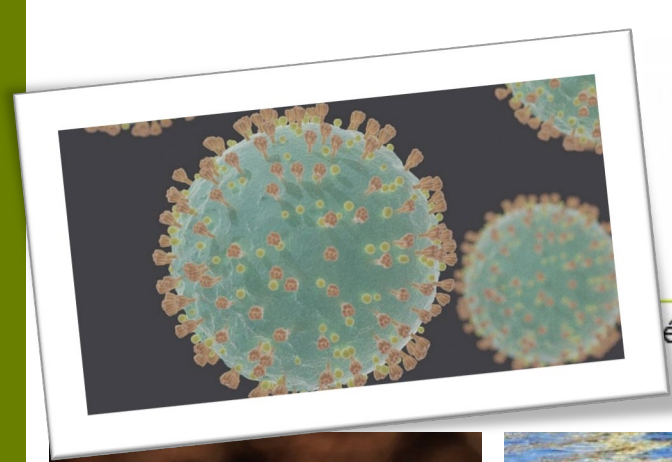




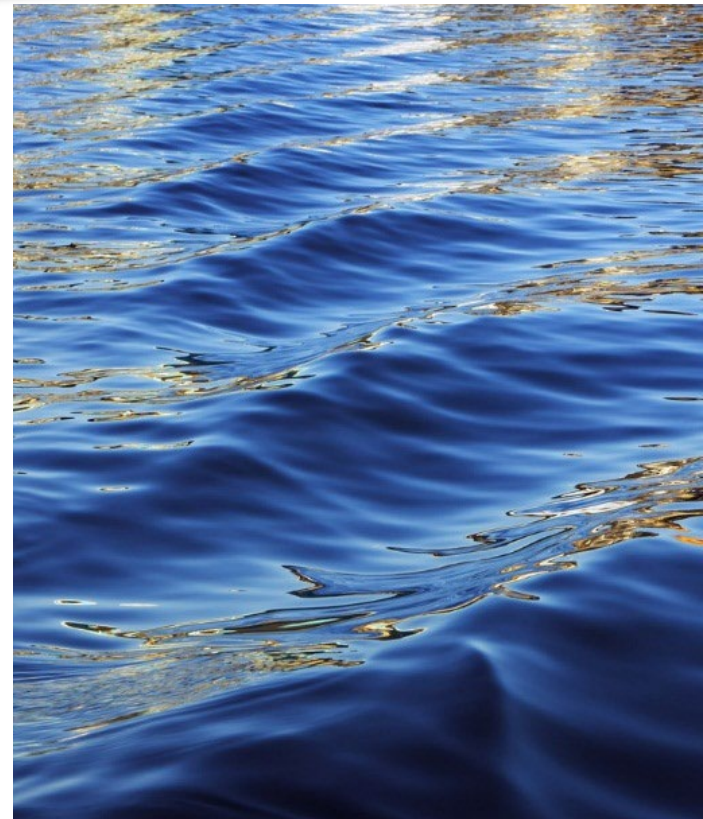
© Alexandre Hassanin, MNHN



Fédération Française
de Spéléologie



Virus et chauves-souris
Une association de malfaiteurs ?
Fabien Darne - mars 2026



Avertissement

- Je suis instructeur fédéral et membre du *groupe d'étude de biospéologie (GEB)* au sein de la commission scientifique de la Fédération Française de Spéléologie (<https://geb.ffspeleo.fr>).
- Je ne suis spécialiste ni des chiroptères ni des virus ou de la microbiologie. Ce travail de vulgarisation procède d'une démarche naturaliste et pédagogique, d'une curiosité pour la biologie et l'écologie, amorcée durant les études et poursuivie depuis lors dans le cadre spéléo.
- La pandémie de Covid 19 (virus Sars-CoV-2) en 2019 a été le déclencheur d'une sorte de passion pour les virus.
- Cette présentation est le produit de recherches bibliographiques, de lectures et de nombreux échanges avec des spécialistes. Elle se veut un état de la connaissance sur ce thème, adapté pour un usage pédagogique.



Remerciements

Merci aux naturalistes, enseignants et chercheurs qui ont accepté de relire cette présentation, m'ont fait des remarques, des corrections, ont partagé leurs propres documents, m'ont encouragé :

Jacques Chauvin (biospéologue, GEB-FFS), Jean-François Guégan (parasitologue, écologue numéricien, IRD en accueil à l'INRAE), Jean-François Julien (chargé de recherche CNRS au MNHN, Centre d'Écologie et des Sciences de la Conservation - CESCO), Isabelle Monteil (professeure de biochimie), Jean-Pierre Buch (médecin fédéral FFS), Sébastien Puechmaille (maître de conférence en phylogénie et évolution moléculaire, Institut des sciences de l'évolution Montpellier), Carole Douillet et Vincent Lacombe (enseignants et spéléo), Stéphane Pfendler (docteur en génie biologique, IUT Saint Etienne), François Moutou (vétérinaire, naturaliste et ancien épidémiologiste à l'Anses)...

Note d'intention

- Les notions de virus, de zoonose, d'épidémie, etc. sonnent comme de terribles menaces et nous incitent à trouver les « responsables » : le *pathogène*, le *réservoir* et *l'hôte intermédiaire* (ou le *vecteur*).
 - Depuis quelques années et encore très récemment nous entendons parler des chauves-souris comme de véritables « réservoirs à virus », voire des « bombes à retardement », à l'origine de la plupart des nouvelles épidémies. Mais est-ce aussi simple ? Y a-t-il vraiment « association de malfaiteurs » ?
 - Cette approche « causale » (à l'image du principal paradigme de la médecine occidentale, le *modèle ontologique*,) ne semble pas suffire à appréhender la complexité des interactions au sein du vivant.
 - Pour essayer de comprendre comment tout cela est enchevêtré, il nous faut répondre à quelques questions : quelle « grille de lecture » appliquons nous sur le vivant ? Qu'ont les chauves-souris de si extraordinaire ? Quelles relations les virus entretiennent-ils avec elles ? Quelle est la place des virus dans l'évolution du vivant et la régulation de la biosphère ? Quelles leçons pouvons-nous tirer des dernières pandémies ?
- La discussion pourra porter sur les relations entre humains et non humains (i.e. les spéléologues avec les chauves-souris ou autres), sur les impacts environnementaux de l'espèce humaine et sur son influence dans l'apparition de nouvelles maladies.

Plan de la présentation

Classer le vivant ?

1. Nommer & classer
2. Le cas des chauves-souris
3. La classification phylogénétique

Les chauves-souris d'abord

1. Classification
2. Une grande diversité
3. Echolocation
4. Longévité, régénération, système immunitaire

Et les virus dans tout ça ?

1. Quelle variété !
2. Définitions
3. Combien sont-ils ?

Les virus à l'origine de la vie ?

1. L'ADN serait d'origine virale ?
2. Les virus régulateurs de la biosphère
3. Nous sommes aussi constitués de virus
4. Des virus pour soigner

Virus et maladies

1. Les virus pathogènes pour l'être humain
2. Les chauves-souris transmettent-elles la rage ?
3. Chauves-souris et coronavirus

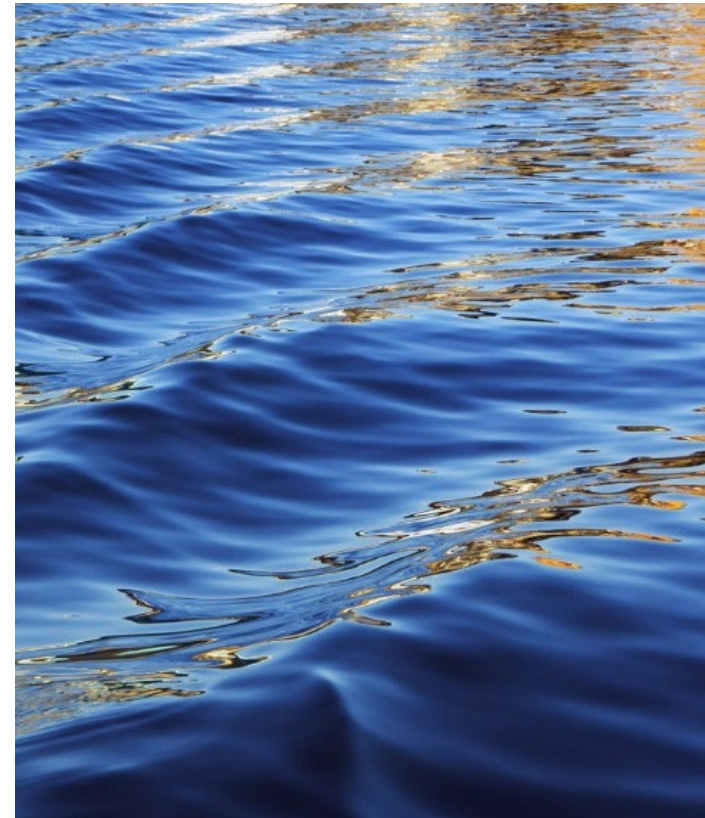
Les humains contre le reste du monde

1. Les chauves-souris menacées par les humains
2. Anthropisation des écosystèmes
3. Virus et changements climatiques



Classer le vivant ?

Puisqu'il s'agit quand même d'une histoire du vivant...



Nommer & classer, une activité essentielle

- **Nommer et classer sont deux processus cognitifs** (ce qui sous-entend observer, décrire, comparer, catégoriser, etc.) indispensables à l'être humain qui cherche à ordonner le monde qui l'entoure et penser ainsi en avoir une meilleure maîtrise. Ils sont à la **base de toute activité scientifique**.
- **La classification des plantes et des animaux n'est pas un simple exercice formel**, elle répond à des besoins précis, qui peuvent être **culinaires** (classer les organismes en comestibles, non-comestibles voire vénéneux), **scientifiques** (classification selon des critères morphologiques, génétiques, de parenté ou d'évolution, etc.), ou **autres** (cynégétiques, réglementaires, esthétiques, sanitaires, théologiques, sportifs, etc.).

<u>GIBIERS EN PLUMES</u>	<u>GIBIERS EN POIL</u>		<u>GIBIERS EXOTIQUES</u>
	PETITE VENAISON	GRANDE VENAISON	
Alouette, Ortolan, Caille, Pigeon ramier, Palombe, Faisan, Grive, Canard colvert, Perdrix, ...	Lapin de garenne Lièvre, Ragondin, Rat musqué, ...	Sanglier, Cerf, Biche, Chevreuil, Mouflon, ...	Autruche, Emeu, Nandou, Bison, Kangourou, Antilope, ...

Les dénominations et classifications populaires ou vernaculaires ont une certaine « efficacité » dans leur usage quotidien (plantes médicinales par exemple, gibier, etc.) et procèdent souvent par analogie ou extension à partir d'une caractéristique commune, souvent l'aspect, l'habitat ou l'usage.

Nommer & classer, le cas de la chauve-souris

- **La chauve-souris** a été nommée ainsi par analogie (partielle) avec une souris (mais elle est appelée parfois « rat volant » ou « renard volant », selon l'aspect ou la taille). Le mot **murin** vient d'ailleurs du latin *mus*, qui signifie souris. Les murins appartiennent au genre *Myotis*, qui signifie « oreilles de souris », etc.
- **L'étymologie** émet l'hypothèse que **chauve** pourrait dériver du mot « chouette » en gaulois, qui, déformé ensuite en latin : *calva sorix*, aurait donné *calvus* : chauve. Mais cette origine est discutée, car on ne connaît pas exactement le cheminement des différentes formes. Cette dénomination aurait progressivement remplacé « vespertilio » utilisé dans le nord, probablement en raison de ses mœurs nocturnes (*vesper*) et qui a donné la famille des vespertiliens.
- **Malgré son nom**, la chauve-souris était classée parmi les oiseaux jusqu'au début du XIXe s. : « Oiseaux de proie, tels que la chauve-souris, le hibou, le grand-duc » (Bernardin de Saint-Pierre, *Harmonies de la nature*, 1814, page 268). En Basque, chauve-souris se dit *Gau Alnhara* : hirondelle de nuit.
- **Quelques noms régionaux** : *ratepenade* ou *ratapenade* ou *rato-penado* en occitan du Languedoc (« rat ailé »), *arrata-cauda* en Gascon, *chawe-sori* en Wallon, *casseuris* ou *cateseuris* en Picard...



Le premier « chauve-yéti » ?

Illustration extraite du livre d'heure enluminé *Les Heures de Jeanne I^{re} de Castille* (dite Jeanne la folle), édité à Gand ou Bruges entre 1486 et 1506, conservé à la British Library sous la cote Add.18852

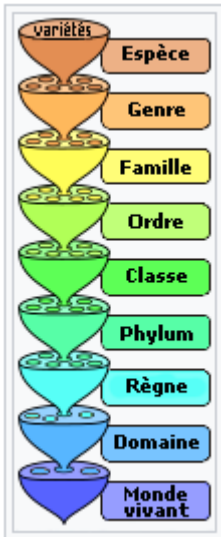
Classification classique

La **classification traditionnelle ou classique** des espèces est issue de celle du naturaliste suédois du XVIIIe siècle Carl von Linné. Linné commença par diviser les êtres naturels en trois règnes, un pour le monde minéral et deux autres pour le monde vivant, les règnes végétal et animal. Le nombre de règnes eut tendance ensuite à s'accroître au fur et à mesure que les systématiciens prenaient conscience de la complexité du monde vivant. Actuellement, elle définit **six « règnes »**, parfois **7** si on distingue les chromistes (protozoaires doués de photosynthèse) :

1. **les bactéries** (procaryotes unicellulaires dépourvus de noyau) → *Escherichia coli*
2. **les archées** (procaryotes unicellulaires dépourvus de noyau, souvent extrêmophiles) → A. d'Asgård
3. **les protistes ou protozoaires** (eucaryotes le plus souvent unicellulaires) → la paramécie
4. **les champignons** (eucaryotes multicellulaires hétérotrophes qui décomposent) ;
5. **les végétaux** (eucaryotes multicellulaires, réalisant la photosynthèse) ;
6. **les animaux** (eucaryotes multicellulaires hétérotrophes qui ingèrent des composés carbonés).

La classification classique est fondée sur des caractères multiples (biologiques, phénotypiques, physiologiques). Elle repose sur une hiérarchie fixe de catégories (les rangs de taxon) :

Règne → embranchement → classe → ordre → famille → genre → espèce (la plus petite unité)





La classification phylogénétique (ou cladistique)

Il est possible de classer les animaux en fonction de **critères écologiques** (herbivores, charognards, fouisseurs...), qui permettent de décrire le fonctionnement d'un **biotope** → il manque la dimension temporelle car les biotopes et les espèces évoluent

La classification phylogénétique, essaie de tenir compte de la biodiversité actuelle et passée. Elle regroupe les organismes en fonction de leur **degré d'apparentement** → identification de groupes dits « monophylétiques » qui comprennent un ancêtre commun hypothétique et l'ensemble de ses descendants (« lignée »).

Attention : c'est différent des **clés de détermination** qui permettent de trier de façon non ambiguë des échantillons de terrain lors d'un inventaire de biodiversité par exemple.

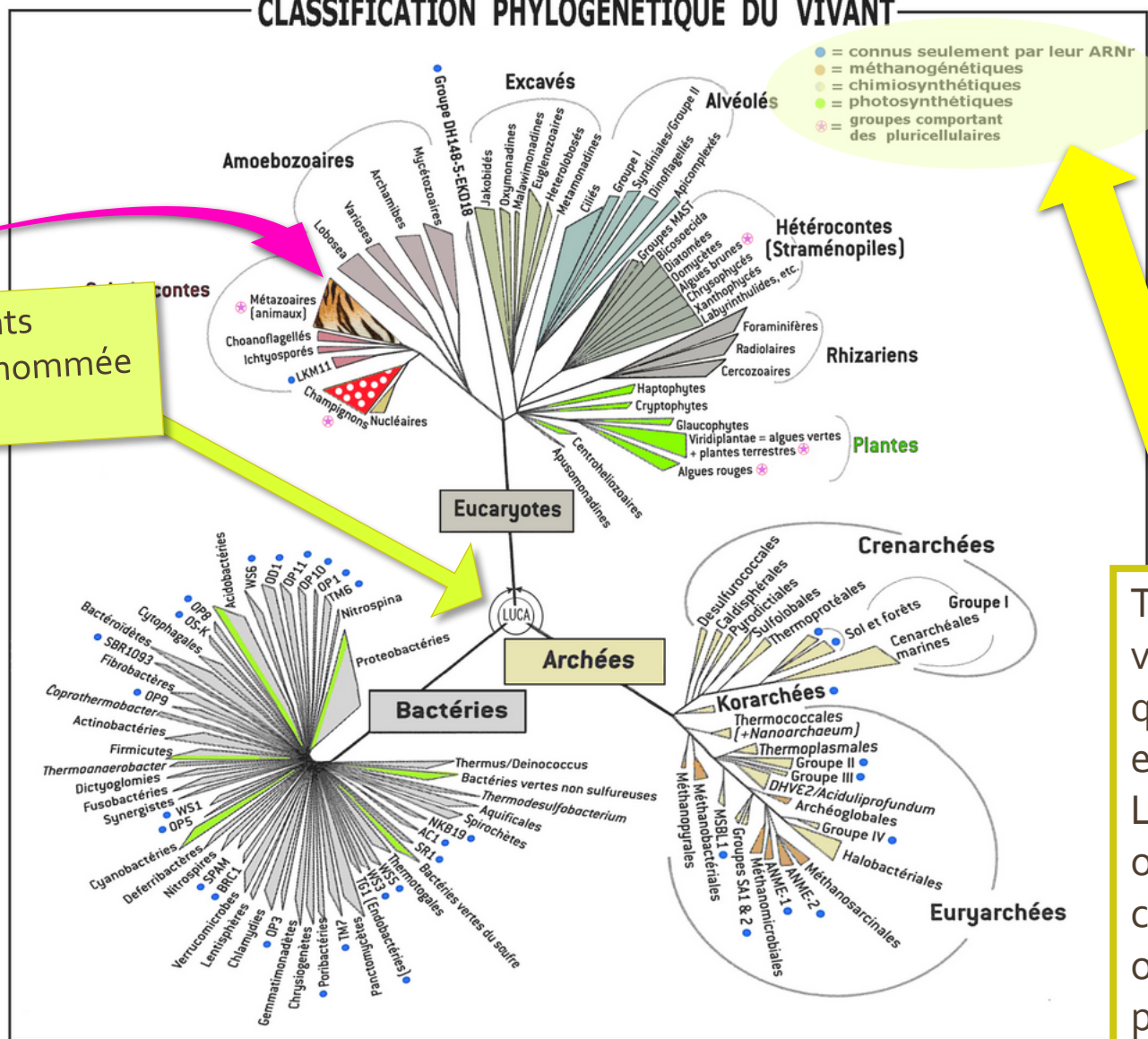
CLASSIFICATION PHYLOGÉNÉTIQUE DU VIVANT

Un arbre phylogénétique hypothétique de tous les organismes vivants, construit à partir des séquences de l'acide ribonucléique ribosomique (biologie moléculaire)

Selon ce modèle, tous les organismes vivants descendent d'une seule lignée de cellules, nommée "Luca" (*Last universal common ancestor*).

Les chauves-souris sont là, avec nous !

Les virus n'y sont pas !



Tout ce qu'on voit « au quotidien » est là ★ Le « reste » on ne le connaît pas, on ne le voit pas, on l'oublie...

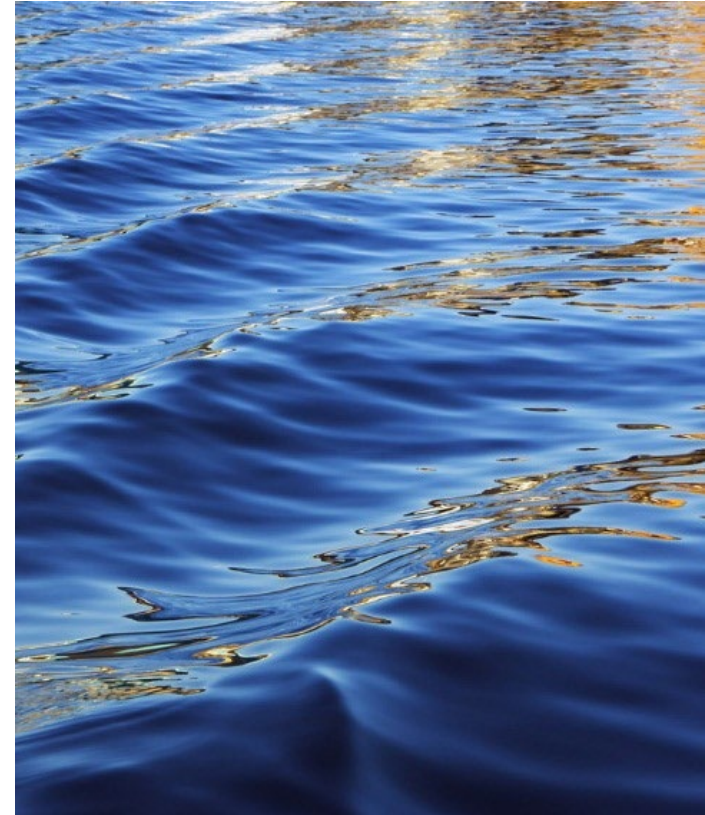
Schéma inspiré par les divers diagrammes similaires présents dans la littérature phylogénétique :

- 1- Travaux de Yuki Amano, Ronald Amundson, Karthik Anantharaman, Brett J. Baker, Jillian F. Banfield, Christopher T. Brown, Cristina N. Butterfield, Cindy J. Castelle, Natasha Dudek, Kari M. Finstad, Ale Hemsdorf, Laura A. Hug, Kotaro Ise, Alexander J. Probst, David A. Relman, Yohey Suzuki et Brian C. Thomas ;
- 2- Revue "Nature" - <https://www.nature.com/articles/nmicrobiol201648> ;
- 3- Peer Bork, Francesca D. Ciccarelli, Christopher J. Creevey, Tobias Doerks, Christian von Mering and Berend Sno I: article (en) « Toward Automatic Reconstruction of a Highly Resolved Tree of Life » in : "Science", vol. 311, n° 5765, 3 mars 2006, pp.1283-1287 ;
- 4-Corinne Fortin, Gérard Guillot, Guillaume Leconte, Marie-Laure Le Louarn-Bonnet, chapitres sur la « Classification phylogénétique du vivant » dans : "Guide critique de l'évolution", Belin-Humensis, Paris 2009 & 2015, ISBN : 978-2-7011-4797, pp. 65-69 ;
- 5- Marie-Laure Bonnet, François Cariou, André Duco, Gérard Guillot, Claude Lebas, Guillaume Leconte, Patrick Mardelle & Eric Nicol : "Comprendre et enseigner la classification du vivant", Belin, Paris 2004 ISBN : 2701138965 ;
- 6 - Purificación López-García & David Moreira (en) : « Tracking microbial biodiversity through molecular and genomic ecology » in : "Research in Microbiology", vol.159, n°1, janvier 2008, pp. 67-73 ;
- 7- Carl R. Woese, Otto Kandler & Mark L. Wheelis, « Towards a natural system of organisms: Proposal for the domains Archaea, Bacteria, and Eucarya » in "Proceedings National Academy of Sciences USA", vol. 87, n° 12, Juin 1990, pp. 4576-4579, DOI : 10.1073. PNAS : 87.12.4576.



Les chauves-souris d'abord

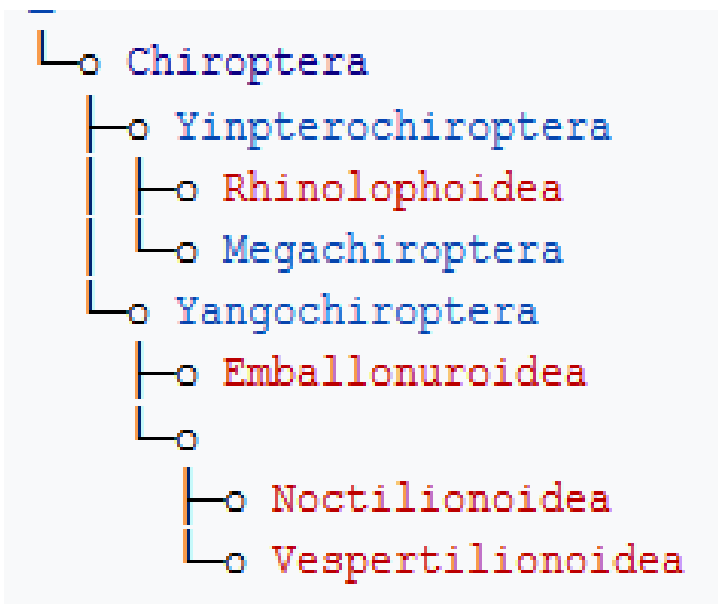
Un bien drôle de mammifère



Classification des chauves-souris

Les **Chiroptères** (*Chiroptera*), appelés couramment chauves-souris, sont un **ordre** de mammifères placentaires comptant près de **1 400 espèces** (et d'autres encore à découvrir...), soit un quart (25%) des près de **5 000 espèces** de mammifères connues ; avec 175 genres regroupés en 20 familles.

C'est le **groupe de mammifères le plus important** après celui des rongeurs (Rodentia).



Arbre phylogénétique des *Chiroptera*, c'est-à-dire un cladogramme mettant en lumière les relations de parenté existant entre leurs différents groupes (ou taxa), telles que les dernières analyses reconnues les proposent. Ce n'est qu'une possibilité, sujet à débat dans la communauté scientifique

- Deux sous-ordres étaient classiquement admis : les **Microchiroptères** et les **Mégachiroptères**.
- Récemment, sur la base d'analyses moléculaires, les Mégachiroptères ont rejoint 4 familles de Microchiroptères au sein des **Yinpterochiroptères**.
- Les familles restantes de Microchiroptères constituent les **Yangochiroptères** (Teeling et al. 2002, Teeling et al. 2005).

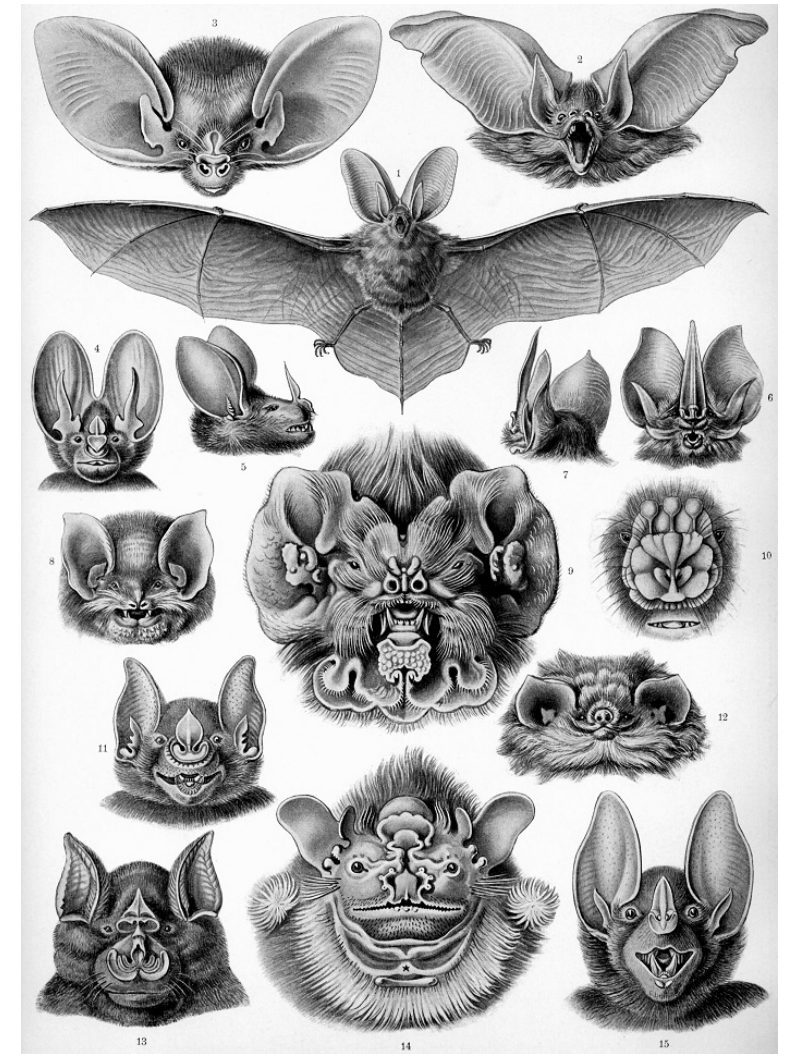
Une si grande variété...



De la minuscule chauve-souris bourdon de Thaïlande (« Kitti à nez de porc », *Craseonycteris thonglongyai*, 2 g, plus petit mammifère actuel) à l'immense renard volant des Philippines (roussette à couronne dorée, *Acerodon jubatus*, 1,2 kg et 1,5 m d'envergure)...



Diverses têtes de Chiroptères, dessinées par Ernst Haeckel en 1904 (*Kunstformen der Natur*).



Chauve-souris, l'ancêtre sourd ?



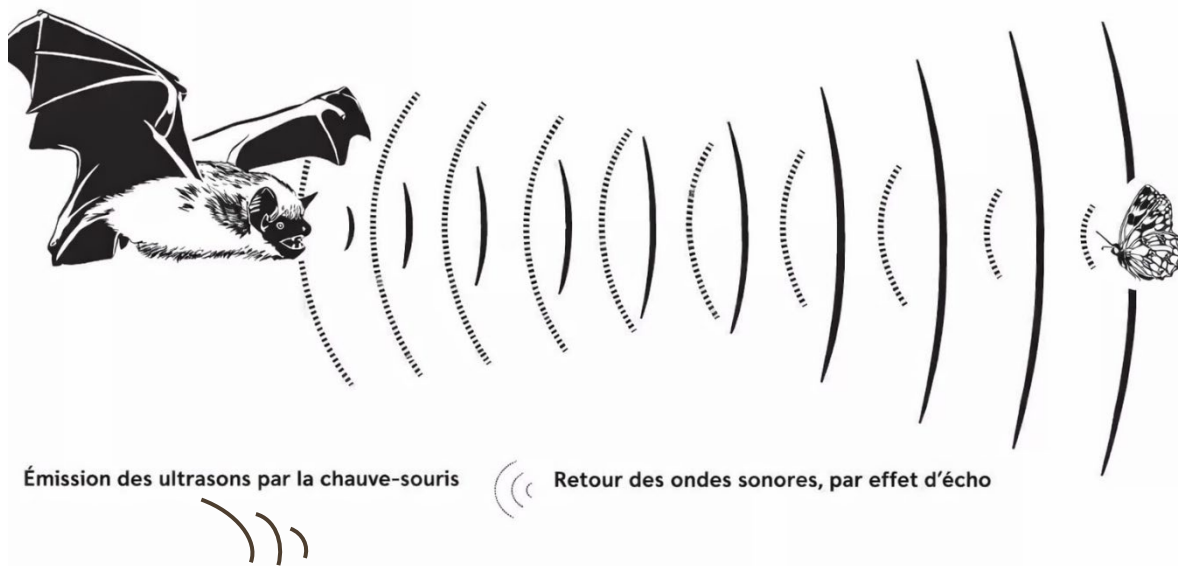
La plus ancienne chauve-souris connue a été trouvée en 2008 dans le Wyoming, elle a été baptisée *Onychonycteris finneyi* et date de 52 millions d'années.

Ses membres supérieurs indiquent que l'animal pratiquait le vol battu, ses membres inférieurs montrent qu'il était un grimpeur agile, capable de marcher à quatre pattes au sol et de se suspendre à l'aide de ses griffes. Sa denture indique qu'il consommait de préférence des insectes mais l'organisation de son oreille interne ne confirme pas **qu'il disposait de l'écholocation** (Simmons, 2010), (Veselka, 2010).

On pensait les chauves-souris proches des **dermoptères** (appelés aussi lémuriens volants) mais des analyses génétiques les placent plutôt dans une ancienne lignée nommée les *laurasiathériens*, des insectivores de petite taille à l'origine d'un grand groupe comprenant les mammifères carnivores, les ongulés, les baleines, les musaraignes, les porcs-épics, les taupes et les pangolins.

Les chauves-souris, des volatiles à sonar






Chauve-souris

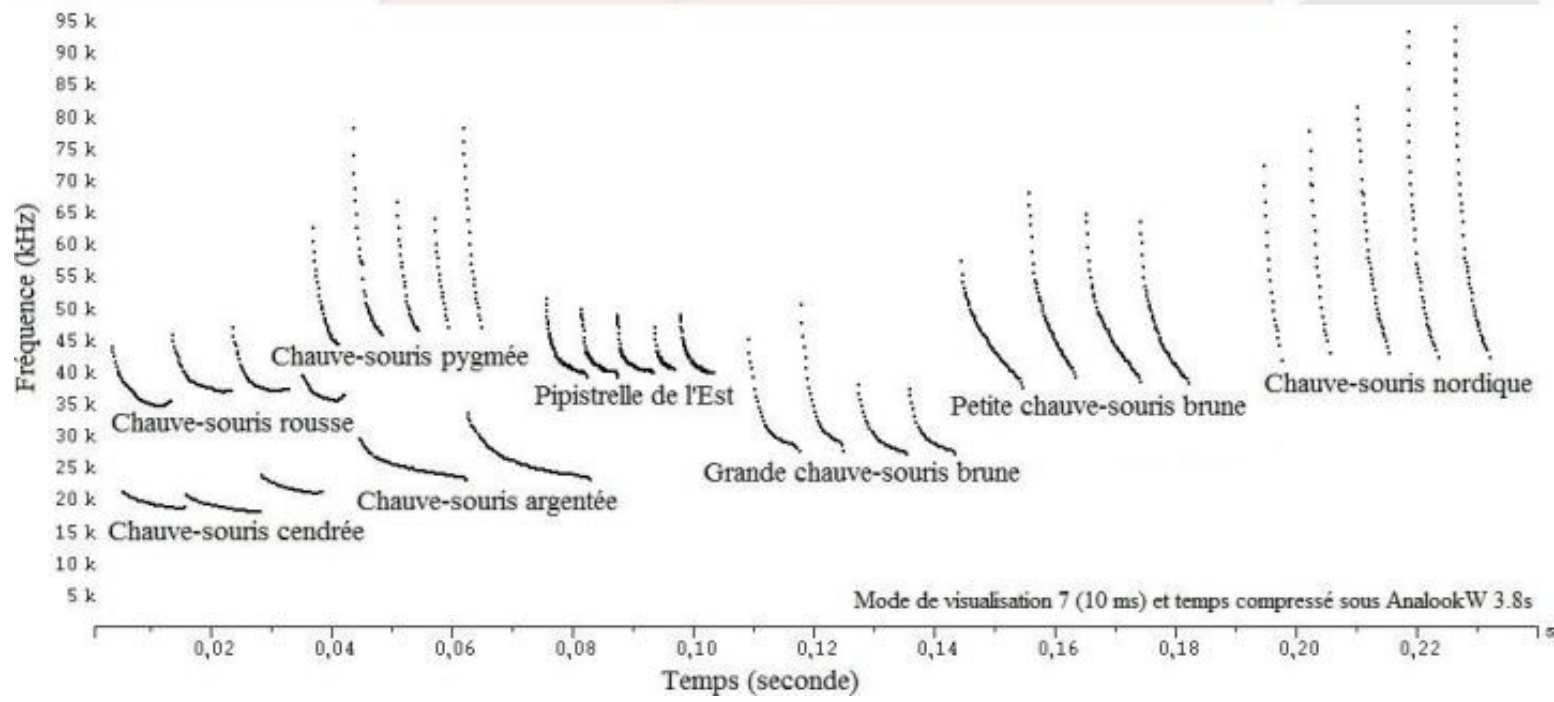


Les chiroptères sont **les seuls mammifères doués du vol actif**. Ils se déplacent dans les airs grâce à une aile formée d'une membrane de peau entre le corps, les membres et les doigts (leur aile est en fait **une main**). Ils se posent tête en bas grâce à leurs orteils qui se « verrouillent ».

Ils sont souvent capables d'**écholocation**, c'est-à-dire de repérage grâce à leur **sonar à ultra-sons**. Cette capacité est surtout développée chez les **microchiroptères insectivores** qui sont essentiellement nocturnes et se dirigent dans l'obscurité en émettant des ultrasons dont ils captent la réflexion, **écholocalisant** ainsi leurs proies et les obstacles. Les **mégachiroptères** se fient plus à leur vue et à leur odorat mais utilisent parfois des 'tongue clicks' (roussettes) d'autres utilisent des 'wing clicks' (*Cynopterus*, *Eonycteris*, ...) pour activer leur biosonar (Boonman, 2014).

L'écholocation, signature sonore de chaque espèce

 <p>Chauve-souris nordique <i>Myotis septentrionalis</i> Fmax (KHz) : 74 ± 11 Fmoy (KHz) : 53 ± 5</p>	 <p>Grande chauve-souris brune <i>Eptesicus fuscus</i> Fmax (KHz) : 44 ± 8 Fmoy (KHz) : 32 ± 2</p>
 <p>Petite chauve-souris brune <i>Myotis lucifugus</i> Fmax (KHz) : 52 ± 8 Fmoy (KHz) : 43 ± 2</p>	 <p>Chauve-souris argentée <i>Lasionycteris noctivagans</i> Fmax (KHz) : 39 ± 8 Fmoy (KHz) : 28 ± 2</p>
	 <p>Chauve-souris cendrée <i>Lasiurus cinereus</i> Fmax (KHz) : 28 ± 6 Fmoy (KHz) : 22 ± 2</p>



[Ecouter un grand rhinolophe](#) 

[Ecouter un grand murin](#) 

Une extraordinaire longévité...

Chez les mammifères, on considère **que l'espérance de vie d'une espèce est liée à sa taille et à son métabolisme** :

- La souris : 1 à 3 ans
- La baleine boréale : 200 ans
- Grand singes : environ 40 ans
- *Homo sapiens* : jusqu'à 100 ans

Mais dix-neuf espèces de mammifères font mieux... dont dix-huit espèces de chauves-souris (et l'hétérocéphale ou rat-taupe nu, qui peut vivre jusqu'à 30 ans), malgré le très grand **coût métabolique** de leur vol :

- **Grand murin : 38 ans** (30 grammes et un rythme cardiaque en vol qui peut atteindre 1 200 bpm !)
- **Murin de Brandt : >40 ans** (pèse moins de 7 g...)

Ces petites espèces ralentissent énormément leur métabolisme et leur rythme cardiaque (jusqu'à moins de 20 bpm) durant l'hibernation. La physiologie des chauves-souris s'est adaptée au cours de l'évolution, développant une capacité étonnante de réparation de l'ADN, de destruction des tumeurs et de défense immunitaire.



Un écosystème à régénération naturelle

Les chauves-souris ne souffrent pas de l'usure des **téломères**, ses extrémités de chromosomes qui protègent de la dégradation de l'ADN lors de chaque division cellulaire (Foley et al., 2018, genre étudié *Myotis*).

Une équipe de chercheurs a étudié l'expression des gènes des chauves-souris au cours du temps et elle a comparé leur évolution à celle enregistrée chez la souris, le loup et l'humain. Chez les trois espèces comparées les capacités métaboliques associées à **la réparation de l'ADN, à l'immunité, à l'autophagie** (nettoyage et recyclage des cellules) ou à la **suppression des tumeurs** diminuent avec l'âge, celles du **grand murin** demeurent intactes.

- Pas ou peu de cancer, pas de chute de l'immunité, donc peu d'infections et quand il y a infection, réaction inflammatoire contenue (Kacprzyk et al. 2017)...
- Ce seraient les effets des adaptations dues au vol...



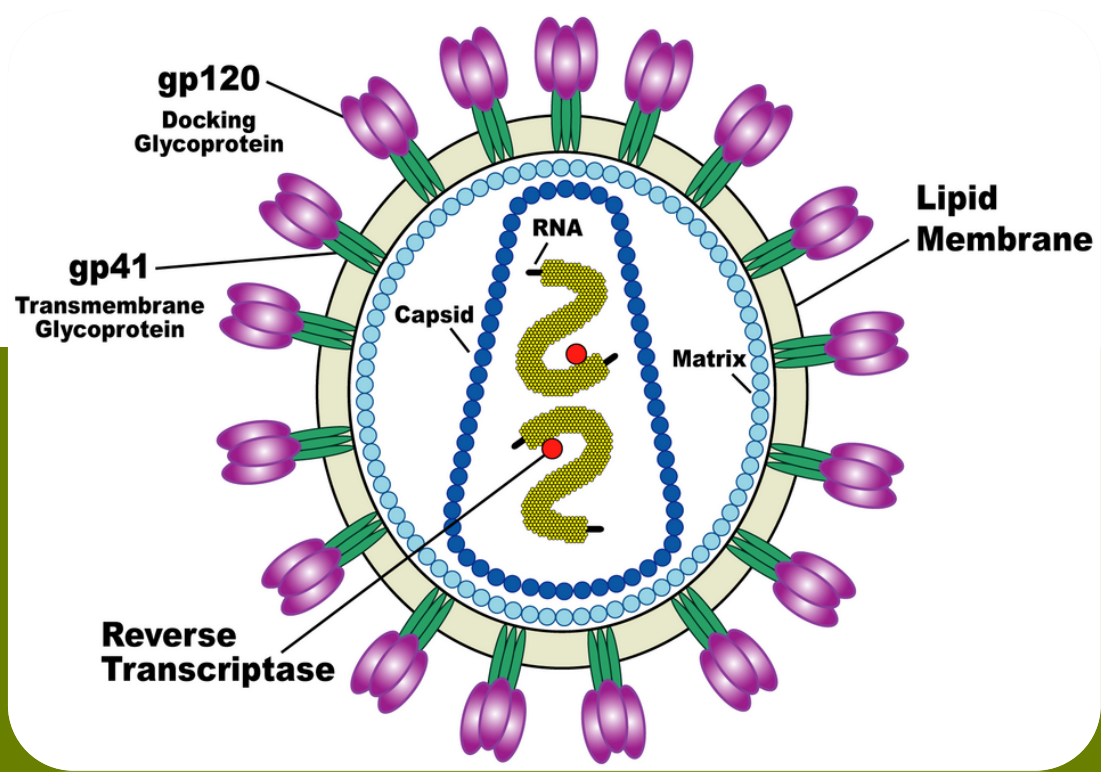
Un système immunitaire hors-normes

Comment les chauves-souris « supportent-elles » tous ces virus ?

Des cultures cellulaires de singe et de deux espèces de chauves-souris (la roussette d'Egypte et la roussette à tête grise) ont été exposées à des virus proches de celui d'Ebola et de celui de Marburg. Chez le singe, les cellules ont été rapidement submergées. Chez les chauves-souris, en revanche, les cellules ont résisté à l'attaque virale. Elles produisent de **l'interféron alpha**, une molécule de signalisation antivirale de la famille des cytokines. Par conséquent, le virus reste plus longtemps dans leur organisme sans être détruit (Brook et al., *eLife* 2020).

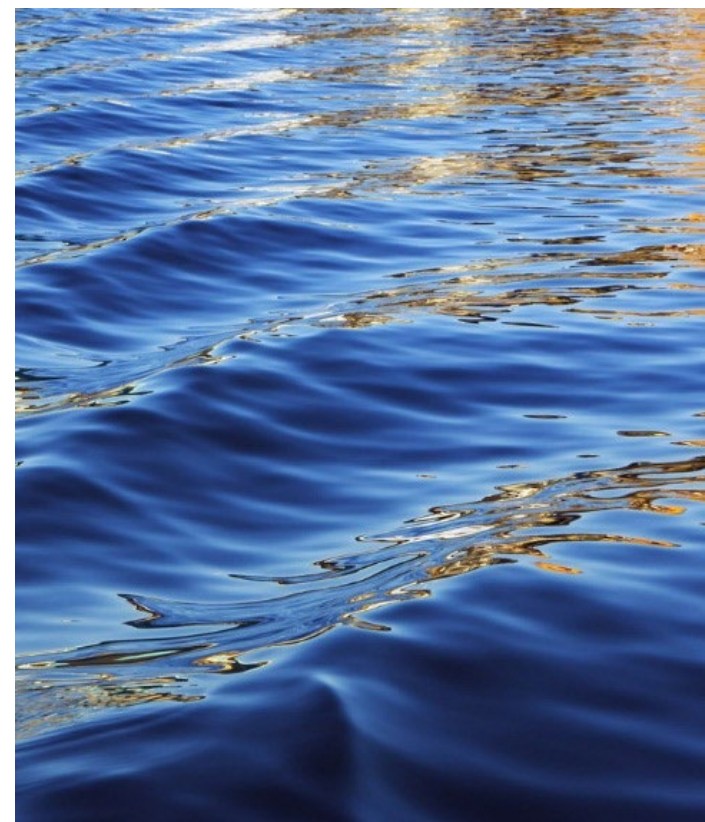
Le système immunitaire de la chauve-souris ne tue pas tous les virus mais ferait suffisamment baisser « la charge virale » pour qu'ils soient tolérés, **la plupart du temps** sans développer de maladie ni de réponse inflammatoire systémique (« orage de cytokines »), qui fait des chauves-souris de parfaites *bibliothécaires de virus* et non de « réservoirs »...

Pour mémoire, en France, plusieurs nouveaux virus de la famille des coronavirus ont été récemment identifiés chez des chauves-souris (Ar Gouilh et al., 2018).



Et les virus dans tout ça ?

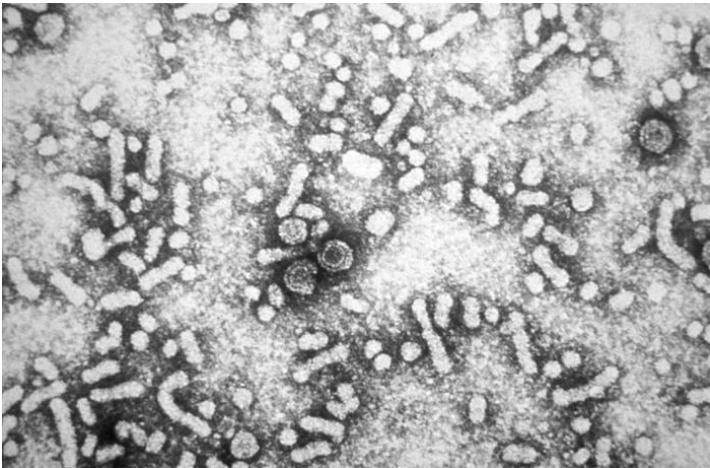
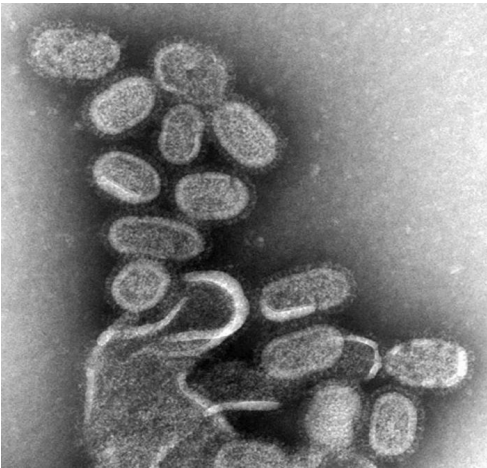
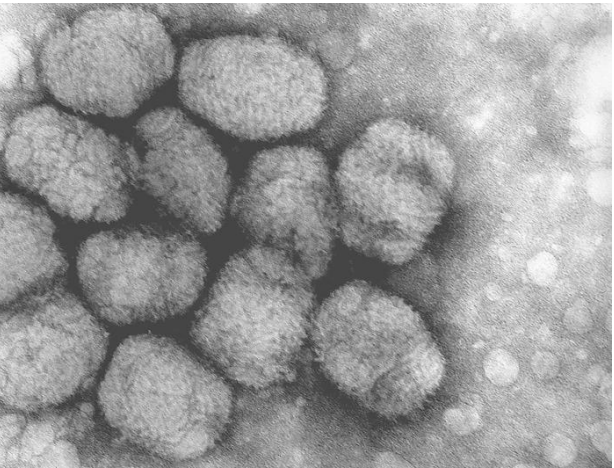
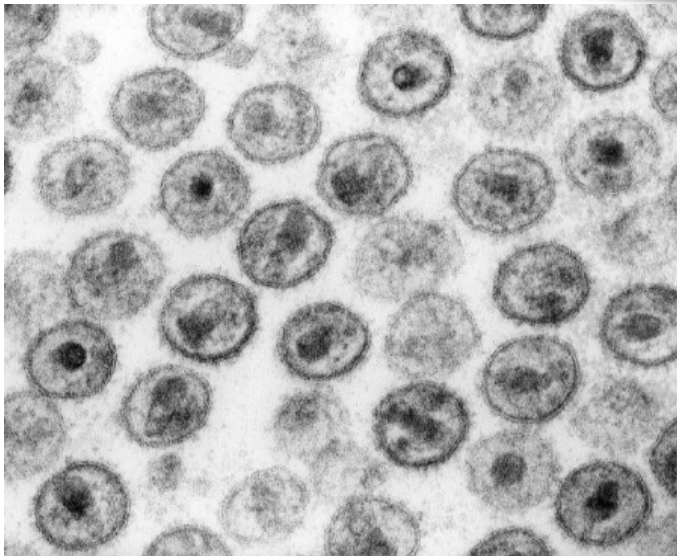
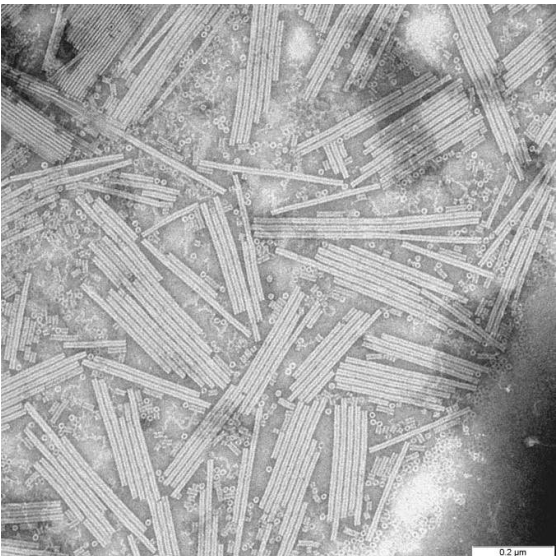
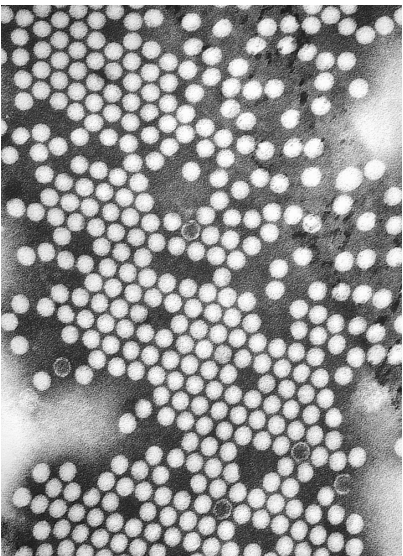
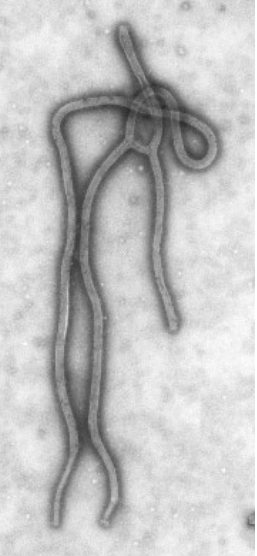
Définition, origine, biodiversité...



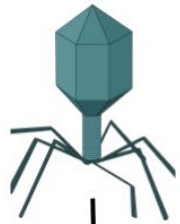
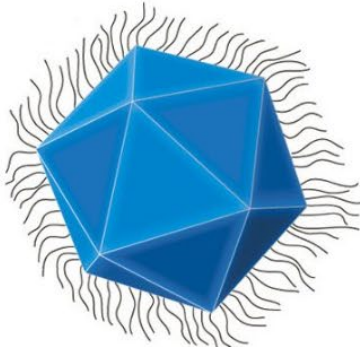
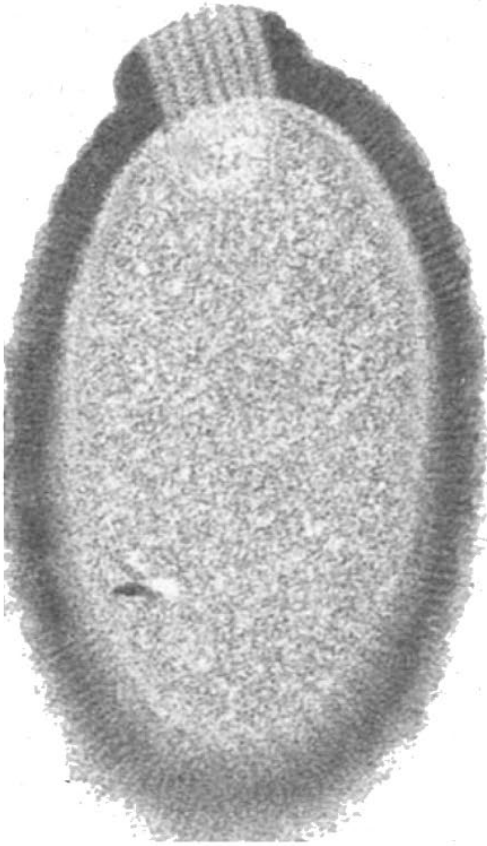


Saurez-vous les reconnaître ?

Quelle variété de formes...



Comparaison des tailles entre virus, virus géants et bactérie



Définition des virus

Virus (lat.) = humeur, venin, poison, toxine... (au figuré : méchanceté, malveillance)

Entités physico-chimiques capables de se multiplier mais qui ont absolument besoin d'un hôte pour cela, les virus ont d'abord été définis par leur taille très petite – de quelques dizaines de nanomètres (nm) à 300 nm –, en comparaison des bactéries.

- Avènement de la microscopie électronique (invention 1931)
- André Lwoff, prix Nobel de médecine : étude structure et composition chimique (1962, première classification)

Vivant ou non vivant ?

Lorsqu'il est en dehors de son hôte (la cellule qu'il parasite), un virus est une particule inerte, qui ne possède ni métabolisme propre (la respiration, par exemple), ni capacité de multiplication, donc pas d'existence autonome → diffère d'une bactérie.

Pour régler cette question, Patrick Forterre a proposé l'expression « **virocellule** » ou **cellule virale** quand le virus est actif au sein de la cellule et donc « vivant ». Les clones produits, les « virions », une fois sortis de la cellule, seraient de nouveau inertes.



Combien sont-ils ?

C'est l'entité biologique la plus abondante et la plus variée sur Terre :

- 10 fois plus abondants que les bactéries
- 100 fois plus que les micro-algues dans l'océan

Pour estimer le nombre de virus chez les mammifères, une équipe a récolté 1897 échantillons biologiques sur des roussettes du Bangladesh, avant de les analyser en laboratoire. Une cinquantaine de virus a ainsi été dénombrée, dont seulement 5 étaient déjà connus. En extrapolant aux **5486 espèces de mammifères connus**, ils sont arrivés à une estimation de **320 000 virus** ! (Anthony, 2013).

Et il n'y a pas que les virus, il y a également les bactéries, champignons parasites, helminthes ou encore protozoaires que les chauves-souris abritent... comme tout être vivant !

- Une étude chez les invertébrés a recensé 1445 virus dans cette « virosphère » (Shi, 2016)
- En 2018, 214 nouveaux virus à ARN ont été découverts chez les vertébrés, montrant que les virus ont coévolué avec leurs hôtes depuis un demi-milliard d'années (Zhang et al. 2019).
- Les expéditions *Tara Océans* ont identifié plus de 5 500 nouvelles espèces de virus ARN dans les océans.
- En 2024, la liste n°40 des espèces de virus de l'ICTV, répertoriait 16 215 espèces, réparties en 368 familles et 3 769 genres.

Il pleut des virus !



Il y aurait plus de 10^{30} (10 000 trilliards) de particules virales dans les océans (Suttle, 2005).

L'aérosolisation de la poussière du sol et des agrégats organiques dans les embruns facilite le transport à longue distance des bactéries et des virus dans l'atmosphère. Ainsi il « pleut » $0,26 \times 10^9$ (260 millions) à plus de 7×10^9 (7 milliards) de virus par m^2 tous les jours sur Terre, contre de 3 à 80 millions de bactéries (Reche et al. 2018).

Ubiquité des virus

- Les virus sont extrêmement abondants dans l'ensemble des écosystèmes terrestres et aquatiques connus, des fonds marins (Danovaro et al., 2008) jusqu'aux glaciers (Zablocki et al., 2014).
- L'abondance des particules virales de la surface de l'océan est comprise entre 10^5 et 10^8 particules par millilitre (Bergh et al., 1989) (Suttle, 2007).

→ je suis sûr que vous y penserez désormais quand vous nagerez !

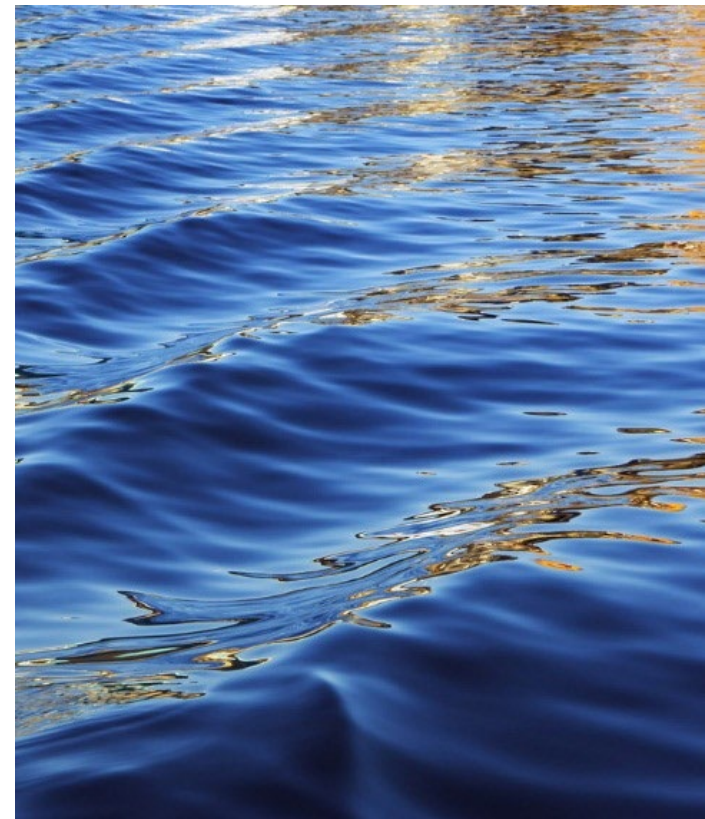


- Le pergélisol (permafrost) est une immense archive de micro-organismes, sa fonte serait susceptible de libérer des bactéries et des virus disparus (potentiellement pathogènes → incident avec le bacille de l'anthrax en Sibérie).
- Le sang humain contient 10^5 particules virales par millilitre tandis que l'urine en contient en moyenne 10^7 /ml. (Rascovan et al., 2016).
- Les séquences virales endogénéisées (le génome est intégré dans la descendance) peuvent ainsi représenter une proportion significative du génome des hôtes. On peut repérer que 8% du génome humain et 10% du génome de la souris sont composés de dérivés de séquences virales endogénéisées (Horie et Tomonaga, 2011).



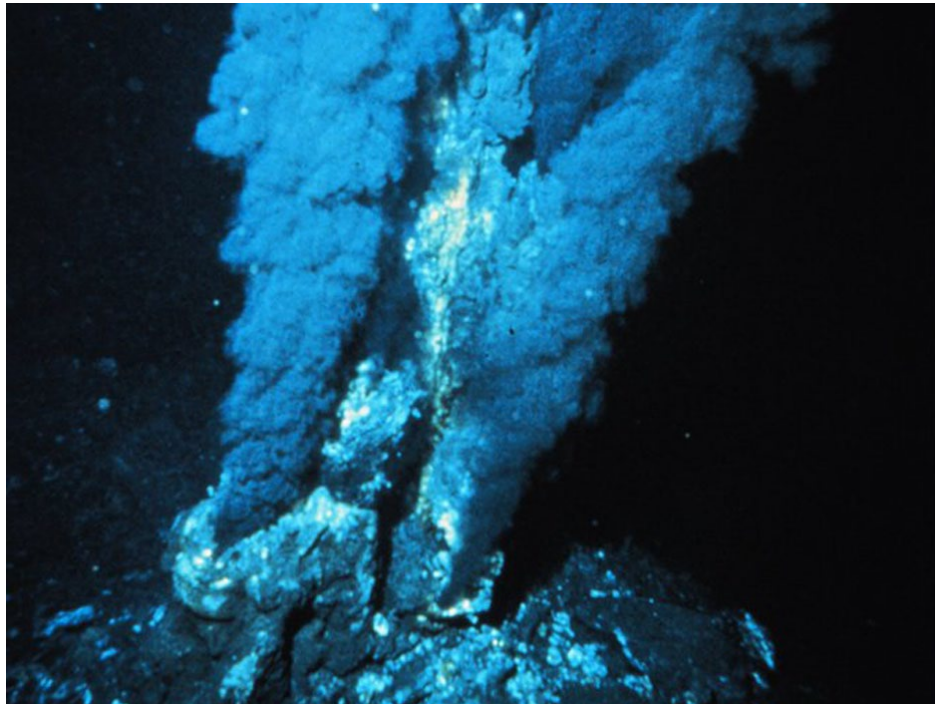
Les virus à l'origine de la vie ?

Les relations au sein du vivant



Luca et l'origine virale de l'ADN

Le dernier ancêtre commun universel (DACU) est le plus récent type d'organisme dont seraient issues toutes les espèces vivant actuellement sur Terre. En anglais, *LUCA* = **Last Universal Common Ancestor**.



LUCA aurait été actif il y a environ 3,3 à 3,8 milliards d'années. Il ne doit pas être confondu avec le premier organisme vivant. C'était un type d'organisme assez complexe, déjà issu d'une longue évolution.

Un événement hydrothermal des abysses, où les scientifiques pensent que *LUCA* vivait des gaz s'échappant de la croûte terrestre.



L'ADN serait d'origine virale ?

Pour le microbiologiste Patrick Forterre, la majorité de l'ADN séquencé dans l'environnement est d'origine virale. Partant de ce principe, on peut extrapoler que la plus grande partie de l'information génétique présente sur notre planète provient des virus.

S'inspirant du mécanisme de rétrotranscription utilisé par les rétrovirus (VIH...), il émet l'hypothèse que LUCA aurait été une cellule avec un génome à ARN.

Il y aurait eu plusieurs transferts d'ADN viral vers les cellules aux cours de l'évolution, éventuellement même trois pour créer les trois lignées actuelles : bactéries, archées, eucaryotes.

Rappelons aussi, que les gènes codant pour les syncytines, des protéines indispensables au fonctionnement du placenta, ont une origine virale ! Il y a environ 150 millions d'années, l'ancêtre des mammifères, qui pondait probablement encore des œufs, a été infecté par un virus. C'est à grâce à ces séquences virales insérées dans le génome des mammifères que le fœtus n'est pas rejeté par le système immunitaire de la mère, alors même qu'il introduit des molécules « étrangères » d'origine paternelle.

Les virus, régulateurs de la biosphère

Au sein du plancton (50% de l'oxygène terrestre, 1,1% de la biomasse), les virus **tuent entre 40 et 50% des bactéries et des micro-algues océaniques par jour** (10^{23} infections virales par seconde !).

On estime que cela représente la libération **d'un milliard de tonnes de carbone par jour**. Les virus constituent ainsi une force directrice majeure des grands cycles biogéochimiques et écologiques de la matière (Danovaro et al., 2008; Rohwer et Thurber, 2009).

En parasitant l'espèce **la plus compétitive** dans un écosystème donné, les virus laissent une niche écologique vacante où des espèces moins compétitives peuvent alors se développer, ce qui aboutit à un maintien de la diversité des communautés d'hôtes (selon le modèle « **kill the winner** ») (Rodriguez-Brito et al., 2010).

La disparition **des efflorescences (blooms) de phytoplancton** en quelques heures, dues aux virus, illustre bien ce phénomène (Wilhelm, 1999).



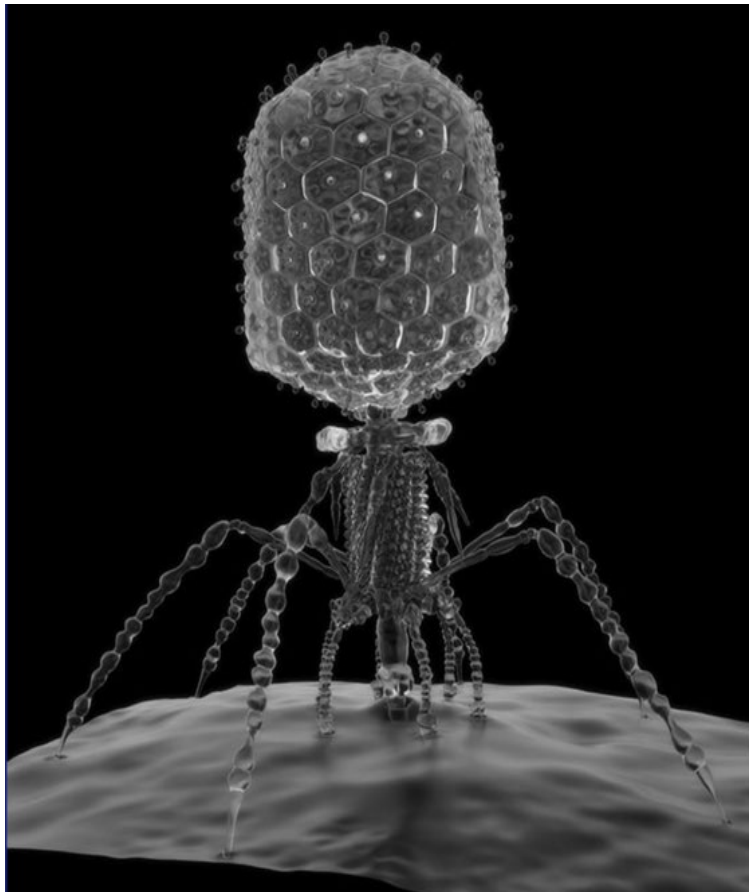
Nous sommes aussi constitués de virus !

- **Le virobiote** constitue la composante virale du **microbiote**.
- L'ensemble de ces virus présents dans la « **flore intestinale** » et sur le **derme** (mais probablement ailleurs) contribuerait, parmi d'autres facteurs, à la régulation (homéostasie) du microbiote et du système immunitaire.
- Suite à une nouvelle estimation du nombre de **cellules humaines**, environ 30 mille milliards (Bianconi et al., 2013) on considère qu'il y a dans le corps humain environ 1,3 fois plus de **bactéries** ($\sim 40 \cdot 10^{12}$) et de **virus** ($\sim 40 \cdot 10^{12}$) que de **cellules humaines**.
- Une étude du **virobiote intestinal** a dénombré **13 000 espèces de virus** dont 96% sont des bactériophages.
- **Le microbiote** a également un rôle dans la maturation puis le fonctionnement du système nerveux central.

Nous sommes un écosystème...



Des virus pour soigner

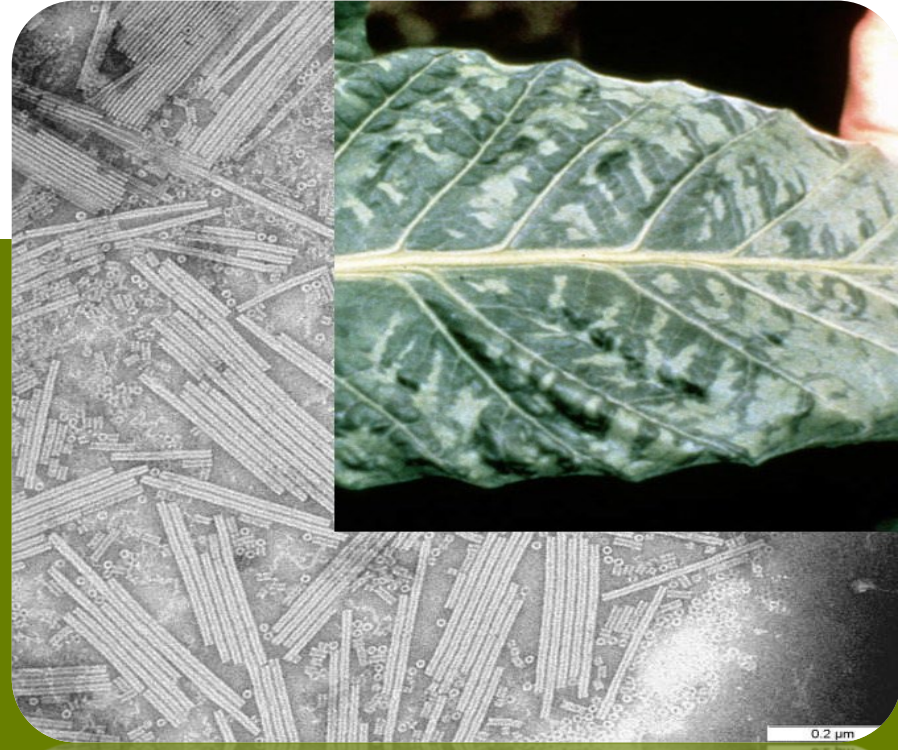


Les vaccins bien sûr ! les virus utilisés comme s(t)imulateurs de l'immunité.

La phagothérapie, c'est-à-dire l'utilisation de virus capables de détruire des bactéries (bactériophages), est l'une des principales alternatives pour lutter contre les infections bactériennes résistantes aux antibiotiques. Un premier essai clinique européen a été mené pour évaluer l'efficacité de cette approche chez les grands brûlés.

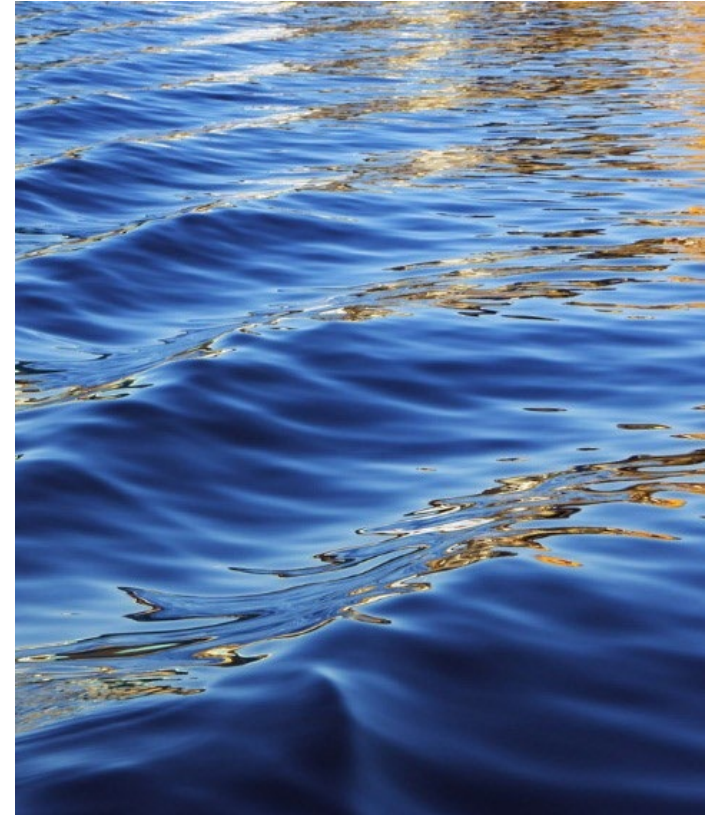
La greffe ou transplantation fécale pour le traitement de l'infection à *Clostridium difficile* (*Cd*) récidivante.

Le *Cd* fait partie de la « flore intestinale » mais son caractère pathogène est réprimé par le microbiote en temps normal. Des antibiotiques peuvent déstabiliser le microbiote et rendre cette bactérie pathogène, contagieuse et résistante. L'adjonction de bactériophages améliore les résultats. La restauration du virome est aussi importante que celle du microbiome bactérien (Zu, 2018).



Virus et maladies

Les virus et les animaux contre les humains ?



Les virus « pathogènes » pour l'être humain

200 espèces environ sont pathogènes chez *Homo sapiens*. La majorité des maladies virales sont bénignes (ex. rhinites), d'autres présentent une certaine gravité : encéphalites, SIDA, hépatites, fièvres hémorragiques.... Enfin certains virus jouent un rôle dans le développement de tumeurs malignes et de cancers.

Les virus sont très sélectifs, ils ne peuvent pas parasiter tous les êtres vivants et au sein d'un même hôte ils présentent une affinité biochimique sélective pour telle ou telle catégorie de cellules.

La « finalité » des virus c'est de se **répliquer**. Il leur faut pour cela des **hôtes en bonne santé** dont l'organisme va supporter la perte de nombreuses cellules pour permettre la réplication. La mort de l'hôte n'a pas « d'intérêt » pour un virus qui perd alors sa « machine à répliquer » (le taux de mortalité des hôtes du virus Ebola limite de fait la prolifération et la diffusion du virus).

60 % des quelque 1500 maladies infectieuses que l'on retrouve chez l'humain sont des **zoonoses**, à savoir des maladies que se partagent les animaux et l'être humain. De plus, depuis quelques décennies, environ 75 % des nouvelles maladies « émergentes » affectant l'humain sont d'origine animale. **Les virus sont responsables de 25 % des maladies infectieuses émergentes humaines** (Jones et al., 2008).



Les chauves-souris transmettent-elles la rage ?



Les chauves-souris transmettent-elles la rage ?

En Europe, les chauves-souris peuvent être porteuses de deux formes du virus (virus à ARN de la famille des Rhabdoviridae, genre *Lyssavirus*, avec 7 génotypes), différentes de la rage des chiens et des renards (génotypes 5 et 6 : European Bat Lyssavirus - EBLV 1 et 2). La transmission se fait via la salive, généralement lors d'une morsure.

Ces virus ne passent que très difficilement la barrière des espèces et seule une minorité d'espèces de chauves-souris (5 sur les 35 espèces françaises, principalement la Sérotine commune, *Eptesicus serotinus*, pour 124 cas sur les 128 connus) et pour l'EBLV-2, le murin de Daubenton (*Myotis daubentonii*) et le murin des marais (*Myotis dasycneme*).

Une chauve-souris contaminée n'est généralement pas agressive, elle sera tout au plus apathique et affaiblie. Elle ne mordra que si on tente de la manipuler. C'est pourquoi, par mesure de précaution, il est toujours conseillé, si vous avez à manipuler une chauve-souris qui vous semble en détresse, de porter des gants en cuir épais.

Au cours des vingt dernières années, une quarantaine de cas de rage chez les chauves-souris a été recensé en France. En août 2019, un cas de rage vraisemblablement transmise par une chauve-souris a provoqué le décès d'un patient en Nouvelle-Aquitaine. Ce cas exceptionnel a été confirmé par le Centre national de référence (CNR) de la rage de l'Institut Pasteur en 2020. C'est la première fois qu'un patient est contaminé par le lyssavirus EBLV-1 en France métropolitaine, et il s'agit du premier cas de rage contracté sur le territoire métropolitain depuis 1924 !

En Europe, la rage des chauves-souris a été détectée dans six cas humains mortels. Aux Etats-Unis, les cas de rage sont désormais plus fréquemment transmis à l'humain par les chauves-souris (70%, 2 cas mortels par an) que par les chiens.

Pour rappel dans le monde, 59 000 personnes meurent encore de la rage chaque année (40% sont des enfants), inoculée par les chiens dans 99% des cas.

Chauves-souris et virus du SARS

Présence dans des chauves-souris (*Rinolophus sinicus* et *Rinolophus ferrumequinum*, province du Yunnan) de coronavirus proches du coronavirus humain du SRAS (SRAS-like coronavirus).

- Génome 92 % d'identité avec celui du SRAS-CoV humain.
- Utilisent même « récepteur » **ACE2 (enzyme de conversion de l'angiotensine 2)** pour entrer dans les cellules.

Nouveau coronavirus SARS-CoV-2 humain :

- apparenté au SRAS Bat-SRAS-like (SL)-ZC45, Bat-SL ZXC21 (environ 89 % d'identité de séquence)
- plus encore **BatCoV RaTG13** (*Rhinolophus affinis*, 2013) → identité de séquence sur l'ensemble du génome de 96,2 %.

Alors, la chauve-souris est démasquée, elle est bien à l'origine de la pandémie de 2020 !?

Et bien, ce n'est pas si simple...

Il semblerait que le SARS-CoV-2 ait dérivé il y a 40 à 70 ans du CoV-RaT-G13 retrouvé chez des rhinolophes du Yunnan, qu'il ait circulé et se soit recombinaison plusieurs fois avant d'émerger dans les populations humaines. (Boni et al., 2020).

Le virus SARS-CoV-2 n'est donc pas directement un virus de chauve-souris, il fait partie du même phylum mais a divergé, circule et évolue de manière sélective depuis bien longtemps.

L'être humain, « réservoir » de virus

L'être humain est le réservoir exclusif des virus de :

- La variole (éradiquée)
- La varicelle
- L'herpès (simplex)
- La poliomyélite (quasiment éradiquée)
- La rougeole
- L'hépatite B
- Des principales gastro-entérites (à rotavirus, première cause au niveau mondial)
- Papillomavirus humain (PV), etc.

Et réservoir principal des virus de :

- SIDA (le VIH dérive du VIS, le virus simien de l'immuno-déficiences)
- La grippe (il constitue le réservoir pour les formes humaines et est apparemment le seul réservoir des virus types B et C)
- Des rhumes et rhinopharyngites (à rhinovirus dont le réservoir sont principalement les enfants)
- Des pharyngites, infections respiratoires, gastro-entérites et conjonctivite (à adénovirus, l'humain est le réservoir exclusif, et l'hôte de la plupart des 45 sérotypes), etc.

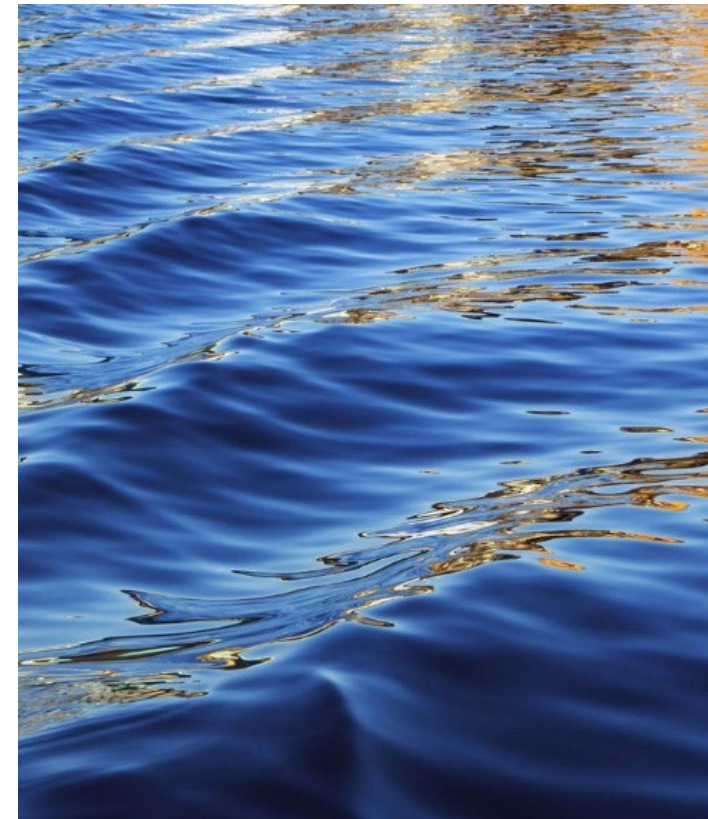


© Radomianin / Wikimedia Commons / CC BY-SA 4.0



Les humains contre le reste du monde ?

Les chauves-souris, témoins et victimes de la destruction des écosystèmes

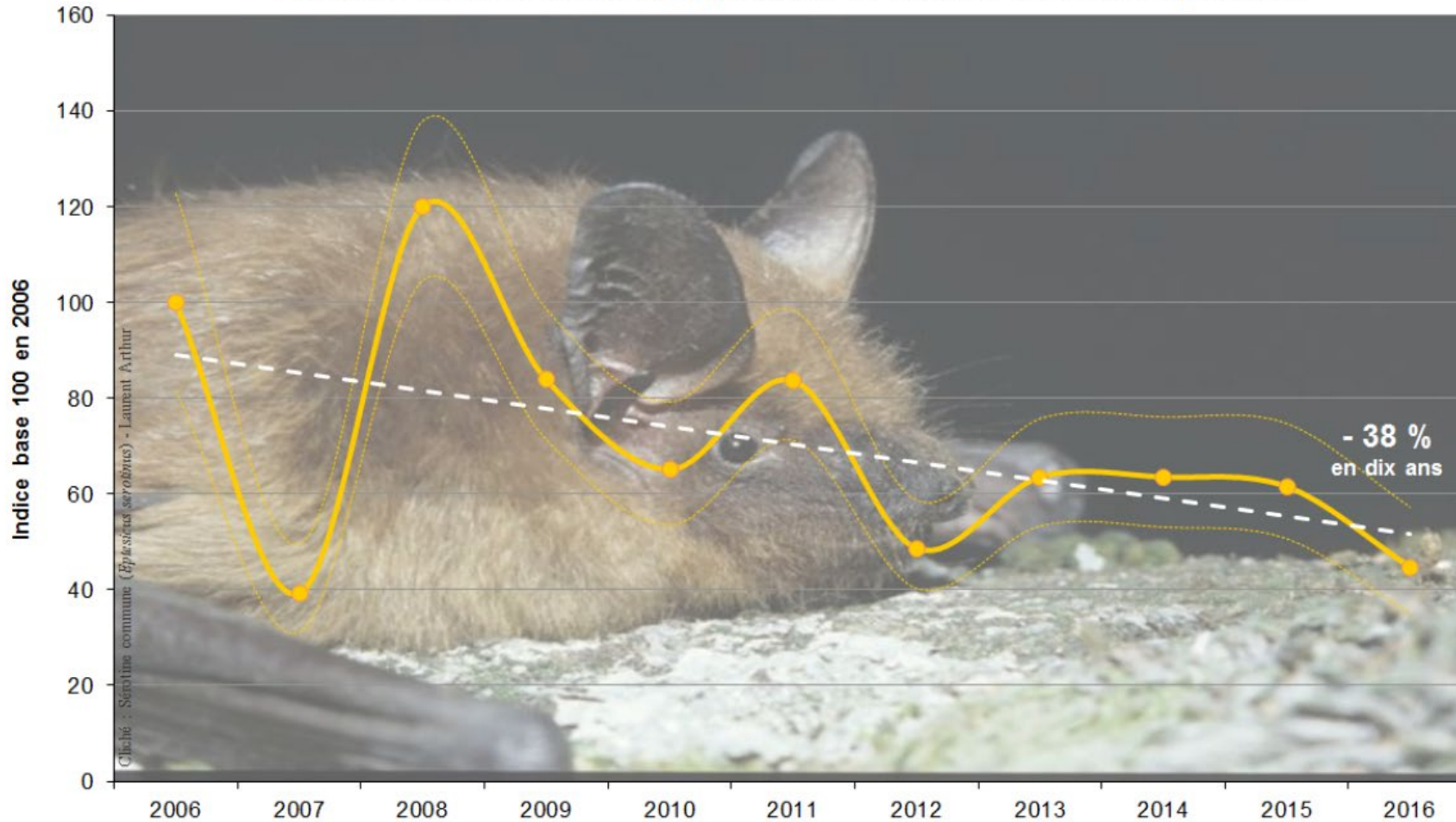


Les chauves-souris menacées par *Homo sapiens*

- **La disparition ou la modification des gîtes** : rénovation des bâtiments ou des ponts, fermeture de l'entrée des gîtes souterrains, abattage des arbres à cavités, l'éclairage des monuments... ne prenant pas en compte ces mammifères...
- **La transformation de leur domaine** (routes de vol et terrains de chasse) : densification du réseau routier, abandon du pâturage extensif, destruction des haies, disparition de zones humides, homogénéisation des boisements, artificialisation des cours d'eau, pollution lumineuse...
- **Les dérangements durant l'hibernation ou la reproduction**,...
- **La transmission** de virus et bactéries par les humains (spéléologues).
- **Les produits chimiques** : traitement de charpentes, pesticides, antiparasitaires...
→ en trente ans près de 80% des insectes européens ont disparu !
- **Mortalité directe** : prédation par le chat, développement éolien, véhicules...
- « *En France, nous estimons que près de 40 % des chauves-souris ont disparu en dix ans entre 2006 et 2016 en raison des activités humaines* », (Fabien Claireau, Muséum national d'histoire naturelle, S&A, 2019). Combien depuis ?

Petit rappel d'importance

Evolution de l'abondance des populations de chauves-souris métropolitaines



En Europe, toutes les espèces de chauves-souris sont protégées conformément à une directive et des conventions internationales (Directive Habitats Faune Flore, Convention de Berne, Convention sur les espèces migratrices, Accord EUROBATs) et aux législations nationales.

Note : prise en compte de 7 espèces ou groupes d'espèces : groupe des *Myotis*, *P. kulhii*, *P. pipistrellus*, *P. pygmaeus*, *E. seronitus*, *N. leisleri* et *N. noctula*.



ONB Visuel ONB, d'après :
Origine des données : Programme Vigie-chiro de Vigie Nature
Traitements : CESCO - UMS Patrinat, 2017

Quand *Homo sapiens* provoque une épidémie chez les chiroptères

Depuis 2007, les chiroptères d'Amérique du nord sont victimes par millions (+ de 40 ?) du **syndrome du nez blanc** (WNS), une maladie due au champignon *Pseudogymnoascus destructans* (Pd).

Sur dix-huit espèces suivies, quatorze sont gravement touchées (90% mortalité certaines colonies) et probablement d'autres non encore testées. La maladie apparue dans l'Etat de New York a gagné le centre des Etats-Unis et le Canada. Depuis deux ans, elle a touché le Colorado et la Californie.

Cette épidémie serait liée à l'explosion de **la circulation humaine** à travers le globe. Le « pathogène » serait arrivé en provenance d'Europe centrale (région de Podillia en Ukraine) dans les valises ou sous les semelles des voyageurs. Une autre espèce originaire d'Eurasie serait également pathogène, mais n'est pas encore signalée en Amérique. En Europe, ce champignon existe depuis très longtemps. Il avait par le passé peut-être affecté les populations de chiroptères, mais depuis, les deux auraient coévolué et appris à vivre ensemble.

Cette épidémie est à rapprocher de la pandémie de **chytridiomycose** (à champignon *Batrachochytrium dendrobatidis*) qui décime les populations mondiales de batraciens et qui est également de cause anthropique.

Spéléologie et biosécurité

- Grâce à l'analyse génétique de plus de 5400 échantillons collectés à travers l'Eurasie et l'Amérique du Nord, une étude internationale de 2025 identifie pour la première fois avec précision la région d'origine de la lignée responsable de l'épidémie nord-américaine de la maladie du nez blanc : la région de Podillia, en Ukraine. Les résultats suggèrent que l'introduction accidentelle du champignon en Amérique du Nord, vraisemblablement via des échanges avec des explorateurs de grottes de l'État de New York, où la maladie a été détectée pour la première fois, provient d'un événement unique. Ce travail met fin à près de deux décennies de spéculations sur l'origine de la maladie du nez blanc outre-Atlantique et illustre de manière frappante l'impact qu'un seul événement de translocation peut avoir sur la faune sauvage.
- Cette découverte met en lumière les risques majeurs que représentent les activités de spéléologie pour la dispersion d'agents pathogènes, et souligne l'urgence d'une meilleure connaissance de la "pollution biologique" liée aux déplacements humains. La prévention du transport involontaire de champignons pathogènes comme *Pseudogymnoascus destructans* doit devenir une priorité dans les stratégies de conservation et de gestion sanitaire, tant pour la faune que pour les humains. **Le nettoyage systématique et rigoureux de l'équipement de spéléologie** lors des voyages s'impose comme une mesure essentielle : des études montrent qu'il permet de réduire drastiquement la présence de spores viables et limite ainsi la propagation du champignon qui cause la maladie du nez blanc.
- Source : Un nouveau champignon pathogène menace les chauves-souris. <https://www.umontpellier.fr/articles/un-nouveau-champignon-pathogene-menace-les-chauves-souris>



Spéléologie et biosécurité

Histoplasmose

- Le guano, excrément des chauves-souris, est lui-même porteur d'agents pathogènes multiples (virus, bactéries, champignons, parasites) dont le plus significatif est l'histoplasmose bien connue des spéléologues en expédition tropicale, mais aussi l'aspergillose et la cryptococcose.

Vigilances pour la leptospirose

- Certaines chauves – souris sont infectées par les leptospires alors que d'autres non. Chaque famille de chauves – souris infectées ont une ou plusieurs leptospires spécifiques.
- Les chauves-souris, bien que densément infectées par *L. botgpetersenii*, ne contribuent pas à la leptospirose humaine car elles excrètent des leptospires dont les génotypes n'ont pas été retrouvés chez les cas humains.

Et la borreliose de Lyme (*Borrelia burgdorferi*)

- Il existe une tique, du genre *Argas* (tiques « molles »), *Argas vespertilionis* dans les colonies de chauves-souris, qui peut transmettre des bactéries et des virus pathogènes à l'animal mais pas d'exemple connu de pathogène pour l'humain (possible réactions allergiques).

Virus et changements climatiques

Les changements climatiques affectent les micro-organismes (au sens large : bactéries, virus, et beaucoup d'autres) mais dans certains cas, les micro-organismes ont également un effet sur les changements climatiques (Cavicchioli et al., 2019).

Le transport international et le réchauffement ont un impact sur la diffusion de certaines maladies « tropicales » : moustique-tigre (*Aedes albopictus* qui s'est adapté jusqu'en France) réservoir et vecteur entre autre du virus de la dengue, du Chikungunya, du Zika (plutôt transmis par *Aedes aegypti*).



Le moustique « local » (*Culex pipiens*), présent sur l'ensemble de la métropole, peut également être porteur de virus potentiellement dangereux pour l'être humain. C'est principalement le cas du virus West Nile (virus du Nil occidental), ainsi 2083 cas humains autochtones confirmés ont été déclarés en Europe en 2018 (avec 181 décès).

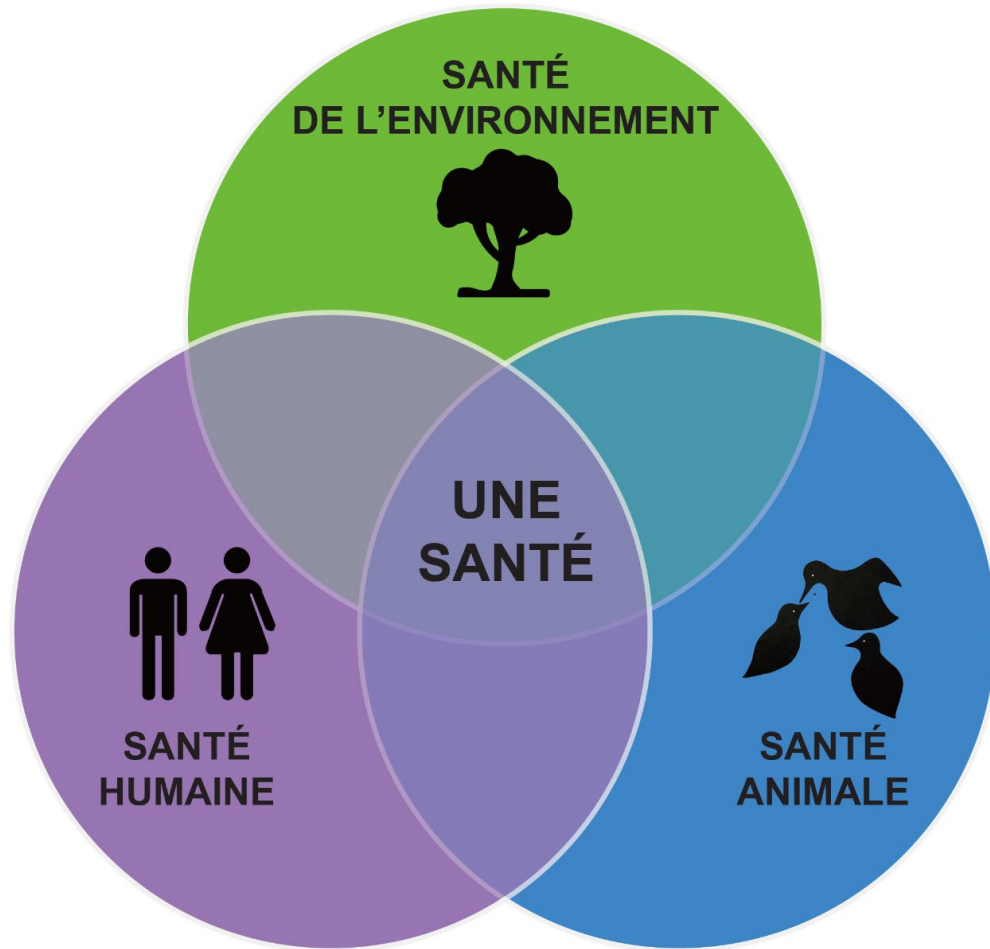
Anthropisation des écosystèmes

Le fait que des virus de chauves-souris ou d'autres espèces sauvages passent occasionnellement à d'autres espèces animales (notamment domestiques) et à *Homo sapiens* est largement dû aux activités humaines, en premier lieu aux pratiques agricoles modernes (nouvelles plantations, déforestations, urbanisation, élevages industriels, pesticides, etc.).

Empiétant sur des écosystèmes naturels elles ont contribué à mettre en relation des espèces animales sauvages n'ayant normalement que peu ou pas de contacts avec l'humain. La conséquence a été de rapprocher des populations de chauves-souris avec des habitats humains et/ou des élevages d'animaux domestiques.

Par conséquent, de nombreux chercheurs estiment que la façon la plus efficace d'éviter des zoonoses virales est de maintenir des barrières entre ces réservoirs naturels et la société humaine, en gardant à l'esprit le concept de « santé globale » (One Health) qui considère que la santé humaine est connectée à la santé animale et à l'environnement.

Démarche « one health » (OMS)



Approche « Un monde, une santé »

Cette initiative mondiale – « One Health » en anglais – préconise de gérer la question de la santé humaine en lien avec l'environnement et la biodiversité. Elle identifie trois objectifs principaux : lutter contre les zoonoses (maladies transmissibles des animaux aux humains et inversement) ; assurer la sécurité sanitaire des aliments ; lutter contre la résistance aux antibiotiques.

Approche plus éco-systémique mais pas encore « globale » comme *Gaïa* qui ne ferait pas cette différence entre « environnement » et humains ou animaux (il n'y a pas de décor seulement des acteurs) ...



Anthropisation des écosystèmes

L'Asie du Sud-Est est la région qui a connu la plus grande déforestation ces 40 dernières années, avec une perte de 30 % des surfaces forestières. Dans le même temps, la population humaine en Asie du Sud-Est a augmenté de 130 millions entre 2001 et 2011.

En 2008, des chercheurs vietnamiens et britanniques ont rapporté dans la revue *Zoonoses Public Health* qu'environ 4,4 % des rats vendus dans trois marchés d'animaux vivants dans la région du Mekong au Vietnam et 22 % des chauves-souris provenant de fermes spécialisées dans la collecte de guano étaient porteurs de coronavirus dans leurs excréments.

L'usage de médicaments vétérinaires peut conduire à l'effondrement des populations d'animaux sauvages ; ainsi, le *Diclofenac* utilisé pour traiter les bovins en Inde aurait décimé plus de 95 % des vautours, générant par un effet de cascade une épidémie de rage. (Markandy et al., 2008).

En Europe, campagnes d'élimination des sangliers potentiellement porteurs de la grippe porcine...

Questionnements, discussion

- Relations humains non humains : « La nature est un concept occidental qui désigne l'ensemble des non-humains. Et cette séparation entre humain et non-humain a eu pour résultat d'introduire une distance sociale entre eux. » (P. Descola, 2020). La chauve-souris pourrait-elle être une « espèce-compagne » de l'humanité (Dona Haraway)
- Destruction écosystèmes & biodiversité, extinction de masse, changements climatiques, « Émergence » de nouvelles maladies : prévention, précaution ou préparation ?
- Élevages industriels, diminution de la biodiversité, antibiotiques, consommation carnée, échanges commerciaux internationaux
- Augmentation de la mobilité, notamment via le transport aérien intercontinental
- Pratiques culturelles à condamner ?
- **Et la spéléo dans tout ça ?** : protection des biotopes et des espèces, sensibilisation, formation, question des expéditions internationales (pas d'expé sans accompagnateurs locaux ?), prévention, prophylaxie...
- Lien vers site GEB + commission scientifique (nouveau dépliant) + COMED + actions dans vos régions (comptages, actions de protection, préservation des écosystèmes, information du grand public, etc.



Merci de votre attention et
de votre participation !

