Astrophysicien à l'heure de l'Anthropocène

Alexandre Le Tiec

Laboratoire Univers et Théories
Observatoire de Paris / CNRS

CONTEXTE SCIENTIFIQUE

Comme le résume en des termes chocs le titre de l'article de Thierry et al. (2023), « il n'y a pas de recherche possible sur une planète morte ». Afin de garantir la possibilité pour les générations présentes et futures de prolonger l'aventure scientifique moderne, dont l'exploration de l'Univers, il convient *en premier lieu* d'assurer la pérénnité des conditions nécessaires au maintien d'une telle activité, à savoir un certain degré de stabilité politique, au sein d'organisations sociales présentant un haut degré de complexité organisationnelle (Tainter 1990). Ceci requiert en amont une biosphère fonctionnelle et le maintien du flux d'énergie nécessaire au fonctionnement du métabolisme économique qu'une telle organisation requiert (Day et al. 2018). Ces conditions sont aujourd'hui *profondément* remises en question (Bradshaw et al. 2021, Murphy Jr et al. 2021, Kemp et al. 2022).

En 2017, un collectif international de plus de 15 000 scientifiques a signé un nouvel « avertissement des scientifiques mondiaux à l'humanité » (Ripple et al. 2017). Dans le dernier volet de leur description annuelle de « l'état du climat », Ripple et al. (2023) affirment que « nous entrons dans un domaine inconnu en ce qui concerne la crise climatique, une situation dont personne n'a jamais été témoin dans l'histoire de l'humanité ». Par ailleurs, le budget carbone restant pour avoir *une chance sur deux* de contenir le réchauffement planétaire en-deça de 1,5°C par rapport à l'ère préindustrielle correspond à *cinq années* d'émissions de CO_2 au rythme actuel (Lamboll et al. 2023). La barre des 2°C de réchauffement global sera vraisembablement franchie au milieu de ce siècle au plus tard (Diffenbaugh & Barnes 2023), voire d'ici une quinzaine d'années à peine si l'augmentation du déséquilibre énergétique terrestre récemment observée provoque une *accélération* du réchauffement climatique au cours des décennies à venir (Hansen et al. 2023).

Les trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre caractéristiques du prolongement du *business as usual* nous conduisent droit vers un réchauffement global de l'ordre de 3°C d'ici la fin du siècle (IPCC 2023). Entre autres nombreuses conséquences dramatiques, cela signifie que, d'ici 2050, entre 25% et 35% de la population mondiale serait exposée au moins 20 jours par an à des conditions climatiques (température et humidité relative) *mortelles*, et jusqu'à la moitié de la population mondiale d'ici la fin du siècle (Mora et al. 2017). Par ailleurs, un nombre croissant d'études suggère qu'au-delà de 1,5°C de réchauffement, les risques de déclencher des *points de bascule* climatiques (Lenton et al. 2019) et océaniques (Heinze et al. 2021) vont croissant (Armstrong McKay et al. 2022, Wunderling et al. 2022), susceptibles de conduire la Terre vers un état de « planète étuve », et ce *indépendamment* de la trajectoire d'émissions anthropiques (Seffen et al. 2018).

Le dérèglement climatique causé par les émissions de gaz à effet de serre induites par l'usage de combustibles fossiles, divers procédés industriels, l'agriculture et la déforestation n'est pas le seul — *ni même le principal* — « problème » auquel la civilisation thermo-industrielle est confrontée. D'après la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES 2019), « la nature décline globalement à un rythme sans précédent dans l'histoire humaine et le taux d'extinction des espèces s'accélère, provoquant dès à présent des effets graves sur les populations humaines du monde entier ». Par ailleurs, « environ 1 million d'espèces animales et végétales sont aujourd'hui menacées d'extinction [1/8 du nombre total d'espèces estimé], notamment au cours des prochaines décennies, ce qui n'a jamais eu lieu auparavant dans l'histoire de l'humanité ». Les taux d'extinction à travers les taxons sont typiquement plusieurs dizaines à centaines (voire milliers) de fois supérieurs au taux d'extinction naturel (Lamkin & Miller 2016).

À cette érosion accélérée de la *biodiversité* s'ajoute l'effondrement des *populations* d'espèces à travers l'ensemble du règne animal. Ainsi, les populations de vertébrés sauvages et d'eau douce se sont respectivement effondrées de 69% et 83% en moyenne entre 1970 et 2018 (WWF 2022), à tel point que les humains et leur bétail représentent désormais 96% de la biomasse des vertébrés terrestres (Bar-On et al. 2018, Greenspoon et al. 2023). Une étude récente a documenté un effondrement de 78% des populations de $\sim$ 2700 espèces d'arthropodes entre 2008 et 2017 dans 150 prairies réparties sur 3 régions en Allemagne (Seibold et al. 2019). À l'échelle mondiale, les populations d'insectes déclinent au rythme de $\sim$ 4% par an (Sánchez-Bayo & Wyckhuys 2021), et ce depuis des décennies. Force est de constater que nous observons les prémices de la *sixième extinction de masse* du vivant sur Terre (Cebalos et al. 2015, Borgelt et al. 2022, Cowie et al. 2022).

Une perspective *systémique* (Meadows et al. 2004) permet de comprendre que le dérèglement du climat et l'effondrement du vivant « ne sont que » deux des nombreux *symptômes* d'un méta-problème sous-jacent, c'est-à-dire des conséquences directes d'une organisation socio-économique extractiviste et productiviste qui convertit — au travers de moyens techniques alimentés en énergie — de prodigieuses quantités de « ressources naturelles » en biens de consommation (Day et al. 2018), plus particulièrement depuis la *grande accélération* initiée au sortir de la seconde guerre mondiale (Steffen et al. 2015). Le métabolisme en croissance de cette économie mondialisée (Haas et al. 2020) implique le rejet de nombreuses formes de pollutions (solides, liquides et gazeuses), parmi lesquelles les gaz à effet de serre responsables de l'essentiel du dérèglement climatique contemporain.

L'amplitude catastrophique de tels bouleversements écologiques et géophysiques n'a été rendu possible que suite à la *révolution industrielle*, initiée il y environ 250 ans en Angleterre, via un usage sans cesse croissant de formes d'*énergies fossiles* (charbon, pétrole, gaz), lesquelles constituent aujourd'hui encore $\sim$ 82% du mix énergétique primaire mondial (Energy Institute 2023). En dépit de la croissance rapide de moyens de production d'énergie dite renouvelable (bas carbone), la *transition énergétique* tant attendue n'a pas encore commencé, puisque la production de combustibles fossiles est toujours en croissance (Energy Institute 2023). Jusqu'à présent, l'histoire de l'énergie est en effet celle d'une succession d'*additions* et de *symbioses* énergétiques et matérielles (Fressoz 2021).

Cependant, le stock de ressources fossiles étant fini, la production de ces combustibles est vouée à terme au *déclin géologique*. Dans son rapport annuel 2018, l'Agence internationale de l'énergie a d'ailleurs confirmé le franchissement en 2008 du *pic historique* de production du pétrole brut conventionnel, c'est-à-dire le pétrole puisé dans des réservoirs géologiques classiques (IEA 2018). L'exploitation croissante de ressources dites non conventionnelles depuis $\sim$ 2010 ne semble pas en mesure de changer significativement la donne (Hacquard et al. 2019), de sorte que le pic pétrolier tous liquides confondus est proche (Auzanneau & Chauvin 2021, Delannoy et al. 2021, Laherrère et al. 2022). La figure 1 illustre une perspective à long terme sur l'histoire énergétique de l'humanité.

Le paradigme des *limites planétaires* (Rockström et al. 2009, Boutaud & Gondran 2020) offre une vision synoptique des conditions biophysiques requises afin de préserver le système Terre dans l'état qui a caractérisé la dernière époque géologique (l'Holocène), une période couvrant les $\sim$ 12 000 dernières années, et au cours de laquelle la relative stabilité du climat a permis l'émergence et l'épanouissement de la civilisation humaine, suite à la révolution agricole. Les neuf limites planétaires identifiées à ce jour sont le changement climatique, l'érosion de la biodiversité, la modification des usages des sols, l'introduction d'entités artificielles (pollution chimique), les cycles de l'azote et du phosphore, l'acidification des océans, la charge atmosphérique en aérosols, l'érosion de la couche d'ozone, et la perturbation du cycle de l'eau douce. En l'état, *six de ces neuf limites* ont déjà été allègrement dépassées (Richardson et al. 2023).

La notion d'*empreinte écologique* (Wackernagel & Beyers 2019) — et plus généralement celle d'empreinte environnementale (Hoekstra & Wiedmann 2014) — fournit un diagnostic complémentaire au dépassement avéré de nombreuses limites planétaires. À l'échelle globale, l'empreinte écologique associée à l'ensemble des activités humaines dépasse la biocapacité de la planète depuis plus d'un demi-siècle (Rees & Wackernagel 2023). Il faut aujourd'hui 1,7 années aux écosystèmes terrestres pour générer les ressources consommées et absorber les pollutions produites, chaque année,

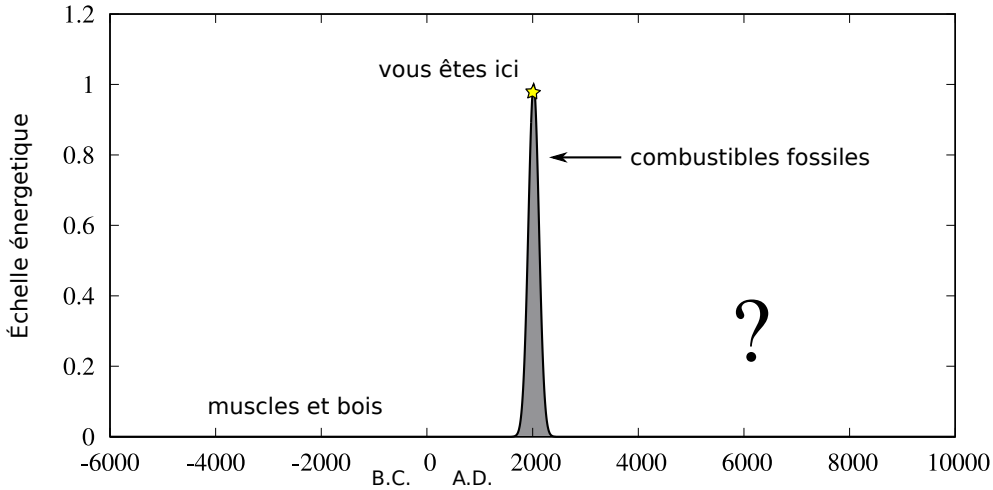

FIGURE 1. Une représentation schématique de la consommation énergétique de l'humanité sur le temps long permet une remise en perspective du mode de vie contemporain, qui été rendu possible par la croissance fulgurante de l'exploitation de sources fossiles. À quelques décennies près, nous nous trouvons précisément au pic global de production, tous combustibles fossiles confondus. *Figure adaptée de Murphy et al. (2021).*

par les activités humaines résultant du mode de vie industriel. Si l'humanité dans son ensemble vivait comme la population française (en dépit d'inégalités flagrantes), il faudrait 2,9 planètes Terre pour subvenir à ses besoins (Global Footprint Network 2023).

Des outils de modélisation contemporains reposant sur la dynamique des systèmes et tenant compte des *contraintes biophysiques* « montrent que la poursuite des tendances actuelles entraînera des pénuries et des impacts biophysiques qui se traduiront très probablement par une régionalisation, des conflits et, en fin de compte, une crise mondiale, conduisant à l'effondrement de notre civilisation moderne » (Capellán-Pérez et al. 2020). Au dire de Bradshow et al. (2021), « la gravité de la situation exige des changements fondamentaux dans le capitalisme mondial, l'éducation et l'égalité, qui comprennent notamment l'abolition de la croissance économique perpétuelle, une tarification adéquate des externalités, un abandon rapide de l'utilisation des combustibles fossiles, une réglementation stricte des marchés et de l'acquisition de la propriété, le contrôle du lobbying des entreprises et l'autonomisation des femmes. »

CONTEXTE INSTITUTIONNEL

En parallèle à ce constat désastreux, alarmant et de plus en plus sensible (Forster et al. 2023), on observe un certain nombre d'évolutions institutionnelles récentes au sein du monde académique francophone, en ce qui concerne la prise en compte des enjeux socio-environnementaux. En effet, le Comité d'éthique du CNRS a récemment souligné la responsabilité éthique des chercheurs et des instances d'évaluation de prendre en compte l'intégration des enjeux environnementaux à la conduite de la recherche (Comets 2023). Par ailleurs, le Groupement de recherche *Labos 1point5* — soutenu par le CNRS, l'INRAE, l'ADEME et l'INRIA — a produit de multiples textes de positionnement (Labos 1point5 2023) concernant « La Responsabilité de l'ESR en ces temps incertains », « Enseigner la transition environnementale dans le supérieur » et « Pour la reconnaissance de l'engagement des personnels de l'enseignement supérieur et de la recherche en faveur des enjeux environnementaux ». Dans une lettre datée du 4 octobre 2023, le Groupe de travail « Sobriété et Recherche » (GT S&R 2023) de la réunion des secrétaires scientifiques des Sections et Commissions interdisciplinaires du Comité national invite la direction du CNRS à reconsidérer « L'évaluation de la recherche à l'heure des défis environnementaux ». Dans un courriel daté du 11 décembre 2023, le PDG

du CNRS a officiellement annoncé que l'établissement s'est vu confier la responsabilité d'une agence de programmes intitulée « Climat, biodiversité et sociétés durables ». Enfin, le Ministère de l'Enseignement supérieur de la Recherche a récemment publié une note de cadrage (MESR 2023) intitulée « Former à la transition écologique pour un développement soutenable les étudiants de 1er cycle », suite aux recommandations formulées par Jouzel & Abbadie (2022) dans le rapport « Sensibiliser et former aux enjeux de la transition écologique et du développement durable dans l'enseignement supérieur ». L'objectif annoncé est de former *l'ensemble* des étudiants en premier cycle universitaire aux enjeux de la transition écologique, à raison de 30 heures de cours minimum, et ce dès la rentrée 2025.

BIBLIOGRAPHIE

- D. I. Armstrong McKay et al., *Science* **377**, 1171 (2022)
- M. Auzanneau et H. Chauvin, *Pétrole : le déclin est proche*, Seuil, 2021
- Y. M. Bar-On, R. Phillips et R. Milo, *Proc. Natl. Acad. Sci.* **115**, 6506 (2018)
- J. Borgelt et al., *Commun. Biol.* **5**, 679 (2022)
- A. Boutaud et N. Gondran, *Les limites planétaires*, La Découverte, 2020
- C. J. A. Bradshaw et al., *Front. Conserv. Sci.* **1**, 615419 (2021)
- I. Capellán-Pérez et al., *Energy Environ. Sci.* **13**, 986 (2020)
- G. Ceballos et al., *Sci. Adv.* **1**, e1400253 (2015)
- Comité d'éthique du CNRS, Avis n°2022-43 : *Intégrer les enjeux environnementaux à la conduite de la recherche – Une responsabilité éthique*, décembre 2022
- R. H. Cowie, P. Bouchet et B. Fontaine, *Biol. Rev.* **97**, 640 (2022)
- J. W. Day et al., *Biophys. Econ. Resour. Qual.* **3**, 2 (2018)
- L. Delannoy et al., *Appl. Energy* **304**, 117843 (2021)
- N. S. Diffenbaugh et E. A. Barnes, *Proc. Natl. Acad. Sci.* **120**, e2207183120 (2023)
- Energy Institute, *Statistical Review of World Energy 2023*, juin 2023
- P. M. Forster et al., *Earth Syst. Sci. Data* **15**, 2295 (2023)
- J.-B. Fressoz, *Annales des Mines* **101**, 7 (2021)
- Global Footprint Network [https:/data.footprintnetwork.org]
- L. Greenspoon et al., *Proc. Natl. Acad. Sci.* **120**, e2204892120 (2023)
- Groupe de travail « Sobriété et recherche », *L'évaluation de la recherche à l'heure des défis environnementaux*, octobre 2023
- W. Haas et al., *Resour. Conserv. Recycl.* **163**, 105076 (2020)
- P. Hacquard, M. Simoën et E. Hache, *Oil Gas Sci. Technol.* **74**, 88 (2019)
- J. E. Hansen et al., *Oxford Open Clim. Change* **3**, kgad008 (2023)
- C. Heinze et al., *Proc. Natl. Acad. Sci.* **118**, e2008478118 (2021)
- A. Y. Hoekstra et T. O. Wiedmann, *Science* **344**, 1114 (2014)
- Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, *Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services*, mai 2019
- International Energy Agency, *World Energy Outlook 2018*, novembre 2018
- International Panel on Climate Change, *Climate Change 2023 : Synthesis Report*, mars 2023
- J. Jouzel et L. Abbadie, *Sensibiliser et former aux enjeux de la transition écologique et du*

développement durable dans l'enseignement supérieur, février 2022
- L. Kemp et al., *Proc. Natl. Acad. Sci.* **119**, e2108146119 (2022)
- Labos 1point5, *Les textes de positionnement* [https:/labos1point5.org/les-textes-positionnement]
- J. Laherrère, C. A. S. Hall et R. Bentley, *Curr. Res. Environ. Sustain.* **4**, 100174 (2022)
- R. D. Lamboll et al., *Nat. Clim. Chang.* **13**, 1360 (2023)
- M. Lamkin et A. I. Miller, *BioScience* **66**, 785 (2016)
- T. M. Lenton et al., *Nature* **575**, 592 (2019)
- D. Meadows et al., *The Limits to Growth*, Chelsea Green Publishing, 2004
- Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, *Former à la transition écologique pour un développement soutenable les étudiants de 1er cycle*, juin 2023
- C. Mora et al., *Nat. Clim. Chang.* **7**, 501 (2017)
- T. W. Murphy Jr et al., *Energy Res. Soc. Sci.* **81**, 102239 (2021)
- S. Seibold et al., *Nature* **574**, 671 (2019)
- W. Steffen et al., *Anthr. Rev.* **2**, 81 (2015)
- W. Steffen et al., *Proc. Natl. Acad. Sci.* **115**, 8252 (2018)
- K. Richardson et al., *Sci. Adv.* **9**, eadh2458 (2023)
- W. E. Rees et M. Wackernagel, *Environment* **65**, 5 (2023)
- W. J. Ripple et al., *BioScience* **67**, 1026 (2017)
- W. J. Ripple et al., *BioScience*, biad080 (2023)
- J. Rockström et al., *Nature* **461**, 472 (2009)
- F. Sánchez-Bayo et K. A. G. Wyckhuys, *Austral Entomol.* **60**, 9 (2021)
- J. A. Tainter, *The Collapse of Complex Societies*, Cambridge University Press, 1990
- A. Thierry et al., *Front. Educ.* **8**, 1237076 (2023)
- M. Wackernagel et B. Beyers, *Ecological Footprint*, New Society, 2019
- N. Wunderling et al., *Nat. Clim. Chang.* **13**, 75 (2023)
- World Wide Fund for Nature, *Rapport planète vivante 2022*, octobre 2022