FRB
FONDATION POUR LA RECHERCHE SUR LA BIODIVERSITÉ

La démographie, une des pressions indirectes identifiées par l'Ipbes

Cette note a été rédigée par les membres du Conseil scientifique 2018-2021 de la FRB, avec la contribution et la relecture de membres de l'équipe FRB.

Avec le soutien du ministère de la Transition écologique et solidaire

CONTRIBUTEURS ET RELECTEURS
Luc Abbadie, Cécile Albert, Robin Almansa, Isabelle Arpin, Sébastien Barot, Didier Bazile, Philippe Billet, Nathalie Charbonnel, Anne Charmantier, Pauline Coulomb, Denis Couvet, Aurélie Delavaud, Sabrina Gaba, Philippe Grandcolas, Philippe Gros, Hervé Jactel, Yann Laurans, Line Le Gall, Harold Levrel, Jean-Louis Morel, Jean-louis Pham, Guillaume Sainteny, François Sarrazin, Jean-François Silvain et Eric Thybaud

COORDINATION
Hélène Soubelet

© FRB
Novembre 2022

AVANT-PROPOS
BIODIVERSITÉ ET DÉMOGRAPHIE HUMAINE

Quel(s) rôle(s) a joué et continue de jouer l'augmentation continue du nombre d'humains dans l'érosion - mais aussi l'évolution au sens darwinien - de la biodiversité ?

Ce travail examine la démographie, une des pressions indirectes identifiées par la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (Ipbes), en partant d'une approche par le nombre d'humains, intégrant peu, à ce stade, les autres dimensions de la démographie, comme les facteurs socio-économiques qui en déterminent la structure.

Il a été rédigé avec un regard émanant majoritairement des sciences de l'écologie et appelle à un élargissement, tenant plus compte des sciences humaines et sociales : il se veut, ainsi, point de départ d'échanges et de collaborations avec d'autres approches.

Ce travail s'appuie sur une brève synthèse de la littérature scientifique publiée entre 2019 et fin 2022 et a bénéficié de relectures par les membres du Conseil scientifique de la FRB. Il est original en ce qu'il est focalisé sur le réseau des liens entre la biodiversité et le facteur indirect sans doute le moins exploré de ce point de vue : la démographie humaine.

Première approche de mise en évidence des impacts entre démographie humaine et biodiversité, fondée sur les résultats de travaux de recherche, il a vocation à se poursuivre et à être enrichi par des échanges en interne et avec l'ensemble des partenaires de la FRB. Les fiches présentées ci-après approfondissent les éléments de connaissance autour de la démographie humaine (FICHE 1) et de la manière dont elle peut influencer les facteurs directs et certains facteurs indirects façonnant la biodiversité (FICHES 2 à 11). La quantification de l'effet de la croissance de la population humaine sur l'érosion de la biodiversité, par rapport à d'autres facteurs de pression, comme le changement climatique par exemple, reste, quant à elle, un aspect peu abordé dans la littérature et constitue à ce titre un « front de science », une question appelant à des recherches inédites.

Ce travail a été réalisé avec le soutien du ministère de la Transition écologique.

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS

SYNTHÈSE ET MESSAGES-CLÉS ---------- 5

FICHES INTRODUCTIVES – CONTEXTE ET ENJEUX

FICHE 1 - Dynamique de la démographie humaine ---------- 9

FICHE 2 - Tensions entre besoins de l'humanité et « capacité » de la biosphère ---------- 24

FICHE 3 - Démographie, économie et demande mondiale croissante pour la biomasse ---------- 28

DÉMOGRAPHIE ET MOTEURS DIRECTS DE L'ÉROSION DE LA BIODIVERSITÉ

FICHE 4 - Démographie et changement d'usages des sols ---------- 31

FICHE 5 - Démographie et exploitation directe des ressources ---------- 36

FICHE 6 – Démographie et changement climatique ---------- 39

FICHE 7 - Démographie et pollutions ---------- 40

FICHE 8 - Démographie et espèces envahissantes ---------- 41

DÉMOGRAPHIE ET MOTEURS INDIRECTS DE L'EROSION DE LA BIODIVERSITÉ

FICHE 9 - Démographie et technologie ---------- 43

FICHE 10 - Démographie et facteurs culturels : l'exemple de la mondialisation du tourisme ---------- 45

FICHE 11 - Démographie et maladies infectieuses émergentes ---------- 48

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES ---------- 49

SYNTHÈSE ET MESSAGES-CLÉS

Dans son récent rapport sur l'état et les tendances de la biodiversité mondiale (années 1970-2050), l'Ipbes dresse le constat de l'impressionnante détérioration de la biosphère à toutes les échelles spatiales, ainsi que de l'exceptionnelle rapidité de l'érosion de la biodiversité - des gènes aux communautés d'espèces – et de la dégradation des écosystèmes.

Parallèlement :

- le nombre d'humains a triplé au cours du demi-siècle écoulé et la population mondiale atteindra 8 milliards d'humains avant le fin de l'année 2022 (United Nations, 2022) ;
- en sept décennies, de 1950 à 2019, le produit intérieur brut (PIB) global par habitant a presque quintuplé, passant de 3 500 à 17 000 dollars internationaux (réf. prix 2011) alors que la population mondiale passait de ~2,5 à 7,7 milliards d'humains ; l'activité économique s'est alors construite sur l'exploitation de ressources finies rendant ce modèle non soutenable (Barrett *et al.*, 2020) ;
- les besoins en énergie et matières premières se sont accrus de concert avec l'intensification du commerce international (Gephart & Pace, 2015 ; Wiedmann & Lenzen, 2018 ; Liu *et al*., 2019 ; Scheffers *et al*., 2019 ; Green *et al*., 2019 ; Xu *et al*., 2020) ;
- la superficie des zones urbaines et du réseau de leurs infrastructures a doublé en trois décennies (Johnson & Munshi-South, 2017 ; Weiss, 2018) : plus d'une personne sur deux vit aujourd'hui en ville et ce chiffre devrait être porté à deux sur trois en 2050 ; la taille des villes a augmenté de manière exponentielle depuis 1950 et les 28 premières agglomérations dans le monde, en 2030, auront des effectifs proches ou supérieurs à 20 millions d'habitants (United Nations, 2018) créant une demande en infrastructures et approvisionnements (énergie, alimentation, etc.) ;
- les terres consacrées à l'agriculture et à l'élevage occupent désormais plus du tiers des surfaces continentales (Ipbes, 2019) et, si une grande partie des terres a historiquement été utilisée par les humains, l'intensification de l'utilisation a concouru à l'érosion de la biodiversité (Ellis *et al.*, 2021).

➔ Consulter la fiche 1 : **Dynamique de la démographie humaine**

La plupart des « objectifs d'Aichi », définis par la Convention sur la diversité biologique (CDB), ne sont pas atteints (Ipbes 2019, fig. SPM6). Les trajectoires actuelles du développement des sociétés humaines sont incompatibles avec l'accomplissement des objectifs de développement durable (ODD) des Nations Unies, spécialement ceux relatifs à la pauvreté, la faim, l'eau, l'urbanisation, les océans et les terres (Ipbes 2019, fig. SPM7). L'extraordinaire essor de la production de nourriture, d'aliments pour animaux, de matériaux et d'énergie est accompli au détriment de services écosystémiques tels que la régulation du climat, la qualité des eaux continentales et marines, de l'air et des sols (Steffen *et al*., 2015, 2018 ; Springmann *et al*., 2018 ; Jouffray *et al*., 2020). Nombre de ces activités impriment à la surface de la planète une signature caractéristique de l'Anthropocène [1] (Lewis & Maslin, 2015 ; Waters *et al*., 2016), dont le changement d'usage des terres (artificialisation, etc.) et la transformation des écosystèmes.

L'enrichissement des bases de données et l'analyse des flux d'information permettent aujourd'hui d'appréhender ces bouleversements à l'échelle pluri-décennale, et de porter à connaissance des synthèses globales de l'intensité de l'exploitation (et des projets de mise en exploitation) des ressources de la planète. Sans prétendre à l'exhaustivité, des constats avérés sont établis en ce qui concerne les ressources alimentaires (FAO, 2020 ; IPCC, 2019), biologiques (par ex. génétiques, Blasiak *et al*., 2018 ; FAO, 2019a), mais aussi minières (par ex. celles des fonds océaniques, Miller *et al*., 2018), ou encore les ressources en eau douce, indispensables aux services écosystémiques (Pekel *et al*., 2016 ; Abbott *et al*., 2019 ; Immerzeel *et al*., 2019 ; Schyns *et al*., 2019), sans méconnaître ni les risques afférents (Liu *et al*., 2019 ; Nienhuis *et al*., 2019), ni la percolation des activités humaines dans les espaces réservés à la préservation de la biodiversité (Ramirez-Llodra *et al*., 2011 ; Dureuil *et al*., 2018 ; Kroner *et al*., 2019 ; Martin *et al*., 2020). Quant aux stocks halieutiques, ils sont soit exploités au maximum de leur potentiel de renouvellement, soit surexploités pour un tiers d'entre eux (FAO, 2019b, 2020 ; Taconet *et al*., 2019).

➔ Consulter la fiche 2 : **Tensions entre besoins de l'humanité et « capacité » de la biosphère**

[1] Désigne une ère géologique dominée par les humains, stratigraphiquement distincte de l'Holocène.

Au-delà de ces constats, l'Ipbes a élaboré un modèle conceptuel qui distingue, d'une part, les « moteurs directs » de l'érosion de la biodiversité (amplification des usages de l'océan et des terres, exploitation des écosystèmes, changement climatique, pollutions, espèces exotiques envahissantes) et d'autre part les « moteurs indirects », c'est-à-dire les causes profondes des atteintes à la biodiversité, dont la démographie humaine, la consommation, l'économie, les échanges commerciaux, les progrès technologiques, les institutions, la gouvernance, etc. étayés par un système de valeurs et de choix de comportement (Ipbes, 2019, fig. SPM2, SPM9). Ces moteurs indirects rétroagissent et aggravent les pressions directes exercées sur la biodiversité.

Les interactions entre la biodiversité et les moteurs directs ont été - et demeurent - l'objet de nombreuses recherches. En revanche, l'étude des relations entre la biodiversité et les moteurs indirects, notamment la démographie, semble moins fréquente.

DÉMOGRAPHIE ET MOTEURS DIRECTS DE L'ÉROSION DE LA BIODIVERSITÉ

- ➔ Consulter la fiche 4 : **Démographie et changement d'usage des sols** ;
- ➔ Consulter la fiche 5 : **Démographie et exploitation directe des ressources** ;
- ➔ Consulter la fiche 6 : **Démographie et changement climatique** ;
- ➔ Consulter la fiche 7 : **Démographie et pollutions** ;
- ➔ Consulter la fiche 8 : **Démographie et espèces exotiques envahissantes**.

DÉMOGRAPHIE ET MOTEURS INDIRECTS DE L'ÉROSION DE LA BIODIVERSITÉ

- ➔ Consulter la fiche 9 : **Démographie et technologie** ;
- ➔ Consulter la fiche 10 : **Démographie et facteurs culturels : l'exemple de la mondialisation du tourisme** ;
- ➔ Consulter la fiche 11 : **Démographie et maladies infectieuses émergentes**.

S'il existe une incidence de la croissance des populations humaines sur les pressions qui pèsent sur la biodiversité, ce dossier met aussi en lumière le fait que la relation entre le nombre d'humains et la dégradation de l'environnement est loin d'être linéaire.

- ➔ Consulter la fiche 3 : **Démographie, économie et demande mondiale croissante pour la biomasse**

Cela permet donc d'envisager un découplage entre démographie et impact humain, découplage qui impliquerait une réduction des pressions directes (par l'éducation, la réglementation ou les incitations de toute nature, etc.) ainsi que des actions menées sur des facteurs indirects de pression (par la réflexion sur certaines technologies, modes de gestion des espaces, de consommation, de modèles économiques, de gouvernance, de fiscalité, réglementation, etc.).

Ainsi, **alors que la consommation des ressources naturelles et des biens de consommation par habitant s'accroît et se mondialise entre pays développés et pays émergents, la réduction des impacts anthropiques, dans un contexte de croissance de la population humaine, pourrait passer par une réduction et une rationalisation de l'utilisation globale des ressources naturelles** – réduction et rationalisation qui, elles-mêmes, sous-entendent une révision des modes de production au niveau mondial et une meilleure répartition des ressources. Ce levier d'action semble le plus facile à envisager dans la mesure où agir sur les évolutions démographiques reste un sujet épineux et suppose, de plus, un effet d'inertie. Par ailleurs, il est aussi démontré que certaines modalités de gestion des espaces naturels ou anthropisés s'avèrent favorables à la biodiversité.
Un dernier élément de réflexion autour de cette nécessaire transition vers la durabilité souligne qu'**elle ne pourra sans doute pas se faire sans un profond changement de notre rapport au vivant et de notre regard sur la biodiversité**, souvent réduite à un ensemble de « ressources » pour l'espèce humaine. Citons ici les travaux et réflexions de François Sarrazin et Jeanne Lecomte qui constituent une bonne conclusion de cette synthèse sur les liens entre démographie humaine et biodiversité.

MESSAGES CLÉS EXTRAITS DES FICHES

- **L'effondrement de la biodiversité est concomitant de l'épuisement des ressources naturelles,** induit par une demande sans cesse croissante.
- **La démographie humaine aggrave de manière indirecte les pressions sur la biodiversité**. Elle exerce une influence sur les facteurs directs de pression que sont le changement d'usage des terres et des mers, l'exploitation directe des ressources, le changement climatique, les pollutions, et les espèces envahissantes. Elle intervient également sur les pressions indirectes.
- Même si le strict nombre d'êtres humains n'est pas nécessairement le facteur explicatif prépondérant (notamment dans les modèles d'extinction de la mégafaune) dans l'érosion de la biodiversité, **c'est presque toujours la rupture démographique avec l'arrivée d'humains associée aux ruptures de consommation de biens et de services, à de nouveaux usages et aux ruptures technologiques qui peuvent être mises en cause**.
- **Les impacts de la démographie sur la biodiversité ne sont pas linéaires**. Bien que l'accroissement considérable des populations humaines s'accompagne d'un déclin inégalé et brutal de la biodiversité, des populations humaines, même réduites, peuvent avoir des impacts catastrophiques et irréversibles sur la biodiversité.
- **La question des impacts de la démographie humaine sur la biodiversité ne peut pas être examinée indépendamment des autres facteurs de pressions indirectes comme les modes de production et de consommation**.
- **Le nombre d'humains a triplé au cours du demi-siècle écoulé**. Or pendant la plus grande partie de leur histoire, les populations d'*Homo sapiens* sont restées numériquement limitées. Elles se sont accrues au cours de la révolution néolithique, mais le nombre total d'humains n'a jamais atteint 500 millions avant l'an 1500. Le premier milliard a été dépassé vers 1804, le deuxième 125 ans plus tard, mais 12 ans seulement ont séparé le sixième (1998) du septième (2011). De fait, c'est au cours du dernier demi-millénaire que l'humanité a vécu de nombreuses révolutions de natures variées (démographique, sociale, économique, technologique, médicales, etc.). La prise de conscience de la « crise environnementale » s'amplifie depuis la seconde moitié du XX^{e} siècle.
- Selon l'Onu, le nombre d'humains pourrait atteindre 9,7 milliards en 2050, puis 11 milliards en 2100[2].
- **Il existe une corrélation spatiale positive entre les régions historiquement riches en biodiversité et l'accroissement récent ou actuel des peuplements humains qui s'y trouvent**. Il s'agit souvent d'une croissance démographique récente qui pose la question de la survie de ces hot spots de biodiversité à moyen ou long terme.
- **Il existe très probablement deux tendances dans l'impact des populations humaines sur la biodiversité**.
    - La première est strictement liée au nombre d'humains : l'impact augmente avec le nombre. La démographie, dans ce cas, aggrave les pressions sur la biodiversité par une relation positive due au nombre d'humains présents.
    - La seconde tendance est, elle, pour partie déconnectée de la dimension démographique et peut être liée à l'attrait particulier, et parfois temporaire, de populations humaines pour une ressource spécifique, animale (comme le castor ou la rhytine, un gros sirénien herbivore du détroit de Béring) ou végétale (comme le bois de rose ou d'autres essences rares) dont la valeur augmente à mesure qu'elle devient rare. Elle peut être aussi due au souhait de voir disparaître un compétiteur, comme le bison ou une espèce considérée comme nuisible (comme le moustique). Elle peut aussi être due à l'accès à une technologie plus efficace.
- **Des sociétés plus sobres et des modes de gestion des ressources naturelles plus durables a des conséquences favorables sur la biodiversité**. Atteindre ce but requiert :
    - D'agir sur les pressions directes sur la biodiversité en les diminuant.

- D’agir sur les facteurs indirects notamment par l’éducation, la communication ou les incitations collectives ou individuelles (réglementaires ou financières).
- D’agir sur les facteurs indirects par l’accroissement de la connaissance des relations (pratiques et connaissances) des populations à la biodiversité, dans leur diversité.
- La sanctuarisation d’espaces sans intervention humaine pour contribuer à sauvegarder la biodiversité.
- La transformation des regards sur la biodiversité par une approche « évocentrée » (c’est-à-dire qui promeut le maintien de la capacité d’évolution du vivant) de la conservation et mieux prendre en compte les relations entre les sociétés humaines et la biodiversité.

FICHES INTRODUCTIVES – CONTEXTE ET ENJEUX

FICHE 1 - DYNAMIQUE DE LA DÉMOGRAPHIE HUMAINE

INTRODUCTION

Notre espèce *Homo sapiens* « moderne »[2] est apparue il y a environ 200 000 ans en Afrique, où elle s'est régionalement diversifiée. Les premières migrations d'*Homo sapiens* vers le Moyen-Orient furent précoces (~100 000 ans BP, *before present*),[3] mais c'est autour de 60 000 ans BP que l'expansion hors de l'Afrique semble avoir été à son apogée,[4] ouvrant la voie à la colonisation de l'Australie (~50 000 ans BP), de l'Europe (~40 000 ans BP) et plus tardivement de l'Amérique du Nord.[5] Avant leur extinction (~40 000 ans BP), au moins six espèces d'*Hominini* [6] furent contemporaines d'*Homo sapiens*. [7] La mieux connue à l'heure actuelle est *Homo neanderthalensis*, installée en Eurasie occidentale dès 400 000 ans BP. Les comportements sociaux et le développement culturel des Néandertaliens sont aujourd'hui considérés équivalents à ceux de l'*Homo sapiens* d'alors (Galway-Witham & Stringer, 2018 ; Galway-Witham *et al*., 2019 ; Leder *et al*., 2021).

De manière générale, l'introgression[8] entretenait un brassage génétique entre espèces humaines. Ainsi *H. sapiens* s'est-il hybridé avec *H. neanderthalensis* dès 65 000–50 000 ans BP.[9] L'analyse de l'ADN ancien de quatre fossiles d'*H. sapiens* qui vivaient en Europe il y a plus de 40 000 ans a récemment montré que l'hybridation *sapiens* × *neanderthalensis* aurait été plus fréquente qu'auparavant estimée (Hajdinjak *et al*., 2021 ; Prüfer *et al*., 2021).[10]

Néandertaliens et Dénisoviens, les seconds installés en Eurasie orientale, sont deux espèces-sœurs dont les lignées ancestrales se seraient séparées entre 500 000 et 400 000 ans BP. Les Dénisoviens[11] demeurent énigmatiques : leurs fossiles sont très rarement conservés sous les climats d'au-delà l'Eurasie centrale, et ils sont avant tout identifiés par les signatures de leurs introgressions, révélatrices d'une dynamique complexe : l'héritage des Dénisoviens en Asie du Sud-Est procède d'hybridations récurrentes impliquant des groupes

---

[2] Par opposition à des lignées *H. sapiens* « archaïques », elles aussi africaines, apparues il y a ~320 000 ans. Principaux traits anatomiques d'*Homo sapiens* moderne : boîte crânienne subsphérique, arcade sourcilière non-saillante, menton, petites dents, bassin étroit. NB : le genre *Homo* serait apparu il y a ~2,8 millions d'années (Bobe & Wood, 2021).

[3] Au nord de la péninsule Arabique, *H. sapiens* s'est installé il y a ~ 85 000 ans dans le désert du Néfoud, pendant une période de climat humide (Groucutt *et al*., 2018). L'occupation de cette région a alterné avec les périodes climatiques arides. Les récentes découvertes archéologiques de Groucutt *et al*. (2021) ont révélé une séquence de périodes favorables (aux environs de 400, 300, 200, 125–75 et 55 milliers d'années BP), pendant lesquelles plusieurs populations d'*Hominini* (cf. note 5) et de mégafaune ont vécu dans des environnements paléolacustres.

[4] Afin d'identifier les « fenêtres environnementales » propices aux migrations d'*Homo sapiens* de l'Afrique vers l'Eurasie, Beyer *et al*. (2021) modélisent les variations paléoclimatiques qui ont régné depuis 300 000 ans sur le nord du continent africain et sur l'Arabie. En assemblant les résultats du modèle (régime des pluies, aridité, voies de passage praticables) avec des données archéologiques et génétiques, Beyer *et al*. concluent que les conditions les plus propices à la colonisation du monde furent réunies à partir de 65 000 ans BP environ.

[5] D'après Willerslev & Meltzer (2021), *Homo sapiens* franchissait la Béringie et pénétrait sur le continent nord-américain il y a 17 000 à 15 000 ans. De récentes découvertes archéologiques témoignent d'une arrivée plus précoce, au moins 10 000 ans plus tôt selon Becerra-Valdivia & Higham (2020). Bennett *et al*. (2021) révèlent la mise à jour au Nouveau-Mexique d'empreintes de pas humaines datées de 23 000 à 21 000 ans BP (*i.e*. pendant le dernier maximum glaciaire, avant la fermeture des voies ''*Ice-Free Corridor*'' et ''*Pacific Coastal Route*'').

[6] *Hominini* désigne l'ensemble des espèces du genre *Homo*, « la branche humaine de l'arbre du vivant) », tribu de la sous-famille des *Homininae* (singes africains et lignée humaine). Famille : *Hominidae* (« grands singes » et humains). Super-famille : *Hominoidea* (singes et humains). Cf. Almécija *et al*. (2021).

[7] Figure 2 *in* Galway-Witham *et al*. (2019).

[8] Le transfert de gènes entre espèces par hybridation.

[9] Résultat « pionnier », obtenu par analyse génomique, publié dans *Science* en 2010 par Green *et alii*.

[10] ''*Mixing between Neanderthals and the first modern humans that arrived into Europe was perhaps more common than is often assumed*.'' (Hajdinjak *et al*., *op. cit*.).

[11] Découverte en 2010 en Sibérie dans la Grotte de Denisova (Zavala *et al*., 2021), l'espèce éponyme *Homo denisovensis* fut génétiquement identifiée par analyse de l'ADN d'une phalange (Reich *et al*., 2010 ; Meyer *et al*., 2012).

structurés d'*Hominini* archaïques (*H. luzonensis* et *H. floresiensis*).[12] (Browning *et al*. 2018 ; Teixeira & Cooper, 2019 ; Massilani *et al*. 2020 ; Teixeira *et al*. 2021 ; Larena *et al*. 2021 ; Choin *et al*. 2021).

Au cours de ses migrations, *H. sapiens* parcourait de nouveaux environnements. L'hybridation avec les espèces qui s'y étaient adaptées — et qui en particulier possédaient les gènes liés à l'immunité et à la défense contre les pathogènes — aurait efficacement facilité sa progression (Abi-Rached *et al*., 2011 ; Gouy & Excoffier, 2020).[13] Globalement, les migrations et le métissage eurent une profonde influence sur la diversification génétique et culturelle de l'espèce *H. sapiens* (Roebroeks & Soressi, 2016 ; Harris & Nielsen, 2016 ; Nielsen *et al*., 2017).[14] D'après Liu *et al*. (2021), les différentes lignées d'*Hominini*, fréquemment mélangées au cours du temps, se sont insérées dans le continuum de la diversité génétique — interconnecté depuis ~500 000 ans — comme le sont aujourd'hui les populations humaines contemporaines.

Un acquis primordial de la lignée humaine est l'usage du feu — initialement utilisé pour l'éclairage, le chauffage, la protection contre les prédateurs et, grâce à la cuisson, la diversification des aliments — attesté par les traces de foyers datées de la fin du Pléistocène inférieur (~790 000 ans BP). Beaucoup plus tardivement (164 000 ans BP, Pléistocène moyen tardif) apparut la pyrotechnologie pour le traitement thermique de la pierre, un savoir-faire maîtrisé et disséminé au cours du Pléistocène supérieur, aux alentours de 73 000 ans BP (Brown *et al*., 2009). MacDonald *et al*. (2021) considèrent qu'il s'agit de l'émergence au sein de la lignée humaine, il y a ~400 000 ans, du premier processus de propagation d'une culture.

Richerson *et al*. (2021) rappellent, à l'occasion du 150e anniversaire de la publication de l'ouvrage *The Descent of Man*, que la vision de Charles Darwin — le fondateur des bases scientifiques de la recherche sur les origines et l'évolution de l'Homme — a été amplement corroborée par les résultats des travaux modernes. Ainsi Richerson *et al*. mettent-ils en exergue :

- **La séparation (en Afrique, à la fin du Miocène[15]) entre la lignée humaine (*Hominini*) et celle des chimpanzés**. Avec ces derniers, nous partageons ~96 % de notre ADN ainsi que de nombreux traits et adaptations (en génétique, développement, morphologie, cognition et psychologie). Les nouvelles connaissances en neurobiologie, génétique, primatologie et biologie comportementale consolident l'opinion de Darwin : la plupart des différences entre les humains et les animaux supérieurs[16] sont « de degré et non de nature ».[17] La seule différence reconnue est la maîtrise du langage humain[18].
- **La puissante faculté de coopération des humains, adossée à une éthique et à des normes sociales.** Nos ancêtres ont choisi la voie de la coopération, de l'apprentissage social et de la culture cumulative ; ces capacités avancées, devenues instrument universel, réduisent la nécessité de faire évoluer des organes biologiques en réponse à des défis environnementaux[19].

[12] Cf. l'arbre phylogénétique schématique de Choin *et al*. (2021 ; *Extended Data Fig. 10*). Le métissage *sapiens* × *denisovensis* fut beaucoup plus complexe que *sapiens* × *neanderthalensis* (Bergström *et al*., 2020, 2021).

[13] De nombreux auteurs soulignent le rôle crucial des introgressions néandertalienne et dénisovienne dans l'adaptation du système immunitaire de l'homme moderne au paysage pathogénique de l'Eurasie.

[14] À l'époque de l'introgression *H. sapiens* × *H. neanderthalensis*, la proportion d'ADN néandertalien chez *H. sapiens* atteignait vraisemblablement 10 %. En admettant que l'effectif efficace de la population néandertalienne équivalait à 10 % de la population d'*Homo sapiens*, les deux espèces se seraient mélangées en proportion de leurs effectifs efficaces, entraînant l'assimilation des Néandertaliens par *H. sapiens*. Un scénario plausible en l'état des connaissances actuelles, selon Bergström *et al*. (2021). [NB : l'effectif efficace d'une population théorique possède la même variabilité génétique aléatoire que celle de la population réelle].

[15] Il y a 9,3 à 6,5 millions d'années.

[16] *Higher animals* : animaux supérieurs (Mammifères et autres vertébrés).

[17] *… most differences between humans and higher animals are "of degree and not of kind*."

[18] Certains aspects du langage se retrouvent dans la communication d'autres espèces, à l'exception de la syntaxe, de la récursivité et de la richesse de sens de notre communication symbolique.

[19] *"…, removing the need to evolve specific biological organs for specific environmental challenges*." Notre lignée, dont la taille du cerveau a plus que doublé en deux millions d'années, tend à s'adapter progressivement à la variabilité environnementale par l'apprentissage individuel et social.

- **Les progrès qualitatifs de l'apprentissage et de la transmission du savoir.** Considérant l'instabilité de l'environnement au Pléistocène, Richerson *et al*. insistent sur les rôles décisifs du patrimoine culturel, de la cognition associée à l'émergence du langage, des normes sociales et des institutions.

Au cours de l'Holocène, les premiers développements de l'agriculture extensive — précurseurs d'évolutions vers de profondes transformations des sols et des communautés végétales et animales [20] — ont émergé en Mésopotamie dès 10 000 ans BP. Vers 8 000 ans BP, l'agriculture extensive se propageait d'une part en Europe centrale, d'autre part dans l'est du Moyen-Orient et en Asie de l'Ouest, et apparut en Asie de l'Est et en Amérique (Centrale et du Sud). Répandue en Europe occidentale et en Chine il y a 6 000 ans, elle avait gagné l'Asie du Sud, l'Asie du Sud-Est, le nord du continent africain et la quasi-totalité de l'Amérique du Sud. Dès 2 000 ans BP, elle était établie dans tout l'Ancien Monde et les Amériques Centrale et du Sud. C'est entre 1 000 BP et 1 [21] qu'elle s'est étendue à l'Amérique du Nord (ArchaeoGLOBE Project, 2019[22]). L'expansion de l'agriculture, de l'irrigation, de l'élevage et de la déforestation ont puissamment remanié le couvert végétal, l'hydrographie et la biodiversité des paysages. Dès 8 000 ans BP, ces bouleversements auraient provoqué des émissions anthropogéniques de CO_2 (et de CH_4). Suivant l'hypothèse avancée par W. F. Ruddiman en 2003, ces émissions auraient prolongé la durée de la période intergalciaire [23], *i.e*. retardé le commencement de la prochaine glaciation (Ruddiman[24]).

Les débuts de la croissance des populations d'*Homo sapiens* demeurent aussi difficiles à quantifier que l'accentuation de leur empreinte sur la biosphère. Pendant la plus grande partie de leur histoire, ces populations n'ont rassemblé qu'un petit nombre d'individus (Lutz & Gailey, 2020). Schmidt *et al*. (2021) combinent plusieurs méthodes quantitatives pour estimer l'évolution de la densité de population en Europe depuis le Paléolithique supérieur : de 40 000 à 10 000 ans BP, la densité s'est accrue tout en demeurant faible (~0,0004 à 0,02 ind./km²). Elle a augmenté de ~0,6 à 1,8 ind./km² entre 5 100 et 500 ans BP. À l'époque de l'Empire romain, elle était d'environ 14 ind./km²[25]. À l'échelle mondiale, ce n'est que vers l'an 1500 que fut atteint le nombre de 500 millions d'humains[26]. Le premier milliard fut dépassé vers 1804, le deuxième 125 ans plus tard ; plus près de nous, 12 ans seulement ont séparé le sixième (1998) du septième (2011).[27] Aujourd'hui, nous sommes 7,8 milliards[28].

---

[20] Une évolution dont l'emprise sera devenue globale dès 3 000 ans BP.

[21] CE : Common Era (Ère commune), ou Current Era (actuelle), Christian Era (chrétienne), synonymes de A.D. (Anno Domini).

[22] Des représentations cartographiques figurent dans les '*Supplementary Materials*' de la publication citée en référence (https://www.science.org/doi/10.1126/science.aax1192). Sont aussi cartographiés : *Foraging / Hunting / Gathering* ; *Intensive Agriculture* ; *Pastoralism* ; *Urban Centers*.

[23] Les « interglaciaires »—incluant celui en cours, l'Holocène, qui a débuté il y a 11 700 ans—sont des périodes chaudes, exemptes de neige aux faibles altitudes ; le niveau de la mer est élevé. Le début de chaque interglaciaire marque la fin d'une période glaciaire. L'interglaciaire nommé MIS 19 (*Marine Isotope Stage 19*, ~777 000 ans BP) est cellui qui ressemble le plus au MIS 1, *i.e*. à l'Holocène (*Past Interglacials Working Group of PAGES*, 2016).

[24] « L'hypothèse de Ruddiman » a suscité de nombreux débats scientifiques. *Inter alia*, les résultats d'un modèle développé par Ganopolski *et al*. (2016) : des causes naturelles (faible excentricité de l'orbite de la Terre, concentration en CO_2 atmosphérique exempt d'émissions anthropogéniques) pourraient à elles seules expliquer le retard du démarrage de la prochaine glaciation. S'appuyant de même sur des simulations, Vavrus *et al*. (2018), dans un article cosigné avec Ruddiman, estiment que la trajectoire du climat actuel pourrait conduire à un début de glaciation si les concentrations des gaz à effet de serre étaient aussi faibles qu'elles le furent à la fin de l'interglaciaire MIS 19.

[25] En 2018, la densité de population du continent Européen était estimée à ~73 individus par km².

[26] En 1492, l'arrivée des Européens dans la Caraïbe a enclenché, d'une part, une vaste commutation de population (causes : exposition aux maladies apportées d'Europe, conflits, esclavage) et, d'autre part, l'essor du commerce entre l'Europe, la Chine, l'Afrique et les Amériques. Plusieurs impacts sur la biodiversité émanent d'échanges de denrées alimentaires originaires du Nouveau Monde (*i.a*., maïs, pomme de terre, manioc), de celles provenant de l'Ancien Monde (*i.a*., blé, canne à sucre), et aussi d'animaux domestiques introduits aux Amériques (cheval, vache, chèvre, porc), toutes ces espèces accompagnées de leurs commensaux, parasites et pathogènes.

[27] Lehman *et al*. (2021) analysent des résultats comparables obtenus à l'aide d'un modèle dynamique déterministe simple des variations quantitatives—depuis la période préhistorique—des populations d'*Hominini*, de leurs proies et prédateurs et de leurs ressources alimentaires animales et végétales. Les auteurs soulignent trois ruptures écologiques fondamentales : la lignée humaine (i) acquiert le statut de compétiteur dominant et de grand prédateur, (ii) puis un comportement mutualiste avec les espèces dont elle s'alimente, (iii) et substitue le contrôle de sa fécondité à la croissance non maîtrisée de sa population. Les auteurs soulignent aussi un « marqueur » de l'avènement de la révolution industrielle : l'appropriation de la puissance des énergies fossiles.

[28] 7,79 milliards en 2020 (Nations Unies, https://population.un.org/wpp/Download/Standard/Population/)

Lors de la seconde moitié du précédent millénaire, l'humanité a engagé de profondes révolutions démographique, sociale, économique, technologique. La prise de conscience de la « crise environnementale » s'est quant à elle amplifiée à partir de la seconde moitié du XX^{e} siècle, de concert avec l'expansion des changements en cours. Dans le cadre du programme IGBP[29], Steffen (2000) introduit la notion de « métabolisme de la Terre » (*Earth metabolism*), puis développe une vision holistique pour appréhender conjointement les dynamiques croisées du « système Terre » (*Earth System*) et les pressions combinées qui modifient profondément la biosphère (Steffen *et al.*, 2004). Ces réflexions et recherches s'organisent en particulier autour du tryptique *Earth System – Anthropocene*[30] *– Great Acceleration*.[31] La « grande accélération » est classiquement exposée à l'aide de graphes qui — tout en tenant compte des écarts entre pays (OCDE, BRICS[32] et autres) — mettent en relief l'emballement, dans les années 1950, d'indicateurs de croissance afférents à la socio-économie (au premier chef la démographie humaine) et aux perturbations anthropogéniques (i.a. émissions de CO_2, réchauffement, acidification de l'Océan, déforestation tropicale)[33].

L'Anthropocène [34] désigne l'époque de l'emprise globale de l'humanité sur la nature — un faisceau de phénomènes concomitants dont l'intensification modifie profondément les enveloppes superficielles de la planète Terre : l'atmosphère, les surfaces océanique et continentale, la biosphère. Citons notamment l'augmentation d'un ordre de grandeur de l'érosion et du transport des sédiments[35] provoqués par l'urbanisation et l'agriculture[36] ; les perturbations anthropogéniques brutales des cycles du carbone, de l'azote[37], du phosphore et de divers métaux ; la production et la dissémination de nouvelles substances chimiques[38] ; les dérèglements environnementaux et leurs conséquences, *inter alia* le réchauffement climatique global, la montée du niveau de la mer, l'acidification de l'océan et sa désoxygénation (expansion de « *dead zone* »)[39] ; les changements rapides affectant la biosphère (océanique et continentale), tels que la disparition d'habitats, l'explosion des cheptels d'animaux domestiques,[40] les espèces envahissantes[41] ; la prolifération et la dispersion à l'échelle mondiale de nombreux nouveaux matériaux, notamment le béton[42] — et l'un de ses principaux déchets, la cendre volante (*pulverised fuel ash*)[43] [44].

Plus spécifiquement, la disparition de nombreuses espèces animales et végétales constitue l'une des altérations de la biodiversité parmi les plus alarmantes. À cet égard, Ceballos *et al*. (2020) décrivent un phénomène quasi-irréversible, la progression vers la sixième extinction en masse des vertébrés terrestres[45] : plus de 400 espèces ont disparu au cours du siècle passé, et 1,7 % de celles évaluées sont en voie d'extinction (moins de 1 000

[29] *International Geosphere–Biosphere Programme*, http://www.igbp.net/. Programme international de recherche qui, de 1987 à 2005, a fédéré suivant une approche interdisciplinaire la communauté scientifique mondiale, avec l'objectif de faire progresser l'élucidation de la dynamique du « système Terre » plongé dans le « changement global ».

[30] "*The current epoch in which humans and their societies have become a global geophysical force*", Steffen *et al.* (2007).

[31] "*The last 50 years have without doubt seen the most rapid transformation of the human relationship with the natural world in the history of humankind*" ; Steffen *et al*. (2004) ; mise à jour : Steffen *et al*. (2015).

[32] BRICS : Brésil, Russie, Inde, Chine, Afrique du Sud.

[33] Voir aussi : Steffen *et al*. (2018, 2020). Ainsi que l'article de Jouffray *et al*. ('*The Blue Acceleration*', 2000), où sont analysées une douzaine d'activités maritimes en croissance rapide. *Inter alia* : exploitation des ressources génétiques, minérales, alimentaires ; trafic maritime, dont croisières ; cables sous-marins.

[34] Agissant pour la Commission Internationale de Stratigraphie, le « Groupe de travail sur l'Anthropocène », créé en 2009, a approuvé en 2019 l'homologation d'une nouvelle ère géologique, l'Anthropocène (cf. avancées du groupe de travail : http://quaternary.stratigraphy.org/working-groups/anthropocene/). Consulter aussi l'article de Lewis & Maslin (2015), qui exposent concrètement et avec clarté le protocole du choix des empreintes de l'humanité qui permettront de définir avec précision la future unité chrono-stratigraphique.

[35] Syvitski & Kettner (2011).

[36] Pretty, J. (2018).

[37] Stevens, C. J. (2019) ; Canfield, D. E. *et al.* (2010).

[38] Alpizar, F. *et al*. (2019) ; Wang, Z. *et al.* (2021).

[39] IPCC (2021) ; Smith, K. E. *et al*. (2021) ; Rockström, J. *et al*. (2021).

[40] Robinson, T. P. *et al.* (2011) ; Plotnick, E. & Koy, K. A. (2020).

[41] Ricciardi, A. *et al*. (2017) ; Diagne, C. *et al*. (2021).

[42] Andrew, R. M. (2019).

[44] Geyer, R. *et al*. (2017) ; Galloway, T. S. *et al*. (2017) ; Santos, R. G. *et al*. (2021).

[45] Ceballos *et al*. choisissent les mammifères terrestres parce qu'ils sont en général bien recensés. Incidemment, signalons que ce n'est en revanche pas le cas des 5,5 millions d'espèces d'insectes (entre 2,6 et 7,8 millions, Stork *et al*., 2015), malgré leur rôle essentiel au fonctionnement de la biosphère continentale. Eggleton (2020) reconnaît les causes d'un déclin avéré (intensification de l'agriculture, usage abusif des pesticides, déforestation tropicale, urbanisation, changement climatique), mais l'auteur souligne aussi que la forte hétérogénéité (quantitative et qualitative) des données selon les groupes et les biomes ne permet pas d'accéder à une vision globale de l'état des insectes.

survivants)[46]. Les auteurs soulignent que toute perte d'une espèce impacte les autres (phénomène de cascade), et ils conjecturent qu'un vertébré sur cinq pourrait être en danger d'extinction vers 2050 — et la moitié, voire plus, à la fin du siècle. C'est dans les régions densément peuplées, telle l'Asie tropicale, que surviennent les dégâts les plus considérables. Globalement, l'humanité en est le premier facteur — et aussi, rétroactivement, la victime : fragmentation et destruction des habitats naturels, trafics illégaux, surexploitation, introduction d'espèces allochtones[47], pollutions, risques accrus de zoonoses[48] (notamment virales, *i.a*. HIV/AIDS, MERS-CoV, H1N1, Dengue, Nipah, Ebola, Zika), etc., autant de ravages qui se conjuguent avec les effets du changement climatique. En première priorité, Ceballos *et al*. préconisent d'instaurer — au-delà de la Cites[49] — [50] pour l'interdiction du trafic illégal et du commerce légal de la faune et de la flore sauvages (*wildlife trade*[51]).
En 2019, l'Ipbes[52] publie le rapport sur l'état et les tendances de la biodiversité mondiale (période 1970–2050)[53]. La plateforme souligne le constat alarmant de l'échec de la progression vers les objectifs d'Aichi[54] (fig. SPM6 du rapport), ainsi que les altérations de la biosphère et le brusque déclin de la biodiversité — sans précédent dans l'histoire de l'humanité. Les trajectoires actuelles du développement des sociétés humaines entravent l'accomplissement des objectifs de développement durable des Nations Unies (ODD)[55], spécialement ceux relatifs à la pauvreté, la faim, l'eau, l'urbanisation, les océans et les terres (IPBES 2019, fig. SPM7).

[46] Source des données : IUCN (https://www.iucnredlist.org/), Birdlife International (https://birdlife.org/).

[47] Hulme, P. E. (2021).

[48] Gibb, R. *et al*. (2020) ; Guégan, J.-F. *et al*. (2020) ; Aassve, A. *et al*. (2021) ; Sobotka, T. *et al*. (2021).

[49] *CITES : Convention on International Trade in Endangered Species,* https://cites.org/eng. *Voir aussi :* https://www.iisd.org/system/files/2020-10/still-one-earth-wildlife-trade.pdf

[50] Citons l'exemple de la FAO, qui a initialisé en 2001 la mise en chantier d'un instrument mondial juridiquement contraignant pour préserver les ressources halieutiques, plus précisément pour « éradiquer la pêche illégale, non déclarée, non réglementée » (INN, *IUU fishing* en anglais) : l'accord « relatif aux mesures de l'État du port », entré en vigueur en 2016 (http://www.fao.org/port-state-measures/background/parties-psma/en/)

[51] Scheffers, B. R. *et al*. (2019) ; Liew, J. H. *et al*. (2021).

[52] *Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*, https://ipbes.net/. (Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques).

[53] IPBES (2019): *Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. Díaz, S. and 26 co-authors (eds.). IPBES secretariat, Bonn, Germany. 56 pages. https://doi.org/10.5281/zenodo.3553579

[54] https://www.cbd.int/sp/targets/

[55] https://sdgs.un.org/goals

ENCADRÉ 1

ARCHITECTURE DU MODELE CONCEPTUEL DE L'IPBES

Afin d'impulser un ambitieux, inéluctable et irréversible changement transformateur[56], l'Ipbes définit un cadre pour l'action, qui englobe :

- les « **moteurs directs** » de l'érosion de la biodiversité (amplification des usages de l'océan et des terres, exploitation des écosystèmes, changement climatique, pollutions, espèces exotiques envahissantes) ;
- les « **moteurs indirects** », les causes profondes des atteintes à la biodiversité ; comme la consommation croissante de la population humaine versus la soutenabilité de l'exploitation des services écosystémiques ;
- une **boucle de rétroaction** combinée à des « **leviers pour l'action** » comme un dispositif coordonné d'infléchissements des trajectoires des moteurs directs (les pressions exercées sur la biodiversité) et des moteurs indirects ;
- outre la dynamique démographique, les moteurs indirects englobent un ensemble de facteurs sociétaux — afférents à l'évolution de la consommation, de l'économie, des échanges commerciaux, des progrès technologiques, des institutions, de la gouvernance — dont la régulation procède d'un **système de valeurs** et de choix de comportement[57]. (Ipbes, 2019, fig. SPM2 & SPM9).

Le schéma élaboré par l'Ipbes, intrinsèquement dynamique, ouvre la voie à des scénarios qui incluent explicitement des hypothèses contrastées de choix de société impliquant les moteurs indirects — ici, tout spécialement la démographie humaine[58].

1. LA NAISSANCE D'HOMO SAPIENS LITERATA[59]

NB : *dans les lignes qui suivent, le propos est limité au « monde occidental »*.

Fruit d'une élaboration progressive, les premiers écrits apparurent il y a environ 5 000 ans en Mésopotamie et en Égypte. Ils eurent pour utilité première l'enregistrement de transactions et la tenue d'inventaires, avant d'évoluer vers la conservation de la mémoire des événements (*e.g*. historiques, environnementaux). Au cours des premiers millénaires, l'usage de la lecture et de l'écriture fut à quelques exceptions près l'apanage d'une élite circonscrite aux autorités religieuses et en partie à la noblesse, aux fonctionnaires et commerçants, *inter alia*. Au début du XVI[e] siècle, la Réforme engage un profond changement en Europe : Martin Luther insiste sur l'absolue nécessité de l'instruction et d'une solide culture classique pour étudier la Bible. Suivant les principes du *sola scriptura* et du sacerdoce universel[60], Luther promeut le développement de l'instruction de tout le peuple chrétien et « *rend ainsi nécessaire ce que Gutenberg a rendu possible* »[61]. La Réforme a efficacement entraîné la formation de sociétés alphabétisées dans les territoires protestants[62] où elle précéda la croissance économique.

---

[56] Une réorganisation fondamentale, à l'échelle planétaire, dans les domaines technologique, économique et social, incluant paradigmes, objectifs et valeurs.

[57] La vitesse du changement des moteurs directs et indirects est variable selon les régions et les pays.

[58] Les interactions entre la biodiversité et les moteurs directs ont été—et demeurent—l'objet de nombreuses recherches. En revanche, l'étude des relations entre la biodiversité et les moteurs indirects apparaît moins fréquente.

[59] Référence à un article de Wolfgang Lutz, intitulé *World Population Trends and the Rise of homo sapiens literata*. (2020), ISBN 978-88-7761-114-7. L'auteur a forgé ce concept pour souligner l'ampleur des effets de l'éducation des femmes.

[60] Dès le printemps 1524, dans son appel *Aux magistrats de toutes les villes allemandes pour les inviter à ouvrir et à entretenir des écoles chrétiennes*, Luther présente l'instruction comme un instrument au service de l'Église et de l'État, le second en principe beaucoup mieux gouverné par des personnes instruites.

[61] F. Furet & J. Ozouf, historiens français cités par P. Cabanel & A. Encrevé, auteurs de l'article dont nous nous sommes inspiré : « De Luther à la loi Debré : école, protestantisme et laïcité » in : *Histoire de l'éducation* 110 : 5–21 (2006). Citons Cabanel & Encrevé : « *les Réformateurs ne réclament pas seulement le développement de la culture profane. Le type d'instruction religieuse dont ils se font les champions est lui aussi porteur d'une alphabétisation du peuple : dès lors que la Bible est la seule autorité (et non plus la hiérarchie de l'Église) et que la lecture individuelle de la Bible est une exigence fondamentale, il est indispensable que chaque fidèle soit en mesure de la lire et donc qu'il dispose d'un minimum d'instruction*. […] *L'un des moyens souvent utilisés alors – lorsque les huguenots dominent socialement une région – est l'introduction de maîtres protestants dans les écoles*. »

[62] « *ayant le goût et la familiarité du livre* » (Cabanel & Encrevé, *op. cit*.).

Au XIX[e] siècle, l'alphabétisation universelle s'est répandue dans les pays de l'Europe du Nord[63]. Pendant la première moitié du XX[e] siècle, La plupart des pays d'Europe, des Amériques et le Japon devinrent totalement alphabétisés puis, au cours de la deuxième moitié, le reste du monde[64]. Cette progression remarquable a stimulé de profonds changements sociaux, économiques et culturels (Lutz, 2020), conformément aux effets attendus de l'apprentissage scolaire sur le développement des capacités cognitives abstraites (catégorisation, déduction logique, compréhension d'informations complexes) et sur l'aptitude à raisonner, évaluer les risques, imaginer l'avenir, décider et exécuter[65].

2. L'ÉMERGENCE D'AXES DE RÉGULATION DE LA CROISSANCE DÉMOGRAPHIQUE

La question de l'ajustement des besoins de l'humanité à la capacité de production de la biosphère est une source inépuisable de réflexions et de recherches[66]. En 1679, Antoni van Leeuwenhoek extrapole la densité de la population hollandaise à ce qu'il estimait être la superficie globale des territoires vierges, et conclut que la Terre ne peut pas héberger plus de 13,4 milliards d'habitants. En 1798, Thomas R. Malthus postule que la capacité de la biosphère n'est pas statique, mais dynamiquement couplée avec la population humaine ; l'erreur de Malthus fut de ne pas expliquer comment une population en croissance non régulée pourrait augmenter la capacité de la biosphère — tandis que Nicolas de Condorcet misait quant à lui sur le pouvoir du génie humain à surmonter les obstacles au progrès. Diverses approches furent ultérieurement explorées, comme celle proposée dans les années 1920, fondée sur le ratio entre approvisionnement et besoins alimentaires ; le principe fut ensuite étendu soit à de nombreux autres facteurs influents (énergie, eau, espace, *inter alia*, traités séparément ou conjointement), soit à une approximation, comme la superficie des terres cultivables. L'intérêt accordé à la dynamique démographique de l'humanité s'est ensuite amplifié dans les années 1960-1970. Les interrogations afférentes furent abordées dès la « Conférence sur la Biosphère » (UNESCO, 1968)[67], et des publications marquantes comme « La bombe humaine » de Paul Ehrlich (1968) ont alors fait date. Dans les années 1970, l'émergence de la modélisation des systèmes — et du foisonnement de débats qu'elle suscite — a constitué une réelle avancée. Dans le champ thématique abordé ici, le « rapport Meadows »[68] peut être considéré comme l'un de ses premiers fruits.

Dans les décennies 1990-2000 — après la prise de conscience de la croissance accélérée de la population due à une baisse rapide de la mortalité dans les pays en développement, combinée au maintien d'une natalité élevée — l'évolution vers une diminution progressive du taux de fécondité était admise, conformément à la théorie de la transition démographique.[69] Parallèlement, tandis que l'émergence des enjeux climatiques focalisait l'attention sur la surconsommation des pays développés[70] — et aussi sur la montée d'une classe moyenne dans les pays en développement — le succès de la « révolution verte », portée par les innovations agronomiques et technologiques, a accrédité l'illusion d'un découplage entre la dynamique démographique de l'humanité et les

[63] Vers 1850, 80% de la population des Pays-Bas savait lire et écrire (dès 1600 déjà, les deux tiers des hommes résidant en ville). Dans l'Europe des années 1870, les territoires protestants de Suède, d'Allemagne et d'Angleterre sont alphabétisés à 80%. La France, après la Révolution, a haussé son taux d'alphabétisation à 69%. Viennent ensuite l'Autriche, l'Irlande et, loin derrière, l'Italie et l'Espagne (taux < 35 %), la Russie (15%).

[64] Excepté quelques enclaves d'analphabétisme en Afrique subsaharienne et en Asie occidentale.

[65] L'élucidation du rôle de nos perceptions et comportements dans la dynamique démographique est tributaire des avancées de nombreuses recherches, notamment en sciences cognitives et neuropsychologie.

[66] Pour plus ample information sur les exemples cités dans cet alinéa, voir l'article de Joel E. Cohen (1995).

[67] https://ise.unige.ch/isdd/spip.php?article39

[68] https://clubofrome.org/publication/the-limits-to-growth/

[69] Selon la théorie de la « transition démographique », après une phase initiale de forts taux de natalité et de mortalité, l'amélioration des conditions d'existence, sanitaires notamment, entraîne la baisse de la mortalité, tandis qu'une fécondité élevée — un trait profondément ancré dans les normes culturelles des sociétés traditionnelles — soutient une natalité vigoureuse. Ce n'est qu'après une phase de transition (telle qu'achevée au début du XXe siècle en Europe) que les taux de natalité diminuent. La baisse concomitante de la mortalité et de la natalité entraîne l'émergence d'une population active. Celle-ci, d'un point de vue économique, est à même de créer un « dividende démographique » sous certaines conditions, notamment : gouvernance éclairée, émancipation des femmes, politiques ambitieuses d'investissement dans l'éducation et la santé. Les bénéfices économiques attendus du dividende démographique sont classiquement attribués à la baisse de la natalité. Lutz *et al.* (2019a) transforment le paradigme : les auteurs, considérant les résultats de l'analyse de l'évolution démographique d'un panel de 165 pays (période 1980–2015), établissent que la cause première du dividende démographique est la progression de l'éducation qui entraîne la baisse de la natalité, la hausse de la productivité et l'amélioration des services de santé.

[70] *e.g.* Hoekstra & Wiedmann, 2014 ; Godfray *et al.*, 2018 ; Hayward & Roy, 2019 ; Van Vuuren *et al.*, 2019.

changements environnementaux (Crist *et al*., 2017). Comme précédemment indiqué, L'IPBES constate désormais les multiples conséquences de l'exploitation intensive accélérée des ressources naturelles. Par surcroît, les récentes projections de la Division Population des Nations Unies — 9,7 milliards d'humains en 2050, 11 milliards en 2100[71] — rehaussent l'intérêt d'élucider les interactions entre démographie humaine et soutenabilité (UN 2019, a, b)[72].

Plus fondamentalement, le lien substantiel entre l'humanité et la biosphère fut sobrement exprimé en juin 1972 à l'issue de la « Conférence de Stockholm » : « *l'homme est à la fois créature et créateur de son environnement* » (préambule, alinéa 1). D'un point de vue opérationnel, le principe 16 énonce que « *dans les régions où le taux d'accroissement de la population ou sa concentration excessive sont de nature à exercer une influence défavorable sur l'environnement ou le développement* […] *il faudrait mettre en œuvre des politiques démographiques qui respectent les droits fondamentaux de l'homme et qui soient jugées adéquates par les gouvernements intéressés* »[73]. Il est instructif de relire la déclaration de Stockholm (UN, 1973)[74]. Ce court texte (un préambule en 7 alinéas suivi de 26 principes)[75] est fondateur d'une vision dont les axes d'action seront ultérieurement ajustés, enrichis et consolidés au cours du processus des conférences des Nations Unies (Rio et Agenda 21, 1992[76] ; Johannesburg, 2002 ; Rio+20, 2012) avant d'aboutir—après plus de quatre décennies—à « l'Agenda 2030 » adopté en 2015 par 195 pays. Dans ce cadre, l'évaluation de la progression vers les ODD[77] s'appuie sur des synthèses globales et à haute résolution spatiale de tendances à long terme, *inter alia* celles de la mortalité infantile (Burstein *et al*., 2019), de la malnutrition (Local Burden of Disease Child Growth Failure Collaborators, 2020) et des disparités de l'accès à l'éducation, y compris les écarts à la parité (Graetz *et al*., 2018 ; Local Burden of Disease Educational Attainment Collaborators, 2020).

3. SCÉNARIOS D'ÉVOLUTION DE LA DÉMOGRAPHIE HUMAINE

***Préambule**. L'élucidation des rouages de la démographie humaine, en particulier des effets de la scolarité et de l'apprentissage, s'inscrit dans un domaine de recherche très vaste. Les sciences humaines et sociales sont au premier chef mobilisées autour d'un ensemble de questions pluridisciplinaires de nature variée (politique, économique, anthropologique, psychologique, cognitive, inter alia). Les avancées de la connaissance nourrissent une abondante littérature scientifique en appui à la progression vers des objectifs globaux, en l'occurrence les ODD 4 et 5[78]. Il suffit pour s'en convaincre de consulter, parmi de nombreuses sources, les résultats synthétisés dans les rapports de l'Unesco[79]. En ce qui concerne le texte qui suit :* **(i)** *le contenu privilégie les résultats quantitatifs de modèles mathématiques de la dynamique de la démographie humaine ;* **(ii)** *ces modèles intègrent plusieurs ensembles cohérents d'hypothèses de développement socio-économique (i.e. plusieurs scénarios) élaborés dans un cadre interdisciplinaire ;* **(iii)** *les résultats de ces modèles consistent en projections (à l'horizon*

[71] Intervalles de confiance (95%) : [9,4–10,1] milliards en 2050, [9,4–12,7] en 2100.

[72] Une vision synthétique des questions afférentes est exposée dans la *Special Issue* '*Population*' publiée dans la revue *Science*: Chin G., Marathe T., Roberts L., eds. (2011 July 29). Population. *Science* 333: 539–594. https://www.science.org/toc/science/333/6042

[73] Version anglophone : *Demographic policies which are without prejudice to basic human rights and which are deemed appropriate by Governments concerned should be applied in those regions where the rate of population growth or excessive population concentrations are likely to have adverse effects on the environment of the human environment and impede development*.

[74] https://www.iisd.org/articles/stockholm-and-birth-environmental-diplomacy, *IISD Newsletter*, 2020. Dans cet article richement documenté, P. Chasek retrace la naissance et l'héritage de la Conférence de Stockholm.

[75] Parmi les 26 principes figurent la gestion intégrée de l'environnement et de ses ressources, fondée sur la connaissance scientifique indispensable aux procédures de décision décentralisées, transparentes, et engageant l'ensemble des parties concernées. La situation et les besoins spécifiques des PED face à leurs problèmes environnementaux sont explicitement reconnus.

[76] En 1992, dans un cadre distinct de celui de la convention de Rio, deux autres conventions virent le jour : la Convention sur la Diversité biologique (CDB, juridiquement contraignante) et la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC).

[77] En 2020, la pandémie COVID-19 a abaissé le score moyen des ODD dans leurs dimensions économique, sociale et environnementale—une première depuis 2015. En ce qui concerne le climat et la biodiversité, la faible, voire absente progression des ODD 13, 14 et 15, qui obtiennent parmi les plus faibles scores, est tout aussi alarmante que les conclusions des rapports du GIEC et de l'IPBES (Sachs *et al*., 2021).

[78] ODD 4 : « *Assurer l'accès de tous à une éducation de qualité, sur un pied d'égalité, et promouvoir les possibilités d'apprentissage tout au long de la vie* ». ODD 5 : « *Parvenir à l'égalité des sexes et autonomiser toutes les femmes et les filles* ». Les ODD sont tous interdépendants ; *e.g*., les deux qui précèdent sont liés à l'ODD3 (« *Permettre à tous de vivre en bonne santé et promouvoir le bien-être de tous à tout âge* »).

[79] Spécialement, dans la série des '*Global Education Monitoring Reports*' (https://en.unesco.org/gem-report/allreports) : '*Education for people and planet: Creating sustainable futures for all*' (2016, https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000245752) ou encore '*Inclusion and education*' (2020, https://gem-report-2020.unesco.org/).

2100 en général) de « futurs possibles », à l'appui de choix de société entre trajectoires de développement contrastées ; **(iv)** *l'analyse des contrastes entre projections met en lumière l'impact déterminant du capital humain, tout spécialement le rôle de la scolarisation*[80]*.*

La communauté scientifique internationale élabore depuis une décennie, initialement à l'appui des travaux du Giec[81], un ensemble de scénarios qui décrivent des trajectoires contrastées de développement socio-économique : les SSP (*Shared Socioeconomic Pathways* ; (voir encadré 2)[82]. Les SSP sont intégrés à la modélisation des prévisions de l'évolution du climat, qu'il s'agisse, par exemple, d'estimer les futures émissions de CO_2 compatibles avec l'Accord de Paris (2015) — publiées en 2018 dans le rapport *Global Warming of 1.5°C* — ou de calculer le *remaining carbon budget*, c'est-à-dire la quantité de CO_2 qu'il sera encore possible de rejeter dans l'atmosphère tout en maintenant le réchauffement global dans les limites posées par l'Accord de Paris (Rogelj *et al*., 2019)[83, 84].

Initialement, cinq SSP ont été définis — aujourd'hui sept pour la 6e évaluation du Giec[85]. Les SSP combinent de façon cohérente des narrations prospectives de l'évolution démographique de l'humanité et des changements de ses conditions d'existence, du développement économique, des progrès de la technologie, de l'intensité d'exploitation des ressources en fonction des styles de vie, et des mécanismes de redistribution des richesses (Rogelj *et al*., 2018b)[86]. Les scénarios climatiques associent les SSP avec des hypothèses de forçage radiatif (*i.e.*, de réchauffement global) — les *representative concentration pathways* (RCP)[87]. Enfin, des modèles dynamiques d'évaluation intégrée (*integrated assessment models*, IAMs) calculent des projections climatiques fondées sur des combinaisons RCP × SSP (Riahi *et al*., 2017 ; Rogelj *et al*., 2018a). L'Ipbes, en conformité avec sa conceptualisation de la dynamique de la biosphère (voir encadré 1), a désormais adopté cette stratégie de modélisation.

Partie intégrante des SSP, la démographie humaine est une composante-clé des scénarios de biodiversité. Les deux institutions les plus en vue — investies sur l'analyse des tendances et les projections démographiques — sont la Division de la population des Nations Unies[88] et l'IIASA (*International Institute for Applied Systems Analysis*, fondé en 1972)[89]. La première, la plus connue, est la plus souvent citée. On s'intéressera ici à la seconde, partenaire depuis 2016 du JRC (*Joint Research Centre* de la Commission européenne) dans le CEPAM (*Centre of Expertise on Population and Migration*). Dans ce cadre, Lutz *et al*. (2018) ont publié un rapport dont les résultats—des projections issues d'un modèle pluridimensionnel de population—offrent une mise à jour des trajectoires démographiques de 201 pays (dont les États membres de l'UE)[90] au cours de la période 2015–2100.

Dans l'encadré 2 ci-après, la présentation résumée des projections d'évolution de la population mondiale tient compte de la baisse récemment détectée de la mortalité infantile, notamment en Afrique (Burstein *et al*. 2019)— un progrès en grande partie attribuable à la puissante mobilisation de la communauté internationale (*Global Fund to Fight HIV/AIDS, Tuberculosis and Malaria*, entre autres).

---

[80] Au-delà de la scolarité, l'éducation des jeunes filles et des femmes. Cf. Lutz (2017), *inter alia*.

[81] Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, https://www.ipcc.ch/

[82] Deux revues ont chacune publié un numéro spécial consacré aux SSP : (i) *Climatic Change*. Volume 122: 351–522 (February 2014). Special Issue: *A Framework for the Development of New Socio-economic Scenarios for Climate Change Research* ; https://link.springer.com/journal/10584/122/3 ; (ii) *Global Environmental Change*. Volume 42: 148-358 (January 2017). Special Section Articles Featuring "*Quantification of the Shared Socio-economic Pathways*" (https://www.sciencedirect.com/journal/global-environmental-change/vol/42). Edited by Keywan Riahi & Detlef P. van Vuuren.

[83] https://www.ipcc.ch/sr15/

[84] '*Remaining carbon budget*' : 500, 850, et 1350 Gt CO_2 à partir de 2020 pour avoir une chance sur deux de maintenir le réchauffement sous le seuil 1,5, 1,7 et 2°C, respectivement (IPCC, WG1 AR6, 2021).

[85] SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, et SSP5-8.5.

[86] Paragraphe 2.3, '*Overview of 1.5°C Mitigation Pathways*', pp. 108-130 in: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels (2018).* https://www.ipcc.ch/sr15/

[87] Les associations entre SSP et RCP ne sont pas toutes possibles : *e.g.*, SSP3 est incompatible avec RCP2.6.

[88] https://www.un.org/development/desa/pd/ ; La publication biennale des projections démographiques des Nations Unies, attendue en 2021, sera publiée en 2022.

[89] https://iiasa.ac.at/

[90] Voir aussi : Lutz W. (Ed.) *et al*., 2019b. *Demographic Scenarios for the EU—Migration, Population and Education*. DOI:10.2760/590301.

La mise à jour en 2018 des SSP1-2-3 (voir encadré 2) est issue d'une collaboration entre l'IIASA et le JRC. Ensuite ont été actualisés les scénarios SSP4 (un monde inégalitaire et fragmenté) et SSP5 (proche du SSP1 dont il se démarque par l'usage intensif des énergies fossiles). Le « *2018 update* » des cinq scénarios « classiques » offre à la communauté scientifique un « module démographique » (« *the human core of the SSPs* ») permettant de projeter les taux de fécondité et de mortalité en fonction des niveaux d'éducation—et aussi des flux migratoires—en cohérence avec les hypothèses de nature sociologique et économique propres à chaque SSP (KC, 2020).

ENCADRÉ 2

TRAJECTOIRES DE DEVELOPPEMENT SOCIOECONOMIQUE (*SHARED SOCIOECONMIC PATHWAYS*, SSP)

Les résultats des combinaisons du modèle démographique pluridimensionnel avec trois SSP (Lutz *et al.*, 2018) sont résumés ci-après. La description succincte des projections est focalisée sur l'impact de l'éducation et des deux autres piliers du « capital humain » (l'état de santé et la capacité de travail). Rappelons en préambule que 10 % de la population mondiale n'avaient reçu aucune éducation formelle en 2016, à l'opposé des 11 % qui avaient bénéficié de l'équivalent d'une éducation post-secondaire.

- **SSP1 (scénario le plus optimiste) :** la proportion des jeunes qui reçoivent une éducation post-secondaire atteint 32 % en 2050 puis 65 % en 2100 ; le 4e objectif de développement durable des Nations Unies (ODD 4, « Éducation de qualité ») est quasiment atteint, entraînant la baisse des taux de fécondité et de mortalité ; globalement, la transition démographique s'accélère ; la population augmente jusqu'à atteindre 8,9 milliards en 2055–2060, puis diminue (7,8 milliards à la fin du siècle) ; en 2015, 8,3 % de la population mondiale sont des 65+ (personnes âgées de plus de 65 ans), une proportion qui atteint 20 % en 2050, puis 43 % en 2100.
- **SSP2 (scénario médian) :** le développement des pays à faible revenu est inégal ; globalement, la proportion d'enfants non scolarisés décline : 5 % en 2050, 1 % en 2100, dans le même temps qu'augmente de 20 % à 38 % la proportion de ceux qui bénéficient d'une éducation post-secondaire ; les taux de fécondité et de mortalité suivent des trajectoires proches de leurs tendances actuelles ; la population atteint 9,8 milliards en 2070–2080, puis décroît lentement (9,5 milliards à la fin du siècle) ; la proportion des 65+ augmente sensiblement (resp. 17 % et 29 % au milieu et à la fin du siècle).
- **SSP3 (scénario pessimiste) :** un monde divisé et gangrené par la pauvreté ; l'ambition sécuritaire l'emporte sur l'aide au développement ; dans les PED, l'éducation stagne, voire régresse ; à la fin du siècle, 20 % de la population ne recevront aucune éducation formelle ; en forte hausse dans les pays où le taux de fécondité est aujourd'hui élevé, la population poursuit sa croissance (10 milliards en 2045, puis 13,4 milliards en 2100) ; la proportion des 65+ n'augmente que lentement (16 % en 2100).

Sans oublier les incertitudes attachées aux simulations, les choix de société contrastés propres à la définition des SSP séparent nettement entre elles les futures trajectoires plausibles de la population mondiale : **(i)** la projection « pessimiste » (SSP3) prévoit une hausse continue (13,4 milliards d'humains en 2100) ; **(ii)** à l'opposé, les deux scénarios qui intègrent une autorégulation par le capital humain, et spécialement par l'éducation, prévoient que la population franchit un maximum (plus vite atteint dans le cas du SSP1) puis qu'elle diminue : 9.5 milliards (SSP2) ou bien 7.8 milliards (SSP1) en 2100 — soit un écart de 4 milliards entre la trajectoire « *business as usual* » (SSP2) et la trajectoire pessimiste (SSP3).

Précisons qu'une équipe de chercheurs de l'IHME (*Institute for Health Metrics and Evaluation*[91], partenaire de l'Université de Washington) a récemment publié les projections 2017–2100 de cinq scénarios démographiques (Vollset *et al.*, 2020)[92]. Les auteurs se réfèrent aux travaux des Nations Unies et de l'IIASA, auxquels ils apportent

[91] http://www.healthdata.org/

[92] L'IHME définit cinq scénarios (*reference*, *slower, faster*, *fastest*, *SDG met*), contrastés principalement en fonction de la progression de deux « moteurs influents » de la fécondité : l'éducation des femmes et l'accès aux services de santé génésique. Il convient de noter que Le scénario *SDG met*, ou ''*SDG pace alternate scenario*'', apparaît comme un révélateur de l'écart entre l'agenda des Nations Unies et la réalité. Ce scénario (i) postule qu'en 2030 tous les pays auront atteint les objectifs de développement durable dans les domaines de l'éd ucation et de l'émancipation des femmes (cf. ODD 3, 4 et 5) ; (ii) prévoit qu'en 2100 le nombre d'humains sera 6,3 milliards [4,8–8,7]—une trajectoire aujourd'hui peu vraisemblable, car de nombreux pays sont loin d'être engagés dans le processus d'accomplissement des ODD. **NB :** D'après

plusieurs modifications techniques, en particulier : (i) remplacer le taux de fécondité totale (*total fertility rate*, TFR) par une métrique plus stable, la fécondité totale par cohorte[93] (CCF50) ; (ii) intégrer dans les projections un modèle statistique de l'évolution des CCF50 en fonction de deux « moteurs » de la fécondité : la durée de scolarité des filles et la satisfaction de leurs besoins contraceptifs ; (iii) gérer les incertitudes attachées à la fécondité, à la mortalité et aux migrations. Le scénario de référence de l'IHME prévoit qu'en 2064 la population humaine culminerait à 9,7 milliards [8,8–11] — un maximum très proche de celui du scénario SSP2 de l'IIASA — puis diminuerait (8,8 milliards [6,8–12] en 2100, une baisse plus forte que celle prévue par l'IIASA). Observons que la trajectoire du scénario médian des Nations Unies—une augmentation continue de la population qui atteindrait 10,9 milliards en 2100—s'écarte nettement des projections de l'IIASA et de l'IHME[94].

4. SCÉNARIOS : STRATÉGIE DE MODÉLISATION ET RÉSULTATS SPÉCIFIQUES

4.1. STRATEGIE DE MODELISATION

Les projections multifactorielles de l'évolution de la démographie humaine, adossées à un corpus d'hypothèses de nature variée possèdent, au moins, un double intérêt : (i) objectiver la diversité des visions d'états futurs et jauger leurs degrés respectifs de consistance et de vraisemblance ; (ii) mettre en évidence des leviers d'action.

Plus fondamentalement, l'originalité des résultats obtenus découle de l'intégration explicite au modèle de l'IIASA de la dimension « niveau de scolarité atteint par les femmes d'une part, par les hommes d'autre part », en complément des dimensions usuelles (âge et sexe). Outre qu'elle est une cause observable majeure de l'hétérogénéité des populations, le choix de la dimension « éducation »[95] est justifié par (i) le constat empirique de son lien fort avec les trajectoires démographiques ; (ii) l'explication vraisemblable des mécanismes sous-jacents ; (iii) l'absence d'interprétation alternative. Précisons que les indicateurs afférents à l'éducation et à la santé permettent d'appréhender le « capital humain » (Lutz & KC, 2011 ; Lutz *et al*., 2014). Concernant le calcul des trajectoires 2015–2060 des États membres de l'UE, la dimension « population active »[96], ainsi qu'une description plus détaillée du niveau d'éducation[97], sont intégrées au modèle de l'IIASA (cf. Lutz *et al*., 2018, chap. 3 & 4 pp. 30–51) ; pour la majorité des 173 autres pays, les trajectoires évolutives des mêmes niveaux d'éducation sont agrégées à l'échelle de six grandes régions (*ibidem*, chap. 5 à 10, pp. 53–112).

L'hypothèse-clé est la suivante : l'éducation des femmes est le principal déterminant de la maîtrise de la fécondité, maîtrise qui renforce les capacités d'adaptation aux changements environnementaux. La modélisation démographique pluridimensionnelle de l'IIASA — qui intègre les différences saillantes des taux de fécondité et de mortalité en foction du niveau d'éducation — est couplée avec les SSP et définit le « noyau humain » de chaque scénario (KC & Lutz, 2017)[98].

4.2. VIEILLISSEMENT DE LA POPULATION

Gietel-Basten & Sobotka (2020, *preprint*) l'article de Vollset *et al*. souffre globalement d'un manque de cohérence et de logique interne, plusieurs hypothèses sont discutables, de même que l'appéhension d'interactions entre phénomènes complexes.

[93] ''*Completed cohort fertility at age 50 years*'' (CCF50) : pour une cohorte donnée, le nombre moyen d'enfants par femme dont l'âge est compris entre 15 et 49 ans (période de fécondité).

[94] En ce qui concerne la progression de l'éducation, des résultats contrastés sont exposés dans une récente publication de l'IHME. D'après Friedman *et al*. (2020), l'éducation primaire pour tous serait une réalité en 2030 (90% des enfants bénéficiraient alors de 6 années de scolarité). Au surplus, l'écart de scolarisation entre hommes et femmes a quasiment disparu depuis 2018—sauf dans plusieurs régions d'Afrique et du Moyen-Orient—voire tend significativement à s'inverser dans une vingtaine de pays. *A contrario*, la perspective de prolonger la scolarité au-delà de l'enseignement primaire est assombrie par la prévision de fortes disparités interrégionales : seulement 61% des jeunes adultes (25–29 ans) bénéfcieraient de 12 années de scolarité.

[95] « Éducation » désigne ici à la fois le processus lui-même et son résultat (*i.e*. les compétences acquises par les jeunes adultes). L'éducation contribue à la création du « capital humain » ; ce dernier est souvent mesuré par le nombre moyen d'années de scolarité dans la population des plus de 15 ans ou des plus de 25 ans.

[96] Des projections de capacité de travail peuvent être réalisées avec ces modèles démographiques ; en revanche, ils ne peuvent pas prévoir l'offre d'emploi—une information attendue des modèles économiques et de leur corpus d'hypothèses.

[97] Le niveau le plus élevé est scindé en trois catégories.

[98] ''*The human core of the shared socioeconomic pathways.*''

Les simulations des changements de l'abondance relative des classes d'âge convergent sur un trait saillant, la tendance au vieillissement de la population[99] — un phénomène global souligné il y a plus de vingt ans par Lutz *et al*. (1997)[100], et synthétisé avec talent par Vaupel *et al*. (2021)[101]. Concernant les pays développés, et notamment l'UE (32 % de 65+ en 2060 vs. 19 % en 2015)[102], Marois *et al*. (2020) montrent que le « ratio de dépendance démographique » (*i.e*. le rapport 65+/[15–64] ou « *Age Dependent Ratio* », ADR)[103] induit une perception erronée des conséquences du vieillissement. Afin d'éliminer ce biais préjudiciable au processus de la décision publique, Marois *et al*. élaborent un indicateur multifactoriel. En l'occurrence, un « ratio pondéré de dépendance à la productivité » (PWLFDR)[104] qui intègre 13 variables socioéconomiques et ethnoculturelles (*inter alia* : implication dans la population active, durée de résidence dans le pays, région de naissance, niveau d'éducation, y compris celui de la mère) et englobe les flux migratoires[105]. À l'aide d'un algorithme sophistiqué, sept scénarios de l'évolution du PWLFDR de chaque État membre de l'UE sont simulés (période 2015–2060). Le scénario « *business as usual* » (la poursuite du *statu quo*) suggère qu'en 2060 la hausse du niveau de compétence et de qualification de la population active allègerait en grande partie la charge du vieillissement. Par surcroît, les autres scénarios mettent en évidence des transformations envisageables (la prolongation du temps consacré à la vie active — à l'instar de la Suède —, ou encore l'accueil sélectif d'immigrés selon leur niveau d'éducation, associé à l'amélioration de leur intégration dans le marché du travail), dont l'application permettrait une compensation quasi-totale du vieillissement de la population.

Marois *et al*. (2021) abordent de même le vieillissement de la population chinoise—en écartant l'indicateur ADR (*vide supra*). En Chine, le taux de fécondité était de 1,45 en 2019, et estimé à ~1,3 en 2020. Malgré la politique d'incitation préconisant trois enfants par foyer, la majorité de la population chinoise inclinerait plutôt vers moins de deux enfants en moyenne. La stagnation de la fécondité à ce faible niveau suscite *a priori* l'inquiétude : le déclin puis le vieillissement rapide de la population serait à même d'entraver la progression vers une prospérité future (« *la Chine pourrait vieillir plus vite qu'elle ne s'enrichit* »). Utilisant les indicateurs LFDR et PWLFDR[106], Marois *et al*. conçoivent un avenir très différent : sous l'hypothèse que les services de santé et d'éducation seront à même d'accélérer les progrès du capital humain, un faible taux de fécondité ne serait pas nécessairement un insurmontable obstacle au développement—les générations les plus âgées étant alors remplacées par celles qui auront bénéficié d'une bien meilleure scolarisation.

---

[99] Le scénario médian prévoit qu'un tiers de la population de l'UE aura dépassé l'âge de 65 ans en 2060.

[100] ''*The focus of public, political and scientific concern will continue to shift from global population growth to population ageing*.''

[101] Depuis 1840, l'espérance de vie augmente dans la majorité des pays du monde, au rythme de près de 2,5 ans par décennie (*i.e*. 3 mois par an, ou 6 heures par jour). Dans les pays les plus avancés, la majorité des décès frappe les octo- et nonagénaires. Si cette trajectoire se maintenait, la plupart des enfants nés au XXIe sciècle fêteraient l'anniversaire de leurs 100 ans (une projection fondée sur un éventail d'hypothèdes commentées par Vaupel *et al*.). D'un point de vue évolutif, Pavard & Coste (2021) intègrent des facteurs épidémiologiques et socio-démographiques dans un modèle dont les résultats montrent que la sélection naturelle (non-neutre) ne disparaît pas avec l'âge. De fait, la fin de la reproduction relâcherait la purge des allèles de susceptibilité aux maladies à déclenchement tardif (cancer, maladie d'Alzheimer, …), par opposition au paradigme traditionnel de la neutralité des mutations génétiques impliquées dans la mortalité des personnes âgées.

[102] En France : Proba { décéder à 70 ans en 2017 } = Proba { décéder à 60 ans (F) et 58 (H) en 1967 }. Vaupel *et al.* (2021).

[103] Plus précisément : ADR = (population < 15 et population 65+) / (population 15–64)

[104] Dans le ratio de dépendance à la population active (*labor-force dependency ratio*, LFDR) le numérateur (resp. le dénominateur) rassemble tous les « économiquement inactifs » (resp. tous les « économiquement actifs »), quel que soit leur âge. Ainsi prend on en compte le fait qu'une partie des >15 et <64 est inactive tandis que certains 65+ sont encore actifs (l'espérance de vie est en moyenne de 81 ans dans l'UE). De plus, considérant les différences entre contributions des actifs à l'économie, Marois *et al*. définissent un ratio pondéré (PWLFDR: ''*productivity-weighted LFDR*'') intégrant des proxies tels que les écarts salariaux et le niveau d'éducation.

[105] Au cours de la période 1960–2015, l'amplitude relative des flux migratoires mondiaux entre régions (*sensu* Nations Unies et Banque mondiale) a fluctué autour de 0,65% de la population par période 5 ans (hormis le pic de 1990–95), et de 1,25% par période 10 ans (Abel, 2018). Au début du XXIe siècle, le nombre global de migrants a poursuivi sa croissance (~45 millions de 2005 à 2010) avant diminution du flux (~36 millions de 2010 à 2015). En ce qui concerne les « migrations climatiques », Abel *et al.* (2019) établissent que l'aggravation des conditions climatiques—conjuguée à l'exacerbation de conflits armés—a catalysé les demandes d'asile pendant la période 2010–2015. Les auteurs précisent que ces récents types de migrations apparaissent dans des contextes spécifiques, notamment les épisodes de sécheresse. Signalons que deux revues (*Science* 356: 676-699 et *Nature* 547: 21-27) ont chacune publié en 2017 un dossier consacré aux migrations humaines contemporaines.

[106] Considérant les incertitudes attachées aux taux de fécondité, Marois *et al*. simulent deux trajectoires du scénario SSP2 : (i) fécondité ≈ 0,8 à l'instar de la Corée du Sud ; (ii) fécondité ≈ 1,7 d'après les Nations Unies (période 2015–2040). L'évolution des deux populations aboutit en 2040 à des pyramides d'âges de même structure (par niveau d'éducation et par sexe) à partir de l'âge de 25 ans [d'effectifs différents pour les <25 selon la fécondité, (i) ou (ii)]. En 2040, la proportion des actifs de haut niveau d'instruction apparaît beaucoup plus élevée; de fait, l'indicateur PWLFDR ne révèle pas d'augmentation sensible de la dépendance. **NB:** Rees (2021) éclaire avec didactisme les concepts et méthodes développées et appliquées par Marois *et al.*

4 .3. DECOUPLAGE ENTRE SCOLARITE ET ACQUISITION DU SAVOIR, UNE FRACTURE ENTRE PAYS RICHES ET PAYS PAUVRES

À l'échelle de nombreux pays, l'estimation de la composante « autonomisation cognitive générale » du capital humain est approchée à l'aide des indicateurs « nombre moyen d'années de scolarité » (*Mean Years of Schooling*, MYS) et « niveau d'éducation complet » par âge et par sexe. Ces indicateurs quantitatifs sont néanmoins insuffisants pour appréhender — dans l'ensemble de la population d'un pays — l'acquisition des capacités cognitives (*sensu* apprendre à attribuer une signification abstraite à une combinaison de signes), fondement de la rationalité des comportements.

Pour accéder à cette information tout en conservant la spécificité des classes d'âge, Lutz *et al*. (2021) créent l'indicateur SLAMYS (*Skills in Literacy Adjusted MYS*) en pondérant l'indicateur MYS par le niveau atteint dans la maîtrise de la lecture et de l'écriture[107]. L'indicateur SLAMYS (durée moyenne de la scolarité corrigée du niveau d'alphabétisation) intègre l'évolution avec l'âge de l'agilité de la lecture et de la qualité rédactionnelle, aptitudes qui peuvent s'améliorer ou au contraire se dégrader en fonction des nécessités d'usage en milieu professionnel, combinées au contexte social[108] .

Appliqués à l'analyse de séries de données s'étendant sur 45 ans, les indicateurs MYS et SLAMYS montrent, à l'échelle mondiale (185 pays), que les estimations moyennes (MYS : 4,81 et SLAMYS : 3,73 en 1970) ont atteint respectivement 8,53 et 6,88 en 2015, une augmentation d'autant plus remarquable que la population humaine a doublé pendant la même période (de 3,7 à 7,4 milliards). L'indicateur SLAMYS révèle aussi l'ampleur des contrastes qui, de 1970 à 2015, se sont accentués aussi bien entre grandes régions qu'entre pays : (i) la plus forte hausse est celle de l'Asie orientale[109], de 3,16 à 8,35 ; (ii) partant d'un niveau très bas (0,79), le SLAMYS de l'Afrique subsaharienne atteint 3,19 (en termes de développement socio-économique, un score équivalent à un demi-siècle de retard par rapport à l'Asie orientale)[110] ; (iii) l'Amérique latine, l'Asie du Sud[111] et l'Asie de l'Ouest progressent lentement ; (iv) L'Europe (Ouest et Est) a comblé son retard par rapport à l'Amérique du Nord (resp. 12,3 et 13,3 en 2015)[112].
Ce panorama souligne que la progression des compétences des populations actives de nombreux pays en développement n'est pas à la mesure de l'expansion de la scolarité. Un constat partagé par Angrist *et al*. (2021), quatre experts en économie qui rappellent (i) que ce n'est qu'à la condition qu'elle aboutisse à la maîtrise d'un savoir que la scolarité est un indicateur pertinent du capital humain ; (ii) que la réalité est tout autre (« *Schooling ain't learning »)*[113] *:* environ six adolescents sur dix dans le monde ne possèdent pas les connaissances de base en mathématiques et en lecture, un phénomène accentué dans les pays en développement[114]. Angrist *et al*. élaborent un indicateur du capital humain (*Harmonized Learning Outcomes*, HLO) couplé à une base d'informations afférentes à (i) la scolarité primaire et secondaire, (ii) la maîtrise de la lecture, des mathématiques, et la culture scientifique[115]. Les auteurs montrent que de nombreux pays en développement atteignent de substantiels niveaux de scolarisation (*i.e*. 10 à 12 ans de scolarité), mais qu'en revanche leurs scores d'apprentissage avancé demeurent médiocres dans les tests internationaux (typiquement, le cas du Brésil et du

[107] D'un point de vue statistique, l'appropriation de la lecture et de l'écriture est corrélée à la maîtrise des mathématiques et aussi à l'aptitude à résoudre des problèmes. Par conséquent, les données afférentes à l'ensemble de de ces trois compétences constitutives du capital humain contiennent une part d'informations de nature similaire—une redondance qui explique pourquoi les *'literacy skills*' sont une bonne approximation de l'ensemble des aptitudes de la population active (spécialement quand l'indicateur SLAMYS est estmé à l'échelle d'un pays).

[108] Données : *International Adult Literacy Survey* (IALS, 1994–1998 survey, US Dept. of Education) ; *Program for the International Assessment of Adult Competencies* (PIAAC, 2011–2017 survey, OECD).

[109] En particulier : la Chine, dont le score passe de 1,98 à 7,35 en 45 ans ; la Corée du Sud (de 5,57 à 13,3) dépasse les USA ; le Japon, au premier rang en 2015 avec un score de 15,6.

[110] Par ailleurs, le MYS de plusieurs pays d'Afrique (Ghana, Nigeria, Kenya) a fortement augmenté, mais pas le SLAMYS.

[111] SLAMYS de l'Inde : 0,95 en 1970, 4,35 en 2015.
[112] Étendue du SLAMYS de l'UE-28 en 2015 : de 8,38 (Portugal) à14,3 (Finlande). France : 12,1.
[113] https://www.cgdev.org/publication/9781933286778-rebirth-education-schooling-aint-learning

[114] UNESCO. Institute for Statistics. Fact Sheet No. 46, September 2017. UIS/FS/2017/ED/46.

http://uis.unesco.org/sites/default/files/documents/fs46-more-than-half-children-not-learning-en-2017.pdf

[115] *Harmonized Learning Outcomes database* : 164 pays, période 2000–2017

Ghana). Angrist *et al*. (2021) attestent la primauté de l'apprentissage en s'appuyant sur les corrélations entre le développement économique (ici, le taux de croissance annuel moyen de 2000 à 2010) et quatre indicateurs du capital humain : HLO, *Penn world tables*[116], scolarisation, HDI (*Human Development Index*)[117]. La plus forte corrélation entre croissance et capital humain est obtenue avec l'indicateur HLO : une variation de 1 % du niveau d'apprentissage entraîne (au sens statistique) un changement de 7,2 % de la croissance annuelle (*versus* de 1,6 % à 3,3 % avec les autres indicateurs, plus dépendants de la scolarisation et moins des aptitudes acquises).

Ces résultats sont cohérents avec la conclusion de Lutz *et al*. (2021), plus socio-centrée et n'utilisant pas les mêmes métriques : Les évolutions des indicateurs MYS et SLAMYS de 185 pays révèlent qu'une profonde fracture traverse les populations en âge de travailler. Entre celles hautement qualifiées[118] et celles peu qualifiées[119], il s'est creusé en 45 ans un écart équivalent à plus de 10 années de scolarisation. Une telle situation porte en germe des conséquences désastreuses (aggravation des disparités en matière de développement économique, de santé et bien-être), tout particulièrement dans le contexte de la transition en cours vers les sociétés de la connaissance et de la révolution numérique.

CONCLUSION

La démographie traite de questions relatives à la conception individuelle et collective de la famille. Nourries de perceptions intimes, ces questions imprègnent nos vies sociales (voire ethniques ou tribales) et culturelles au sens le plus large. Ultime liberté individuelle pour beaucoup, la démographie est l'objet de combats idéologiques de toute nature. Aborder la démographie demeure complexe et matière à controverse. Malgré et/ou à cause de la rugosité du champ des investigations, un nombre croissant de publications scientifiques qui abordent la soutenabilité des trajectoires de l'humanité s'y confrontent.

Ci-après sont exposés, sans nécessairement toutes les faire nôtre, une palette d'opinions issues du monde de la recherche.

- Parmi treize actions à entreprendre pour progresser vers la soutenabilité, Ripple *et al.* (2017)[120] pointent spécifiquement la démographie et préconisent de « *réduire davantage les taux de fécondité en veillant à ce que les femmes et les hommes aient accès à l'éducation et à des services de planification familiale volontaires, en particulier là où ces ressources font encore défaut* ».

- Crist *et al.* (2017) recommandent deux finalités complémentaires et indissociables pour réduire l'impact des activités humaines :
  - **(i)** dépasser l'opposition entre *consommation excessive* et *demande non soutenable* ; la dichotomie Nord-Sud, autrefois patente, s'atténue au fur et mesure que s'accroît une classe moyenne de consommateurs (au nombre de 3,2 milliards en 2016, de 5 milliards en 2030) ; pour modérer toutes les formes de consommation, une stratégie consiste à stabiliser puis diminuer globalement la taille de la population humaine — sans coercition et dans le respect des droits fondamentaux — et à abaisser la consommation individuelle ;
  - **(ii)** la démographie humaine est indissociable de la biodiversité — un bien universel ; faire de la protection de la biodiversité une contrainte régulatrice du développement renouvellerait la réflexion sur la taille de la population, les standards de vie, et sur la préservation à grande échelle de la nature. Crist (2018) identifie le principal obstacle à ce changement de paradigme : globalement, l'humanité possède une vision anthropocentrée du monde, elle n'accorde guère de valeur aux besoins des non-humains et perçoit comme oppressive toute entrave à son bien-être.

[116] https://www.rug.nl/ggdc/productivity/pwt/

[117] http://hdr.undp.org/en/content/human-development-index-hdi

[118] *Inter alia* : la presque-totalité des pays membres de l'OCDE, Taïwan, Singapour, Fédération de Russie, Biélorussie.

[119] *Inter alia* : une majorité de pays d'Afrique (*e.g.* Niger, Mali, Burkina Faso, Tchad, Mozambique, Yémen, Éthiopie), des pays d'Asie (*e.g.* Pakistan, Bangladesh, Népal) et d'Amérique centrale (*e.g.* Honduras, Nicaragua…).

[120] *et alii* : 7 co-auteurs et 15 364 scientifiques (184 pays) signataires.

- Les solutions promues par Crist *et al.* (2017) convergent avec celles prônées par Bongaarts (2016) : la priorité à l'éducation des filles et des femmes, à leur émancipation, à l'accès aisé au planning familial et aux moyens contraceptifs modernes, au déploiement des services médicaux afférents (informations de base et conseil), à l'éducation sexuelle obligatoire dans le cursus scolaire, à la suppression des incitations natalistes aux familles nombreuses. L'éducation des hommes est tout aussi indispensable pour diminuer les pressions sociologiques et religieuses, qui restent fortes. À cet égard, Dasgupta & Dasgupta (2017) déplorent que le planning familial soit encore aujourd'hui un levier négligé des politiques publiques, alors que son succès a été démontré par l'accélération de la baisse de la fécondité en Asie et en Amérique latine pendant les décennies 1960–1980. C'est un investissement essentiel à la transition de la fécondité, non seulement pour éviter les grossesses non désirées, mais aussi parce qu'en espaçant les naissances et en élargissant les possibilités d'éducation, la contraception améliore la santé des femmes et celle de leurs enfants[121]. Plus généralement, Barrett *et al.* (2020) observent qu'il émane des ODD une réticence vis-à-vis de la démographie, alors qu'il est difficile d'imaginer que les objectifs de développement pourraient être atteints sans traiter ce sujet[122].
- Pour une meilleure répartition des richesses, Barrett *et al.* (2020) énoncent trois raisons de réduire à la fois la croissance de la population et le PIB par individu :
  - **(i)** les institutions et la technologie ont échoué face au changement climatique ; par conséquent, il sera encore plus difficile de maîtriser notre empreinte écologique, sauf si l'on envisageait pouvoir soumettre la population humaine à restreindre sa consommation de biens et services de la nature ;
  - **(ii)** la consommation individuelle et la démographie humaine relèvent d'institutions distinctes de celles dont dépend la préservation de l'environnement ; seule une profonde transformation sociétale est à la hauteur de l'enjeu pour approcher l'équilibre entre empreinte écologique et capacité de régénération de la biosphère—les institutions locales et nationales étant plus efficaces que celles de niveau régional et global pour provoquer cette transformation ;
  - **(iii)** reconnaître que les comportements individuels s'enracinent fondamentalement dans le tissu social, souvent réfractaire à l'analyse, incite à espérer—au-delà de la baisse des émissions de carbone—que la correction des externalités dues à la consommation et à la fécondité améliorera directement le bien-être de l'humanité.

- Afin d'élargir la focale, François Sarrazin et Jeanne Lecomte (2014, 2016) invitent à une réflexion, celle du profond changement de notre regard sur la biodiversité :

« Essayer d'atteindre une neutralité humaine vis-à-vis du reste de la biodiversité et de son évolution—sans lourde perte de valeur sélective ou de bien-être phénotypique pour l'Homme—nécessite d'inventer des tactiques qui substituent des logiques qualitatives aux logiques quantitatives, i.e. réaliser la transition du « toujours plus » vers le « toujours mieux ». À titre d'exemple, remplacer les indices de croissance économique par des indices de bien-être durable, en intégrant le devenir des écosystèmes de façon cohérente avec la réflexion sur la nécessaire transition démographique. Accomplir cette métamorphose dans un cadre démocratique est sans nul doute une entreprise hautement complexe, qui s'impose comme la seule voie éthiquement acceptable et soutenable. Quelles seraient alors les propriétés émergentes d'une telle transformation, au-delà des rapports coût/bénéfice pour l'Homme d'une part, pour le reste de la biodiversité de l'autre ? Une humanité capable de neutralité à l'égard de la biodiversité ne pourrait-elle pas fonder un plus grand respect des conditions nécessaires à chacun pour exprimer ses potentialités au sein même de cette humanité ? De ce point de vue, les réflexions sur l'approche évocentrée de la conservation et des relations entre sociétés humaines et biodiversité ne doivent pas être perçues comme un recul, mais au contraire appréhendées comme la vision progressiste d'une humanité qui cesse de vouloir explicitement ou implicitement maîtriser l'évolution des non-humains et qui, par là même, s'en distingue enfin. Reste l'ultime question : sommes-nous capables de cette évolution ? ».

[121] Les lecteurs intéressés découvriront avec profit l'analyse des ambiguïtés du Fonds des Nations Unies pour la population, spécialement à propos des biais d'interprétation et d'utilisation de l'indicateur 3.7.1 : *Proportion of women of reproductive age (aged 15-49 years) who have their need for family planning satisfied with modern methods*. [https://sustainabledevelopment.un.org/sdg3]. Cf. Dasgupta & Dasgupta (2017), Part 1, § 5.

[122] Ces auteurs rappellent que les ODD sont fondés sur l'hypothèse qu'ils sont atteignables, mais que la question de leur soutenabilité dans un monde qui apprécie la croissance du PIB global n'est pas examinée dans les documents de base.

FICHE 2 - TENSIONS ENTRE BESOINS DE L'HUMANITÉ ET « CAPACITÉ » DE LA BIOSPHÈRE

1. UNE EMPREINTE GÉNÉRALISÉE ET GLOBALE QUI MET EN PÉRIL LA BIOSPHÈRE

Il y a 3 000 ans, dans le sillage des chasseurs-cueilleurs, puis des agriculteurs et des éleveurs (Stephen *et al.*, 2019)[123], l'espèce humaine avait déjà profondément transformé les écosystèmes continentaux — autant de mutations qui furent consolidées par la domestication animale (Vigne, 2011) et la sélection végétale (Larson *et al.*, 2014). Des espèces comme le Mammouth (genre *Mammuthus*) par exemple se sont éteintes sous l'action combinée du changement climatique (passage d'un climat froid pendant le dernier maximum glaciaire à un climat plus doux) et de l'action de chasse, c'est l'hypothèse « coup de grâce » développée par Nogués-Bravo *et al.* (2008). Les périodes et les étapes du développement humain ont cependant été très variables d'une région à l'autre. Ainsi, de grandes régions ayant eu une longue histoire d'agriculture et de pastoralisme au cours des six derniers millénaires (e.g. Europe et Chine) montrent une rapide expansion des terres agricoles et des pâturages et, dans une certaine mesure, une diminution de certains pans de la biodiversité. Mais c'est au XX^{e} siècle que les taux d'extinction des populations animales ont le plus fortement augmenté, tendance attestée au moins pour les groupes taxonomiques qui ont pu faire l'objet d'une évaluation robuste.

Il n'existe aujourd'hui que très peu d'endroits au monde exempts de pressions humaines directes sur la biodiversité (84 % des surfaces émergées de la planète font face à des pressions anthropiques multiples, Kennedy *et al.*, 2019). Seules de petites zones d'empreinte nulle ou très faible persistent : en Australie occidentale, dans les Andes tropicales, dans le nord du Cerrado au Brésil (Amigo, 2020) et dans les montagnes d'Asie centrale. De même, très peu de zones riches en biodiversité sont épargnées. C'est le cas au cœur de Bornéo et dans les déserts d'Asie centrale, entre la mer Caspienne et la mer d'Aral. Ainsi, les zones peu touchées par les pressions directes couvrent moins de 3 % des points chauds de biodiversité dans le monde et 2 % des zones à forte concentration de vertébrés menacés (Venter *et al.,* 2015). Les changements climatiques et certaines pollutions chimiques ou plastiques s'observent très loin des zones habitées, comme les pôles (Brahney *et al.*, 2020).

ENCADRÉ 3

Toutes les populations d'êtres vivants sont concernées par les questions démographiques pour au moins deux raisons :

1° Toute population voit sa dynamique (temporelle et spatiale) répondre à trois processus : survie, reproduction, dispersion (émigration et immigration). Donc, quand on parle de démographie on joue sur tout ou partie de ces trois familles de paramètres.

Quand ces paramètres sont constants sur une certaine période de temps, les croissances ou décroissances de population sont géométriques. Aucune population ne peut croître indéfiniment en environnement fini même si elle peut temporairement dépasser la capacité de charge du milieu.

Des adaptations évolutives ou la plasticité comportementale peuvent permettre d'exploiter plus efficacement certaines ressources et donc augmenter la capacité de charge du milieu. Néanmoins, toute ressource indispensable peut devenir drastiquement limitante en cas de surconsommation.

2° Dans une compréhension éco-évolutive du monde vivant, la démographie est le filtre par lequel s'exprime la valeur adaptative et sélective, soit l'efficacité relative avec laquelle les caractères héritables des organismes passent d'un individu à ses éventuels descendants.

Une des questions cruciales relative à la démographie humaine est de savoir à quel stade l'humanité se situe actuellement dans son expansion, non pas selon les données démographiques actuelles mais en prenant en

[123] Les résultats des analyses collaboratives de Stephen *et al.* (2019: *the ArchaeoGLOBE synthesis*) éclairent bien au-delà du modeste panorama des changements préhistoriques auparavant inférés à partir de la base HYDE (*History Database of the Global Environment*).

compte l'épuisement de la Planète et la dégradation des écosystèmes. Une mise à jour du schéma de Meadows (voir ci-après) serait pertinente.

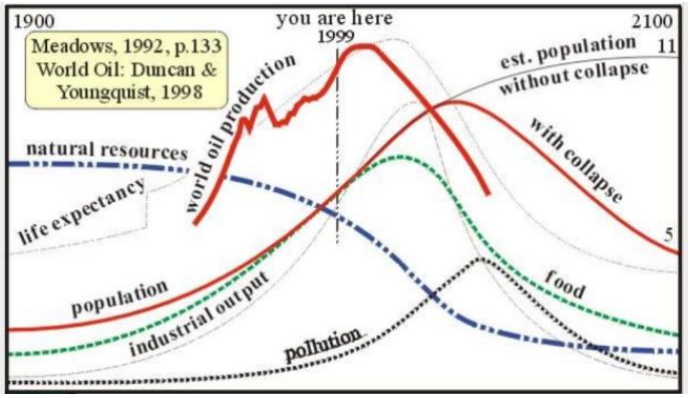

Figure 1 : Schéma de Meadows

2. LE MODÈLE IPAT

Le modèle IPAT est explicitement présenté comme le « **précurseur du modèle d'empreinte humaine** ». Selon ce modèle, l'impact de la présence humaine sur la biodiversité découle de l'équation **I = P.A.T** où :

I = impact biodiversité
P = nombre d'êtres humains
A = consommation moyenne de ressources et d'énergie par individu
T = impact des technologies utilisées pour extraire les ressources nécessaires à la population P

Les modes de production, les quantités consommées, les modes et les distances de distribution, les technologies disponibles, ont donc une incidence majeure sur l'impact des populations humaines sur la biodiversité. Il est ainsi habituellement admis que les individus aux plus faibles revenus émettent moins de gaz à effet de serre et qu'ils consomment moins d'énergie et de ressources que les individus des pays à hauts revenus (Galli *et al.*, 2012) : l'empreinte écologique par habitant des pays développés représente environ 500 % de celle des pays à faibles revenus (Solarin, 2019). De plus, l'empreinte a augmenté au fil des ans dans les pays à revenus élevés, tandis qu'elle a diminué ou est restée la même dans les pays à revenus faibles et intermédiaires (World Wildlife Fund for Nature, 2014) ; on note toutefois des changements de tendance récents : sur la période 1993 à 2009, Venter *et al.* (2016) mettent en évidence des taux d'accroissement de l'empreinte humaine plus faibles dans les pays à hauts revenus que dans les autres catégories, l'accroissement le plus fort étant observé dans les pays à revenus faibles ou intermédiaires.

D'autres éléments interviennent comme les facteurs sociaux ou culturels, ou encore l'accès à l'énergie et la technologie**. En découle le concept d'empreinte humaine ou d'empreinte écologique qui est une tentative de synthèse de ces différents facteurs.**

3. L'EMPREINTE ÉCOLOGIQUE

D'autres facteurs interviennent dans l'empreinte humaine, comme les comportements sociaux ou culturels ou les modes de gouvernance. La méthode de construction de l'empreinte écologique[124], clairement exposée par David Lin *et al.* (2018) est un indicateur quantitatif qui intègre plus de facteurs que l'équation IPAT. Elle n'est pas exempte de critiques ou de biais, mais présente l'avantage de mises à jour qui « s'alimentent » des bases de données internationales.

[124] *Ecological Footprint*. (2022, 15 juin). Global Footprint Network. https://www.footprintnetwork.org/our-work/ecological-footprint/

L'Ipbes définit l'empreinte humaine sur la biodiversité comme la somme des pressions directes et indirectes qui s'exercent sur elle. Le rapport 2019 (figures SPM2 et SPM9) présente un modèle conceptuel ; la figure SPM2 illustre la distinction entre :

- **d'une part, les « moteurs directs » de l'érosion** de la biodiversité ; il s'agit principalement de l'amplification des usages de l'océan, des terres et de l'exploitation des écosystèmes, du changement climatique, des pollutions, des espèces exotiques envahissantes ;
- **d'autre part, les « moteurs indirects », c'est-à-dire les causes profondes des atteintes à la biodiversité.** Au premier rang des moteurs indirects figure la croissance globale de la population humaine — à 55 % urbaine en 2018, prévue à 68 % en 2050 (UN, 2019a) — associée à ses modes de production, de consommation[125], et dépendante de la capacité de résilience de celles-ci[126]. Sont aussi englobés dans les moteurs indirects les échanges commerciaux, les innovations technologiques et la gouvernance.

Une « boucle d'apprentissage » complète le schéma conceptuel (cf. ci-après : Ipbes, 2019, fig. SPM9) : la rétroaction des moteurs indirects sur la gouvernance enclenche des leviers d'action qui modifient les moteurs directs, transforment les activités humaines et leurs impacts sur la biosphère, déclenchant ainsi la correction des trajectoires (e.g. démographique, économique, technologique) des moteurs indirects.

Ce schéma intrinsèquement dynamique ouvre la voie à des scénarios qui incluent explicitement des hypothèses contrastées de choix de société impliquant les moteurs indirects. Parmi les résultats attachés à ces hypothèses multifactorielles figurent les projections de trajectoires plausibles des contraintes anthropiques exercées sur la biodiversité (Ipbes, 2016).

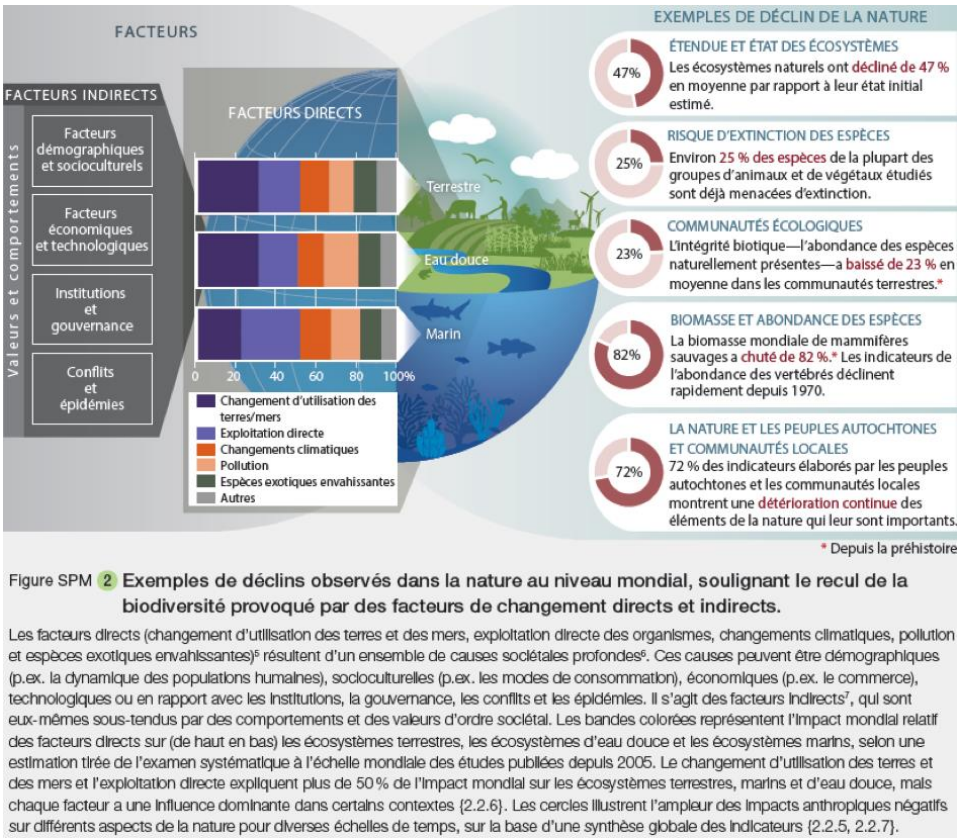

Figure SPM 2 **Exemples de déclins observés dans la nature au niveau mondial, soulignant le recul de la biodiversité provoqué par des facteurs de changement directs et indirects.**

Les facteurs directs (changement d'utilisation des terres et des mers, exploitation directe des organismes, changements climatiques, pollution et espèces exotiques envahissantes)[5] résultent d'un ensemble de causes sociétales profondes[6]. Ces causes peuvent être démographiques (p.ex. la dynamique des populations humaines), socioculturelles (p.ex. les modes de consommation), économiques (p.ex. le commerce), technologiques ou en rapport avec les institutions, la gouvernance, les conflits et les épidémies. Il s'agit des facteurs indirects[7], qui sont eux-mêmes sous-tendus par des comportements et des valeurs d'ordre sociétal. Les bandes colorées représentent l'impact mondial relatif des facteurs directs sur (de haut en bas) les écosystèmes terrestres, les écosystèmes d'eau douce et les écosystèmes marins, selon une estimation tirée de l'examen systématique à l'échelle mondiale des études publiées depuis 2005. Le changement d'utilisation des terres et des mers et l'exploitation directe expliquent plus de 50 % de l'impact mondial sur les écosystèmes terrestres, marins et d'eau douce, mais chaque facteur a une influence dominante dans certains contextes {2.2.6}. Les cercles illustrent l'ampleur des impacts anthropiques négatifs sur différents aspects de la nature pour diverses échelles de temps, sur la base d'une synthèse globale des indicateurs {2.2.5, 2.2.7}.

Figure 2 : Exemples de déclins observés dans la nature au niveau mondial, soulignant le recul de la biodiversité provoqué par des facteurs de changement directs et indirects (Ipbes, 2019, fig. SPM2)

[125] *e.g.* Hoekstra & Wiedmann, 2014 ; Godfray *et al.*, 2018 ; Hayward & Roy, 2019 ; Van Vuuren *et al.*, 2019.

[126] Nyström *et al.*, 2019. Les auteurs définissent la résilience comme étant la capacité d'un système à se développer en assimilant des perturbations récurrentes, à gérer les incertitudes et les risques, tout en conservant ses propriétés essentielles.

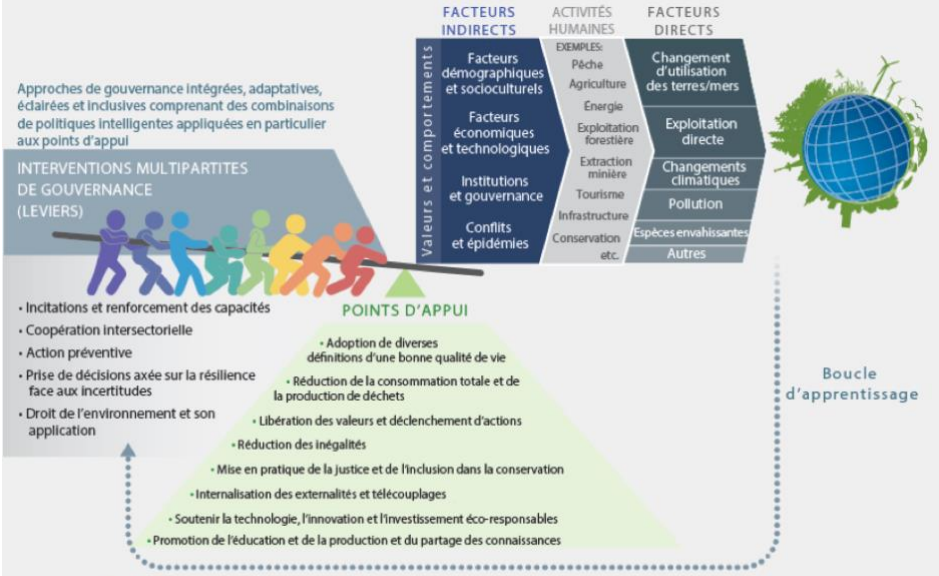

Figure SPM 9 **Changement en profondeur dans les voies vers la durabilité à l'échelle mondiale.**

La mise en œuvre concertée d'interventions prioritaires en matière de gouvernance (leviers) ciblant des points d'intervention clés (points d'appui) pourrait amorcer un changement en profondeur pour passer des tendances actuelles à des tendances plus durables. La plupart des leviers peuvent être appliqués au niveau de multiples points d'appui par divers acteurs, tels que les organisations intergouvernementales, les gouvernements, les organisations non gouvernementales, les groupes communautaires et de citoyens, les peuples autochtones et les communautés locales, les organismes donateurs, les organisations scientifiques et éducatives et le secteur privé, selon le contexte. La mise en œuvre d'instruments existants et nouveaux par le biais d'interventions de gouvernance locales intégrées, éclairées, inclusives et adaptatives, en utilisant des combinaisons de politiques stratégiques et en tirant des leçons des retours d'information, pourrait rendre possible une transformation mondiale.

Figure 3 : Changement en profondeur dans les voies
vers la durabilité à l'échelle mondiale (Ipbes, 2019, fig. SPM9)

FICHE 3 - DÉMOGRAPHIE, ÉCONOMIE ET DEMANDE MONDIALE CROISSANTE POUR LA BIOMASSE

Si le perfectionnement des moyens techniques a permis à de petits groupes d'avoir un impact important, leur activité a souvent reposé sur une demande liée à l'économie. Ainsi, les questions de consommation ou de PIB sont ici absolument essentielles à explorer, car **une augmentation spectaculaire de la consommation alimentaire par personne se confirme au niveau mondial** (Tilman *et al.*, 2011). Plus que la démographie elle-même, ce facteur pourrait être le plus important pour expliquer le déclin de la biodiversité.

Plusieurs exemples illustrent ce facteur :
Selon certains « coureurs des bois » canadiens, le **castor** d'Amérique avait déjà vu ses populations diminuer à la fin du XVIII^{e} siècle et au début du XIX^{e} du fait de la pression de chasse intensive dont il était l'objet de la part d'un nombre très réduit de trappeurs et d'une demande importante pour les peaux, mais aussi le castoréum utilisé depuis l'Antiquité dans de nombreuses pharmacopées. Ici, ce sont les élites européennes au XVII et XVIII^{e} siècles qui utilisaient les peaux de castors, donc un nombre assez restreint de personnes, mais à forte consommation (les peaux des castors servaient à faire des vêtements très prisés des élites européennes avides de fourrures).
L'économie mondiale des débuts de l'ère industrielle a en partie reposé sur les usages des huiles de **baleine** (éclairage, lubrifiants mais aussi baleines de parapluie et de corsets, etc.). La pression de pêche, qui a quasiment décimé les populations de baleines, a été induite par la demande mondiale, mais mise en œuvre par un petit nombre de baleiniers. C'est l'arrivée du pétrole qui a permis de sauver ces mammifères marins de l'extinction.
Le **bison** d'Amérique fut pratiquement éliminé en quelques années dans la seconde moitié du XIX^{e} siècle, là encore face à une pression démographique humaine relativement faible, mais équipée de fusils efficaces et répondant à une demande forte.
Citons aussi le cas du **bouquetin des Alpes** en Chartreuse : Abondant au XVI^{e} siècle, le bouquetin a été exterminé suite à l'apparition des armes à feu. Les causes de cette éradication sont d'ordre cynégétique mais également d'ordre pharmacologique et magique (« Note de synthèse concernant la réintroduction du bouquetin des Alpes », 2010).
C'est aussi le cas pour la **pêche** industrielle ou la **déforestation** industrielle, qui emploient un nombre réduit de personnes pour satisfaire une demande croissante en partie due à l'augmentation de la population mondiale.

1. L'EXPORTATION DE LA BIOMASSE ET L'EXPORTATION DES IMPACTS

La dégradation de l'environnement est inégalement répartie tant en termes de causes que de conséquences. Les mécanismes sous-jacents à la dégradation de l'environnement et l'érosion de la biodiversité induite par la consommation des ressources naturelles (accès, production, distribution) sont, d'une part, l'utilisation des ressources naturelles par les pays pour se développer et devenir plus compétitifs et, d'autre part, la consommation de biens et de services en lien avec l'augmentation des revenus par les individus.

La dégradation de l'environnement local dépend aussi de la capacité des pays à exporter leurs impacts. Ainsi, alors que la demande par habitant de ressources naturelles est beaucoup plus élevée dans les pays à revenus élevés et moyens que dans les pays à faibles revenus, les dégradations des écosystèmes restent plus importantes dans les pays à faibles revenus (voir figure 4, figure 5 et les travaux du panel international sur les ressources : http://www.resourcepanel.org/reports/global-resources-outlook).

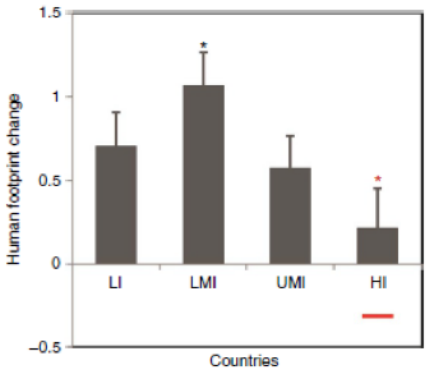

Figure 4 : Variation moyenne de l'empreinte humaine selon les pays regroupés par niveau de revenu sur la période 1993-2009. Pays à bas revenu (LI, n = 36), pays à revenu moyen inférieur (LMI, n = 42), pays à revenu moyen supérieur (UMI, n = 44), pays à haut revenu (HI, n = 51). La barre horizontale rouge sous la colonne HI montre la variation moyenne des pays les plus riches (n = 24), définis comme ceux disposant d'un PIB basé sur la parité du pouvoir d'achat (BIP/PPP) supérieur à 30 000 dollars. Les bâtons noirs montrent l'erreur standard et les astérisques colorées pointent les différences statistiques.

Le couvert forestier s'est stabilisé et la superficie agricole a diminué dans les pays à revenus élevés, mais, depuis 1990, le couvert forestier a diminué de 30 % et la surface agricole a augmenté dans les pays à revenus faibles et moyens. De même, la valeur des actifs naturels a diminué de 1 % dans les pays à faibles revenus depuis 1995, mais a augmenté de 5 % dans les pays à revenus intermédiaires et supérieurs. Ce phénomène est probablement en grande partie dû au commerce mondial et aux impacts délocalisés sur la biodiversité de la consommation dans les pays à forts revenus. Il faut toutefois tenir compte de tendances fortes récentes qui soulignent l'importance croissante de la demande locale, à l'origine de la déforestation tropicale ; Pendrill *et al.* (2019) montrent que plus de la moitié des émissions de dioxyde de carbone (CO_2) associées à la déforestation tropicale sont liées à des productions agricoles et forestières destinées à la consommation locale, quel que soient les modèles de calcul utilisés.

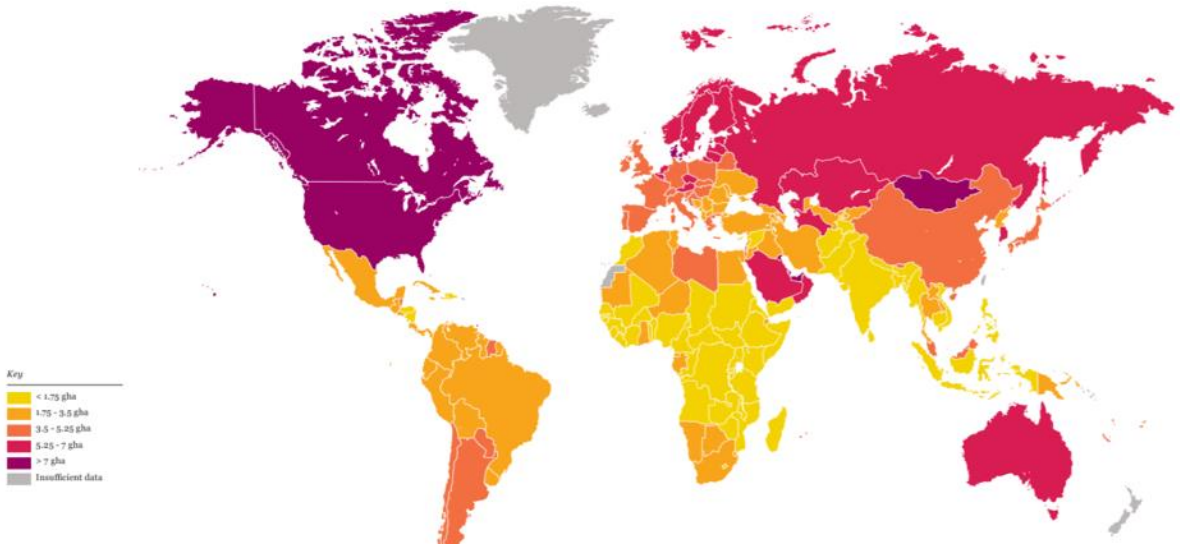

Figure 5 : Carte mondiale de l'empreinte écologique de la consommation en 2014 exprimée en hectares globaux (gHa). L'empreinte écologique totale est une fonction à la fois de la population totale et des taux de consommation. La consommation d'un pays inclut l'empreinte écologique de ce qu'il produit, plus de ce qu'il importe depuis d'autres pays, moins ce qu'il exporte.

2. UNE RELATION ÉCONOMIE / DÉGRADATION DE L'ENVIRONNEMENT EN FORME DE « U » INVERSÉ

Mais là encore, la relation n'est pas nécessairement linéaire. Alors que toute la planète est actuellement soumise au changement climatique et que 75 % de la surface terrestre est soumise aux pressions humaines directes, intenses, généralisées et de plus en plus fortes, notamment dans les points chauds de biodiversité, Venter *et al.* (2016) démontrent que si, entre 1999 et 2009, la population humaine a augmenté de 23 % et l'économie mondiale de 153 %, l'empreinte humaine, elle, n'a augmenté que de 9 %. Par ailleurs, de façon encourageante, les auteurs ont démontré que la pression sur l'environnement pouvait diminuer dans les pays les plus riches et ceux qui contrôlent fortement la corruption.

Pour entrer plus dans le détail des processus à l'œuvre, il apparait que les premiers stades de la croissance économique dégradent souvent la qualité de l'environnement, alors que les stades ultérieurs sont plus vertueux, une fois que le revenu par habitant a atteint un palier économique (Grossman & Krueger, 1995 ; Grossman & Krueger, 1991).

L'économie mondiale a effectivement accru son efficacité pour l'utilisation des ressources foncières, mesurée en termes d'empreinte humaine par personne ou par dollar ce qui est conforme aux conclusions des études citées précédemment qui mettaient en évidence une **relation en forme de U inversé entre croissance économique et dégradation de l'environnement**. Cette tendance est également favorisée par des mesures socio-économiques et de gouvernance plutôt que par le commerce et les échanges qui permettent à certains pays de transférer leur demande de nourriture et de matières premières à d'autres pays. Par exemple, près de 40 % de la viande bovine produite en Amazonie n'est pas consommée au niveau national, mais exportée vers les pays de l'Union Européenne.

Venter *et al.* (2016) démontrent également que la gravité, l'étendue et l'expansion de l'empreinte humaine sont directement corrélées à l'aptitude des terres à l'agriculture. Par exemple, les terres impropres à l'agriculture présentent une pression humaine quasi nulle (c'est le cas des déserts), mais cette pression augmente rapidement dès que la zone devient modérément adaptée à l'agriculture de sorte qu'il n'existe aucune zone adaptée à l'agriculture sans aucune pression humaine. La pression devient forte dans les zones adaptées à plus de 60 % pour le développement agricole avec des implications fortes pour la biodiversité.

ENCADRÉ 4

Il y a un lien clair entre la satisfaction des besoins essentiels ou non et la préservation de la biodiversité.

Ainsi, la consommation de protéines animales par habitant a augmenté de 50 % au cours de la période 1960-2010, pour atteindre environ 55 g / habitant / jour aux États-Unis et dans l'Union européenne, environ 30 g / habitant / jour en Amérique latine, mais seulement environ 15 g / habitant / jour en Asie et en Afrique subsaharienne. Cette demande augmente de façon constante, en particulier dans les pays émergents, à l'exemple du Vietnam dont le produit intérieur brut a été multiplié par 15 en 20 ans alors que la consommation de viande passait de 14 kg par personne en 1986 à 55 kg en 2013, un des chiffres les plus élevés d'Asie (à titre d'exemple, la consommation s'élevait pour la France à 86 kg par habitant et à 153 kg à Hong-Kong en 2013) (Hansen, 2018). La consommation de viande s'accroit à un point tel qu'elle est considérée comme un des facteurs principaux d'érosion de la biodiversité. Il semble qu'une grande part des impacts actuels ne résultent plus seulement de la satisfaction des besoins essentiels, mais de la recherche de satisfactions sensorielles ou psychologiques qui vont bien au-delà de nos besoins physiologiques. D'où des surconsommations alimentaires, de ressources naturelles ou d'espaces (via le tourisme notamment) induites par un système de comparaison et de compétition de rangs sociaux qui, bien que basées sur des processus comportementaux initialement sélectionnés (via la valeur adaptative, c'est-à-dire l'efficacité relative avec laquelle les caractères héritables des organismes passent d'un individu à ses éventuels descendants), sont maintenant démultipliées dans nos processus sociaux et économiques, notamment par le biais d'outils commerciaux et marketing. Ces comportements induisent des rétroactions négatives sur la valeur adaptative via les problèmes de santé à court terme et les problèmes environnementaux à long terme. L'ensemble du découplage potentiel entre valeur adaptative et sphère de bien être est appelé « émancipation phénotypique » (Sarrazin, Lecomte, regard SFE[2] 59 : https://www.sfecologie.org/regard/r59-sarrazin-lecomte-anthropocentrisme/).

DÉMOGRAPHIE ET MOTEURS DIRECTS DE L'ÉROSION DE LA BIODIVERSITÉ

FICHE 4 - DÉMOGRAPHIE ET CHANGEMENT D'USAGES DES SOLS

Le Centre pour la conservation de l'Université de Stanford a développé, dès les années 1990, un outil d'analyse permettant de croiser des données de destruction des écosystèmes (notamment forestiers) et de pression démographique humaine pour identifier les pays à risques en termes de conservation de la biodiversité. Ainsi, l'utilisation des terres et la perte des habitats associés est un facteur plus déterminant que la rareté des espèces pour estimer le danger d'extinction de cette même espèce (Sisk *et al.*, 1994). Une espèce endémique peu commune, dont l'habitat est protégé, présente moins de risque d'extinction qu'une espèce commune dont l'habitat est menacé par des changements rapides dans l'utilisation des terres. Sisk *et al.* (1994) posent l'hypothèse que l'indice d'augmentation de la population humaine par an et pour 100 hectares est un indicateur plus fiable de la vulnérabilité de la biodiversité que les observations de déclins dans l'abondance des espèces d'un écosystème. Cet indice, combiné aux indicateurs de diversité des espèces, d'espèces endémiques et de pertes de forêts, a permis de déterminer des zones où une grande diversité était confrontée à une grande menace de destruction. Un des biais est néanmoins l'absence de prise en compte des impacts importés d'une population (pression sur les ressources naturelles dues à leur exportation vers la population dont on estime l'empreinte).

Ces changements d'usages des terres sont dus à plusieurs facteurs détaillés ci-après.

1. L'AGRICULTURE

1.1. LE DÉVELOPPEMENT AGRICOLE

Le développement agricole, selon la théorie de Cohen dans son livre « *The food crisis in Prehistory* » (1977), aurait eu pour cause unique le franchissement d'un seuil démographique au-delà duquel le régime précédemment basé sur la cueillette et la chasse n'était plus soutenable, ce n'est néanmoins pas la thèse d'autres auteurs comme Scott (2017). D'autres hypothèses ont, par la suite, confirmé le rôle de la démographie, aux côtés d'autres facteurs de temps long comme la modification du climat (Zeder & Smith, 2009).

En 1994, Sisk *et al.* faisaient déjà le lien entre l'extinction massive des espèces, la modification du fonctionnement des écosystèmes et l'augmentation de la population humaine. Ils expliquaient ce lien par l'accélération du changement de l'usage des terres : conversion en terres agricoles, forêts exploitées et centres urbains. Sur le temps long, l'exploitation des ressources les plus directement disponibles explique aussi les chutes massives de populations ; les gros mammifères ont été plus sensibles à l'accroissement des densités de populations humaines que les petits (Crees *et al.*, 2019).

L'utilisation des terres à des fins agricoles est à l'origine de la modification rapide du couvert végétal et de la composition des sols (e.g. perte de matière organique, déséquilibre en éléments minéraux, salinisation) qui influe sur la composition floristique et la micro et mésofaune associées. Elle est impliquée dans les changements environnementaux anthropiques mondiaux allant des émissions de gaz à effet de serre et du changement climatique à la déforestation généralisée, à l'érosion des sols et à la modification du régime des feux, ainsi qu'à l'introduction, à l'invasion et à l'extinction d'espèces (Baker, 1991 ; Vigne, 2011). De tels changements sont manifestes dans tous les écosystèmes y compris dans les forêts tropicales humides et les environnements de savane longtemps considérés comme vierges. Ces changements ont modifié tous les systèmes terrestres, allant de la lithosphère et de la biosphère à l'atmosphère. Par exemple, un travail mené en Italie tend à montrer que la vulnérabilité des écosystèmes méditerranéens (*desertification hotspots*) est liée, au Sud, principalement à la démographie humaine et aux indicateurs économiques, alors qu'au Nord ce sont les indicateurs d'occupation des terres qui expliquent en premier lieu la vulnérabilité, un phénomène certainement lié à l'expansion urbaine (Salvati, 2014). Ces modifications affectent aussi des régions généralement peu propices à l'agriculture, comme les zones de montagne, lorsqu'elles sont soumises à une pression d'élevage pastoral dépassant les capacités du

milieu, qui s'accompagne de phénomènes de tassement et d'érosion des sols et d'eutrophisation due aux déjections qui entraînent une banalisation de la flore.

Les humains ont aussi utilisé le feu pour transformer à grande échelle des biomes de type « savanes » en Afrique (Archibald *et al.*, 2012), tandis que divers régimes de déboisement, de mise en culture et de pâturage modifiaient et agrandissaient les prairies au cours des 3 000 à 7 000 dernières années. La superficie cultivée dans le monde a augmenté de 12 % de 1960 à 2010, soit trois fois plus que la production agricole (FAO, 2011a). La FAO relie ce phénomène à l'accroissement de la demande alimentaire due à la démographie et prévoit une tendance à la hausse, avec des projections à 9 milliards d'êtres humains en 2050 et plus en fonction des scénarii à l'horizon 2100 (voir plus haut). Des facteurs comme la surconsommation et les pertes alimentaires sont également pris en compte dans les réflexions de l'organisation internationale.

ENCADRÉ 5

Le développement agricole a des impacts forts sur l'environnement

- **La superficie agricole** (cultures, terres arables et pâturages permanents) **est passée de 35 % à 38,6 %** de la surface terrestre entre 1960 et 2007 (Hooke *et al.*, 2012 ; Alexandratos & Bruinsma 2012 ; Kennedy *et al.*, 2019).
- **La production agricole par unité de surface a presque quadruplé** (FAOSTAT, 2017 ; Green, 2005) en raison de l'intensification de l'agriculture (mécanisation, utilisation d'engrais et de pesticides, remembrement et redistribution des terres). Ce processus **a certes permis d'**économiser des terres en termes de surfaces de production, mais **a actuellement un impact fortement négatif sur l'environnement (érosion des sols, pollution des sols et des eaux continentales puis marines, déstockage de carbone (C) et émissions de protoxyde d'azote (N_2O), appauvrissement de la biodiversité en lien avec le travail du sol, la monoculture, l'utilisation de produits phytosanitaires, l'apport d'engrais azotés et phosphatés)**.

1.2. LE CAS DES PLANTATIONS DE PALMIERS À HUILE

Entre 2000 et 2012, la superficie mondiale consacrée à la plantation de palmiers à huile est passée de 10 à 17 millions d'hectares (Pirker *et al.*, 2016). Or ce type de culture a un grand impact sur la biodiversité. Des chercheurs ont compilé et analysé 25 articles scientifiques consacrés aux conséquences de la production d'huile de palme sur la biodiversité. D'après leurs résultats, les plantations de palmiers à huile abritent, sans surprise, un nombre d'espèces (richesse spécifique) inférieur à celui de forêts primaires et secondaires (Savilaakso *et al.*, 2014). Certaines espèces voient leur abondance diminuer, comme la plupart des chauves-souris insectivores, faute de proies. Les plantations défavorisent également les espèces d'oiseaux les moins répandues et les plus exigeantes en termes de conditions environnementales et de ressources (oiseaux dits spécialistes). Cette raréfaction des oiseaux spécialistes dans les plantations s'expliquerait par une végétation au sol réduite par rapport aux forêts. En outre, les conditions plus chaudes et sèches qui règnent dans ces plantations nuisent à certaines espèces de fourmis, de coléoptères et d'abeilles. D'où un impact très probable sur les services écosystémiques tels que la pollinisation, le contrôle des ravageurs de culture et le fonctionnement des sols (Savilaakso *et al.*, 2014). Les espèces végétales endémiques sont également affectées et tendent à être éliminées notamment sur les milieux particuliers comme dans les régions ultramafiques (contenant beaucoup de métaux), par exemple Bornéo, lesquelles sont d'ailleurs peu favorables à la culture du palmier à huile, ce qui n'empêche pas la déforestation de se poursuivre sur ces zones.

1.3. LE CAS DE L'ELEVAGE

À l'échelle mondiale, l'élevage est le plus grand utilisateur de terres agricoles et laisse donc une empreinte importante sur l'environnement (FAO, 2015a). L'augmentation de la consommation de viande par individu est ici plus importante en termes d'impact que l'augmentation du nombre d'individus consommant de la viande. Dans l'équation évoquée plus haut, c'est donc ici plus un problème de consommation et de technologie (capacité à exploiter intensivement et transporter la viande) qu'un problème de nombre absolu d'individus. L'impact de

l'élevage sur les terres agricoles est à la fois indirect, au travers des cultures destinées à l'alimentation animale (e.g. soja, maïs) dont les conséquences ont été évoquées plus haut (e.g. déforestation, cultures intensives, irrigation), et direct, par la dégradation des sols (e.g. tassement, érosion, pollution par les déjections animales (azote, phosphore) et les produits vétérinaires) qui a des conséquences sur la flore, la faune et les écosystèmes environnants (e.g. pollution des eaux) auxquels il faut ajouter les émissions de gaz à effet de serre.

2. L'URBANISATION

2.1. UNE URBANISATION GALOPANTE ET INÉLUCTABLE

Entre 1950 et 1990, le nombre de personnes vivant dans les zones urbaines est passé d'environ 746 millions à 2,29 milliards et entre 1990 et 2014, la population urbaine a encore augmenté de 1,6 milliard, soit l'équivalent de la population mondiale de 1900. D'ici 100 ans, les tendances de développement prévoient que l'essentiel de l'humanité vivra dans les villes et les agglomérations dans une économie de marché interconnectée et fondée sur la technologie (Sanderson *et al.* 2018). Les zones urbaines et semi-urbaines couvrent environ 88 millions d'hectare ou méga (Mha), soit moins de 0,6 % de la surface terrestre de la planète (Goldewijk *et al.*, 2017), sur lesquels vivent 54 % de la population mondiale (Banque mondiale 2017). L'expansion urbaine est maintenant plus rapide, plus étendue et fondamentalement différente de la croissance des zones urbaines dans le passé (Seto *et al.* 2010). L'Europe et l'Amérique du Nord ont dominé la croissance urbaine de 1750 à 1950, mais, entre 1950 et 2030, la population totale des villes africaines et asiatiques devrait être multipliée par dix, passant de 309 millions à 3,9 milliards (Ramalho & Hobbs, 2012). L'augmentation la plus rapide est enregistrée en Asie-Pacifique (25 % de la population urbaine entre 1980 et 2010) et en Afrique (37 %).

Il y a actuellement 2,8 milliards de personnes dans les mégapoles, la croissance la plus rapide étant enregistrée dans les pays à revenus intermédiaires de tranche inférieure (39 %). Dans les pays en développement, beaucoup de ces personnes vivent dans des bidonvilles où la qualité de vie est mauvaise. La révolution industrielle en Europe et la croissance des villes associée ont accéléré les impacts sur la biodiversité. Certains habitats naturels ont ainsi perdu plus de 90 % de leur superficie depuis 1800, notamment en Europe (Biró *et al.*, 2018) et en Amérique du Nord. De même, la perte de forêt, notamment en raison de l'urbanisation, provoque l'extinction locale d'espèces adaptées à la forêt, mais cette perte peut s'accélérer à partir d'une proportion d'habitats naturels inférieure à 30 % (Banks-Leite *et al.*, 2014 ; Ochoa-Quintero *et al.*, 2015).

2.2. L'URBANISATION COMME ATTÉNUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Quelques études récentes se sont penchées sur les phénomènes d'atténuation des impacts sur la biodiversité dus à l'urbanisation, notamment Sanderson *et al.* (2018), dont la publication dans le journal *Bioscience* montre qu'un des scénarii crédibles est que la population humaine stagnera ou diminuera aux environs de 6 à 8 milliards de personnes et que sa concentration dans les villes entrainera des changements socio-environnementaux importants et notamment, la diminution de l'extrême pauvreté, une meilleure maîtrise de la fécondité et une évolution des modes de vie et de pensée ainsi que des innovations dans les transports, l'industrie et la médecine. Le modèle quantitatif développé dans l'étude de Sanderson *et al.* montre tout d'abord des impacts négatifs sur la biodiversité, entrainés par ces changements, puis une inversion de la tendance avec des impacts positifs sur l'environnement. Ainsi, selon ces auteurs, bien qu'il soit parfaitement clair que les impacts environnementaux augmentent au fur et à mesure que les sociétés traversent la transition démographique et s'urbanisent, la transition en cours de la fécondité et la réduction de la pauvreté résultant de l'urbanisation suggèrent la perspective d'une stabilisation éventuelle et d'une réduction à long terme des impacts globaux sur l'environnement. Il est cependant illusoire de penser que la densification urbaine et la transition démographique vont résoudre l'ensemble des problèmes environnementaux à eux seuls. En effet, **la tendance de déclin de la biodiversité ne pourra être inversée que si entre temps** la biodiversité ne s'est pas effondrée et que le potentiel évolutif et la diversité génétique intraspécifique ont été conservés. Il y a donc urgence à mettre en place des politiques adéquates et à engager des actions.

L'urbanisation est un facteur intégratif de transformation des dynamiques de la démographie, de la consommation et de la technologie (Sanderson *et al.*, 2018[127]). Ces auteurs rappellent les différents facteurs d'incidence de l'urbanisation sur la réduction de la démographie :

- des opportunités de travail accrues entrainent une plus grande autonomie, en particulier pour les femmes qui contrôlent davantage leur reproduction, grâce à l'accès à la contraception, à la planification familiale et à l'éducation (Lutz & Qiang, 2002), mais aussi grâce à l'évolution des normes culturelles et des dynamiques de pouvoir résultant de leur accès à des revenus (McDonald P., 2000) ;
- les familles urbaines font face à des charges plus élevées (loyer, nourriture, etc.) et le travail des enfants est plus rare, ce qui diminue les incitations en faveur des familles nombreuses (Notestein, 1945) ;
- la population urbaine a un meilleur accès aux soins médicaux, ce qui améliore l'espérance de vie et ne justifie plus une multiplication des naissances pour se protéger contre la mortalité infantile (Mace, 2008) ;
- les enfants des zones urbaines ont vocation à devenir des adultes urbains occupant des emplois qualifiés et non agricoles : l'éducation est encouragée (Maralani, 2008).

Toutefois, il faut garder en tête que si les effets démographiques et économiques considérables de l'urbanisation ont été démontrés dans maintes régions du monde, ils ne le sont pas pour l'Afrique subsaharienne.

2.3. LE VERDISSEMENT DES VILLES

L'humanité urbaine se développera-t-elle dans un monde strictement minéral ou aura-t-elle su créer les conditions du développement conjoint de la biodiversité dans son propre habitat ? La demande manifestée par les citadins de villes plus vertes répond partiellement à ces questions. Les stratégies et les outils à mettre en œuvre manquent encore pour envisager un futur favorable pour l'ensemble des espèces vivantes dans un contexte de densification urbaine. Toutefois, l'intérêt démontré par les gestionnaires de l'espace urbain pour la notion de services écosystémiques, observé depuis plusieurs années, et sa prise en compte dans les processus de décisions d'aménagement urbain pourrait augurer d'une évolution favorable de l'état de la biodiversité dans les villes et amener à renforcer la création des conditions de sa protection et de son développement. Le développement des trames vertes et des toits végétalisés sont des exemples d'aménagement productif pour la biodiversité en ville (Clergeau, 2019 ; Madre *et al.*, 2014 ; Vergnes *et al.*, 2013). Il faut noter que les zones très urbanisées hébergent parfois une biodiversité particulièrement abondante, notamment en regard des autres espaces anthropisés (*e.g.* terres agricoles), où la diversité des habitats joue probablement un rôle important (par exemple la diversité des jardins privés). En zone rurale, *a contrario*, l'aménagement fait appel à des concepts et méthodes souvent anciens qui tiennent peu ou pas compte de la biodiversité. Ce point mériterait une analyse sociologique approfondie sur les raisons de ces comportements contrastés entre les citadins et les ruraux vis-à-vis des questions environnementales, relatives notamment à la biodiversité et également des travaux de comparaison de la biodiversité des villes et de la biodiversité de divers types de zones rurales.

3. LES POINTS CHAUDS DE BIODIVERSITÉ ET LES AIRES PROTÉGÉES

L'impact de l'accroissement des populations humaines sur l'environnement et la biodiversité est particulièrement fort dans les régions les plus riches en biodiversité (les « *biodiversity hot spots* ») qui ont connu des augmentations de populations humaines plus élevées que les autres régions entre 1995 et 2000 (Cincotta *et al.*, 2000). Cela est vrai aussi dans les aires tropicales sauvages (*Tropical wilderness areas*) où les taux d'accroissement sont le double de ceux observés dans les *hot spots*. Dans ces derniers on observe une structure de population comprenant une forte proportion de classes d'âge jeunes, ce qui laisse augurer une poursuite de l'accroissement démographique (Williams, 2013). La résultante de tout ceci est qu'un tiers des zones protégées terrestres sont soumises à une pression humaine intense (Jones *et al.* 2018) qui peut inciter les gouvernements à en réduire les niveaux de protection ou même les supprimer (Golden Kroner *et al.*, 2019). En France, *a contrario*, il semble qu'on observe plutôt un report de la densité dans le voisinage immédiat des aires protégées. Selon le récent rapport du ministère de l'écologie (CGDD, SDES, janvier 2020), la proche périphérie (bande d'un kilomètre de large autour des sites) de ces espaces protégés se partage entre territoires artificialisés et milieux naturels (végétation arbustive et herbacée, zones humides et surfaces en eau). Les milieux ouverts, comme les prairies,

[127] https://www.fondationbiodiversite.fr/wp-content/uploads/2019/09/2019-09-Synthese-Conservation-et-urbanisation.pdf

les landes et les dunes, les zones humides et les surfaces en eau, occupent 43 % de ces territoires, soit près de deux fois plus que pour la métropole. Le taux d'artificialisation s'élève toutefois à 16 %, soit trois fois le niveau national, et est légèrement plus élevé que celui des communes littorales (15 %).

De nombreuses études révèlent que les dernières zones sauvages de la Terre constituent des surfaces tampons de plus en plus importantes pour lutter contre les effets du changement climatique et d'autres impacts humains. Mais, jusqu'à présent, la préservation des fonctionnalités des écosystèmes intacts et donc des services écosystémiques associés, n'a pas été un objectif explicite des cadres politiques internationaux, tel que le plan stratégique des Nations Unies pour la biodiversité ou l'accord de Paris sur le climat.

FICHE 5 - DÉMOGRAPHIE ET EXPLOITATION DIRECTE DES RESSOURCES

L'expansion démographique humaine historique a été directement liée à la colonisation de nouvelles terres, notamment grâce à l'amélioration de la navigation depuis l'Holocène moyen qui a permis la colonisation, y compris des îles les plus éloignées, et l'exploitation des ressources de ces nouveaux territoires entrainant des déclins de nombreuses populations d'espèces ou tout au moins des modifications majeures dans les équilibres et la richesse des communautés d'êtres vivants.

ENCADRÉ 6
Les écosystèmes insulaires

Les écosystèmes insulaires sont souvent caractérisés par des espèces endémiques et une faible redondance fonctionnelle qui les rend vulnérables à la colonisation humaine (Rick *et al.*, 2013). Ainsi, par exemple, les deux tiers des espèces d'oiseaux originaires des îles du Pacifique ont disparu entre la colonisation humaine initiale (après 1300 av. J.-C.) et l'arrivée des Européens (XVII^{e} siècle) (Duncan *et al.*, 2013) et de nombreuses espèces exploitées dans le monde sont devenues de plus en plus petites (Fitzpatrick & Keegan, 2007 ; Jorgensen *et al.*, 2007).

A contrario, la tendance globale de diminution de la biodiversité n'est parfois pas observée pour des groupes comme les oiseaux, les mammifères et les amphibiens dans certaines zones, lorsque la présence humaine est faible. Par exemple, une grande partie de l'Amazonie a longtemps été exempte de pressions humaines majeures, à l'exception de la pression du changement climatique, même si elle reste soumise aux impacts humains (McKey, 2010). Ainsi le bassin de l'Amazone est dans les 10 % des terres les plus riches en espèces sur Terre, alors que l'Amazonie est traversée en partie par des voies navigables et les routes, et est de plus en plus envahie par les implantations humaines et l'agriculture industrielle (en particulier dans la région sud). Ceci est néanmoins en train de changer rapidement et il est à craindre que sans politiques de conservation adaptées, ces dernières zones disparaissent (Venter *et al.*, 2015).

1. L'APPROPRIATION DE LA BIOMASSE PAR LES HUMAINS

Au cours du siècle dernier, l'appropriation par les humains de la production primaire nette végétale a presque doublé, avec une augmentation de 116 % pour atteindre 14,8 Giga tonnes de carbone en 2005 (Krausmann *et al.* 2013). Ceci représente un prélèvement pour les besoins humains de la productivité primaire nette de 13 % en 1910 à 25 % en 2005. Au cours de la même période, la population a augmenté de 274 % et le produit intérieur brut (PIB) (en dollars constants de 1990) a augmenté de 1 655 %. L'appropriation de la production primaire nette par personne et par an a néanmoins diminué de 3,9 à 2,3 tonnes. Cette baisse a été constatée après 1950 en raison principalement de l'arrivée du pétrole, qui a participé à la réduction du prélèvement de biomasse à des fins énergétiques.

La biomasse récoltée et la biomasse consommée ont augmenté de façon linéaire avec la croissance de la population : la biomasse consommée par habitant est restée relativement constante, mais avec de grandes disparités selon les types de biomasse. Ainsi, la consommation de produits végétaux et animaux a très fortement augmenté (de 20 % en moyenne par habitant sauf dans l'ex-Union soviétique) ainsi que l'utilisation du bois pour d'autres usages que l'énergie. C'est la baisse de la production de bioénergie qui a compensé ces hausses. Le prélèvement accru de biomasse en milieu forestier a des conséquences sur l'état des sols et la faune et flore associées, avec une diminution du carbone stocké et de la fertilité des sols.

Les gains de production primaire nette agricole sont passés de 41 % en 1910 à 69 % en 2005. Cette augmentation a généré en 2005 2,5 GtC / an, ce qui représente 49 % de l'augmentation totale de la consommation humaine depuis 1910. Néanmoins, ces avancées technologiques qui permettent de compenser l'augmentation de la demande en biomasse ont souvent des gains de court terme et des coûts de long terme (pollutions chimiques

des écosystèmes, épuisement de la ressource en eau, eutrophisation des écosystèmes, etc.) qui impactent fortement la biodiversité.

2. LA DÉFAUNATION

Accompagnant la croissance démographique et les besoins humains, la globalisation des échanges dans un marché mondialisé a contribué à la surexploitation de certaines populations, notamment les poissons et les baleines ainsi que les animaux à fourrure, (Lightfoot *et al.*, 2013 ; Monsarrat *et al.*, 2016 ; Rodrigues *et al.*, 2018).

2.1. DÉFAUNATION MARINE

La défaunation marine a commencé il y a quelques centaines d'années. Bien que peu d'espèces marines aient disparu dans le monde (Webb & Mindel, 2015), beaucoup ont tellement régressé que leur commerce n'est plus possible et ce dès le début de l'exploitation à l'échelle industrielle (McCauley *et al.*, 2015). Forrest *et al.* (2019) ont démontré que la présence humaine était le facteur le plus important pour expliquer l'état d'abondance des poissons, dans une relation qui montre que plus il y a d'hommes, moins il y a de poissons, quel que soit le territoire considéré, y compris dans les parties les moins peuplées du monde.

2.2. DÉFAUNATION TERRESTRE

Ce sont les grands mammifères qui subissent le plus la compétition avec l'homme pour les ressources ou les territoires. Au Ghana (Brashares *et al.*, 2001), le facteur principal de pression sur ces mammifères est le prélèvement par la chasse sous forme de « viande de brousse ». Les extinctions d'ongulés et de carnivores ont ainsi été corrélées à la pression démographique 50 km autour des réserves. La population humaine et la taille des réserves ont représenté 98 % de la variation observée des taux d'extinction entre les réserves étudiées. Ces résultats suggèrent que, là où le prélèvement d'animaux sauvages est important, les plans de conservation devraient se concentrer sur l'augmentation de la taille des réserves et la réduction du taux de chasse.

Ce phénomène n'est cependant pas encore complètement généralisé, des processus différents sont, par exemple, à l'œuvre dans la toundra arctique et la haute toundra où l'exploitation des rennes, caribous, bœufs musqués, poissons et oiseaux (dont les oies) permet le maintien des populations autochtones et a peu d'impact en raison de la faiblesse relative des populations humaines concernées (Ipbes, 2019). Dans ces écosystèmes, la productivité animale et végétale reste relativement élevée et globalement, ces écosystèmes sont encore fonctionnellement intacts (Viviroli *et al.*, 2007 ; Chettri *et al.,* 2012), bien que les impacts de l'élevage saisonnier soient significatifs dans certaines zones utilisées et que ces milieux soient sensibles à de nombreux facteurs, dont le changement climatique (Myers-Smith *et al.*, 2015, You *et al.*, 2017).

Cependant ces régions du monde sont en train de changer rapidement avec une fermeture de milieux, le remplacement d'espèces, le tout aggravé par le changement climatique et les échanges mondiaux. Par ailleurs les changements de mode de vie de populations locales (sédentarisation, mécanisation, déplacement des jeunes) ont parfois aussi des impacts locaux.

3. LA GESTION PRODUCTIVE DES ÉCOSYSTÈMES

Il y a un siècle, seule 15 % de la surface de la Terre était utilisée pour la culture et l'élevage, aujourd'hui, plus de 77 % des terres (hors Antarctique) et 87 % de l'océan ont été modifiés par les effets directs des activités humaines. Watson *et al.* (2018) ont produit une carte des écosystèmes « intacts », 'est à dire peu ou pas exploités démontrant que cinq pays détenaient 70 % de ces espaces : la Russie, le Canada, l'Australie, les États Unis et le Brésil.

Entre 1993 et 2009, 3,3 millions de kilomètres carrés de zone terrestre peu anthropisée ont été perdus en raison des pressions exercées par les activités humaines (urbanisation, agriculture, exploitation minière, infrastructures,

lumières nocturnes, etc.). Dans l'océan, les zones exemptes de pêche industrielle, de pollution et de navigation sont presque entièrement confinées aux régions polaires.

De même, longtemps considérées comme les derniers écosystèmes intacts, près des deux tiers des forêts boréales sont aujourd'hui gérées, principalement pour la production de bois d'œuvre (Gauthier *et al.*, 2015). Pratiquement toutes les forêts tempérées de la plupart des régions du monde sont gérées.

Une autre menace importante résultant de la gestion dirigée des écosystèmes est leur homogénéisation, y compris par l'introduction d'espèces exotiques cultivées ou ornementales.

FICHE 6 – DÉMOGRAPHIE ET CHANGEMENT CLIMATIQUE

Il existe deux types de liens entre croissance démographique et émissions de gaz à effet de serre, le premier par l'augmentation des émissions dues aux combustibles fossiles et le second par le changement d'usage des terres et l'agriculture (avec diminution du stockage de carbone dans les sols). Fuller *et al.* (2011) posent par exemple l'hypothèse que l'expansion des rizières et le pastoralisme ont entraîné une augmentation du méthane atmosphérique il y a 4 000 ans.

ENCADRÉ 7

Des actions plus efficaces que d'autres

Whynes & Nicholas (2017) dans leur étude publiée dans *Environmental research letter* établissent que les quatre mesures les plus efficaces sont d'avoir un enfant de moins (ce qui réduit en moyenne les émissions d'équivalent CO_2 de 58,6 tonnes par an), vivre sans voiture (2,4 tonnes équivalent CO_2 économisées par an), éviter les voyages en avion (1,6 tonnes équivalent CO_2 économisées par vol transatlantique aller-retour) et une alimentation à base de plantes (0,8 tonnes équivalent CO_2 économisées par an). Ils démontrent que ces actions ont un potentiel beaucoup plus grand de réduction des émissions que les stratégies couramment promues comme le recyclage (quatre fois moins efficace qu'un régime à base de plantes) ou le changement des ampoules domestiques (huit fois moins efficace).

Comme pour toutes les autres pressions, une partie de l'augmentation du changement climatique est directement liée à la démographie, une autre partie est liée aux modes de consommation, de production et à l'augmentation de la demande par habitant. La part de responsabilité de la pression démographique et donc du strict nombre d'humains dans le changement climatique est cependant complexe à établir, pour les mêmes raisons que celles qui ont été discutées dans le paragraphe relatif aux modes de consommation et au niveau de vie.

FICHE 7 – DÉMOGRAPHIE ET POLLUTIONS

Plus il y a d'humains en un lieu, plus ils génèrent de pollutions et de déchets, même si la production de déchets est très dépendante du mode de consommation. Ainsi, un grand nombre de pressions « abiotiques », par exemple dues à l'agriculture, sont liées à la démographie : la contamination généralisée par les pesticides, par le phosphore, par l'azote réactif qui découle de l'utilisation des engrais chimiques produits à partir d'azote atmosphérique (la fixation industrielle a augmenté de 50 % la fixation d'azote atmosphérique).

Similairement, mais pour d'autres activités ou pratiques, il existe une corrélation positive entre le nombre d'humains (et la quantité d'objets de consommation) et la pollution, notamment par les déchets solides (e.g. plastiques) et les polluants organiques (e.g. hydrocarbures aromatiques polycycliques polychlorobiphényl), les polluants inorganiques (e.g. métaux lourds). Le secteur primaire, dont l'essor fut particulièrement marqué au 19ème siècle, avec l'extraction minière et la grande industrie, est à l'origine de pollutions massives qui ont dégradé l'état des écosystèmes adjacents (e.g. terres, eaux de surface, eaux souterraines). Certes l'amélioration des technologies et les réglementations qui ont amené à la mise en œuvre de procédés plus propres ont considérablement réduit, dans les pays développés, les émissions de polluants, mais l'usage des biens de consommation dérivés des processus industriels est un émetteur majeur de composés polluants de diverses natures (*e.g.* métaux lourds, composés organiques persistants, nanoparticules) qui sont ensuite dispersés dans l'environnement. Si la relation linéaire entre démographie et pollution peut s'envisager à comportement constant, l'impact des technologies utilisées est, pour cette pression, très fort. Par exemple, les céramiques antiques ont généré des tonnes de déchets non biodégradables, mais, aujourd'hui, cette industrie a largement diminué ses impacts.

Il existe par exemple des pollutions massives (azote réactif et métaux lourds, par exemple) observées dans les milieux très anthropisés (e.g. zones minières et industrielles). Dans le cas des environnements marins, la pollution par les macro et les micro déchets est une menace majeure.

Il est intéressant de faire un retour sur les effets du confinement vécu en 2020 en termes de pollution. En effet, la crise Covid-19 a entrainé une baisse spectaculaire des émissions de polluants, attestée par la publication de cartes d'impact de la pollution par la Nasa et le Cnes en février et mars 2020. Cette diminution démontre que l'impact humain sur la biosphère dépend en premier lieu de la consommation au-delà du nombre d'humains présents.

FICHE 8 – DÉMOGRAPHIE ET ESPÈCES ENVAHISSANTES

Plusieurs études démontrent que le risque de propagation des espèces exotiques envahissantes en forêt augmente avec la densité de population en raison du risque accru de transport de matériaux contaminés comme, par exemple, des grumes de conifères infestées par le nématode du pin (en Chine, Robinet *et al.*, 2009) ou du bois de chauffage véhiculant l'agrile du frêne (aux États-Unis, Robertson & Andow, 2009).

Néanmoins, la relation avec la démographie doit être relativisée, car il est établi que les nombres cumulés d'espèces exotiques enregistrées sont environ 30 fois plus élevés dans les pays à revenus élevés par rapport aux pays à faibles revenus, en partie à cause des échanges commerciaux et des niveaux de consommation, mais aussi à cause des capacités de détection des espèces envahissantes que les pays riches peuvent développer (Seebens *et al.* 2018 ; Seebens *et al.*, 2017). Ainsi, les niveaux actuellement enregistrés d'espèces exotiques en Europe et en Asie centrale, dans les Amériques et en Asie-Pacifique sont tous similaires, les niveaux sont plus faibles en Afrique (Seebens *et al.*, 2018 ; Seebens *et al.*, 2017). De même, les points chauds en termes d'espèces exotiques envahissantes se trouvent souvent dans les pays à revenus élevés d'Amérique du Nord, d'Europe et d'Australie et Nouvelle Zélande (Dawson *et al.*, 2017). Il ne faudrait toutefois pas déduire de tels chiffres l'idée que l'incidence économique des espèces envahissantes est plus faible dans les pays en développement ou émergents que dans les pays du Nord. Dans le domaine agricole et de l'agroforesterie, les exemples récents de l'invasion de la cochenille du manioc en Afrique, des teignes de la pomme de terre en Amérique du Sud (Torres-Leguizamon *et al.*, 2011), du rhynchophore rouge des palmiers au Moyen-Orient (El-Mergawy *et al.*, 2011) ou très récemment celui de la chenille légionnaire d'automne américaine, *Spodoptera frugiperda*, en Afrique et en Asie (Silver 2019) montrent toute l'incidence économique que ces phénomènes peuvent avoir au Sud, même si là encore, le lien avec la démographie reste à établir précisément.

Une analyse des menaces liées aux espèces exotiques envahissantes suggère que, dans les décennies à venir, les invasions biologiques resteront élevées, en lien avec deux causes principales, le changement climatique et l'accroissement du commerce mondial (Early *et al.*, 2015).

1. UN ENVAHISSEMENT MONDIAL

Près d'un cinquième de la surface de la Terre est aujourd'hui menacé d'invasion de plantes et d'animaux, y compris de nombreux points chauds de la biodiversité (Ipbes, 2018b). L'Ipbes (2019) établit que le nombre d'espèces exotiques envahissantes a doublé en 50 ans. De même, la vitesse des introductions s'est accrue avec plus d'un tiers des introductions intervenues après 1970 (Seebens *et al.*, 2017, 2018). Aujourd'hui, 75 % de l'environnement terrestre, 40 % du milieu marin et 50 % des cours d'eau présentent de graves effets de dégradation en raison de cette menace. En 2015, l'UICN confirmait déjà que 354 espèces étaient directement menacées par des espèces exotiques envahissantes en Europe, soit 19 % de l'ensemble des espèces en danger (UICN, 2015).

Les milieux les plus étudiés étaient historiquement les milieux insulaires qui représentaient de bons modèles d'étude pour la dynamique de colonisation et d'installation des espèces exotiques. Mais ce phénomène est aussi bien décrit actuellement dans les forêts de l'hémisphère nord (Murphy & Romanuk ,2014 ; Brockerhoff & Liebhold, 2017).

Pendant longtemps les espèces exotiques ont circulé du Nord au Sud en lien avec la colonisation, puis entre les deux rives de l'Atlantique en lien avec les échanges commerciaux (du phylloxera au doryphore et à la chrysomèle du maïs en passant par les ratons laveurs, les écureuils américains, etc.). Enfin, avec le développement économique de la Chine et des pays asiatiques, il y a eu multiplication des introductions en Amérique du nord (par exemple des insectes xylophages transportés via le bois des caisses d'emballages qui contenaient les équipements chinois) et globalisation de ces introductions.

2. LES PRINCIPAUX MOTEURS DES INVASIONS

Même si de nombreuses espèces végétales ou animales ont accompagné *Homo sapiens* dans son expansion géographique planétaire, à l'exemple de la mouche du vinaigre, *Drosophila melanogaster*, devenue un strict commensal de l'homme (Lachaise & Silvain, 2004), la prolifération récente des espèces envahissantes est avant tout liée au développement des transports, un phénomène lié au développement économique et à celui des échanges commerciaux entre différentes parties du monde. La démographie humaine, lorsqu'elle va de pair avec le développement économique, et avec l'accroissement des déplacements à longue distance, comme ceux liés à la colonisation européenne, pourra donc favoriser indirectement le transport puis l'introduction, intentionnelle ou non, d'espèces animales et végétales dans de nouveaux écosystèmes, parfois très éloignés de leur origine.

Ce phénomène est très bien documenté dans les importants travaux collectifs issus du programme européen DAISIE par exemple[128]. Si les principaux moteurs des invasions sont aujourd'hui **l'augmentation en volume et rapidité du commerce international et une mobilité humaine accrue,** Regan *et al.* (2015) pointent aussi le commerce des animaux de compagnie en raison des fuites ou des abandons fréquents d'espèces importées dans les milieux naturels, et tout comme celui des plantes ornementales qui se dispersent au-delà des jardins, et sont également impliquées dans l'introduction d'organismes nuisibles aux végétaux. L'introduction de plantes (par exemple médicinales) (Fernández-Llamazares *et al.*, 2016) ou de grands mammifères (par exemple, l'éléphant, le pécari) (Ancrenaz *et al.*, 2007, Sahoo *et al.*, 2013) peuvent être liées à la prolifération ou l'effondrement des populations d'autres espèces.

Lenda *et al.* (2014) ont également étudié l'effet d'Internet sur la diffusion d'espèces végétales exotiques et démontré que treize des espèces de plantes exotiques envahissantes les plus nocives d'Europe étaient vendues comme plantes décoratives en Pologne. Ils ont établi qu'Internet était à l'origine de transports sur des distances considérablement plus longues que les ventes traditionnelles en magasins s'éloignant des dispersions naturelles et favorisant l'augmentation du taux d'homogénéisation des communautés écologiques partout dans le monde.

3. ESPÈCES ENVAHISSANTES ET ACTIVITÉS HUMAINES

La présence et les activités humaines favorisent généralement les phénomènes d'invasion, notamment par des espèces exotiques : les espèces indigènes déclinant généralement dans les zones touchées par l'homme. Lazzarina *et al.* (2020) ont exploré l'effet de la densité de la population humaine, des utilisations des terres d'origine humaine (agricole et urbaine) et de la superficie naturelle des terres sur la richesse en espèces aviaires (exotiques et indigènes) du Massachusetts. Les chercheurs ont démontré que ces trois facteurs avaient un impact positif à la fois sur les espèces indigènes et sur les espèces exotiques. Les explications possibles de ces schémas peuvent inclure l'hétérogénéité de l'habitat, une disponibilité accrue des ressources et une réduction du risque de prédation.

La colonisation européenne des années 1500 au début des années 1800 a concouru à l'accélération de **la déforestation au bénéfice de monocultures** qui ont favorisé la propagation d'espèces exotiques envahissantes (Dyer *et al.*, 2017). Par exemple la multiplication des plantations d'eucalyptus sur de nombreux continents a favorisé l'introduction de nombreuses espèces d'insectes ravageurs et de champignons pathogènes originaires d'Australie et le succès de leur installation.

La Révolution verte qui a suivi la Seconde Guerre mondiale et l'intensification de l'agriculture, a provoqué un déclin rapide des espèces dans les habitats agricoles et la propagation des espèces envahissantes en raison d'un accaparement plus important de la proportion de production primaire nette par l'humanité (Krausmann *et al.*, 2013).

La dégradation des écosystèmes est une cause majeure de colonisation par les espèces exotiques envahissantes et notamment, l'expansion de l'agriculture, les changements dans la composition des communautés indigènes de flore et de faune provoqués par le changement climatique et la multiplication des incendies de forêt qui y semble liée (Aukema *et al.*, 2010 ; Early *et al.*, 2016 ; IPBES, 2018b ; Seebens *et al.*, 2018).

[128] https://ec.europa.eu/environment/nature/invasivealien/docs/pan_european_inventory_ias.pdf
https://ec.europa.eu/environment/nature/invasivealien/docs/ias-brochure-en-web.pdf

DÉMOGRAPHIE ET MOTEURS INDIRECTS DE L'EROSION DE LA BIODIVERSITÉ

FICHE 9 - DÉMOGRAPHIE ET TECHNOLOGIE

L'accès à des outils de chasse ou de récolte adaptés a pu conduire à l'éradication d'une espèce en quelques années. C'est vrai pour l'effondrement initial des populations du grand pingouin, mais pas pour son éradication ; c'est vrai aussi pour le castor dont la chasse était source de grands profits du fait de la demande européenne, mais ces situations dramatiques se sont produites dans des contextes démographiques très différents de celui des XX^{e} et XXI^{e} siècles.

Il est maintenant admis que l'influence des populations humaines sur les écosystèmes, donc sur la faune et la flore, remonte loin dans le temps à des époques où ces populations étaient très clairsemées (Stephen *et al.*, 2019). Ainsi, les outils et la technologie (pièges, fusils, canots) ont permis à des groupes humains réduits d'impacter dramatiquement une population d'intérêt et de la conduire pratiquement ou effectivement à l'extinction. De même, l'utilisation du feu a été un des grands facteurs de modification des écosystèmes par les populations humaines et peut expliquer que des populations de taille très réduite aient pu avoir un impact majeur sur les écosystèmes et sur la biodiversité (voir James Scott, dans *Homo domesticus*). Un autre exemple de modification massive des écosystèmes par des populations parfois très réduites est l'introduction d'espèces exotiques, notamment dans les milieux insulaires.

En outre, la mécanisation, qui a permis de défricher et exploiter des surfaces de plus en plus grandes, est à l'origine de la disparition des forêts et des zones humides et de la modification profonde de la composition des écosystèmes (*e.g.* azote, phosphore). Un seul individu équipé d'engins puissants peut aujourd'hui, en un temps très court, éliminer bois, bosquets et buissons, en vue d'augmenter ses surfaces de production agricole et affaiblir dramatiquement la biodiversité de ces espaces.

L'examen des situations passées et actuelles conduit à considérer que des humains, même rares, peuvent affecter profondément la biodiversité, détruire des écosystèmes entiers et faire disparaître en peu d'années de nombreuses espèces s'il existe une demande pour cette ressource et la **technologie** adéquate pour l'exploiter. Si l'augmentation de l'efficacité d'une technologie permet d'en réduire les impacts, il faut aussi tenir compte de l'**effet rebond** : l'amélioration de la qualité technologique d'un bien a pour conséquence la réduction de ses coûts de production / prix de vente, la stimulation de la demande et l'augmentation de sa production / consommation (Jevons, 1865) – c'est le cas en agriculture notamment. La vitesse de disparition de la ressource est souvent liée à l'efficacité de la technologie et la disparition elle-même à l'existence d'une demande.

Les boucles de rétroaction entre la population et la technologie font aussi l'objet de recherche. Esther Boserup, par exemple, dès le milieu des années 1960, avait prédit que la surpopulation humaine, au lieu d'être régulée automatiquement par le manque de ressources, allait entraîner une explosion des innovations technologiques qui entrainerait une augmentation de productivité. Ceci a été confirmé dans le domaine agricole avec le développement de l'irrigation, la réglementation des semences et la sélection variétale, l'intensification des cultures, l'innovation dans le machinisme et les techniques de labour. Elle avait également prévu que la pression démographique allait entraîner la mise en place de pratiques agricoles non durables et polluantes – mais ces pratiques peuvent stimuler, en retour, *via* l'effet rebond, la démographie (Alcott, 2008).

L'élimination des deux tiers des espèces d'**oiseaux originaires des îles du Pacifique** entre la colonisation humaine initiale (après 1300 av. J.-C.) et l'arrivée des Européens (XVII^{e} siècle) (Duncan *et al.*, 2013), un exemple cité plus avant, s'est produite dans un contexte démographique très différent de celui d'aujourd'hui. Un des exemples les mieux documentés est celui de l'extermination des moas (oiseaux : Dinornithiformes) dans l'île sud de la Nouvelle-Zélande au XVème siècle. Ce processus direct et indirect (via la destruction des habitats) aurait été le fait d'une population humaine n'excédant pas 2 000 personnes et n'aurait pas pris plus de deux siècles (Holdaway *et al.*, 2014).

Il en va de même de la disparition du **dodo**, *Raphus cucullatus*, à l'île Maurice au milieu du XVII^{e} siècle (Cheke, 2014).

L'éradication de la **rhytine de Steller**, *Hydrodamalis gigas*, s'est produite en moins de 30 ans au XVIII^{e} siècle et n'a mobilisé qu'un nombre réduit de chasseurs.

L'éradication de la dernière population du **grand pingouin**, *Pinguinus impennis*, jadis commun dans tout l'Atlantique Nord, n'a été le fait que de quelques individus, le dernier couple étant tué en 1844 par trois chasseurs islandais sur l'île d'Eldey au Sud-Ouest de l'Islande.

FICHE 10 - DÉMOGRAPHIE ET FACTEURS CULTURELS : L'EXEMPLE DE LA MONDIALISATION DU TOURISME

En 1950, le nombre de touristes était estimé à 25 millions, selon des modalités touristiques notoirement différentes de celles d'aujourd'hui (*e.g.* distances parcourues, moyens de transport, infrastructures dédiées, activités). Les données de la Banque mondiale affichent, entre 2015 et 2018, une croissance des entrées de 532 millions à 1,442 milliard, l'essentiel des touristes (6/10) voyageant par avion (Banque Mondiale)[129]. Aujourd'hui, près de 20 % de la population humaine est engagée dans des déplacements touristiques, l'augmentation des déplacements est liée à la croissance démographique, mais aussi à l'offre économique, aux disponibilités croissantes en termes d'infrastructures (avions, hôtels, etc.) et aux aspirations sociales liés à l'accroissement du niveau de vie (développement du tourisme asiatique). Le Vieux Continent reste la destination la plus prisée, devant la région Asie-Pacifique. Environ 30 millions de personnes ont fait des croisières en 2019 (Association Internationale des Croisières : Clia) ; essentiellement des Américains, des Chinois, des Allemands et des ressortissants du Royaume-Uni. Environ 5% des navires de croisière sont déployés en Alaska.

1. LE TOURISME COMME FACTEUR DE PRESSION SUR LES ÉCOSYSTÈMES

1.1. LE CAS DE L'ANTARCTIQUE

Selon l'IAATO (*International Association of Antarctica Tour Operators*), le nombre de touristes en Antarctique serait de l'ordre de 30 000 par an. Malgré un durcissement de la réglementation (Convention MARPOL et Protocole de Madrid qui sanctuarisent théoriquement le continent, notamment en matière de protection de la faune), ce chiffre devrait atteindre environ 80 000 visiteurs en 2019-2020 et cela uniquement en comptant ceux transportés par les adhérents de l'IAATO[130] et sans compter les personnels naviguant. Sur ce total, seules 18 000 personnes voyageant sur des bateaux de plus de 500 passagers n'ont pas le droit de débarquer. Ces débarquements ont lieu essentiellement sur la côte sud-ouest de la péninsule Antarctique et, dans 76% des cas, se font sur une surface ne dépassant pas 200 hectares, générant ainsi un effet de tourisme de masse (Bender *et al.* 2016), potentiellement très dangereux pour la faune, mais aussi pour la flore, une étude ayant montré que des graines pouvaient être trouvées dans les vêtements et sacs de 20 à 40 % des visiteurs, ouvrant la porte à un transfert de propagules végétaux (Huiskes *et al.*, 2014).

Si l'IAATO prône, en matière d'environnement, une autorégulation de ses membres et un respect des protocoles internationaux, ses règles ne sont pas contraignantes (cf. le dossier de State.fr : http://www.slate.fr/story/175344/antarctique-touristes-espece-invasive). Dans un contexte de désaccord international sur l'exploitation de l'Antarctique, de refus des tour-opérateurs d'accepter des observateurs à bord des bateaux et de la multiplication des activités associées au tourisme, on peut craindre que l'incidence négative de celui-ci sur une faune déjà fortement perturbée par le changement climatique ne croisse à l'avenir.

1.2. LE CAS DE L'ARCTIQUE

Les chiffres pour l'Arctique sont beaucoup plus élevés (10 millions pour l'ensemble des pays *circum* arctiques concernés selon l'estimation de Maher en 2017). Selon Runge *et al.* (2020), le tourisme en Arctique a augmenté de 600 % entre 2006 et 2016, soulevant la question de ses impacts et de sa durabilité. L'empreinte du tourisme a augmenté de 374 % en été et de 634 % en hiver. Ces auteurs soulignent combien l'observation de la faune sauvage vulnérable met une pression supplémentaire sur des espèces déjà menacées par le changement climatique. Tolvanen & Kangas (2016) montrent qu'à proximité des sites touristiques la composition en espèces tend à favoriser les espèces communes associées à l'homme au détriment des espèces sauvages. Cela peut favoriser aussi des espèces envahissantes. Avec des conditions climatiques qui deviennent plus favorables à l'activité touristique et sportive (*e.g.* expéditions commerciales) des territoires antérieurement vierges d'humains sont maintenant parcourus par des groupes qui causent divers dommages à la faune et provoquent

[129] https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/ST.INT.ARVL?end=2018&start=1995
[130] https://iaato.org/documents/10157/25111/Ship+Scheduler+Redevelopment+160519.pdf/c713d9f9-ebd9-4544-bb46-a2f1b2e8d391

de nouvelles pollutions (*e.g.* fécales, déchets plastiques). Les zones côtières sont particulièrement menacées par cette progression du tourisme en Arctique (*e.g.* Groenland), en plus des activités minières qui commencent à s'y développer.

1.3. LE CAS DES ENVIRONNEMENTS COTIERS

Le tourisme côtier a débuté au XIX^{e} siècle. Les processus sous-jacents sont la démographie, les changements comportementaux et l'élévation du niveau de vie. Ce tourisme « de masse » a généré des changements majeurs en matière d'infrastructures, de transport notamment, mais aussi hôtelières ou portuaires induisant une fragmentation des habitats, réduisant la biodiversité littorale et accroissant les pollutions. Davenport & Davenport (2006) soulignent aussi le rôle des comportements et pratiques susceptibles de venir ajouter leurs effets au développement des infrastructures : le piétinement intertidal par les touristes sur les rives rocheuses/sablonneuses, les effets non évalués du «nettoyage» des plages qui est pratiqué dans la majorité des stations balnéaires du monde, ou encore le développement de la plongée sous-marine qui provoque une détérioration quantifiable des écosystèmes coralliens malgré la promotion de bonnes pratiques. L'impact des bateaux à moteur et des « jet ski » est aussi souligné, en particulier dans le contexte de la transmission d'espèces non indigènes. Enfin, l'émergence incontrôlée de nouveaux « sports extrêmes » (par exemple, « *coasteering* », kitesurf) est identifiée comme un problème futur. Schierding *et al.* (2011) ont étudié l'impact du tourisme sur les plages de galets et de sable de la mer Baltique. Ils montrent que les effets du piétinement des touristes ont un impact élevé sur la richesse en espèces des plages de sable, à la fois sur les sites intensément utilisés et ceux qui le sont de manière extensive.

2. LE TOURISME COMME VOIE D'INTRODUCTION D'ESPÈCES ENVAHISSANTES

Anderson *et al.* (2015) démontrent que l'abondance et la richesse d'espèces exotiques sont plus élevées dans les sites touristiques. Ce phénomène qui se retrouve à la fois dans les environnements terrestres, marins et d'eau douce, est liée à plusieurs vecteurs, chevaux, marcheurs, yachts et concerne plusieurs groupes taxonomiques. Witt *et al.* (2017) ont analysé l'impact des espèces envahissantes sur l'écosystème protégé Serengeti-Mara en Afrique de l'Est. Au total, 245 plantes exotiques ont été recensées ; 212 ont été introduites intentionnellement dans les jardins des réserves et 51 ont établi des populations dans les limites des infrastructures touristiques ; 23 de ces espèces sont devenues envahissantes dans l'écosystème. Six espèces peuvent présenter des risques majeurs pour l'intégrité de l'écosystème et posent la question de la prise en compte et de la gestion des espèces envahissantes dans de tels écosystèmes, y compris en procédant à l'élimination des espèces naturalisées dans le périmètre des infrastructures touristiques (*e.g.* lodges).

3. LE TOURISME COMME FACTEUR DE PERTURBATION DU COMPORTEMENT DE CERTAINS TAXONS

Il existe de nombreuses situations où le développement du tourisme, en l'occurrence le tourisme de nature, tourné vers la faune sauvage va interagir avec des taxons particuliers de la faune, en en modifiant l'environnement spécifique et le comportement. C'est le cas, en particulier, pour les Elasmobranches (requins et raies). Une étude récente montre, par exemple, que les requins blancs augmentent significativement leur activité lors d'interactions avec les opérateurs de cages de plongées au prix de dépenses énergétiques qui ne sont pas compensées par la nature des attractifs utilisés (Huveneers *et al.*, 2018). Le tourisme est également considéré comme une des quatre menaces principales qui s'exercent à l'encontre des mammifères marins, notamment dans les eaux côtières (Avila *et al.*, 2018).

Les vertébrés terrestres subissent aussi les conséquences du développement du tourisme qui modifie leurs comportements. C'est le cas bien connu du guépard qui présente une sensibilité forte à la présence touristique. Broekhuis (2018), montre que les guépards femelles qui ont été exposées à une activité touristique élevée ont élevé en moyenne seulement 0,21 ± 0,72 petits jusqu'à l'autonomie, contre 2,32 ± 0,11 petits dans des zones faiblement touristiques. L'impact sur le nombre de petits élevés des autres facteurs confondants, comme l'abondance des lions ou des hyènes tachetées, semble moindre. Sur la base de ces résultats, l'auteur recommande que des quotas touristiques soient mis en place dans les zones de forte fréquentation et que des

directives strictes d'observation de la faune, telles que le nombre de véhicules, le comportement des touristes, le temps passé et la distance d'observation, soient appliquées.

Les activités touristiques peuvent affecter le comportement des éléphants d'Asie. Ainsi, la fréquence et la durée des comportements d'alerte, de peur, de stress et d'agressivité des éléphants sont significativement plus élevées en présence de touristes et ces comportements se sont produits au détriment du temps d'alimentation (Ranaweerage *et al.*, 2015). Le comportement des touristes, le bruit des véhicules, les distances rapprochées et la durée des visites sont étroitement associés aux changements de comportement des éléphants. Szott *et al.* (2019) se sont livrés à une étude similaire en Afrique. Ils montrent, qu'à mesure que la pression touristique augmente, l'agression dirigée contre les individus conspécifiques augmente chez les éléphants ; les éléphants mâles étant plus susceptibles de pratiquer une agression dirigée contre individus conspécifiques que les éléphants femelles. Ils ont aussi constaté que les troupeaux d'éléphants devenaient de plus en plus susceptibles de s'éloigner avec un nombre croissant de véhicules présents. Ces résultats suggèrent que les gestionnaires de réserves devraient surveiller le comportement des éléphants pour identifier quand la pression touristique a des effets potentiels négatifs sur leur bien-être.

On observe des modifications du comportement chez des oiseaux comme la grue à couronne rouge, *Grus japonensis*, animal hautement emblématique en Asie. Li *et al.* (2017) montrent que la fréquence et la durée de la vigilance des grues augmentent considérablement en présence de touristes. La vigilance des grues diminue avec l'augmentation de la distance entre les touristes et la faune, avec une distance minimale de perturbation déclenchant un degré élevé de vigilance des grues identifiées à 300 m.

Les récifs coralliens attirent de nombreux touristes, en particulier dans les pays d'Asie du Sud-Est. Si le nombre de visiteurs peut affecter la santé d'un récif corallien, il semble que le principal facteur de risque soit lié à la présence d'infrastructures touristiques, du fait de l'altération de la qualité des eaux (apport d'éléments nutritifs, azote (N), phosphore (P), matière organique, etc.) ; les sites éloignés des infrastructures, mais très visités sont néanmoins plus pollués que les sites peu visités (Siriwong *et al.*, 2018).

4. LE TOURISME COMME FACTEUR DE PERTURBATION DANS LES AIRES PROTÉGÉES ET LES POINTS CHAUDS DE BIODIVERSITÉ

Les liens entre aires protégées et tourisme sont complexes puisque la fréquentation du public peut être considérée comme un élément de valorisation et donc de pérennité des aires protégées et, en même temps, elle est source de menaces sur la biodiversité. Canteiro *et al.* (2018) identifient quinze activités touristiques qui peuvent avoir un impact sur la biodiversité, la couverture végétale, les sols et l'eau, avec une importance variable selon les sites. L'impact des randonneurs sur les chemins de randonnée et pistes de marche sportive reste toutefois encore mal connu.

ENCADRÉ 8

Exemples d'activités touristiques pouvant impacter la biodiversité des aires protégées

Randonnées et visites / Sorties en bateau / Randonnées à cheval / Pêche sportive / VTT / Sports aquatiques non motorisés / Tourisme statique (plages) / Rassemblements / Parapente / Escalade / Spéléologie / Tout-terrain / Observation de la faune / Camping / Infrastructures et services

Ballantyne & Pickering (2015) citent les changements de couvert végétal, de composition de la flore, l'élargissement des chemins et pistes, la perte de sols et la compaction de ceux-ci. La question du passage d'impacts locaux à des impacts à l'échelle du paysage se pose. Pickering & Hill (2007) soulignent l'incidence du tourisme sur la végétation des aires protégées en Australie. On retrouve les effets du piétinement, des chevauchées, de la pratique du vélo tout terrain et du hors-pistes des véhicules à moteur. Mbaiwa (2003) rapporte les effets négatifs du développement du tourisme dans le delta de l'Okavango du fait du hors-pistes, des pollutions sonores et du mauvais traitement de déchets.

FICHE 11 - DÉMOGRAPHIE ET MALADIES INFECTIEUSES ÉMERGENTES

1. UNE ACCÉLÉRATION DES ÉPISODES D'ÉMERGENCES ÉPIDÉMIQUES

Les 40 à 50 dernières années ont été incontestablement marquées par une intensification dans l'apparition de nouveaux agents microbiens responsables de maladies infectieuses émergentes humaines (Jones *et al.*, 2008 ; Smith & Guégan, 2010) et la pandémie mondiale due au SARS-CoV2 en est une illustration.

Dans la séquence des événements infectieux humains du Néolithique à nos jours, les historiens de la santé nomment cette période récente celle de la « transition épidémiologique de l'émergence ». Cette nouvelle transition, succédant à trois à cinq autres, est conditionnée par l'augmentation des demandes agricoles mondiales – demande qui se traduit par une accélération des transformations des écosystèmes naturels, en particulier forestiers, en terres exploitables et le développement de la production agricole intensive (Guégan *et al.*, 2019). Le Brésil, l'Indonésie, mais aussi le Cameroun, en Afrique centrale, en constituent des exemples manifestes. La démographie humaine actuelle et la demande mondialisée en ressources et en biens qui l'accompagne auront des conséquences sur l'apparition de nouvelles formes d'infections, sur la transmission d'un grand nombre d'autres maladies infectieuses et leurs développements épidémiques et pandémiques. De surcroît, ces mêmes conditions seront aussi favorables au développement et à la circulation de nouveaux agents pathogènes animaux et végétaux, conduisant à des épizooties (épidémies qui frappent les animaux) plus fréquentes et plus importantes chez les animaux de rente et à des maladies de plantes affectant plus largement les denrées alimentaires d'origine végétale. L'ère actuelle de la transition de l'émergence exige une plus grande prise de conscience des futures menaces sanitaires et alimentaires, pour mieux satisfaire aux exigences de sûreté sanitaire internationale.

La synthèse des connaissances coordonnée par la FRB en avril-mai 2020 fait un état des lieux des principales questions sur ce sujet, relativement récent, d'interface entre destruction anthropique de l'environnement et maladies infectieuses (Silvain, Goffaux, Soubelet, Sarrazin, 2020). La crise Covid-19 ouvrira peut-être des perspectives d'étude sur les impacts de la démographie humaine sur l'environnement. Dans l'état actuel des connaissances, il n'existe pas de réponse à cette question.

2. ÉPIDÉMIES ET DÉMOGRAPHIE

En lien avec l'accroissement démographique humain, l'urbanisation importante, en particulier dans les régions intertropicales, exacerbe les menaces de nouvelles épidémies. De même, par la mise en contact des zones à forte biodiversité avec celles à concentration humaine importante au centre des mégalopoles (Manaus, Bangkok, etc.), le développement de l'élevage intensif et de la production vivrière, horticole et fruitière, dans les zones périurbaines, verra s'accroître le risque de nouveaux agents pathogènes inconnus jusqu'alors.

Les émergences de nouveaux agents infectieux humains observées ces 50 dernières années traduisent ainsi les tensions qui existent entre les pressions démographiques humaines et l'équilibre des écosystèmes naturels dans de nombreuses régions du monde. Elles constituent des alertes des déséquilibres actuels entre démographie et cycle originel de nombreux micro-organismes, souvent commensaux (relations entre deux organismes d'espèces différentes où un organisme bénéficie de l'autre sans l'affecter) ou symbiotiques (Guégan *et al.*, 2020). Ces nouvelles émergences sont autant de signaux qu'un grand nombre de micro-organismes sommeillent (notamment sous les effets de la démographie humaine et de la quête de nouveaux espaces naturels pour le développement de la production agricole) ; ces mêmes microbes peuvent se révéler être de futurs agents pathogènes non pas par nécessité, mais par circonstance ; celle de leurs nouveaux contacts avec une population animale ou humaine susceptible.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aassve, A. *et al*. (2021). Early assessment of the relationship between the COVID-19 pandemic and births in high-income countries. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 118(36), e2105709118. DOI:10.1073/pnas.2105709118
- Abel, G. J. (2018). Estimates of global bilateral migration flows by gender between 1960 and 2015. *International Migration Review* 52(3), 809-852. DOI:10.1111/imre.12327
- Abel, G. J. *et al*. (2019). Climate, conflict and forced migration. *Global Environmental Change* 54, 239-249. DOI:10.1016/j.gloenvcha.2018.12.003
- Abi-Rached, L. *et al*. (2011). The shaping of modern human immune systems by multiregional admixture with archaic humans. *Science* 334, 89-94. DOI:10.1126/science.1209202
- Almécija, S. *et al*. (2021). Fossil apes and human evolution. *Science* 372, eabb4363. DOI:10.1126/science.abb4363
- Alpizar, F. *et al*. (2019). *UN Environment Global Chemicals Outlook II - From Legacies to Innovative Solutions: Implementing the 2030 Agenda for Sustainable Development*. 102 pages. ISBN (print): 978-92-807-3745-5. https://orbit.dtu.dk/en/publications/un-environment-global-chemicals-outlook-ii-from-legacies-to-innov
- Andrew, R. M. (2019). Global CO_2 emissions from cement production, 1928–2018. *Earth System Science Data* 11(4), 1675–1710. DOI;10.5194/essd-11-1675-2019
- Angrist, N. *et al*. (2021). Measuring human capital using global learning data. *Nature* 592, 403–408. DOI:10.1038/s41586-021-03323-7
- ArchaeoGLOBE Project (2019). Archaeological assessment reveals Earth's early transformation through land use. *Science* 365, 897-902. DOI:10.1126/science.aax1192
- Barrett, S. *et al*. (2020). Social dimensions of fertility behavior and consumption patterns in the Anthropocene. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 117(12), 6300-6307. DOI:0.1073/pnas.1909857117
- Becerra-Valdivia, L., & Higham, T. (2020). The timing and effect of the earliest human arrivals in North America. *Nature* 584, 93–97. DOI:10.1038/s41586-020-2491-6
- Bennett, M. R. *et al*. (2021). Evidence of humans in North America during the Last Glacial Maximum. *Science* 373, 1528-1531. DOI:10.1126/science.abg7586
- Bergström, A. *et al*. (2020). Insights into human genetic variation and population history from 929 diverse genomes. *Science* 367, eaay5012. DOI: 10.1126/science.aay5012
- Bergström, A. *et al*. (2021). Origins of modern human ancestry. *Nature* 590, 229–237. DOI:10.1038/s41586-021-03244-5
- Beyer, R. M. *et al*. (2021). Climatic windows for human migration out of Africa in the past 300,000 years. *Nature Communications* 12, 4889 (2021). DOI:10.1038/s41467-021-24779-1
- Bobe, R. & Wood, B. (2021). Estimating origination times from the early hominin fossil record. *Evolutionary Anthropology*,1–11. DOI:10.1002/evan.21928
- Bongaarts J. (2016). Development: Slow down population growth. *Nature* 530, 409–412. DOI:10.1038/530409a
- Brown, K. S. *et al*. (2009). Fire as an engineering tool of early modern humans. *Science* 325, 859-862. DOI:10.1126/science.1175028
- Browning, S. R. *et al*. (2018). Analysis of human sequence data reveals two pulses of archaic Denisovan admixture. *Cell* 173(1), 53–61.e9. DOI:10.1016/j.cell.2018.02.031
- Burstein, R. *et al*. (2019). Mapping 123 million neonatal, infant and child deaths between 2000 and 2017. *Nature* 574, 353–358. DOI:10.1038/s41586-019-1545-0
- Cabanel, P. & Encrevé, A. (2006). De Luther à la loi Debré : protestantisme, école et laïcité. *Histoire de l'éducation* 110, 5-21. DOI:10.4000/histoire-education.1341
- Canfield, D. E. *et al*. (2010). The evolution and future of Earth's nitrogen cycle. *Science* 330, 192–196. DOI:10.1126/science.1186120
- Ceballos, G. *et al*. (2020). Vertebrates on the brink as indicators of biological annihilation and the sixth mass extinction. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 117(24), 13596-13602. DOI:10.1073/pnas.1922686117
- Chin G. *et al*., eds., Special Issue (2011 July 29). Population. *Science* 333, pp. 539–594. https://www.science.org/toc/science/333/6042
- Choin, J. *et al*. (2021). Genomic insights into population history and biological adaptation in Oceania. *Nature* 592, 583–589. DOI:10.1038/s41586-021-03236-5
- Cohen, J. E. (1995). Population growth and earth's human carrying capacity. *Science* 269, 341-346. DOI:10.1126/science.7618100
- Crist, E. *et al*. (2017). The interaction of human population, food production, and biodiversity protection. *Science* 356, 260-264. DOI: 10.1126/science.aal2011

- Crist, E. (2018). Reimagining the human. *Science* 362, 1242-1244. DOI:10.1126/science.aau6026
- Dasgupta, A. & Dasgupta, P. (2017). Socially embedded preferences, environmental externalities, and reproductive rights. *Population and Development Review* 43(3), 405-441. DOI:10.1111/padr.12090.
- Diagne, C. *et al*. (2021). High and rising economic costs of biological invasions worldwide. *Nature* 592, 571–576. DOI:10.1038/s41586-021-03405-6
- Eggleton, P. (2020). The state of the world's insects. *Annual Review of Environment and Resources* 45, 61-82. DOI:10.1146/annurev-environ-012420-050035
- Friedman, J. *et al*. (2020). Measuring and forecasting progress towards the education-related SDG targets. *Nature* 580, 636–639. DOI:10.1038/s41586-020-2198-8
- Galloway, T. S. *et al*. (2017). Interactions of microplastic debris throughout the marine ecosystem. *Nature Ecology & Evolution* 1(5), 0116. DOI:10.1038/s41559-017-0116
- Galway-Witham, J. & Stringer, C. (2018). How did *Homo sapiens* evolve? *Science* 360, 1296-1298. DOI:10.1126/science.aat6659
- Galway-Witham, J. *et al*. (2019). Aspects of human physical and behavioural evolution during the last 1 million years. *Journal of Quaternary Science* 34(6), 355-378 (2019). DOI:10.1002/jqs.3137
- Ganopolski, A. *et al*. (2016). Critical insolation–CO_2 relation for diagnosing past and future glacial inception. *Nature* 529, 200–203. DOI:10.1038/nature16494
- Geyer, R. *et al*. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances* 3(7), e1700782. DOI:10.1126/sciadv.1700782
- Gibb, R. *et al*. (2000). Zoonotic host diversity increases in human-dominated ecosystems. *Nature* 584, 398–402. DOI:10.1038/s41586-020-2562-8
- Gietel-Basten, S. & Sobotka , T. [Preprint] (2020). Uncertain population futures: Critical reflections on the IHME scenarios of future fertility, mortality, migration and population trends from 2017 to 2100. *SocArXiv*. September 23. DOI:10.31235/osf.io/5syef.
- Godfray, H. C. J. *et al*. (2018). Meat consumption, health, and the environment. *Science* 361, eaam5324. DOI:10.1126/science.aam5324
- Gouy, A. & Excoffier, L. (2020). Polygenic patterns of adaptive introgression in modern humans are mainly shaped by response to pathogens. *Molecular Biology and Evolution* 37(5), 1420–1433. DOI:10.1093/molbev/msz306
- Graetz, N. *et al*. (2018). Mapping local variation in educational attainment across Africa. *Nature* 555, 48–53. DOI:10.1038/nature25761
- Green, R.E. *et al*. (2010). A draft sequence of the Neandertal genome. *Science* 328, 710-722. DOI:10.1126/science.1188021
- Groucutt, H. S *et al*. (2018). *Homo sapiens* in Arabia by 85,000 years ago. *Nature Ecology & Evolution* 2(5), 800–809. DOI:10.1038/s41559-018-0518-2
- Groucutt, H. S *et al*. (2021). Multiple hominin dispersals into Southwest Asia over the past 400,000 years. *Nature* 597, 376–380. DOI:10.1038/s41586-021-03863-y
- Guégan, J.-F. *et al*. (2020). Forests and emerging infectious diseases: unleashing the beast within. *Environmental Research Letters* 15(8), 083007. DOI:10.1088/1748-9326/ab8dd7.
- Hajdinjak, M. *et al*. (2021). Initial Upper Palaeolithic humans in Europe had recent Neanderthal ancestry. *Nature* 592, 253–257. DOI:10.1038/s41586-021-03335-3
- Harris, K. & Nielsen, R. (2016). The genetic cost of Neanderthal introgression. *Genetics* 203(2), 881-891. DOI:10.1534/genetics.116.186890
- Hayward, B. & Roy, J. (2019). Sustainable living: Bridging the North-South divide in lifestyles and consumption debates. *Annual Review of Environment and Resources* 44, 157-175. DOI:10.1146/annurev-environ-101718-033119
- Hoekstra, A. Y. & Wiedmann, T. O. (2014). Humanity's unsustainable environmental footprint. *Science* 344, 1114-1117. DOI:10.1126/science.1248365
- Hulme, P. E (2021). Unwelcome exchange: International trade as a direct and indirect driver of biological invasions worldwide. *One Earth* 4(5), 666-679. DOI:10.1016/j.oneear.2021.04.015
- IPBES (2019). *Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. S. Díaz, J. *et al* (eds.). IPBES secretariat, Bonn, Germany. 56 pages. ISBN No: 978-3-947851-13-3. https://ipbes.net/global-assessment
- IPCC (2021). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., et al. (eds.)]. Cambridge University Press. In Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf

- Jouffray, J.-B. *et al*. (2020). The Blue Acceleration: The trajectory of human expansion into the Ocean. *One Earth* 2(1), 43-54. DOI:10.1016/j.oneear.2019.12.016
- KC, S. (2020). *Updated demographic SSP4 and SSP5 scenarios complementing the SSP1-3 scenarios published in 2018.* International Institute for Applied System Analysis Working Paper WP-20-016, 14 pp. Laxenburg, Austria.
- KC, S. & Lutz, W. (2017). The human core of the shared socioeconomic pathways: Population scenarios by age, sex and level of education for all countries to 2100. *Global Environmental Change* 42, 181-192. DOI:10.1016/j.gloenvcha.2014.06.004
- Lachaise D. & Silvain J.-F. (2004). How two Afrotropical endemics made two cosmopolitan human commensals: the *Drosophila melanogaster-D. simulans* palaeogeographic riddle. *Genetica* 120 (1-3), 17-39. doi: 10.1023/b:gene.0000017627.27537.ef.
- Larena, M. *et al*. (2021). Philippine Ayta possess the highest level of Denisovan ancestry in the world. *Current Biology* 31(19), 4219-4230.e10. DOI:10.1016/j.cub.2021.07.022
- Leder, D. *et al*. (2021). A 51,000-year-old engraved bone reveals Neanderthals' capacity for symbolic behaviour. *Nature Ecology & Evolution* 5(9), 1273–1282. DOI:10.1038/s41559-021-01487-z
- Lehman, C. *et al*. (2021). Ecology of the Anthropocene signals hope for consciously managing the planetary ecosystem. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 118(28), e2024150118. DOI:10.1073/pnas.2024150118
- Lewis, S. L. & Maslin, M. A. (2015). Defining the Anthropocene. *Nature* 519, 171–180. DOI:10.1038/nature14258
- Liew, J. H. *et al*. (2021). International socioeconomic inequality drives trade patterns in the global wildlife market. *Science Advances* 7(19), eabf7679. DOI:10.1126/sciadv.abf7679
- Liu, Y. *et al*. (2021). Insights into human history from the first decade of ancient human genomics. *Science* 373, 1479-1484. DOI:10.1126/science.abi8202
- Local Burden of Disease Child Growth Failure Collaborators (2020). Mapping child growth failure across low- and middle-income countries. *Nature* 577, 231–234. DOI:10.1038/s41586-019-1878-8 [1st author: Kinyoki, D. K.]
- Local Burden of Disease Educational Attainment Collaborators (2020). Mapping disparities in education across low- and middle-income countries. *Nature* 577, 235–238. DOI:10.1038/s41586-019-1872-1 [1st author: Graetz, N.]
- Lutz, W. *et al*. (1997). Doubling of world population unlikely. *Nature* 387, 803–805 (1997). DOI:10.1038/42935
- Lutz, W. (2017). Global sustainable development priorities 500 y after Luther: *Sola schola et sanitate*. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A*. 114(27), 6904-6913. DOI:10.1073/pnas.1702609114
- Lutz, W. (2020). World population trends and the rise of *Homo sapiens literata,* pp. 43-67 in: *Transformative Roles of Science in Society: From Emerging Basic Science Toward Solutions for People's Wellbeing*, 358 pp. Vatican City: Ex Aedibus Academicis in Civitate Vaticana. ISBN 978-88-7761-114-7
- Lutz, W. & Gailey, N. (2020). Depopulation as a policy challenge in the context of global demographic trends. UNDP Serbia. ISBN 978-86-7728-292-9. http://pure.iiasa.ac.at/16811
- Lutz, W. & KC, S. (2011). Global human capital: Integrating education and population. *Science* 333, 587-592. DOI:10.1126/science.1206964
- Lutz, W. *et al*. (2014). Universal education is key to enhanced climate adaptation. *Science* 346, 1061-1062. DOI:10.1126/science.1257975
- Lutz, W. *et al*. (2018). *Demographic and Human Capital Scenarios for the 21st Century: 2018 assessment for 201 countries*. Luxembourg: Publications Office of the European Union. 594 pp. DOI:10.2760/41776
- Lutz, W. *et al*. (2019a). Education rather than age structure brings demographic dividend. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 116(26), 12798-12803. DOI:10.1073/pnas.1820362116
- Lutz, W. (Ed.) *et al*. (2019b). *Demographic Scenarios for the EU—Migration, Population and Education*. Publication Office of the European Union. 89 pp. DOI:10.2760/590301. EUR 29739 EN, ISBN 978-92-76-03216-8, JRC116398
- Lutz, W. *et al*. (2021). Skills-adjusted human capital shows rising global gap. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 118 (7), e2015826118. DOI:10.1073/pnas.2015826118
- MacDonald, K. *et al*. (2021). Middle Pleistocene fire use: The first signal of widespread cultural diffusion in human evolution. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 118(31), e2101108118. DOI:10.1073/pnas.2101108118
- Marois, G. *et al*. (2020). Population aging, migration, and productivity in Europe. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 117(14), 7690-7695. DOI:10.1073/pnas.1918988117
- Marois, G. *et al*. (2021). China's low fertility may not hinder future prosperity. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 118(40), e2108900118. DOI:10.1073/pnas.2108900118
- Massilani, M. *et al*. (2020). Denisovan ancestry and population history of early East Asians. *Science* 370, 579-583. DOI:10.1126/science.abc1166

- Meyer, M. *et al*. (2012). A high coverage genome sequence from an archaic Denisovan individual. *Science* 338, 222–226. DOI:10.1126/science.1224344
- Nielsen, R. *et al*. (2017). Tracing the peopling of the world through genomics. *Nature* 541, 302–310. DOI:10.1038/nature21347
- Past Interglacials Working Group of PAGES (2016). Interglacials of the last 800,000 years. *Review of Geophysics* 54(1), 162-219. DOI:10.1002/2015RG000482
- Pavard, S. & Coste C. F. D. (2021). Evolutionary demographic models reveal the strength of purifying selection on susceptibility alleles to late-onset diseases. *Nature Ecology & Evolution* 5(3), 392–400. DOI:10.1038/s41559-020-01355-2
- Plotnick, E. & Koy, K. A. (2020). The Anthropocene fossil record of terrestrial mammals. *Anthropocene* 29, 100233. DOI:10.1016/j.ancene.2019.100233
- Pretty, J. (2018). Intensification for redesigned and sustainable agricultural systems. *Science* 362, eaav0294. DOI:10.1126/science.aav0294
- Prüfer, K. *et al*. (2021). A genome sequence from a modern human skull over 45,000 years old from Zlatý kůň in Czechia. *Nature Ecology & Evolution* 5(6), 820–825. DOI:10.1038/s41559-021-01443-x
- Rees, P. H. (2021). Education's role in China's demographic future. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 118(41), e2115618118. DOI:10.1073/pnas.2115618118
- Reich, D. *et al*. (2010). Genetic history of an archaic hominin group from Denisova Cave in Siberia. *Nature* 468, 1053-1060. DOI:10.1038/nature09710
- Riahi K., *et al*. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change* 42, 153-168. DOI:10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009
- Ricciardi, A. *et al*. (2017). Invasion science: A horizon scan of emerging challenges and opportunities. *Trends in Ecology & Evolution* 32(6), 464-474. DOI:10.1016/j.tree.2017.03.007 [Zenni, R. D. *et al*. (2017). A response to Ricciardi *et al*. *TREE* 32(11), 807-808. DOI:10.1016/j.tree.2017.08.006 – Ricciardi, A. *et al*. (2017). A Reply to Zenni et al. *TREE* 32(11), 809-810. DOI:10.1016/j.tree.2017.08.007].
- Richerson, P. J. *et al*. (2021). Modern theories of human evolution foreshadowed by Darwin's Descent of Man. *Science* 372, eaba3776. DOI:10.1126/science.aba3776
- Ripple, W. J. *et al*. (2017). World scientists' warning to Humanity: A second notice. *BioScience* 67(12), 1026–1028. DOI:10.1093/biosci/bix125
- Robinson, T. P. *et al*. (2011). Global livestock production systems. Rome, FAO and ILRI, (i)–(xiv), 1–152 pp. ISBN 978-92-5-107033-8
- Rockström, J. *et al*. (2021). We need biosphere stewardship that protects carbon sinks and builds resilience. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A*. 118(38), e2115218118. DOI:10.1073/pnas.2115218118
- Roebroeks, W. & Soressi, M. (2016). Neandertals revised. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 113(23), 6372-6379. DOI:10.1073/pnas.1521269113
- Rogelj, J. *et al*. (2018a). Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5 °C. *Nature Climate Change* 8(4), 325–332. DOI:10.1038/s41558-018-0091-3.
- Rogelj, J. *et al*. (2018b). Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development. Chapter 2 in: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., *et al*. (eds.)]. In Press. https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/chapter-2/
- Rogelj, J. *et al*. (2019). Estimating and tracking the remaining carbon budget for stringent climate targets. *Nature* 571, 335–342. DOI:10.1038/s41586-019-1368-z. [Author correction (2020): *Nature* 580, E4. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2147-6]
- Ruddiman, W. F. *et al*. (2015). Defining the epoch we live in. *Science* 348, 38-39. DOI:10.1126/science.aaa7297
- Ruddiman, W. F. *et al*. (2016). Late Holocene climate: Natural or anthropogenic? *Reviews of Geophysics* 54(1), 93–118. DOI:10.1002/2015RG000503
- Sachs, J., *et al*. (2021). *Sustainable Development Report 2021. The Decade of Action for the Sustainable Development Goals*. Cambridge University Press, 505 pp. DOI:10.1017/9781009106559
- Santos, R. G. *et al*. (2021). Plastic ingestion as an evolutionary trap: Toward a holistic understanding. *Science* 373, 56-60. DOI:10.1126/science.abh0945
- Sarrazin, F., & Lecomte, J. (2014). R59 : Peut-on dépasser l'anthropocentrisme dans nos regards sur la biodiversité ? *Société Française d'Écologie*. https://www.sfecologie.org/regard/r59-sarrazin-lecomte-anthropocentrisme/

- Sarrazin, F., & Lecomte, J. (2016). Evolution in the Anthropocene. *Science* 351, 922-923. DOI:10.1126/science.aad6756
- Scheffers, B. R. *et al*. (2019). Global wildlife trade across the tree of life. *Science* 366, 71-76. DOI:10.1126/science.aav5327
- Schmidt, I *et al*. (2021). Approaching prehistoric demography: proxies, scales and scope of the Cologne Protocol in European contexts. *Phil. Trans. R. Soc. B* 376: 20190714. DOI:10.1098/rstb.2019.0714
- Silvain J.-F., Goffaux R., Soubelet H., Sarrazin F. (2021). Mobilisation de la FRB par les pouvoirs publics français sur les liens entre Covid-19 et biodiversité. 63 pp. https://www.fondationbiodiversite.fr/wp-content/uploads/2020/05/Mobilisation-FRB-Covid-19-06-2021-Ok-FR.pdf
- Smith, K. E. *et al*. (2021). Socioeconomic impacts of marine heatwaves: Global issues and opportunities. *Science* 374, eabj3593. DOI:10.1126/science.abj3593
- Sobotka, T. *et al*. [Preprint] (2021). Baby bust in the wake of the COVID-19 Pandemic? First results from the new STFF Data Series. *SocArXiv*. March 24. DOI:10.31235/osf.io/mvy62.
- Steffen, W. (2000). *An integrated approach to understanding Earth's metabolism*. International Geosphere–Biosphere Programme (IGBP) Newsletter No. 41, pp. 9–10, 16–17. ISSN 0284-5865.
- Steffen, W. *et al*. (2004). *Global Change and the Earth System: A Planet Under Pressure*. The IGBP Book Series. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 336 pp. ISBN 3-540-26594-5
- Steffen, W. et al (2007). The Anthropocene: Are humans now overwhelming the great forces of nature? *Ambio* 36(8), 614–621. DOI:10.1579/0044-7447(2007)36[614:taahno]2.0.co;2.
- Steffen, W. *et al*. (2015). The trajectory of the Anthropocene: the Great Acceleration. *The Anthropocene Review* 2(1), 81-98. DOI:10.1177/2053019614564785.
- Steffen, W. *et al*. (2018). Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 115(33), 8252-8259. DOI:10.1073/pnas.1810141115
- Steffen, W. *et al*. (2020). The emergence and evolution of Earth System Science. *Nature Reviews Earth & Environment* 1(1), 54–63. DOI:10.1038/s43017-019-0005-6
- Stevens, C. J. (2019). Nitrogen in the environment. *Science* 363, 578-580. DOI:10.1126/science.aav8215
- Stork, N. E. *et al*. (2015). New approaches narrow global species estimates for beetles, insects, and terrestrial arthropods. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 112(24), 7519-7523. DOI:10.1073/pnas.1502408112
- Syvitski, J. P. M. & Kettner, A. (2011). Sediment flux and the Anthropocene. *Phil. Trans. R. Soc. A* 369(1938), 957–975. DOI:10.1098/rsta.2010.0329
- Teixeira, J. C. & Cooper, A. (2019). Using hominin introgression to trace modern human dispersals. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 116(31), 15327-15332. DOI:10.1073/pnas.1904824116
- Teixeira, J. C. *et al*. (2021). Widespread Denisovan ancestry in Island Southeast Asia but no evidence of substantial super-archaic hominin admixture. *Nature Ecology & Evolution* 5(5), 616–624. DOI:10.1038/s41559-021-01408-0
- UNESCO (2016). *L'éducation pour les peuples et la planète. Rapport mondial*. Résumé FR, 65 pp. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000245745_fre
- UNESCO (2020). *Résumé du Rapport mondial de suivi sur l'éducation 2020 : Inclusion et éducation : Tous, sans exception*. Paris, UNESCO. 37 pp.
- United Nations (1973). *Report of the United Nations Conference on the Human Environment, Stockholm, 5-16 June 1972*. 77 pages. New York. https://digitallibrary.un.org/record/523249/files/A_CONF.48_14_Rev.1-EN.pdf
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2019a). *World Urbanization Prospects 2018: Highlights*. (ST/ESA/SER.A/421). eISBN: 978-92-1-004313-7.
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2019b). *World Population Prospects 2019: Highlights*. (ST/ESA/SER.A/423). eISBN: 978-92-1-004235-2
- Van Vuuren D.P., *et al*. (2019). Integrated scenarios to support analysis of the food–energy–water nexus. *Nature Sustainability* 2(12), 1132–1141. DOI:10.1038/s41893-019-0418-8.
- Vaupel, J. W. *et al*. (2021). Demographic perspectives on the rise of longevity. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 118(9), e2019536118. DOI:10.1073/pnas.2019536118
- Vavrus, S. J. *et al*. (2018). Glacial inception in Marine Isotope Stage 19: An orbital analog for a natural Holocene climate. *Scientific Reports* 8, 10213. DOI:10.1038/s41598-018-28419-5
- Vollset, S. E. *et al*. (2020). Fertility, mortality, migration, and population scenarios for 195 countries and territories from 2017 to 2100: a forecasting analysis for the Global Burden of Disease Study. *The Lancet* 396 (10258), 1285-1306. DOI: 10.1016/S0140-6736(20)30677-2. Linked Articles: Ezeh, A. *et al*. (2020). Why sub-Saharan Africa might exceed its projected population size by 2100. *The Lancet* 396 (10258), 1131-1133.

DOI:10.1016/S0140-6736(20)31522-1. Abubakar, I. (2020). The future of migration, human populations, and global health in the Anthropocene. *The Lancet* 396 (10258), 1133-1134. DOI: 10.1016/S0140-6736(20)31523-3

- Wang, Z. *et al*. (2021). We need a global science-policy body on chemicals and waste. *Science* 371, 774-776. DOI:10.1126/science.abe9090
- Willerslev, E., Meltzer, D. J. (2021). Peopling of the Americas as inferred from ancient genomics. *Nature* 594, 356–364. DOI:10.1038/s41586-021-03499-y
- Zavala, E. I. *et al*. (2021). Pleistocene sediment DNA reveals hominin and faunal turnovers at Denisova Cave. *Nature* 595, 399–403. DOI:10.1038/s41586-021-03675-0