'assemblage des protéines et des génomes conduit à la formation des nouveaux virions.

