

L'eau liquide, molécule-clé pour le vivant

Par Gilles BOEUF

Professeur émérite à Sorbonne-Université,
Ancien président du Muséum national d'Histoire naturelle,
Professeur invité au Collège de France, Président du CEEBIOS

L'eau est réellement la molécule clé pour le vivant ; tous les êtres vivants en sont constitués de quelques pourcents pour une graine à plus de 98 % pour une méduse ! C'est parce que les conditions étaient réunies sur la Terre pour la conserver liquide que la vie a pu s'y développer. Sous forme de glace aux pôles et en altitude, de vapeur d'eau au-dessus de l'océan et des rivières et lacs sur les continents, cette eau est le solvant universel. Cette eau dissout des sels qui, sous formes d'électrolytes, développent une pression osmotique ($mOsm.l^{-1}$) et l'ensemble joue un rôle déterminant dans la régulation de l'équilibre hydrominéral de tous les êtres vivants. Les perturbations climatiques actuelles (dont la température et les précipitations) créent des conditions complexes qui obligent la biodiversité et les activités humaines à répondre dans un temps de plus en plus court. Et pour s'adapter, et le vivant a toujours su le faire, il faut du temps et surtout accepter de changer constamment, ce que l'humanité a bien du mal à faire !

Introduction

La Terre était idéalement positionnée par rapport au soleil, sa masse et sa taille adéquates et elle a pu garder une partie de son eau initiale : les conditions étaient réunies pour l'émergence de la vie ! Christian de Duve, lauréat du Prix Nobel de médecine en 1974, écrivait même dans « Poussière de vie » en 1995 que la vie ne pouvait pas ne pas y apparaître ! L'eau molécule, croyons-nous, si « banale » (*sic*) a été déterminante pour l'apparition de la vie. Sous sa forme liquide elle est le solvant universel et constitue une partie essentielle de toutes les cellules vivantes. Tous les êtres vivants sont constitués d'eau (voir la Figure 1 ci-dessous adaptée de Withers, 1992), dans des proportions variables, de quelques pourcents chez les plus secs, des graines de végétaux par exemple, à des organismes aquatiques qui peuvent en contenir plus de 98 %. Un bébé humain à la naissance, c'est 75 % d'eau, un cerveau humain plus de 80 % ! Ceci nous permet de préciser l'indissociable histoire commune de la biodiversité et de l'eau, et donc rapidement expliquer que le vivant ne peut pas se passer d'eau liquide, et donc que ces turbulences climatiques que nous connaissons aujourd'hui ont une influence claire sur l'état de la biodiversité. N'oublions pas non plus que l'effondrement de ce vivant en retour a une influence sur le climat lui-même ! Trop couper les arbres des forêts ou surpêcher les poissons pélagiques entraînent des désordres locaux dans les niveaux des précipitations ou modifient les capacités de l'océan à stocker le CO_2 !

Une fraction de continent terrestre sans eau c'est rapidement un désert dans lequel la vie est très rapidement limitée. L'eau « c'est la vie » : observons durant

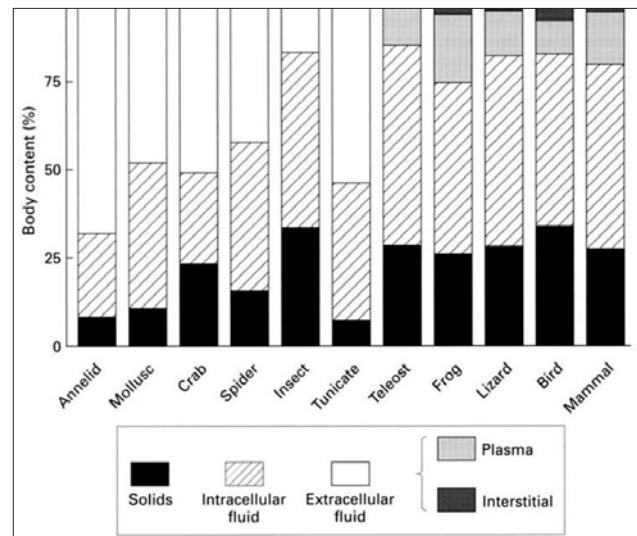


Figure 1 : Proportions des éléments corporels, solides et aqueux au cours de l'évolution des animaux (adapté de Withers, 1992).

une année fortement marquée par l'oscillation sud-pacifique, el niño, par exemple dans le nord du Chili dans l'Atacama, là où l'aridité est extrême (moins de 1 mm de précipitations par an) la survenue du phénomène *desierto florido* durant lequel le désert se couvre de fleurs en quelques jours. Ceci intervient après une pluie intense, et apparaît alors un cortège d'insectes et d'oiseaux, et ceci durant quelques semaines en octobre avant de repartir vers dix ans de sécheresse totale !

Si l'eau ne représente qu'une très mince pellicule superficielle sur la Terre, elle affecte cependant clairement les propriétés physiques du manteau (tempé-

rature de fusion des roches et viscosité). La croûte terrestre formée par accréation au niveau des dorsales s'hydrate au contact de l'eau de mer. Mais ces roches hydratées subissent dans les zones de subduction une augmentation de pression et de température telles que de nouveaux minéraux métamorphiques apparaissent en libérant de l'eau. Sans ce retour massif à l'océan de cette eau, l'océan disparaîtrait en moins de 100 millions d'années ! Les rapports isotopiques de l'hydrogène jouent dans le sens d'un apport important d'eau durant les bombardements de météorites chondrites carbonées durant les premiers 700 millions d'années (Ma) de l'existence de la Terre (Cartigny, 2015). Les origines du vivant sont à rechercher vers 3 900 Ma à partir d'une chimie antérieure, pré-biotique, soumise à d'incessantes périodes sèches et hydratées pour lesquelles nous manquons de connaissances sur les types d'atmosphères alors présentes. Ce qui est clair est que la première cellule vivante émergente (*prokarya*) possédait déjà une membrane séparant un milieu intérieur hydraté liquide d'un milieu extérieur également hydraté liquide, et que les deux communiquaient en permanence !

Le passé

Dans ces mers anciennes, divers événements essentiels se sont produits qui ont eu un retentissement déterminant sur le futur de la vie : 1) après l'apparition de la membrane plasmique, l'apparition de la membrane nucléaire dans la cellule, individualisant le noyau, et le passage des bactéries procaryotes aux cellules eucaryotes (*eucarya*, protistes), plus grandes, vers 2 500 Ma ; 2) l'émergence d'organismes multicellulaires *eucarya* vers 2 200 Ma ; 3) la capture de cyanobactéries ambiantes qui vont s'intégrer dans les cellules eucaryotes et devenir les mitochondries vers 2 000 Ma et les plastes, indispensables à la photosynthèse, vers 1 400 Ma (Boeuf, 2011). Le dernier événement fondamental fut l'apparition de la reproduction sexuée chez les bactéries vers 1 500 Ma, fabuleux système pour le vivant pour générer de la biodiversité, et des capacités d'adaptation et d'évolution bien supérieures. La vie complexe « organisée » telle que nous la connaissons aujourd'hui apparaîtra à la fin du précambrien vers 550 Ma (de Wever et David, 2015).

Sur notre planète, la vie est sortie de l'océan, plusieurs fois, en différents endroits, sous différentes formes, à différentes époques, vers un milliard d'années pour les cyanobactéries, 450 millions d'années pour les plantes et les animaux. Ils ont dû s'adapter à l'air libre et à l'eau douce, et donc faire face à des milieux aux caractéristiques physiques bien différentes. Ainsi, l'eau, molécule tout à fait extraordinaire, est environ soixante fois plus visqueuse que l'air, et huit cent cinquante fois plus dense. Elle est donc moins « pénétrable », mais aussi incompressible. Les sels, en dissolution dans l'eau de mer, développent une pression osmotique qui provoque des contraintes physiologiques bien particulières. Des flux d'eau et de sels s'établissent entre les organismes et l'eau extérieure, selon la loi physique de l'osmose (migrations d'eau du milieu le moins concentré vers le plus concentré à travers une membrane biologique).

Pendant très longtemps (et toujours aujourd'hui, des éponges aux arthropodes), les animaux avaient la même pression osmotique dans leurs tissus et dans leur sang que celle que l'on retrouve dans l'eau de mer. Il leur était impossible de sortir de l'océan. Puis, certaines espèces, comme les crustacés, ont évolué pour atteindre une pression osmotique plus faible, la même que celle de l'humain actuellement (302 mOsm.l⁻¹), leur permettant alors de vivre dans l'eau saumâtre, près des estuaires, puis plus tard en eau douce.

La régulation du métabolisme hydrominéral est essentielle en milieux aquatiques. Mais quelles sont les contraintes de la respiration dans l'eau ? Beaucoup moins riche en oxygène que l'air (un volume d'eau de mer en équilibre avec l'air contient environ 30 fois moins d'oxygène), et subissant des niveaux variables en oxygène, compte tenu des effets de la température et des végétaux photosynthétiques, le milieu aquatique exige une dépense énergétique très importante aux organismes complexes afin d'en extraire l'oxygène. Alors que chez un mammifère, la captation d'oxygène ne coûte que 1 à 2 % de toute l'énergie dépensée, la proportion s'étend à 20 à 40 % chez un respirateur aquatique (hors cellule ou larve, très petits). La surface branchiale ne peut augmenter indéfiniment à cause des désordres hydrominéraux qui se produiraient (perte d'eau en mer par cette branchie, entrée d'eau chez un poisson d'eau douce). La surface branchiale la plus grande se retrouve chez les thons avec environ 1,36 m² par kg de masse corporelle. Elle n'est que de 0,2 m² par kg chez une truite. Il faut aussi tenir compte du facteur écologique abiotique qu'est la température, dont les effets sont aussi liés à la chaleur spécifique de l'eau. La température varie beaucoup moins dans l'eau que dans l'air. En effet, au cours d'une journée, la température de l'air peut fluctuer considérablement tandis que celle de l'eau de la rivière varie moins et celle de la mer encore beaucoup moins !

Lorsque la vie a quitté l'océan, elle a donc dû se conformer aux conditions de respiration en milieu aérien (Boeuf, 2011). Les animaux terrestres ont délaissé les branchies pour des poumons, très efficaces, adaptés à un environnement où l'oxygène est abondant, et de grandes fonctions physiologiques comme l'osmorégulation, ou encore l'excrétion, se sont effectuées dès lors hors de l'eau. Il devenait alors vital de conserver cette eau. La poussée d'Archimède, si présente en milieu aquatique, a disparu et les squelettes, internes et externes, ont considérablement été modifiés. Bien que renforcés, ces derniers n'ont jamais pu être aussi grands et lourds que les animaux marins, notamment les baleines actuelles. Pour le physiologiste, la division des animaux en aquatiques et aériens est aujourd'hui fondamentale.

La plupart des *phyla* animaux (ils y sont tous nés !) ont évolué dans l'océan et sur les plages, en s'approchant des côtes, ont trouvé des environnements particulièrement contraignants et souvent à la limite de conditions extrêmes. Pensez à un petit poisson gobie (Boeuf, 2018) qui sur un cycle de marée va passer à marée haute des conditions océaniques côtières « classiques », température plus stable, 15°C par exemple,

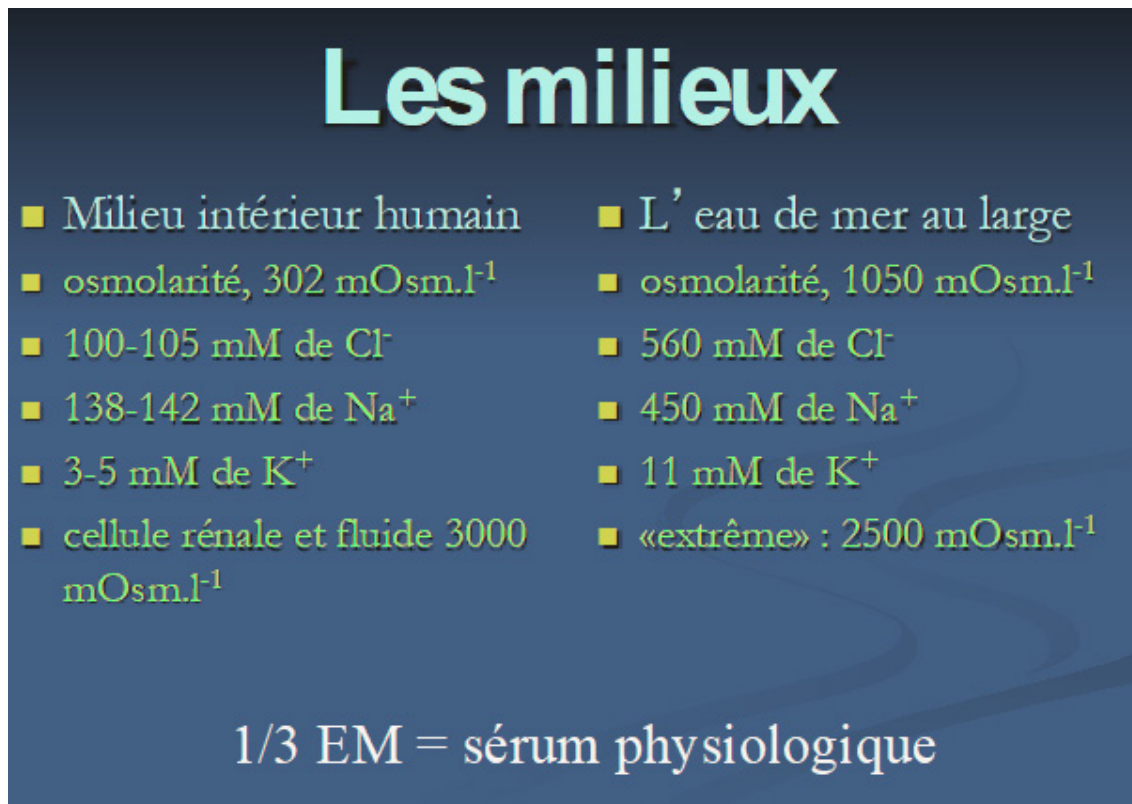


Figure 2 : Compositions de l'océan et du sang humain (Boeuf, 2011).

salinité élevée (1 050 mOsm.l⁻¹), pH stable, légèrement alcalin aux environs de 8, tension en oxygène stable... à marée basse et alors se retrouver dans un petit trou d'eau fortement dilué par l'arrivée d'un filet d'eau douce (flaque à 250 mOsm.l⁻¹), sur la plage, beaucoup plus chaude (25°C dans l'après-midi), de pH 8 à 6, avec une tension en oxygène beaucoup plus élevée (productions micro et macro-algues) ! Et le niveau d'O₂ peut tomber à 0 le matin très tôt, les producteurs primaires respirant alors beaucoup plus et produisant beaucoup moins d'O₂ ! Et ceci se produisant deux fois par jour ! Le milieu marin a apporté à l'humanité de fabuleuses ressources biologiques (Boeuf, 2007, 2011).

Toutes ces évolutions ont eu lieu sur le littoral, faisant de ce milieu le théâtre d'une révolution biologique sans précédent. C'est sur ce même littoral que, plus tard, l'humain s'installera et duquel il s'élancera pour ses « grandes découvertes ».

L'effondrement de la biodiversité

Cet humain qui s'est lui-même (K von Linné, 1758) dénommé « Homo sapiens » (homme « savant », alors que l'on a nommé des espèces *ferox*, *horribilis*, *atrox*, *horridus*, *gulo*...) et qui souvent se croit aujourd'hui « supérieur » par rapport à tout le reste de la nature, espèces et écosystèmes pour le vivant, et aussi à part, sorti des réalités écologiques, est en fait, en grande partie constitué d'eau, de sels et de bactéries ! Alors comment imaginer une seconde pouvoir se passer de cette biodiversité, encore si florissante sur notre planète, mais en forte régression depuis quelques

siècles ou décennies ? Il n'y a pas un humain et une nature à côté, il y a un humain (8 milliards d'individus aujourd'hui !) profondément et indissociablement immergé dans cette nature et cet extraordinaire réseau biologique (Boeuf, 2014).

Le mot « biodiversité » (en anglais, *biodiversity*), contraction de « diversité biologique », a été créé en 1985. Ce terme est souvent assimilé à la diversité spécifique, c'est à dire l'ensemble des espèces vivantes, bactéries, protistes (unicellulaires), fungi (« champignons »), végétaux et animaux d'un milieu. Mais la biodiversité est bien plus que la seule diversité spécifique, incluant à la fois les espèces et leur abondance relative. Simplement, en pratique, l'espèce est commode d'utilisation, elle peut être assimilée à une sorte « d'unité de monnaie » identifiable et comptabilisable (Blondel *et al.*, 2010). Mais aujourd'hui la biodiversité est considérée bien différemment, elle ne peut en aucun cas être assimilée à de seuls inventaires ou catalogues d'espèces. La biodiversité a été définie comme étant « toute l'information génétique comprise dans un individu, une espèce, une population, un écosystème » mais nous nous attachons actuellement à la caractériser comme étant l'ensemble de toutes les relations établies entre les êtres vivants, entre eux et avec leur environnement. C'est en fait la fraction vivante de la nature ! Si durant des milliards et centaines de millions d'années, tout a évolué sous la pression des facteurs abiotiques (température de l'eau et de l'air, leur composition, salinité de l'océan, lumière, longueur du jour, rythmicité des saisons...) et biotiques du milieu (facteurs liés au vivant, la nourriture par exemple, sa composition, sa disponibilité... compétition et relations entre espèces...), la dispo-

nibilité en oxygène étant autant abiotique que biotique, depuis une époque récente, dénommée « anthropocène », la plus grande force évolutive (Vitousek *et al.*, 1997 ; Palumbi, 2001 ; Crutzen et Stoermer, 2000 ; Barnosky *et al.*, 2011 ; Ehrlich et Erlich, 2013) sur cette planète apparaît comme étant la présence de l'humain, associé à son cortège d'activités (plantes et animaux domestiques par exemple). Linné, le père de la systématique « binominale » (nom latin en deux mots, le genre et l'espèce) dénombrait au milieu du XVIII^e siècle environ 12 000 espèces vivantes, végétales et animales. Aujourd'hui, en ce début du XXI^e siècle, nous en sommes à un peu plus de deux millions d'espèces recensées, décrites et déposées dans les musées. Et nous savons bien que nous sommes très loin du compte ! On décrit actuellement entre 16 000 et 18 000 nouvelles (pour nos connaissances !) espèces par an (dont 10 % issues du milieu marin) : qui sait le nombre réel d'espèces présentes aujourd'hui ? Combien de temps nous faudra-t-il encore pour « tout » décrire, 800 à 1 000 ans ? En aurons-nous le temps ? Nous estimons que vivent aujourd'hui entre 1,5 et 2 % de toutes les espèces qui ont peuplé la planète depuis les toutes premières origine (de Wever et David, 2015). Les causes majeures de l'effondrement actuel de la biodiversité (Butchart *et al.*, 2010 ; Cardinale *et al.*, 2012 ; Boeuf, 2012, 2014) sont au nombre de quatre, la première en expliquant à elle-seule les deux tiers, **la destruction et la pollution des habitats**. Les autres sont **la surexploitation des ressources naturelles**, les ressources vivantes étant naturellement « renouvelables », mais l'humain interdisant alors leur « renouvelabilité », les seuils d'exploitation « harmonieuse » étant largement dépassés, **la dissémination anarchique d'espèces partout sur la planète** (la « roulette écologique »), devenant pour certaines des « invasives » et enfin **l'accélération du changement climatique** (Barbault, 2006 ; CSPNB, 2007-2012 ; Boeuf, 2014 ; Steffen *et al.*, 2015 ; Urban *et al.*, 2016 ; Randel, 2018), dans lequel l'humain a bien sa part. Les travaux très récents réalisés chez les oiseaux (Germain *et al.*, 2023 ; Rigal *et al.*, 2023) ou encore les insectes (Hallman *et al.*, 2017) sont édifiants et même parfois désespérants : quand allons-nous enfin réagir (Ceballos *et al.*, 2017 ; David, 2021 ; Klingner et Ryan, 2022) ?

Conclusion

L'humain ne peut pas se passer d'eau et de la biodiversité, nous ne mangeons et ne coopérons qu'avec du biologique, un corps humain c'est 75 % d'eau à la naissance, les deux-tiers plus tard, autant de bactéries dans et sur nous, un tiers de nos gènes (partie codante) en commun avec le phytoplancton, les deux-tiers avec une mouche, 98 % avec un chimpanzé... Nous avons chaque matin, en nous réveillant dans notre lit, entre 1 et 2 millions d'acariens et ils sont là parce que nous y avons dormi. Nous sommes totalement immergés dans cette biodiversité, un exemple extrême (totalement créé par l'humain !) opposé étant les maladies nosocomiales à l'hôpital où dans une salle « trop propre », une seule espèce de bactérie prolifère et se révèle alors mortelle, résistante à tous les antibiotiques ! En fait, ce besoin

profond de biodiversité est essentiel, que seraient nos activités économiques sans le tourisme, la gastronomie ou encore l'industrie du luxe en France, toutes activités liées à un maintien d'une biodiversité prospère ? Nous venons de cette eau et de ce vivant, nous lui appartenons et n'avons aucun avenir sans lui ! Chaque fois que nous l'agressons, nous nous auto-agressons nous mêmes, ce n'est quand même pas très malin, pour une espèce qui s'est, elle-même, attribué cette dénomination de sapiens ! Quand serons-nous prêts à nous adapter à nous-mêmes (Toussaint *et al.*, 2012), à accepter nos limites (Boeuf *et al.*, 2017) ? Alors abandonnons cette imprévoyance, cette arrogance et cette cupidité qui nous ont amené à cette situation si injuste, sociale, sociétale, géopolitique et si inquiétante d'aujourd'hui : en fait passons enfin de faber à sapiens, et vite ! Le monde vivant est vieux de près de quatre mille millions d'années, il s'est formé à partir de ces premières cellules apparues dans l'océan ancestral, il a subi les pires crises imaginables et s'en est toujours sorti ; pour cela, il a dû en permanence s'adapter à des conditions extérieures changeantes. Mais pour s'adapter, il faut impérativement changer, ce que nous ne faisons toujours pas ! Quand cesserons-nous cette « myopie du désastre ». Trop de consumérisme, pas assez de sobriété : rappelons-le-nous en permanence, nous sommes fondamentalement eau, sels et cellules ! Le Coronavirus 19 nous le rappelle, avec ses 15 gènes (nous en avons plus de 20 000 !) : en sortira-t-on grâce à un électrochoc collectif salutaire ? Rien n'est moins sûr...

Bibliographie

- BARBAULT R. (2006), *Un éléphant dans un jeu de quilles. L'homme dans la biodiversité*, Seuil, Science ouverte, 266 pages.
- BARNOSKY A. D. *et al.* (2011), "Has the Earth's sixth mass extinction already arrived?", *Nature*, vol. 471, pp. 51-57.
- BLONDEL J., ARONSON J., BODIOU J.Y. & BOEUF G. (2010), *The Mediterranean region: biological diversity in space and time*, Oxford University Press, 376 pages.
- BOEUF G. (2007), « Océan et recherche biomédicale », *Journal de la Société de biologie*, vol. 201, n°1, pp. 5-12.
- BOEUF G. (2011), "Water, a key-molecule for living. Water in metabolism and biodiversity", in *Water, the forgotten biological molecule*, Eds. LE BIHAN D. & FUKUYAMA H., pp. 343-364, Pan Stanford Publishing, Singapore, pp. 343-360.
- BOEUF G. (2011), "Marine biodiversity characteristics", *Comptes Rendus Biologies*, Académie des Sciences, vol. 334, n°5-6, pp. 435-440.
- BOEUF G. (2012), « Qu'est-ce que la biodiversité ? Quels sont les mécanismes de son érosion ? », *Annales des Mines - Responsabilité & Environnement*, n°68, pp. 9-14.
- BOEUF G. (2014), *La Biodiversité, de l'océan à la cité*, Collège de France / Fayard, Paris, 88 pages.
- BOEUF G., SWYNGHEDAUF B. & TOUSSAINT J.-F., (2017), *L'Homme peut-il accepter ses limites ?*, Quae Editions, Versailles.
- BOEUF G. (2018), « Rivages, entre terre et mer, le littoral », *Reliefs*, n°8, pp. 39-43.
- BUTCHART S. H. M. *et al.* (2010), "Global biodiversity: indicators of recent declines", *Science*, vol. 328, pp. 1164-1168.

- CARDINALE B. J. *et al.* (2012), "Biodiversity loss and its impacts on humanity", *Nature*, vol. 486, pp. 59-65.
- CARTIGNY P. (2015), « Origines de l'eau sur Terre » in *L'eau à découvert*, CNRS Editions, pp. 22-23.
- CRUTZEN P. J. & STOERMER E. F. (2000), "The 'Anthropocene'", *Global Change Newsletter* 41, pp. 12-13.
- CSPNB (2007-2012), « 3 tomes issus du conseil scientifique biodiversité du CSPNB, (2007, 2009 et 2012), La biodiversité à travers des exemples », ministère de l'Écologie et du Développement durable, 104, 196 et 186 pages.
- DAVID B. (2021), *À l'aube de la sixième extinction, comment habiter la Terre ?*, Grasset, Paris, 256 pages.
- DE DUVE C. (1995), *Vital dust: life as a cosmic imperative*, Basic Books, New York, 288 pages.
- DE WEVER P. & DAVID B. (2015), *La biodiversité, de crise en crise*, Albin-Michel, 304 pages.
- EHRlich P. & EHRlich A. H. (2013), "Can a collapse of global civilization be avoided?", *Proceedings of the Royal Society B*, vol. 280, pp. 1-9.
- CEBALLOS G., EHRlich P. R. & DIRZO R. (2017), "Biological annihilation via the ongoing sixth mass extinction signaled by vertebrate population losses and declines", *PNAS*, vol. 114, n°30, pp. E6089-E6096.
- GERMAIN R. R. *et al.* (2023), "Changes in the functional diversity of modern birds species over the last million years", *PNAS*, vol. 120, n°7, e2201945119.
- HALLMANN C. A. *et al.* (2017), "More than 75 percent decline over 27 years in total flying insects biomass in protected areas", *PLOS One*, vol. 12, n°10, pp. 1-21.
- KLINGER B. A. & RYAN S. J. (2022), "Population distribution within the human climate niche", *PLOS Climate*, vol. 1, n°11, e0000086.
- PALUMBI S. R. (2001), "Humans as the world's greatest evolutionary force", *Science*, vol. 293, pp. 1786-1790.
- RANDEL W. J. (2018), "The seasonal fingerprint of climate change", *Science*, vol. 361, pp. 227-228.
- RIGAL S. *et al.* (2023), "Farmland practices are driving bird population decline across Europe", *PNAS*, vol. 120, n°21, e22165573120.
- STEFFEN W. *et al.* (2015), "Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet", *Science*, vol. 347, n°6223, DOI: 10.1126/science.1259255.
- TOUSSAINT J.-F., SWYNGHEDAUW B. & BOEUF G. (2012), *L'Homme peut-il s'adapter à lui-même ?*, Eds Quae, Versailles, 188 pages.
- URBAN M. C. *et al.* (2016), "Improving the forecast for biodiversity under climate change", *Science*, vol. 353, n°6304, pages aad8466.
- VITOUSEK P. M. *et al.* (1997), "Human domination of Earth's ecosystems", *Science*, vol. 277, pp. 494-499.
- WITHERS P. C. (1992), *Comparative Animal Physiology*, Thomson Learning, Books / Cole, 900 pages.