



HAL
open science

Aiôn et Khronos dans la tourmente de la crise pandémique à COVID-19

Jean-François Guégan, Patrick Giraudoux

► **To cite this version:**

Jean-François Guégan, Patrick Giraudoux. Aiôn et Khronos dans la tourmente de la crise pandémique à COVID-19. Alienor Bertrand; Patrick Giraudoux; Arnaud Macé. Les temps des pandémies, Belin education, 2023, 979-1035823917. hal-04082351

HAL Id: hal-04082351

<https://hal.science/hal-04082351>

Submitted on 21 Jan 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

***Aiôn* et *Khronos* dans la tourmente de la crise pandémique à COVID-19**

Jean-François Guégan^{1,2} et Patrick Giraudoux³

Ecologues

¹ Maladies Infectieuses et Vecteurs : Ecologie, Génétique, Evolution et Contrôle (UMR MIVEGEC), Université de Montpellier (UM), Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Montpellier, France

² Epidémiologie des maladies animales (UMR EPIA), INRAE, VetAgro Sup, 63122 Saint-Genès-Champanelle, France

³ UMR Chrono-environnement, Université Bourgogne Franche-Comté, Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Besançon, France

Introduction

Aiôn : le terme désigne chez les Présocratiques le temps d'une vie ou d'un destin d'homme. Héraclite (VI^{ème}-V^{ème} siècle av. J.-C.) comparait *aiôn* et ses actions à un enfant malin, se livrant à des fantaisies dans l'attribution à chacun de son destin, jeu dont les mortels étaient incapables de prévoir l'issue (Bouvier et Dasen, 2021). Dans les textes de l'antiquité tardive, *Aiôn* devient parfois lui-même un dieu (Festugière, 1944-1954) : il est le temps qui renaît indéfiniment, et qui est marqué par les cycles et les saisons. Il existe, en vérité, deux usages du sens donné à *aiôn* : d'un côté la durée longue, de l'autre les perturbations qui résultent de l'enchevêtrement des temporalités et qui elles-mêmes relèvent de mesures spécifiques assurées par *khronos*. Dans ce chapitre, nous utiliserons tour à tour ces deux acceptions pour *aiôn* (Festugière, 1949), car il produit un enchevêtrement de temporalités différentes conduisant à des perturbations dynamiques sous l'effet de la globalisation temporelle qu'il anime. Les philosophes ont entrepris d'opposer *Aiôn* à *Khronos*, horloger du temps physique, objectif et rationalisé qui régule la succession linéaire des événements du monde (Roquet, 2013). Différentes conceptions temporelles existent encore aujourd'hui dans les activités individuelles, sociales et professionnelles développées dans nos sociétés ; elles alimentent notre vocabulaire comme *tempus* qui représente le temps grammatical de la langue et permet de distinguer entre le passé, le présent et le futur, ou *kairos* qui est le temps de l'occasion opportune et du basculement entre un avant et un après. Trédé (2018) montre que la notion de *kairos* évolue aussi au rythme des savoirs, des sciences et des techniques ont précisément pour tâche de parvenir à savoir quel est à chaque fois le bon moment pour agir. Le *kairos* constitue alors l'expression d'un regard sur les sciences et les pratiques selon lequel celles-ci doivent savoir identifier le moment où leur objet est mûr et est donc proche d'un point de bascule pour sa compréhension (Figure 1).

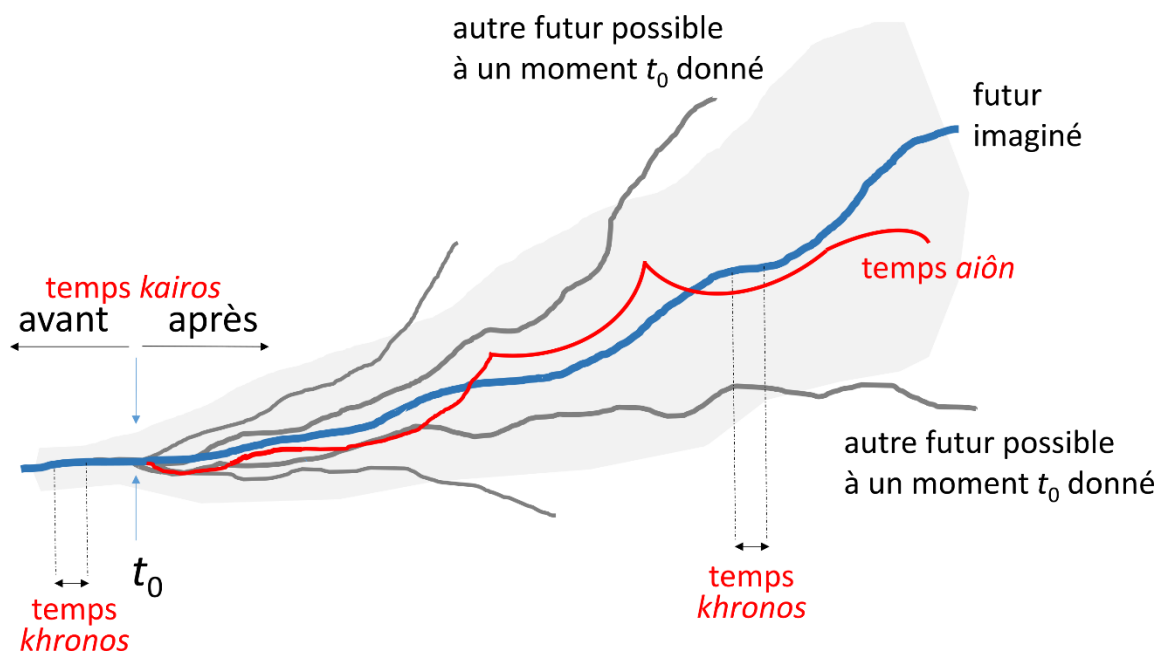


Figure 1. Représentation schématique des trois temps discutés dans ce chapitre. Khronos est le temps le plus connu, et est celui que nous mesurons, comme la seconde, la minute, la semaine. Khronos est un temps quantitatif et linéaire. Le temps kairos est un temps qualitatif et métaphysique, et il correspond à un basculement décisif comme l'avant et l'après, mais correspond aussi très bien aux points de basculement ou rupture dans les systèmes complexes. Enfin, le temps aiôn, le plus méconnu, est à la fois le temps des cycles comme les saisons, le rythme nyctéméral, mais il peut aussi signifier l'éternité. Les spécialistes des systèmes complexes, comme les écologues et les physiciens, fonctionnent le plus souvent dans un temps aiôn - en fait, ils travaillent dans les trois temps - alors que la biologie moderne appréhende uniquement le temps khronos. Les auteurs de ce chapitre préconisent un retour de la biologie actuelle, mais aussi de nombreuses disciplines de la recherche scientifique, dans une meilleure prise en compte des trois temps khronos, kairos et aiôn. Avertissement : le temps aiôn est en réalité très difficile à illustrer car pour chaque temps t des solutions multiples s'ouvrent à lui, et il faudrait donc pour chaque projection dessiner différentes trajectoires possibles ainsi que nous l'illustrons pour le temps repère t_0 . Aiôn est cet espiègle qui emprunte ces voies en passant d'une trajectoire à une autre en fonction des événements à se produire (Crédit J.F. Guégan Licence CC-BY 4.0).

Dans nos sociétés modernes, nos rapports aux différentes temporalités ont été plus ou moins vidés de cette charge symbolique, emprisonnés dans un temps vécu par l'expérience quotidienne et le déploiement des informations régulières par les médias. La pandémie à COVID-19, qui incontestablement marquera ce début du XXI^{ème} siècle, n'est pas sans nous rappeler les mauvaises farces d'*Aiôn*, l'enfant qui bouleverse les pièces du jeu que l'on pensait bien rangées, comme si ce dernier avait encore le pouvoir de traverser ces différentes temporalités, de le bouleverser en imposant son esprit espiègle dans une société mondiale rythmée par le temps continu et monotone. En accord avec Deleuze (*in* Laporte, 2005), l'*aiôn* devient cependant un défi lancé à nos savoirs et à nos pratiques pour reconsidérer l'ensemble des points critiques qu'ils ont la charge de savoir souligner.

Nos rapports humains aux différentes temporalités peuvent être conçus comme une juxtaposition de pièces ou d'éléments s'articulant les uns avec les autres et qu'il serait possible de franchir en un temps donné. La compréhension que nous avons de la pandémie actuelle et du virus SRAS-CoV-2 qui en est la cause mime le temps *khronos* dans lequel de nouveaux variants viraux se déploieraient de manière quasi-infinie et rythmeraient notre temps récent et notre futur ainsi que les décisions à adopter. Or, le temps *kairos* et les jeux d'*Aiôn* viennent déplacer cette perspective vers un devenir non identifiable au sens que lui

donne Gilles Deleuze (Laporte, 2005), et dans lequel le temps ne cesse de se diviser en un avant et un après en fonction des déplacements humains, des différentes politiques vaccinales nationales et des réticences individuelles et collectives à la vaccination.

De manière plus pragmatique, nous percevons le présent comme souvent très long et lorsque nous réfléchissons à posteriori sur celui-ci il nous apparaît alors plus court, souligne la neurobiologiste Virginie Van Wassenhove (2016). Pour autant, chacun d'entre nous a déjà ressenti qu'en fonction des contextes le temps n'allait pas à la même allure, passant ainsi plus ou moins vite. Les psychologues admettent aujourd'hui que les enfants apprennent à maîtriser la représentation du temps par l'éducation progressive des rythmes qui scandent leur existence, et ainsi la notion de temps et ces variations n'émerge définitivement qu'avec l'arrivée de l'adolescence (Droit-Volet, 2005). A quatre ans, un enfant a plus de difficultés à concevoir les saisons que les jours de la semaine parce que ces premières dépendent étroitement de la durée de vie conceptuelle de l'enfant.

Pouvons-nous établir des relations, et lesquelles, entre la perception individuelle du temps et ses variations et la manière dont différentes disciplines scientifiques ou médicales apprennent à découper, ou pas, les objets d'étude en autant de contenus et de contextes aux régularités simples et souvent courtes ? Comment les différentes temporalités, celle du scientifique, du politique, celle du patient ou encore celle du citoyen peuvent-elles se combiner ? En quoi la crise de la COVID-19 est-elle un apprentissage des différentes formes du temps, des mutations des virus jusqu'aux réactions des sociétés ?

La notion d'échelles d'organisation, et de transfert d'échelle

La question des échelles d'observation est un sujet classique dans de nombreuses disciplines à commencer par les nôtres, l'écologie fonctionnelle et évolutive, dont les champs d'application sont au croisement entre les sciences de la vie et de la terre, de l'écologie et de l'épidémiologie (Ezenwa *et alii*, 2015). Elle est pourtant très peu développée dans les faits par de très nombreux champs disciplinaires, et il ne suffit pas d'articuler deux ou trois niveaux d'échelles d'organisation comme souvent en biologie, par exemple l'étude des gènes, le niveau cellulaire et celui des patients, pour réellement procéder à un transfert d'échelles. La crise pandémique de la COVID-19 a mis en exergue la difficulté à interpréter la pandémie sous l'angle strict de la virologie moléculaire et de son interprétation épidémiologique en populations, alors même que ces notions sont évidemment reliées par cette question d'échelles. Les modifications du virus SRAS-CoV-2 et l'apparition de ses variants ne peuvent pas être comprises sans tenir compte d'une perspective inscrivant cette variabilité et l'apparition de mutations dans le jeu évolutif mais aussi social, économique et

politique international favorisant de telles trajectoires. De même, la protection individuelle apportée par la vaccination contre ce virus est bien comprise en général par le public, mais les effets indirects de la protection vaccinale dite d'immunité de groupe, ou « de troupeau » (de l'anglais *herd immunity*), l'est beaucoup moins ou pas du tout. Cette immunité indirecte vient du moindre risque pour un individu de rencontrer un agent pathogène, et ainsi de le contracter, du fait de vivre dans une population ayant une proportion élevée de personnes vaccinées, et sous la condition aujourd'hui incomplètement satisfaite que la vaccination limite suffisamment la transmission infectieuse. Cette notion s'est d'ailleurs compliquée avec les variants récents comme *Omicron*, du fait que la vaccination protégeait des complications graves de la maladie, mais n'empêchait pas totalement de la contracter, et donc de la transmettre. Ainsi, un des grands paradoxes qui émerge de ces approches par échelles est de souvent faire apparaître qu'un résultat vrai scientifiquement à une échelle donnée - l'exemple des mutations virales actuellement - peut n'avoir aucune pertinence évolutive et même sociale. Les mutations du génome viral doivent être comprises dans leur dimension évolutive, et interprétées comme un produit complexe. Elles peuvent donc se révéler sans utilité ou du moins être beaucoup moins graves qu'imaginées initialement : une mutation peut être neutre et globalement sans intérêt, positive pour le virus car elle permet au virus de franchir un pas évolutif (par exemple une plus forte contagiosité) ou négative entraînant une charge délétère pour le microbe qui la porte. La double question des échelles et du transfert d'échelles ne constitue donc pas seulement une question épistémologique, mais elle présente véritablement des implications pratiques dans les domaines de santé, des politiques de santé mais aussi d'autres formes de collaboration entre différents acteurs.

C'est aussi probablement parce qu'elle peut remettre en question la pertinence de certains résultats et l'hégémonie actuel de certaines disciplines que cette question des échelles d'organisation et du transfert d'échelles n'est pas appréhendée et si peu développée. Ce qui est visible à une échelle peut disparaître quand on change d'échelle d'observation, et des déterminants invisibles à une échelle donnée peuvent apparaître du fait même de ce changement d'échelle. Ainsi, on ne répond pas, par exemple, au sujet des impacts du changement climatique sur la transmission d'agents infectieux en limitant le cadre d'étude au raisonnement issu de la biologie réductionniste développée au laboratoire. Embrasser différentes échelles temporelles en science, ainsi que les échelles d'espace qui leurs sont liées, de la biochimie cellulaire (virtuellement rythmée par l'instantané) à l'étude des écosystèmes (marquée par le temps long), c'est accepter l'apparition de différents motifs, ou schèmes, et les explications qui y sont associées. Chaque explication apparaît pertinente à une échelle d'espace et de temps donnée et en fonction d'un problème spécifique, et cette méthode des échelles d'observation pose bien évidemment le sujet de la relativité des explications, mais sert aussi comme outil de recherche interdisciplinaire.

Images simplifiées et échelles de temps courtes impriment la connaissance actuelle

Parce que la recherche en biologie est dominée depuis un demi-siècle par les approches dites mécanistiques, c'est-à-dire développées à des niveaux d'échelles fins du vivant, elle a obligatoirement conduit à développer une connaissance, certes nécessaire mais extrêmement simplifiée, du monde qui nous entoure (Guégan, 2022). Cette vision sous la forme de briques élémentaires du vivant - nous ne contestons pas ici leur existence mais critiquons l'hégémonisme explicatif sous-jacent - a comme corollaire, peu ou pas discuté tant d'un point de vue scientifique qu'épistémologique, de réduire le degré d'analyses en limitant le champ d'études et d'approches à des espaces limités souvent très petits (on déborde rarement la circonférence d'une boîte de Pétri en biologie classique) et en conséquence des temporalités courtes (l'apparition de mutations chez un agent pathogène en quelques heures à quelques semaines). Tout tend ainsi à ce qu'une forme de réductionnisme scientifique entraîne avec lui une perte de représentation de la complexité réelle (avec l'acceptation d'images très simplifiées de cette réalité) et de prise en compte d'échelles de temps longues (Giraudoux *et alii*, sous presse), dans lesquels évidemment viennent s'inscrire les éléments plus rudimentaires. La représentation du temps *khronos* imprime irrémédiablement sa marque et s'impose à nous comme le résultat de simples empilements des briques élémentaires dans une explication du tout par ses parties. Il est alors nécessaire de « réveiller » *khronos* pour lui ouvrir un horizon plus large, celui d'un *aiôn* d'une durée plus étendue.

Selon Aguma Asima (2013), le mécanisme est un système de pensée en science qui repose sur deux idées-forces : une première qui institue que le monde peut être décrit en concepts simples, familiers et souvent banals, à la manière d'un vieux chronomètre qui lui est cependant complexe et subtil ; une seconde qui stipule que, si on connaît les lois physiques d'une part, et si, *a fortiori*, on connaît de manière précise l'ensemble des parties d'un système fut-il complexe, alors on connaît par ricochet le système tout entier. Ces deux idées-forces sont toutefois réfutées par la science moderne notamment issue de la physique, de la théorie des systèmes complexes ou encore de l'écologie (voir Hassell *et alii*, 2021 pour une illustration sur les maladies infectieuses). Les systèmes vivants ne sont pas les analogues de rouages fixes d'une horloge. Les propriétés de ce qui pourraient être considéré comme ces « rouages » ne sont en effet pas fixes (différences individuelles, capacités physiologiques adaptatives, évolution darwinienne) ; des propriétés émergentes propres à l'horloge elle-même et non aux rouages qui la constituent peuvent apparaître, ainsi que des bifurcations imprévisibles, popularisées par le fameux effet « papillon », dues à la sensibilité du système, ici notre horloge, à de petites différences initiales lors du redémarrage de l'horloge par exemple.

La rougeole et la coqueluche sont deux maladies sévères dues pour la première à un virus et pour la seconde à une bactérie, affectant prioritairement les enfants et dites maladies infantiles. Elles montrent des régularités surprenantes dans l'occurrence de leurs épidémies. En effet, les épidémies de rougeole interviennent tous les 2 ans à 2,5 ans alors que celles responsables de la coqueluche montrent des fréquences plus grandes tous les 4 à 5 ans environ. Les deux agents pathogènes interfèrent l'un et l'autre pour engendrer ces ondes épidémiques, et leur connaissance ne peut pas reposer aujourd'hui sur des approches indépendantes. Cette rythmicité des épidémies de coqueluche et de rougeole, si elle est connue depuis le XIX^{ème} siècle, a été étudiée de manière très précise par des équipes britanniques ces 20 dernières années sur la base d'enregistrements de cas rétrospectifs en Angleterre et au Pays-de-Galles (Choisy *et alii*, 2007). C'est ainsi cette lecture temporelle longue, parfois sur plusieurs décennies, qui a révélé l'existence de ces ondes épidémiques circulantes, et cette connaissance, ont des conséquences importantes pour les politiques vaccinales nationales et internationales. La seule approche microbiologique n'aurait jamais pu mettre en évidence de tels phénomènes ; l'inclusion des connaissances biologiques sur le virus et la bactérie dans une perspective temporelle multi-décennale a provoqué le développement d'une nouvelle discipline en épidémiologie et que l'on nomme phylodynamique (par association du préfixe *phyl* issu de phylogénie au mot dynamique). Ce seul exemple, mais il en existe de très nombreux autres, illustre bien comment les modes de pensée en sciences biologiques ont évolué avec l'essor de la biologie moléculaire, à tel point qu'il nous est encore fréquent en tant qu'enseignant-chercheur de voir remettre en cause ces connaissances pourtant fondamentales sur les épidémies dans nos enseignements ou nos conférences. L'imprégnation d'images simples et de temporalités réduites en recherche conduit inexorablement à négliger voire à occulter des schèmes explicatifs plus complexes, souvent plus proches de l'ensemble des réalités observables.

La responsabilité des institutions scientifiques est ici importante car, en effet, les appels d'offre de recherche portent le plus souvent sur des durées de 3 à 5 ans, et ne favorisent ainsi pas les projections temporelles longues (Guégan, 2022). Se pose, de plus, la question du recueil des données sur le long terme et aux échelles appropriées, car peu de structures ont en charge l'observation du vivant à de telles échelles spatio-temporelles, nous y reviendrons (Giraudoux, 2022a). De surcroît, beaucoup de ces appels d'offres demandent la production de résultats rapides comme on a pu le voir récemment avec des appels-*flash* nationaux sur la COVID-19. En somme, tout concorde à déconstruire la complexité qui nous entoure en « particules élémentaires » dont on sait pourtant que les fondements qui structurent cette pensée ne sont aujourd'hui plus adéquats (Cambien, 2008). La prise de conscience actuelle de la complexité du monde et des crises systémiques que nous traversons va de pair avec celle des insuffisances de la pensée classique à offrir les moyens nécessaires à l'appréhension, à la compréhension de la complexité d'une part, à l'action sur cette complexité et à la résolution des problèmes qui en découlent d'autre part.

Une acculturation à l'appréhension globale des systèmes complexes en insistant sur l'importance de la compréhension des relations entre les différents éléments qui composent ceux-ci, en gardant donc comme objectif l'objet final, et non, comme préconisé par la pensée classique la saisie analytique des éléments des systèmes, apparaît objectivement nécessaire aujourd'hui.

Des temporalités différentes mais à fenêtres chevauchantes

La prise en compte des différentes temporalités pour les sciences écologiques et épidémiologiques mais aussi d'autres domaines des sciences (Emprin, 2013) cristallisent plusieurs tensions en termes de gestion des temps, entre le temps court du rythme d'évolution d'un agent pathogène circulant et le temps long d'évolution des environnements qui nous entourent mais aussi de leur existence pré-humaine. Cette entrée par les différentes temporalités est aussi une source stimulante d'intelligibilité et de nouveaux regards portés sur des phénomènes complexes ainsi que nous l'avons déjà abordé avec l'exemple des dynamiques interférentielles de la rougeole et de la coqueluche. Nous allons y revenir ! Elle permet aussi de comprendre certaines transformations récentes mais aussi de glissements de paradigmes dans la recherche scientifique moderne.

Un programme de recherche est avant tout contraint par les dispositifs et les moyens humains et financiers mis en place, avec des implications évidentes sur les temporalités étudiées. Un financement à court terme d'une recherche biomédicale au laboratoire conduira généralement à une compréhension fine mais aussi ponctuelle dans le temps, même si nous observons que des progrès importants ont été produits ces dernières années d'une inscription du temps court dans une temporalité plus longue sous l'impulsion d'ailleurs d'écologues numériques (Grenfell *et alii*, 2004). À l'inverse, l'expérimentation en milieu naturel ou le suivi des environnements et de leur biodiversité face aux changements climatiques, par exemple, mobilisent d'autres temporalités plus longues et des ressources aussi souvent infiniment plus importantes. Il peut s'agir ici, par exemple, de mesurer sur de vastes étendues des variations d'effectifs de populations de nombreuses espèces ou, encore, de quantifier l'incidence d'innombrables parasites sur l'évolution dynamique des effectifs d'hôtes. À ce titre, le modèle de scientificité majeur en biologie moderne, basé sur une approche mécanistique hypothético-déductive, tend à masquer ou à négliger les pratiques mobilisant d'autres temporalités. Selon Emprin (2013) ceci génère, particulièrement en France marquée par les esprits de Pasteur et de Descartes, un risque d'appivoiser les temporalités de la recherche et de les résumer uniquement au modèle dominant. C'est le constat malheureux que nous pouvons faire de la situation actuelle de la recherche moderne mondiale.

Avant tout, notons que la biosphère forme un univers où les vitesses d'évolution ne sont pas les mêmes pour toutes les espèces (Giraudoux, 2021). Au sein d'une même espèce, des populations peuvent aussi connaître des évolutions très différentes dépendantes des contextes abiotiques (climat, roche-mère, etc.) et biotiques (prédateurs, parasites, compétiteurs, etc.) locaux et de leur isolement, un processus à la base de la genèse de nouvelles espèces. Si environ 160 000 générations nous séparent en tant qu'humains modernes des Australopithèques il y a plus de trois millions d'années, pour une bactérie le même nombre de générations est réalisé en seulement dix ans. De surcroît, l'effectif d'une seule population bactérienne est de plusieurs milliards de fois supérieur à celui de la population humaine actuelle, soit 7,8 milliards d'individus. Une conséquence immédiate est alors que par leur nombre et leur vitesse de multiplication, les microbes démontrent des possibilités évolutives et adaptatives infiniment plus importantes que celles des organismes plus évolués. Dans le monde microbien, l'évolution darwinienne est ainsi observable sur des temps très courts. De manière pratique, les infectiologues confrontés aux premiers cas humains de Syndrome d'immunodéficience acquise (SIDA/VIH) ont rencontré leurs premières difficultés de traitement parce qu'en 24 heures seulement, 50% de la charge virale des patients infectés avait changé. En revanche, les écosystèmes autour de nous, ne montrent pas d'évolution facilement visible, sauf à observer les changements importants dus à leur anthropisation et aux dérèglements climatiques. Encore celle-ci peut-elle être en partie cachée par le phénomène d'amnésie environnementale, c'est-à-dire le fait que chaque génération considère comme état de référence d'un écosystème ce qu'elle a connu dans sa prime jeunesse, mais qui pouvait déjà être altéré par les activités humaines (Pauly, 1995, Soga et Gaston, 2018). L'évolution darwinienne agit moins vite macroscopiquement que la dynamique des écosystèmes sous l'effet de la pression anthropique (Giraudoux, 2018). Hors pression anthropique, ces écosystèmes changent de façon visible à des rythmes bien plus longs, souvent au-delà d'une génération humaine, ce que les paléo-écologues explorent pour comprendre l'histoire et les dynamiques des paléo-environnements. Tout comme les *matriochkas* russes, ou poupées gigognes, qui s'imbriquent à l'intérieur l'une de l'autre jusqu'à la plus grande qui englobe toutes les autres, le principe majeur de l'organisation du vivant conduit à ce que l'évolution microbienne et sa compréhension soient intégrées aux individus et aux populations humaines voire animales et végétales, le tout contextualisé dans l'univers qui nous entoure, ainsi que l'avait interprété François Jacob (1970). La compréhension de l'évolution microbienne et des produits qu'elle engendre n'a de sens que dans cette intégration car la plupart des microbes agissent directement sur le métabolisme des cellules hôtes qu'ils infectent et exploitent, et la recherche actuelle met en évidence le rôle prépondérant des paramètres environnementaux, sociaux voire même économiques ou politiques en tant que facteurs structurants. De plus, de très nombreuses études confirment l'existence d'interactions étroites entre microbes et organismes cellulaires, comme les protistes par exemple, et ces interactions apparaissent très nombreuses, multiples dans leur nature et leurs conséquences (Buisse et Duron, 2021), passant par des relations de compétition entre elles (Telfer *et alii*, 2010, Villette *et alii*, 2020), avec une continuité d'intermédiaires jusqu'à des relations mutualistes obligatoires. Parmi d'innombrables exemples de ces dernières, citons « notre » cellule eucaryote, issue phylogénétiquement de l'absorption d'une bactérie (mitochondriale) par une archée (Eme et

alii, 2017), et le fait que l'organisme humain, comme beaucoup d'autres vivants, est en fait une colonie composite de ce type de cellules et de ses microbiotes (intestinaux, cutanés, naso-pharyngés, etc.), les uns indispensables à la survie des autres, l'ensemble formant ce que nous considérons comme un « organisme » unique (Giraudoux 2022b).

Revenons sur notre illustration des épidémies de rougeole et de coqueluche humaines. Bryan Grenfell et ses nombreux collaborateurs ont montré dans une série de publications scientifiques comment les épidémies de rougeole et d'épidémies se propageaient, et quels en étaient les principaux facteurs responsables (Grenfell *et alii*, 2001). Ce constat, important aujourd'hui pour les politiques de santé, n'aurait jamais pu être réalisé sans une analyse rétrospective de cas de malades sur plusieurs décennies (voir également Bompangue, 2022) à propos du choléra en Afrique centrale). Au-delà de la démonstration d'une forme de régularité de leurs épidémies en population, ces chercheurs ont aussi mis en évidence ce que la démographie locale et l'organisation spatiale des territoires imposaient sur le déclenchement et l'épanchement des épidémies. S'interrogeant sur les effets de la vaccination sur la circulation générale de ces deux infections, ces mêmes travaux ont démontré comment les interventions sanitaires venaient elles-mêmes perturber les dynamiques de propagation des deux agents pathogènes ; les dynamiques de circulation étaient alors moins régulières et donc moins prévisibles, et au final les deux agents infectieux n'étaient pas éliminés de la population britannique. Plus récemment, des travaux ont aussi montré les conséquences des campagnes vaccinales internationales pratiquées contre la coqueluche entre 1940 et 1960, révélant que celles-ci ont engendré une diversité de souches bactériennes de *Bordetella pertussis*, l'agent responsable, plus importante qu'avant ces interventions (Bart *et alii*, 2014).

Ces enseignements sont évidemment importants dans le contexte actuel de la pandémie de la COVID-19 car ils démontrent comment des résultats scientifiques ponctuels doivent être relativisés et remis dans une perspective de long terme. La prise en compte du long terme peut ainsi remettre en question des visions de court terme établies, comme l'espoir d'éradication des agents pathogènes, ou encore les conséquences vaccinales sur l'apparition de variations sous l'effet de cette pression de sélection. L'évolution virale ou bactérienne et l'apparition de variants, comme actuellement observée pour le virus SRAS-CoV-2, ne peuvent ainsi pas être décontextualisées de la temporalité longue et du contexte environnemental, démographique, social et politique dans lesquels cet ensemble s'inscrit. Les fenêtres d'ouverture et de lecture de ces variations génomiques produites ouvrent sur d'autres fenêtres aux horizons plus larges, comme l'hétérogénéité des populations et de leur traitement face à cette crise pandémique ou encore le déplacement international des personnes. Le formalisme développé par les écologues concernant la théorie des métapopulations et des métacommunautés (des ensembles stables d'individus d'une même espèce pour une métapopulation et d'individus d'espèces différentes pour une métacommunauté, composés de sous-unités ou sous-populations instables, par le jeu d'extinctions-colonisations asynchrones) devient aujourd'hui un sujet primordial pour

comprendre la genèse des maladies infectieuses émergentes, notamment en ce qui concerne ses aspects de mosaïque co-évolutive, et de transmission à plus large échelle.

Des événements invisibles et des trajectoires incertaines

L'humanité aimerait déjouer les tours qu'elle attribuait à *Aïon* à l'époque des Anciens, et composer uniquement avec le temps prévisible de *Khronos*. Mais la complexité du *kosmos* est telle que même si *Khronos* définit la succession mesurable du temps macroscopique¹, les effets des jeux d'*Aïon* lui-même ne peuvent pas se rendre prévisibles aux humains. L'émergence des fléaux ainsi que la mort ont certainement été craintes dès lors que les hominidés ont acquis l'équipement neuropsychique et sociétal leur permettant de mémoriser le passé, d'anticiper l'avenir et d'espérer le prévoir. Les religions ont aussi construit leur *business* sur cette angoisse. La prise de conscience de l'augmentation de la fréquence d'émergence des maladies humaines de tous ordres (zoonoses, maladies non transmissibles, etc.) est un des faits majeurs de la deuxième partie du XX^{ème} siècle (Morand, 2020), avec pour conséquence une recherche sur les moyens de les prévoir et, si possible, de les prévenir.

Certains pensent que l'inventaire le plus complet possible des formes vivantes à un instant donné, qui ne va pas sans rappeler les tentatives d'inventaires d'histoire naturelle des temps coloniaux, fait partie de ces moyens. Les virologues, face à l'émergence des maladies virales zoonotiques, se sont alors lancés littéralement dans la chasse aux virus, avec des « chasseurs de virus » à la une de certains médias comme *National Geographic*, et des images frappantes de files de fiers chasseurs encapuchonnés de la tête au pied dans des scaphandres blancs de protection virale, lampe frontale allumée, se frayant un chemin dans une forêt pluviale crépusculaire... Un exemple de ces inventaires systématiques, permis par les techniques de séquençage massif des acides nucléiques, a conduit à identifier, dans les seuls poumons de 3284 rongeurs et insectivores de 18 provinces de Thaïlande, de la République populaire et démocratique du Laos et du Cambodge, de 2006 à 2018, 495 579 séquences virales appartenant à 98 familles distinctes de virus à ARN (Wu *et alii*, 2021). À titre comparatif, 3284 rongeurs peuvent être trouvés aisément sur moins de 4 hectares lors d'un pic de pullulation d'une seule espèce, le campagnol terrestre, dans le Haut-Doubs. À ce seul endroit, Villette *et alii*, (2020), qui eux n'ont pas étudiés les virus, ont identifié par séquençage massif 155 taxons bactériens potentiellement pathogènes représentant au moins 13 genres appartenant à 11 familles dans les 869 spécimens collectés, montrant de plus que la richesse individuelle en taxons microbiens dépendait aussi du nombre et du type d'organes échantillonnés (Villette *et alii*, 2017). Quelle information réelle sur les possibilités d'émergence nous apportent donc la pêche et l'analyse de quelques milliers de spécimens d'animaux, puis de plusieurs centaines de milliers de codes-barres, collectés sur le très court-terme sur les centaines de milliers de kilomètres carrés d'écosystèmes tropicaux (Guégan *et*

¹ Nous ne compliquerons pas cette métaphore en y introduisant les incertitudes et imprédictibilités sur le temps et l'espace de la physique quantique...

alii, 2022a) ? On ne connaît, en effet, ni la dynamique à long terme des populations d'hôtes ni l'évolution de la composition des communautés animales dans l'espace et le temps de ces écosystèmes. On sait de plus que les microbes qu'ils hébergent ne font pas exception et donc qu'ils sont pourvus de capacités évolutives extrêmement rapides, par le jeu des mutations/sélections (voir plus haut). À titre comparatif à nouveau, toujours dans le Haut-Doubs, où les écosystèmes tempérés sont beaucoup plus simples que ceux des tropiques, le suivi d'une communauté de prédateurs et de proies pendant 20 ans montre l'existence de cycle d'abondance chez les proies (deux espèces principales) alternant des périodes de très basse densité (0 à quelques individus par hectare) et de très haute densité (plusieurs centaines à quelques milliers d'individus par hectare). Ces « cycles » sont suivis par des variations consécutives d'abondance dans la communauté de prédateurs, abondance stable autour d'une moyenne, mais l'analyse à "long terme" de 20 ans montre que la composition de la communauté de prédateurs elle-même a changé drastiquement entre le début et la fin de l'étude (Giraudoux *et alii*, 2020). Villette (2018) montre également dans sa thèse comment les communautés bactériennes changent à la fois au cours d'un cycle de quelques années, et sur un pas de temps d'une quinzaine d'années d'un cycle à un autre. Que nous apprennent donc sur l'émergence, répétons-le, la pêche à la ligne (nous ne pouvons pas nous résoudre à l'appeler « chasse », car cela supposerait d'y distinguer un minimum de connaissance de l'écologie du gibier et de stratégie adaptée), à un moment donné, de quelques milliers, voire centaines de milliers et à plus forte raison millions de génomes dans des écosystèmes dont on ignore tout de la dynamique des populations d'hôtes, des variations de structure des communautés animales, des relations et des conditions anthropologiques qui mettent en contact les multiples compartiments du système ? Thoisy *et alii* (2021) montrent remarquablement bien comment les virus de chauve-souris des zones néotropicales sont avant tout des virus de plantes et d'arthropodes acquis par voie alimentaire lorsque qu'en Afrique tropicale peu de considération est actuellement faite sur l'importance des réseaux trophiques dans la compréhension des virus de ces mammifères volants.

Ce que nous savons de l'écologie des systèmes permet d'assurer que leur stabilité n'est qu'apparente, et que leur fonctionnement repose sur la succession d'innombrables émergences et d'extinctions invisibles de populations locales, qu'ils s'agissent des hôtes ou de leurs microbes. La transmission d'agents microbiens par les réseaux écologiques, et en particulier trophiques, constitue aussi une voie majeure de circulation d'infections, cependant aujourd'hui minimisée. Sur le long terme, et sur des étendues géographiques plus larges, des dynamiques cryptiques, car non-observées faute de moyens, incubent l'évolution darwinienne de l'écosystème : l'écologue sait qu'il ne se baigne jamais deux fois dans le même fleuve, et le pêcheur à la ligne ne pêche jamais deux fois dans la même rivière. Il est toutefois des lois écologiques : celle, par exemple, qui prédit que la mise en contact d'un incubateur génétiquement plus homogène avec un réservoir de grande diversité microbienne fera fatalement émerger une épidémie de grande ampleur ; celle qui prédit aussi que plus le système est simple, moins il est « biodiversifié », plus il y a de risque qu'une espèce opportuniste, numériquement dominante, devienne cet incubateur microbien. C'est

exactement ce qui se passe dans les agro-écosystèmes qui, de longue date, peinent à se préserver des pestes diverses et obligent à de coûteuses interventions pour obtenir une récolte. L'absence de prise en compte du temps long et des variations spatiales de dynamiques de populations qui restent inconnues parce que pas étudiées, conduisent à ce que seules quelques rares émergences de grande ampleur soient observées, parmi des millions de bouffées épidémiques locales qui restent le plus souvent inobservées. Elles incubent discrètement, d'autant qu'elles ne touchent pas (encore) l'espace de la santé publique ou vétérinaire, à la faveur de rencontres quasi-imprévisibles quant au « qui, quand et où ? », mais tout à fait prévisibles sur le fait qu'elles se produiront fatalement dû à la multiplication de millions de circonstances fortuites, incommensurables, dont la plupart se soldent par des échecs de transmission de grande ampleur. Faute d'explorer sérieusement l'écologie des populations d'animaux sauvages et de leurs cortèges de microbes, et les idiosyncrasies qui la sous-tendent, on s'abrite ainsi derrière les lignes Maginot de la biosécurité, qui finissent toujours, jusqu'à présent, par être débordées. On se rend donc victime de trajectoires chaotiques initiées par des événements rares qui incubent sous le radar.

Des émergences non abouties très nombreuses, et des succès beaucoup plus rares

On connaît actuellement un peu plus de 2100 agents infectieux et parasitaires causant des maladies dans les populations humaines (Figure 2). Ce chiffre, dont on pourrait tout à la fois soutenir qu'il est important aussi bien qu'en réalité assez réduit, doit être mis en regard de la quantité incommensurable d'agents microbiens abrités par les écosystèmes mondiaux et leur biodiversité (Guégan *et alii*, 2022a). Les microbes représentent 17% de la biomasse terrestre, alors que l'homme et ses animaux domestiques n'en représentent « que » 0,45% (Bar-On *et alii*, 2018). Ce sont, en effet, des centaines de millions voire des milliards de microbes que la planète et ses différents taxons hébergent. Sans ces assemblages microbiens, l'existence de la « vie visible » serait mise à mal (Selosse, 2017). En admettant qu'une très grande proportion de cette quantité gigantesque de microbes soit naturellement armée pour devenir de possibles agents pathogènes humains (une hypothèse actuellement très discutée en microbiologie), une simple division entre le numérateur, soit 2100 agents pathogènes pour l'humain connus, et le dénominateur, c'est-à-dire un nombre incommensurable, nous donne un quotient de valeur quasi-nulle (Guégan *et alii*, 2022a) ; ce qui au premier abord peut apparaître surprenant mais qui cependant nous informe que dans l'histoire des infections humaines ces événements de « captage » sont très rares. De surcroît, tout épidémiologiste sait pertinemment la rareté relative des émergences infectieuses touchant à grande échelle l'espèce humaine, du fait de la nécessité absolue d'une parfaite intrication successive des multiples éléments et facteurs nécessaires à la déclaration de cas humains (Gessain et Manuguerra, 2006).

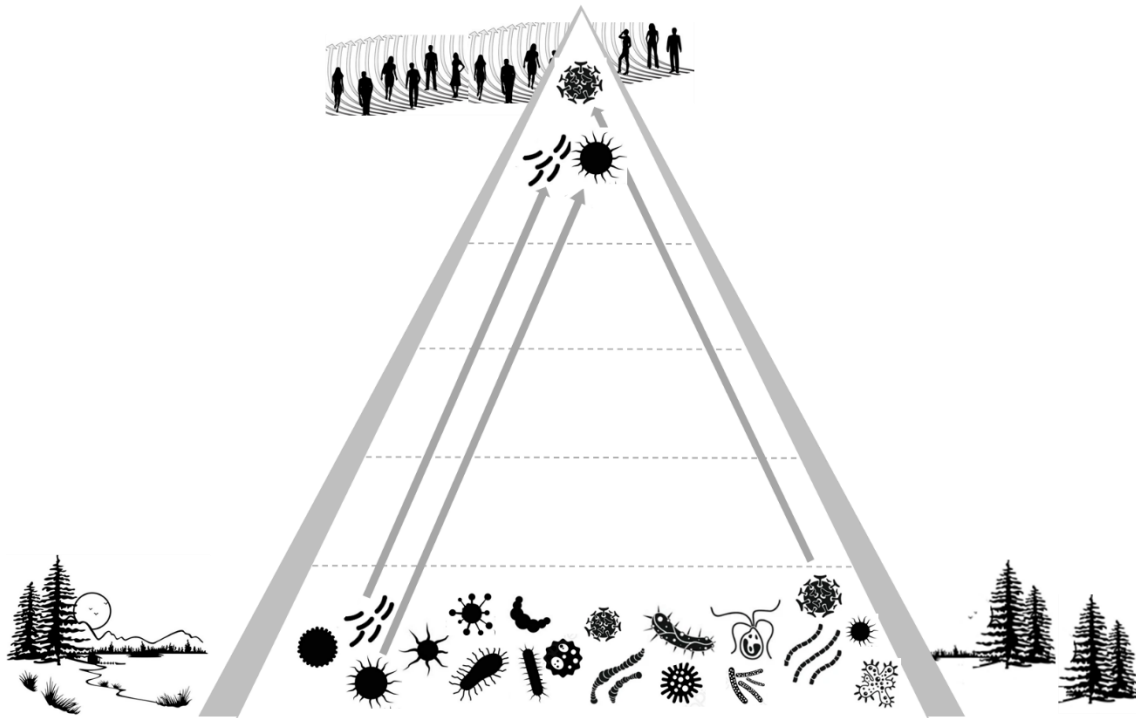


Figure 2. Une diversité incommensurable de microbes existe dans les milieux naturels, et la plus grande proportion exerce des fonctions vitales pour les espèces hôtes et les habitats qui les hébergent (en bas). Seuls quelques microbes ont pu conquérir l'espèce humaine et devenir des agents pathogènes et parasites (en haut). N'oublions pas aussi qu'un très grand nombre de microbes présents chez l'humain ont des fonctions utiles parfois obligatoires avec notre espèce. (Crédit J.F. Guégan Licence CC-BY 4.0).

Deux paramètres sont importants pour comprendre l'installation d'un agent microbien dans une population humaine à partir d'une source qui peut être soit « environnementale », soit animale. Le taux de reproduction basal encore appelé taux de reproduction de base, ou R_0 , correspond au nombre moyen attendu de cas infectés directement issus d'un individu contaminé dans une population où tous les individus sont sensibles à l'infection. Le plus généralement, ce taux est inférieur à 1 pour une très grande majorité de nouveaux germes microbiens issus de l'animal ou de l'environnement. Ainsi, le germe ne peut pas s'installer dans une population humaine, et il tend alors à s'éteindre. Le nombre d'occurrences, auquel il faudrait adjoindre leurs fréquences, encore appelé I_0 , de contacts entre des individus et des germes microbiens, ou leurs hôtes ainsi que leurs excréta, conduit à entraîner plus ou moins d'expositions à ces possibles dangers. Plus le nombre de contacts sera important, et répété dans le temps, plus la probabilité que l'installation de cette pluie microbienne s'adapte et se propage au sein d'un groupe humain devient forte. Cette simplification, nous en convenons, permet toutefois d'interpréter le succès d'un agent infectieux émergent comme le produit entre ces deux paramètres R_0 et I_0 , d'où résulte le taux effectif de reproduction R (Woolhouse *et alii*, 2005). Avec un taux effectif de reproduction inférieur à 1, un agent microbien environnemental ou animal accroîtra ses chances d'installation et de propagation dans une population communauté humaine lors de situations d'expositions importantes et soutenues au danger. C'est en réalité ce qui s'est passé de manière plus efficace mais aussi plus fréquente ces 40 dernières années avec l'émergence de plus de 180 nouveaux agents infectieux émergents d'origine zoonotique dans les populations humaines.

Pourquoi dans le passé entre -10000 / -8000 ans avant l'ère commune et la période actuelle, comparativement peu d'infections et de parasitoses se sont donc installées chez l'humain et y ont donné les maladies que nous connaissons aujourd'hui ? Pourquoi craignons-nous de nouvelles tempêtes microbiennes si ces événements restent relativement rares ?

Dans la plupart des situations passées, en acceptant l'hypothèse d'un paramètre R_0 constant au cours de cette période, la valeur du second paramètre I_0 a considérablement évolué à la faveur d'une démographie galopante - nous étions 3 milliards d'humains sur la planète en 1960 et nous sommes aujourd'hui environ 7,8 milliards de personnes avec en conséquence une augmentation en nombre absolu des pratiques et usages à risque (pénétration des écosystèmes, chasse, trafic d'animaux sauvages...) favorisant ainsi de plus nombreux contacts avec des cycles microbiens enzootiques. Dans les époques pré-anthropocène, de très nombreuses contaminations issues d'animaux ou de l'environnement pouvaient avoir lieu mais elles conduisaient à une quantité fabuleuse d'échecs de transmission et de propagation épidémique. Il y a tout lieu d'imaginer que plus récemment, ce même mode opératoire ait toujours cours, c'est-à-dire de tentatives avortées que l'on n'identifie pas et de succès beaucoup plus rares dont évidemment on parle. Les nouvelles pluies microbiennes qui s'abattent sur nous aujourd'hui prennent des allures diluviennes simplement parce que nous nous en protégeons mal et sommes aussi beaucoup plus nombreux à braver ces aléas au travers de nos occupations et de nos pratiques.

Le temps long sera le juge de paix de la gestion pandémique

La gestion politique de la COVID-19 a mis, et met toujours encore, à l'épreuve le court-termisme des décisions et la nécessité d'une projection longue (Guégan, 2022). La lecture virologique de la pandémie actuelle argumentant sur l'apparition de nouveaux variants sans inclure les causes et les conséquences de cette variabilité dans une vision évolutive, doublée d'une scientométrie sanitaire assénant des chiffres de morbidités et de mortalités sans relativisme (nombre de cas mortels dus à la COVID-19 *versus* ceux dus aux cancers la même année) sont devenus assourdissants voire insupportables.

Le court-termisme correspond à un comportement qui privilégie l'obtention d'un gain immédiat au détriment du résultat futur, et celui-ci est le plus généralement jugé de manière péjorative dans nos sociétés. Le court-termisme naît et s'incruste chez les acteurs de la décision publique qui ont des difficultés à intégrer des paramètres de décision complexes. Ces mêmes acteurs ont aussi tendance à agir sur la base d'extrapolations générées à partir du passé et de leurs propres connaissances acquises dans des cursus où la biologie tient peu de place si même elle n'y a jamais été enseignée, sous contrainte de l'acceptabilité de leurs décisions par la population. Celle-ci est, de plus, psychologiquement peu préparée à évaluer autrement qu'à court-terme la charge et les conséquences d'une décision (la « fin du mois »

classiquement opposée à la « fin du monde »). L'urgent est alors privilégié à ce qui est important à plus long terme, notamment en raison des incertitudes qui entourent la prise de décision mais aussi le souci des acteurs de préserver leur image. En période de crise, les décisions privilégient alors le court terme, ce qui apparaît antagoniste par rapport à la notion de développement durable prônée par les Nations-unies. Encore cette notion de développement durable, dont aimeraient se prévaloir les politiques les plus avancées, se révèle-t-elle sur le temps long un oxymore. Dans un monde fini, comme souligné par Kenneth E. Boulding, seuls les fous et la plupart des économistes peuvent encore croire à la possibilité d'un développement infini ramené à la croissance du produit intérieur brut. Cette question pourtant vitale, relative au long-terme, n'est jamais abordée sérieusement dans les instances de décision économiques, sociales et politiques, toutes court-termistes, avec les conséquences écologiques et humaines délétères que l'on peut constater, CQFD !

Ce même court-termisme, particulièrement en France, depuis près d'un demi-siècle, a inondé la pensée scientifique dans une vision positiviste héritée des progrès de la biologie et de la biomédecine, préfigurant la nouvelle société transhumaniste du XXI^{ème} siècle ; cette dernière cherche par la technologie à créer des êtres « transhumains » aux capacités supérieures à celles des humains actuels. Or, la théorie des systèmes dynamiques complexes a révélé l'impossibilité de prédire le futur détaillé sur la base de données diachroniques anciennes. En effet, pour de tels systèmes, des différences infimes dans les conditions initiales entraînent des résultats futurs différents de ceux espérés du passé ; ce qui rend en général toute prédiction détaillée impossible à long terme. Ces comportements chaotiques sont à la base du fonctionnement de la plupart des systèmes naturels, et la connaissance actuelle montre qu'ils existent aussi dans l'organisation des systèmes humains socio-économiques et politiques (Zwirn, 2006). Il n'en reste pas moins que si le détail n'est pas prévisible, les grandes trajectoires le sont à un certain degré. Les effets de la démographie humaine furent anticipés, certes avec d'importantes erreurs de datation, par Malthus dès le 18^{ème} siècle, et de nombreux scientifiques ont alertés sur l'évolution climatique, l'effondrement de la biodiversité et leurs effets délétères avec plus d'un demi-siècle d'anticipation.

Conclusion

La situation pandémique actuelle et sa gestion traduisent une incompréhension des systèmes complexes et de leurs trajectoires chaotiques. Faute d'avoir organisé une communauté d'observation, de savoir et d'action sur ces systèmes en dehors de la crise, les décisions publiques court-termistes et, de ce fait, mouvantes participent à ce chaos global : on ferme puis on ouvre les marchés et les institutions, ou les frontières ; on fait croire le masque inutile, faute de stock de masque, puis on le porte de manière obligatoire, puis on le rabat, et ce alors que le virus continue de circuler ! Ce court-termisme politique modifie donc en continu, au rythme de la décision, cet espace des possibilités futures traçant

inexorablement les chemins d'un seul sentier aux destinées encore plus complexes et incertaines.

La prise en compte du long-terme et des incertitudes inhérentes, de la hiérarchie des échelles d'espace, de temps et des niveaux d'organisation biologique correspondants, tant dans la production des savoirs que dans leur utilisation publique, est donc une nécessité vitale et difficile. Dans le domaine de la santé publique, elle se heurte encore actuellement à une culture médicale dominante ultra-performante sur le soin, le curatif (la réponse à l'épidémie de la COVID-19 par la rapidité de mise au point de vaccins en est une illustration), mais qui a quelque peu délaissé la prévention et la santé publique. Pour s'en convaincre, il n'est qu'à comparer les budgets alloués à l'une et à l'autre : en 2020, moins de 1% des dépenses nationales des agences régionales de santé étaient affectées à la santé publique et à la prévention (centrée sur tabac, addiction et alimentation), le reste aux soins (<https://www.ars.sante.fr/les-depenses-de-sante-en-region>). L'action en santé, de plus, n'a clairement pas encore réussi à pleinement s'articuler aux sciences des systèmes (dont l'écologie). Cette situation n'est d'ailleurs que la déclinaison particulière d'une incapacité sociétale à réagir à des menaces systémiques de long-terme, pourtant prévues par la science avec une anticipation de plusieurs dizaines d'années, tels que pour le changement climatique ou l'effondrement de la biodiversité, par exemple. Dans le domaine de la santé, les tentatives de réhabilitation de démarches intégratives anciennes (celles hippocratiques « des airs, des eaux et des lieux », celle de certains pasteuriens et de nombreux tropicalistes de l'époque, celles plus récentes, éco-épidémiologiques, de Jean-Antoine Rioux et collègues, etc.), à travers un panel de concepts popularisés dans les 20 dernières années tels que « Une seule santé » (*One Health*), « Ecologie de la santé » (*Ecohealth*), Santé planétaire, etc. achoppent encore sur cet obstacle épistémologique (Morand *et alii*, 2020, Giraudoux *et alii*, 2022c). Bernstein et ses co-auteurs (2022), entre autres études, indiquent cependant clairement qu'en l'état actuel pourtant incomplet des connaissances, un nombre somme toute limité d'actions de prévention primaire des pandémies ne coûterait qu'une faible fraction (1/20^{ème} selon leurs calculs) des coûts de leur réparation, même si leur effet n'était pas total, et présenteraient des co-bénéfices substantiels (notamment dans le domaine de la préservation de la biodiversité, des émissions de carbone, de la protection des eaux, de la protection des droits des peuples indigènes, etc.). Un des enjeux majeurs de la santé publique du futur est donc de se donner les capacités de connaissance et donc d'anticipation dans un monde globalisé, diversifié à de multiples échelles, et dont la prévisibilité n'est pas totale. Cette ambition suppose que les champs disciplinaires contributifs, la décision politique et la diffusion des connaissances (et les budgets correspondants), s'articulent de manière équilibrée, systémique et multi-échelles (OHHLEP *et alii*, 2022). L'acceptation sociale de ces changements transformatifs passe, à notre avis, par une sortie de l'illétrisme biologique (donc écologique) de nos sociétés, qui pour le moment limite la compréhension des enjeux. Cette sortie passe par un pari éducatif s'appuyant sur une connaissance sociologique approfondie des communautés humaines, les rendant alors capables de se penser en tant que socio-écosystème dans des limites planétaires identifiées. Dans les domaines où cela est possible, les sciences participatives et citoyennes, avec l'ambition de

co-construire les connaissances avec les populations, peuvent contribuer au partage d'une culture scientifique inspirant un narratif commun. Celui-ci doit vitalemement rendre explicites les interdépendances aux échelles variées où elles se manifestent, préalable indispensable à des prises de décision anticipatives et acceptées, prenant alors en compte la hiérarchie des temps des pandémies.

Remerciements

Jean-François Guégan remercie l'Institut de recherche pour le développement (IRD), l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE), ainsi que l'Université de Montpellier (UM) et l'École des Hautes Etudes en Santé Publique (EHESP). Il est actuellement financé par le LabEx *Centre d'Etude sur la Biodiversité Amazonienne* (CEBA ; ANR-10-LABX-2501) et un programme de recherche US *National Science Foundation - National Institutes of Health - National Institute of Food and Agriculture Ecology and Evolution of Infectious Diseases* program (DEB #1911457). Le LabEx CEBA, un des rares investissements d'avenir sur site, ici en Guyane française, dotés de 15 ans de financement national, fait partie des très rares programmes à horizon « ouvert » permettant d'inscrire les travaux dans le temps moyen à long.

Patrick Giraudoux remercie le *Fogarty International Center* des Instituts de santé publique des États-Unis, le Conseil régional de Franche-Comté, puis de Bourgogne Franche-Comté, le Commissariat du massif du Jura, et l'Institut écologie et évolution du CNRS, qui parmi les organismes qui ont financé ses recherches, sont les seuls à avoir accepté de s'inscrire, parfois la main un peu forcée, dans un temps plus long que les classiques 3 ans des contrats habituels des organismes de financement de la recherche (mais qui n'a jamais dépassé 8 ans même pour les plus endurants, pour des suivis maintenus contre vents et marées depuis plus de 30 ans, pourtant bien en deçà des nécessités).

Les propos tenus dans ce chapitre sont ceux des deux auteurs, et n'engagent pas les institutions dont ils sont membres.

Références bibliographiques

Aguma Asima J.-A. (2013). Le mécanisme, théorie, philosophie : étude critique. Thèse d'Université, Université de Poitiers, 500 pages.

Bar-On, Y.M., Phillips, R., Milo, R. (2018). The biomass distribution on Earth. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, **115**: 6506-6511.

<https://doi.org/10.1073/pnas.1711842115>

Bart M.J., Harris S.R., Advani A., Arakawa Y., Bottero D., Bouchez V., Cassiday P.K., Chiang C.S., Dalby T., Fry N.K. *et alii.* (2014). Global population structure and evolution of *Bordetella pertussis* and their relationship with vaccination. *Mbio*, **5**: e01074.

Bompangue, D. (2022). Le choléra en Afrique, du fatalisme à l'espoir d'une élimination : histoire de la révolte contre un *statut quo*. In: Socio-écosystèmes (Giraudoux P. ed.), ISTE - Sciences, Londres, pp. 259-296.

Bouvier D. et Dasen V. (2021). (Eds.), Héraclite : le temps est un enfant qui joue, Liège, Presses Universitaires de Liège, Belgique.

Buysse M. and Duron O. (2021). Evidence that microbes identified as tick-borne pathogens are nutritional endosymbionts. *Cell*, **184**: 2259-2260.

Cambien A. (2008). Une introduction à l'approche systémique : appréhender la complexité. Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (CERTU), 84 pages.

Choisy M., Guégan J.-F. and Rohani P. (2007). Mathematical modeling in infectious diseases dynamics. In: Encyclopedia of Infectious Diseases: Modern Approaches (Tibayrenc M. ed.). Wiley & Sons Ltd., Chichester, USA, 2007, pp. 379-404.

Droit-Volet S. (2005). Le long apprentissage du temps. *Pour la Science*, **328** : 1-7.

Eme L., Spang A., Lombard J., Stairs C.W. and Ettema T.J.G. (2017). Archaea and the origin of eukaryotes. *Nature Review Microbiology*, **15**: 711–723.
<https://doi.org/10.1038/nrmicro.2017.133>

Emprin C. (2013). La communication de projet : productions discursives et ajustements autour de différentes temporalités de la recherche en écologie. *Temporalités*, **18**. Mis en ligne le 6 janvier 2015, consulté le 5 janvier 2022.
<http://journals.openedition.org/temporalites/2595>

Ezenwa V.O., Prieur-Richard A.-H., Roche B., Bailly X., Becquart P., García-Peña G.E., Hosseini P.R., Keesing F., Rizzoli A., Suzán G.A., Vignuzzi M., Vittecoq M., Mills J.N., and Guégan J.-F. (2015). Interdisciplinarity and infectious diseases: an Ebola case study. *PLoS Pathogens*, **11**(8): e1004992. Doi: 10.1371/journal.ppat.1004992.

Festugière A.-J. (1944-1954). La Révélation d'Hermès. Trismégiste, tome IV, Paris, Les Belles Lettres, Paris. p. 146-147.

Festugière A.-J. (1949). Le sens philosophique du mot ΑΙΩΝ. À propos d'Aristote De Caelo I, 9. La Parola del Passato. Rivista di studi antichi, XI, p. 172-189.

Gessain A. et Manuguerra J.-C. (2006). Facteurs et mécanismes de l'émergence d'un virus. In: Les virus émergents (Gessain A. et Manuguerra J.-C., eds.), Presses Universitaires de France, Collection Que sais-je ?, Paris, France, pp. 31-70.

Giraudoux P. (2021). Les micro-organismes auront toujours une mutation d'avance sur les autres. Festival des solutions écologiques : tribune. *Libération*.
https://www.liberation.fr/forums/les-micro-organismes-auront-toujours-une-mutation-davance-sur-les-autres-20210903_47X3WFQYENC7TOM45NVCIRHIRY/

- Giraudoux P. (2022a). Socio-écosystèmes. L'indiscipline comme exigence du terrain, Sciences. ISTE Editions Limited, Londres.
- Giraudoux, P. (2022b). Le commun du vivant. *In: Formes de vie partagées entre l'homme et la plante, Sciences, concepts, problèmes* (Carvalho S. et Macé A., eds.), Presses universitaires de Franche-Comté, Besançon, sous presse.
- Giraudoux P. (2022c). La santé des écosystèmes : quelle définition ? Bulletin de l'Académie vétérinaire de France, Sous presse.
- Giraudoux P., Levret A., Afonso E., Cœurdassier M. and Couval G. (2020). Numerical response of predators to large variations of grassland vole abundance and long-term community changes. *Ecology and Evolution*, **10**: 14221-14246.
<https://doi.org/10.1002/ece3.7020>
- Giraudoux P., Besombes C., Bonpangue D., Guégan J.-F., Mauny F. and Morand S. One Health or « One Health washing »? An alternative more than ever to overcome. *CABI One Health* (sous presse).
- Grenfell B.T., Bjørnstad O.N. and Kappey J. (2001). Travelling waves and spatial hierarchies in measles epidemics. *Nature*, **414**: 716-723.
- Grenfell B.T., Pybus O.G., Gog J.R., Wood J.L.N., Daly J.M., Mulford J.A. and Holmes E.C. (2004). Unifying the epidemiological and evolutionary dynamics of pathogens. *Science*, **303**: 327-332.
- Guégan J.-F. (2022). Sciences et expertises en temps de syndémies. *Environnement, Risques & Santé*, **21** : 275-283. Doi: 10.1684/ers.2022.1655
- Guégan J.-F., Roche B. and Morand S. (2022a). Biodiversity and Human health: On the Necessity to Combine Ecology and Public Health. *In: The ecological and societal consequences of biodiversity loss* (Loreau M., Hector A. and Isbell F., eds.). Chapter 11. ISTE/Wiley Ltd., London: pp. 233-260.
- Guégan J.-F., Benbow M.E., Chevillon C., Duron O., Epelboin L., Musset L., Quénel P., Roche B., Le Turnier P. and Thoisy B. de (2022b). Emerging infectious diseases and new pandemics: dancing with a ghost! *Lancet Infectious Diseases* (invited Personal view).
- Hassell J.M., Newbold T., Dobson A.P., Linton Y.-M., Franklinos L.H.V., Zimmerman D. and Pagenkopp Lohan K.M. (2021). Towards an ecosystem model of infectious disease. *Nature Ecology & Evolution*, **5**: 907-918.
- Jacob F. (1970). La Logique du vivant, une histoire de l'hérédité. Gallimard, Paris, France.
- Laporte Y. (2005). Gilles Deleuze, l'épreuve du temps. L'Harmattan, Paris, France.
- Morand S., 2020. L'homme, la faune sauvage et la peste. Fayard, Paris, France.

Morand S., Guégan J.-F. et Laurans Y. (2020). De *One Health* à *Ecohealth*, cartographie du chantier inachevé de l'intégration des santés humaine, animale et environnementale. Iddri, *Décryptage* N°04/20.

Pauly D. (1995). Anecdotes and the shifting baseline syndrome of fisheries. *Trends in Ecology and Evolution*, **10**: 430. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(00\)89171-5](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(00)89171-5)

Roquet P. (2013). Temporalité. In : Dictionnaire des concepts de la professionnalisation (Jorro A., ed.), De Boeck Université, Louvain, Belgique, pp. 315-318.

Selosse M.-A. (2017). Jamais seul. Ces microbes qui construisent les plantes, les animaux et les civilisations. Actes Sud, Arles, France.

Soga M. and Gaston K.J. (2018). Shifting baseline syndrome: causes, consequences, and implications. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **16**: 222-230. <https://doi.org/10.1002/fee.1794>

Telfer S., Lambin X., Birtles R., Beldomenico P., Burthe S., Paterson S. and Begon M. (2010). Species Interactions in a Parasite Community Drive Infection Risk in a Wildlife Population. *Science*, **330**: 243-246. <https://doi.org/10.1126/science.1190333>

Thoisy B. de, Duron O., Epelboin L., Musset L., Quénel P., Roche B., Binetruy F., Briolant S., Carvalho L., Chavy A., Couppié P., Demar M., Douine M., Dusfour I., Epelboin Y., Flamand C., Franc A., Ginouvès M., Gourbière S., Houël E., Kocher A., Lavergne A., Le Turnier P., Mathieu L., Murienne J., Nacher M., Pelleau S., Prevot G., Rousset D., Roux E., Schaub R., Talaga S., Thill P., Tirera S. and Guégan J.-F. (2021). Ecology, evolution, and epidemiology of zoonotic and vector-borne infectious diseases in French Guiana: Transdisciplinarity does matter to tackle new emerging threats. *Infection, Genetics and Evolution*, **93**: 104916. <https://doi.org/10.1016/j.meegid.2021.104916>

Trédé M. (1992). Kairos, l'à-propos et l'occasion : le mot et la notion, d'Homère à la fin du IVe siècle avant J.-C. Klincksieck Editions, Paris, France.

Van Wassenhove V. (2016). Cerveau : pourquoi le temps paraît parfois si long ? *The Huffington Post*, Paris, France.

Villette P. (2018). Spatial and Temporal Characteristics of Bacterial Parasite Communities in Outbreaking Fossorial Water Vole (*Arvicola terrestris*) Populations: Static Uniformity or Dynamic Heterogeneity? Doctoral thesis ; Université de Franche-Comté, France.

Villette P., Afonso E., Couval G., Levret A., Galan M., Tatard C., Cosson J.F. and Giraudoux P. (2017). Consequences of organ choice in describing bacterial pathogen assemblages in a rodent population. *Epidemiology and Infection*, **145**: 3070-3075. <https://doi.org/10.1017/s0950268817001893>

Villette P., Afonso E., Couval G., Levret A., Galan M., Goydadin A.-C., Cosson J.-F. and Giraudoux P. (2020). Spatio-temporal trends in richness and persistence of bacterial communities in decline-phase water vole populations. *Scientific Reports*, **10**: 9506. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66107-5>

Woolhouse M.E.J., Haydon D.T. and Antia R. (2005). Emerging pathogens: the epidemiology and evolution of species jumps. *Trends in Ecology and Evolution* **20**: 238-244

Wu Z., Han Y., Liu B., Li H., Zhu G., Latinne A., Dong J., Sun L., Su H., Liu L., Du J., Zhou S., Chen M., Kritiyakan A., Jittapalapong S., Chaisiri K., Buchy P., Duong V., Yang J., Jiang J., Xu X., Zhou H., Yang F., Irwin D.M., Morand S., Daszak P., Wang J. and Jin Q. (2021). Decoding the RNA viromes in rodent lungs provides new insight into the origin and evolutionary patterns of rodent-borne pathogens in Mainland Southeast Asia. *Microbiome*, **9** : 18.
<https://doi.org/10.1186/s40168-020-00965-z>

Zwirn H. (2006). Les systèmes complexes. Odile Jacob, Paris, France.