



L'appropriation des services écosystémiques

Développement et crise économique dans les limites du système-Terre

Mémoire réalisé par
Martin Dupont

Promoteur
Isabelle Cassiers

Année académique 2016 - 2017

En vue de l'obtention du titre académique de
Master(60) en sciences économiques, orientation générale

J'aimerais remercier ma promotrice, Isabelle Cassiers, pour son attention et pour sa patience à mon égard, car j'ai souvent mérité bien pire que son indulgence et ses sourires. La liberté et la confiance dont j'ai pu bénéficier avec elle au cours de mon cheminement ont été aussi précieuses que la rare ouverture intellectuelle et critique dont son enseignement gratifie le département de sciences économiques de l'UCL. Je n'aurais probablement jamais tiré un tel bénéfice personnel de ce travail et de mon passage dans la faculté en leur absence.

Merci également à ma mère pour son soutien en bout de course et pour sa relecture minutieuse.

Pardon à mes proches et honte à moi-même d'avoir été si absorbé pendant tout un été pour si peu de choses.

Et surtout, bravo à Clara d'être toujours là.

Si les causes physiques de la crise écologique contemporaine, en particulier dans sa dimension climatique, sont de mieux en mieux reconnues aujourd'hui, les analyses de ses racines et de ses conséquences économiques demeurent un champ d'investigation moins bien exploré et en tout cas, un champ de bataille conceptuel et méthodologique dans lequel les analyses, comme toujours, laissent entrevoir des projets politiques plus ou moins assumés. Sur un tel terrain, ce travail de fin de master en sciences économiques a choisi d'adopter la posture suivante : séparer, dans un premier temps, l'analyse écologique de l'analyse d'économie politique en tant que telle, afin de mener la première de la façon la plus dépassionnée possible, pour mieux y revenir ensuite.

À cette fin, le travail s'organisera en 3 parties.

La première et la deuxième partie sont similaires : partant d'un cadre d'analyse englobant développé dans des travaux récents d'écologie scientifique, une série de seuils critiques dans la perturbation de processus écosystémiques globaux déterminant le fonctionnement du système-Terre sont tout d'abord mis en évidence, laissant apercevoir les risques écosystémiques conséquents qui pèsent sur la trajectoire économique adoptée par l'humanité en ce début de vingt-et-unième siècle. Ensuite, c'est à partir de ce cadre analytique que deux processus écosystémiques régulateurs majeurs (un pour chaque partie : la perte d'intégrité de la biosphère dans la partie 1, et le changement climatique dans la partie 2) sont analysés en profondeur, mettant en avant à la fois les procédés économiques humains qui les déstabilisent et les conséquences économiques probables de leur déstabilisation.

La partie 3, en ce qui la concerne, s'intéresse à la chronologie et aux tendances lourdes impliquées par cette crise conjointement économique et écologique. Contrairement aux deux premières parties, qui se focalisent sur les risques liés au dépassement de certaines « limites planétaires », cette troisième partie s'intéresse plutôt aux risques inhérents à des limites biophysiques qu'on ne peut pas dépasser, à savoir les contraintes de ressources et de matières premières qui pèsent sur la poursuite du développement de nos économies.

3

Au cours de tout ce cheminement, c'est en particulier la notion de service écosystémique qui sera utilisée afin de visualiser l'interface entre la nature et l'économie. Elle permettra de révéler les échanges inégaux qui s'opèrent entre les écosystèmes et les systèmes économiques. Ce constat servira de vecteur à une hypothèse qui traverse tout le travail sur le rôle fondamental joué par la valeur économique « invisible » des écosystèmes dans le développement du système économique. En fin de compte, cet exercice débouche donc sur une tentative de penser conjointement le développement et les crises du système économique à l'intérieur du système-Terre

Les dernières pages du travail, enfin, tenteront pour conclure d'amener dans l'analyse quelques considérations d'économie politique indispensables à la compréhension des faits révélés par toute la réflexion écologique et économique qui précède.

Table des matières

Remerciements.....	2
Avant-propos.....	3
Table des matières.....	4
Introduction générale.....	5
1) La perte d'intégrité de la biosphère	8
1.1) Origines économiques.....	9
1.1.1) Appropriation économique par prédation dans la biosphère.....	9
1.1.2) Développement économique en dehors de la biosphère.....	9
1.1.3) Appropriation économique par domestication de la biosphère.....	12
1.2) Conséquences écologiques.....	13
1.3) Conséquences économiques.....	15
1.3.1) Ressources halieutiques.....	16
1.3.2) Pollinisation animale des cultures.....	18
1.3.3) Biodiversité médicinale.....	20
1.3.4) Fertilité des sols.....	22
2) Le changement climatique et les autres processus.....	30
2.1) Origines économiques du changement climatique.....	30
2.2) Conséquences écologiques du changement climatique.....	30
2.2.1) Boucles de rétroaction.....	30
2.2.2) Horizon de l'analyse.....	32
2.3) Conséquences économiques du changement climatique.....	33
2.4) Les autres processus écosystémiques.....	35
3) D'une chronologie à une théorie de l'appropriation.....	38
3.1) La Grande Accélération et l'Anthropocène.....	38
3.2) Les pics de ressources	42
3.3) L'appropriation comme condition du développement économique.....	46
Conclusion : l'appropriation dans un système capitaliste.....	51
Bibliographie.....	57
Annexes.....	70

De quoi la crise écologique est-elle le nom ? Quelle est la cause première des véritables désastres écologiques qui sont promis aujourd'hui aux générations futures ? De l'aveu général, l'origine du problème est connue : elle réside dans notre modèle de civilisation lui-même. De fait, au travers de l'expansion de notre population, mais aussi et surtout celle de nos activités industrielles et extractives, de l'urbanisation, du commerce, de la consommation, des transports, du tourisme... nous ne pouvons que constater le déploiement infatigable de notre propre espèce à l'échelle globale, et nous devons dans le même temps reconnaître qu'au cours de cet effort, nous nous approprions, puis transformons, consommons et rejetons finalement, en dehors du système économique, toute une série de ressources biophysiques qui nous sont devenues indispensables. Pourtant, nous le savons aussi, avant d'entrer dans le système économique et après en être sorties, toutes ces ressources occupent dans la nature une fonction spécifique et irréductible à celle qu'elles remplissent pour nous dans le cadre restreint de l'économie.

Il ne faut pas chercher plus loin les causes de la crise écologique : le déplacement de ces matières, au sein d'un système-Terre qui possède des règles qui lui sont propres, et qui sont étrangères à celles que nous avons construites en économie, alimente à long-terme des déséquilibres aux répercussions de moins en moins négligeables pour nous-mêmes. En effet dans cette totalité complexe et finie qu'est le système-Terre, les éléments biophysiques que nous percevons comme des biens sur un marché sont, avant toute chose, les parties intégrantes d'un ou plusieurs écosystèmes dont ils constituent les équilibres, et au sein desquels nous-mêmes évoluons. Au service du développement industriel, guidés par une raison prométhéenne, nous perturbons pourtant ceux-ci en coupant artificiellement les parties de leur tout, consommant et rejetant des morceaux de nature en oubliant que nos sociétés ne sont jamais autre chose que des sous-systèmes prisonniers de la nature elle-même. En somme, c'est donc notre propre capacité à faire société que nous sommes ainsi en train de détruire.

5

Mais une question essentielle doit être posée : qui se cache derrière ce « nous » qui pilote la machine ? J'ai parlé à la première personne du pluriel pendant deux paragraphes, alors qu'il n'est pas certain qu'il y ait quelqu'un qui agisse en « mon » ou en « notre » nom à l'intérieur du cockpit. Pour comprendre ce qu'il s'y passe, il conviendrait d'analyser plus en détail la boîte noire parachutée par des termes comme « développement industriel », « civilisation » ou encore « économie ». En effet, en omettant de déconstruire de telles expressions, on exclut de l'analyse les véritables logiques sociales et politiques qui conduisent à la crise. Ainsi, peut-être est-il finalement abusif de parler de l'humanité et de la science au singulier, comme si face à la menace écologique, et derrière le grand projet du développement industriel mondial, nous étions tous unis en tant qu'espèce par une seule et même raison. Il se pourrait que dans la réalité, et en particulier dans celle que « nous » promet la crise écologique, les divisions qui séparent les hommes seront (ou sont d'ores et déjà) plus fortes que leur supposée lutte commune face à une nature hostile. La façon dont l'histoire de la crise environnementale est exposée (qui la fait, qui la subit, comment et pourquoi) est à elle seule un enjeu politique. Ceux qui la racontent doivent donc se demander de qui ils parlent et à qui ils s'adressent, en chassant les abus de langage et les impensés dont ils sont la conséquence.

Indéniablement, sur un plan strictement technique, c'est dans l'expansion démographique et économique débridée de l'espèce humaine qu'il faut chercher les causes de la crise écologique contemporaine. Néanmoins, si l'on veut comprendre la nature socio-politique de ces expansions et de cette crise pour tenter de s'y adapter, il faut aussi, et peut-être même avant tout, s'interroger sur

leurs racines sociologiques et historiques, et sur la manière dont se répartissent entre les hommes leurs responsabilités, leurs dommages et leurs bénéfices. A défaut, on ne peut que se méprendre sur l'origine de cette crise, car les pires accomplissements de la « raison prométhéenne » sont loin d'être ceux de toute une espèce.

Soit. Mais il faut commencer par le commencement. Car rien qu'en affirmant que la crise écologique annonce de véritables désastres, et que l'homme est la cause première de ceux-ci, j'ai déjà conclu beaucoup trop rapidement. À l'heure où le gouvernement le plus puissant de la planète nie officiellement l'origine anthropique du changement climatique, soutenant que l'émission de dioxyde de carbone n'est pas sa cause principale (Mufson 2017) et où seuls 27% de la population américaine pensent qu'il existe un consensus scientifique solide sur la question (Funk & Kennedy 2016)¹, deux faits élémentaires doivent être rappelés avant toute chose : le réchauffement climatique et la crise écologique sont des réalités physiques et économiques plus préoccupantes que jamais, et elles sont le fait direct du développement de l'activité humaine sur la planète. Dans un tel contexte, parler à la première personne en considérant comme explicatives des notions qui devraient elles-mêmes être critiquées, telles que « l'activité humaine » ou « le développement économique », ne constitue qu'un moindre mal dans un premier. En effet c'est cette démarche qui permet, avant d'aller plus loin, de prouver la vérité commune que la gravité de la crise écologique impose de mettre au jour. Ce n'est que dans les dernières pages de ce travail que cette première vérité pourra alors être confrontée à ses propres insuffisances, en étant passée au crible de la critique historique et de la justice sociale.

Concentrons-nous donc pour commencer sur le climat, et rappelons deux faits établis réitérés par le GIEC dans son dernier rapport : 1) la hausse mesurée de la concentration dans l'atmosphère des principaux gaz à effet de serre que sont le dioxyde de carbone, le méthane et le protoxyde d'azote, est une conséquence directe de la croissance de l'activité économique humaine sur la planète au cours des décennies précédentes (GIEC 2014, p. 4) ; 2) il est *extrêmement probable* (entre 95 et 100% de probabilité) que ces gaz soient la cause principale du réchauffement climatique observé depuis le milieu du vingtième siècle (ibid, p. 5). À cette cause principale, il faut additionner une série d'autres facteurs qui sont, eux aussi, d'origine anthropique (comme la déforestation). En effet la participation de la nature au réchauffement climatique est quant à elle évaluée aujourd'hui comme étant quasi-nulle, voire négative (cf. annexe 1). Rappelons que les auteurs du GIEC ne conduisent aucune recherche spécifique pour rédiger leur rapport : ils se contentent de synthétiser les résultats de la recherche scientifique existante qui est, en effet, virtuellement unanime sur la question – 97% des articles scientifiques publiés soutiennent la thèse de l'origine anthropique du réchauffement climatique (Cook & al. 2013). Sans détours, le GIEC conclut donc que « l'influence de l'homme sur le système climatique est clairement établie » et que les changements qu'il a provoqués ont déjà eu « de larges répercussions sur les systèmes humains et naturels » (GIEC 2014, p. 2). Sans rentrer dès à présent dans les détails, on peut noter ici que la perturbation de l'équilibre climatique par l'homme est à ce point sérieuse qu'elle est aujourd'hui considérée, de manière générale, comme l'un des deux processus naturels qui possède *à lui seul* le potentiel pour faire basculer l'entièreté du « système-Terre »² vers un état d'équilibre différent de celui qu'il a connu au cours des douze derniers

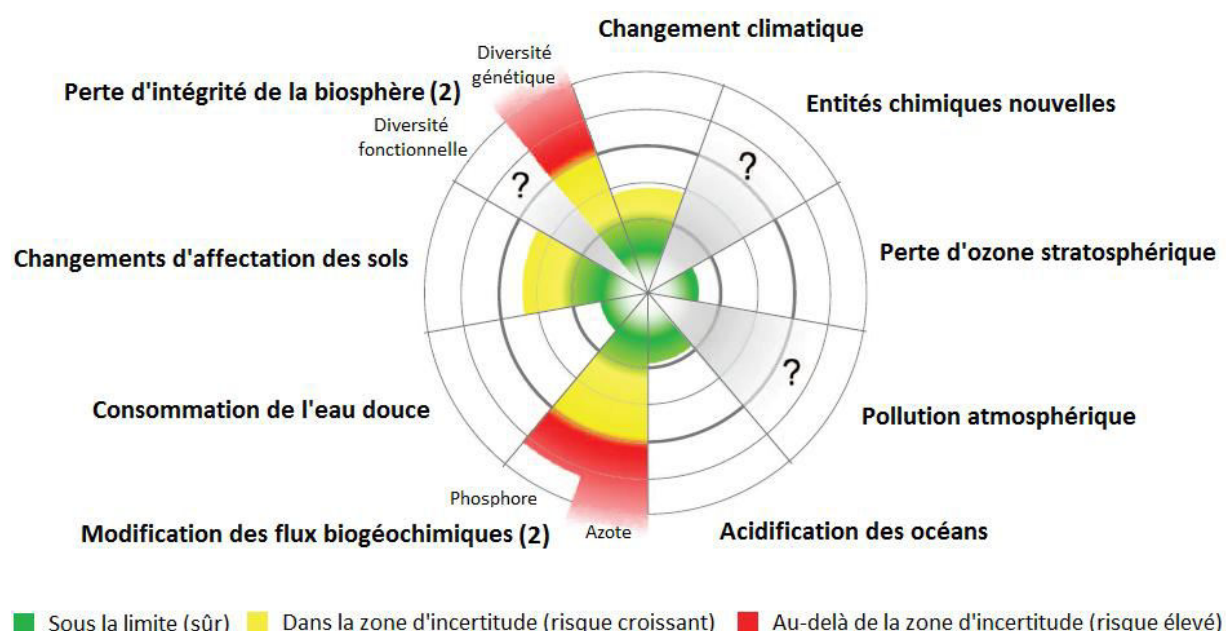
¹ Ce n'est pas le peuple américain mais plutôt les groupes d'intérêt qui entretiennent, à travers des réseaux institutionnalisés d'influence, le doute sur la réalité et la gravité de la crise écologique qui sont à blâmer pour ce « trait culturel » étasunien (Dunlap & McCright 2011 ; Farrell 2015).

² Le système-Terre désigne la totalité complexe formée par l'interaction des diverses sphères de phénomènes naturels (atmosphère, géosphère, hydrosphère, biosphère...) qui s'interpénètrent à l'échelle locale, régionale

millénaires – le second processus naturel de ce genre étant la perturbation du monde biologique (Steffen & al. 2015b). Or cet équilibre vieux de douze mille ans, qui correspond à l'entrée de la planète dans la période géologique de l'«Holocène», est le seul ensemble de régularités écologiques que nous savons capable avec certitude de supporter le développement des sociétés humaines dans leur forme contemporaine. En effet depuis le début de notre Histoire et jusqu'à aujourd'hui, malgré tous nos progrès technologiques, la nature nous a toujours rendu un ensemble de services essentiels sinon indispensables à la conduite des activités économiques qui assurent notre bien-être le plus basique (MEA 2005 ; TEEB 2010). Cette base fondamentale subit cependant de profonds dommages et le changement climatique, notamment, joue un rôle central dans ces transformations : il n'est jamais qu'une expression consacrée pour désigner la perturbation de toute une série de cycles naturels qui régulent directement le fonctionnement des écosystèmes (températures saisonnières de l'air, des eaux et des sols, cycle du carbone, cycle de l'eau et précipitations, courants océaniques...) et forment donc le support même de notre économie, bien qu'ils soient sur le point d'être modifiés de façon irréversible.

Figure 1 : Processus écologiques et leurs limites planétaires

Source : Steffen & al. 2015b



Au-delà du climat et de la biosphère, c'est un total de onze processus écologiques régulateurs d'importance systémique qui ont ainsi été identifiés par une équipe internationale de chercheurs (Rockström & al. 2009, Steffen & al. 2015b). Ceux-ci sont visibles sur la figure 1. En fonction du processus considéré, sa déstabilisation individuelle peut avoir des conséquences plus ou moins rapides et néfastes pour le système-Terre en général, et l'échelle de son application est variable. Néanmoins, chacun de ces processus doit en théorie rester relativement stable si l'on souhaite éviter des bouleversements écologiques majeurs à long terme, car ils sont tous liés les uns avec les autres. Huit sur les onze ont déjà pu faire l'objet d'une évaluation quantitative permettant de déterminer une zone de sécurité, une zone d'incertitude et une zone d'alerte nous informant sur le niveau actuel de perturbation du processus par rapport à son état naturel d'origine. Dès lors qu'un processus

ou globale. Il constitue donc un ensemble d'équilibres biophysiques dynamiques, pour certains planétaires, pour d'autres plus localisés, sur lesquels repose le fonctionnement des écosystèmes (Kump & al. 2008).

quitte sa zone de sécurité (en vert) pour rentrer dans sa zone d'incertitude (en jaune), la perte de la fonction régulatrice qu'il exerce en ce moment pour le système-Terre (donc pour nous et nos économies) devient possible, et celle-ci est de plus en plus probable à mesure qu'on se rapproche de la zone d'alerte (en rouge). Une fois entré dans celle-ci, une déstabilisation radicale est hautement probable à plus ou moins long terme, sans qu'il soit forcément possible d'évaluer précisément le moment de la rupture et le nouveau type d'équilibre écologique qui prévaudra ensuite. Comme on le voit, trois processus régulateurs sont déjà rentrés en zone d'alerte (c'est le cas de la perte d'intégrité de la biosphère) et deux autres se situent dans leur zone d'incertitude (c'est le cas du climat).

Pour ces cinq processus, la limite planétaire, à savoir le niveau au-delà duquel il ne fallait pas perturber le processus sous-jacent si l'on voulait pouvoir être certain de ne pas voir se modifier à l'avenir les régularités écologiques qu'il détermine aujourd'hui, a donc déjà été franchie³. Or la recherche contemporaine nous rappelle l'indéniable responsabilité que nous avons dans ces transgressions, ainsi que la gravité des troubles écologiques et économiques qui leur est associée. Dressons un état des lieux détaillé pour deux des cinq phénomènes en question, à savoir les deux que nous avons déjà épinglés comme ayant une importance particulière : la perte d'intégrité de la biosphère et le changement climatique. D'autres seront ensuite évoqués à titre exemplatif.

1) La perte d'intégrité de la biosphère

La perte d'intégrité de la biosphère est la combinaison de trois choses : 1) la diminution du degré de *biodiversité*, c'est-à-dire du nombre d'espèces vivantes différentes au sein de l'ensemble des populations animales et végétales⁴ ; 2) la perte de *biomasse* naturelle en général, à savoir la diminution du volume global de toutes ces populations, peu importe l'espèce et son niveau de conservation⁵ et enfin ; 3) la perte des *interactions fonctionnelles* qui lient ces êtres vivants entre eux dans la nature, et qui disparaissent en même temps qu'eux (cf. infra). Sous n'importe quel angle, l'expansion économique de l'espèce humaine apparaît aujourd'hui comme le facteur premier de cette perte d'intégrité puisque nous tendons à détruire, de manière plus ou moins directe, les conditions de reproduction des autres formes de vie dans les écosystèmes investis par nos activités économiques (Wood & al. 2013 ; WWF 2016). On peut ainsi distinguer trois types d'interventions économiques humaines qui ont des effets délétères sur le monde biologique.

³ Sur la figure 1, la limite planétaire est la ligne qui sépare la zone verte de la zone jaune (c'est-à-dire la borne inférieure de la zone d'incertitude du processus considéré). Plus précisément, pour chaque processus, elle est une valeur mesurée dans l'écosystème pour la ou les variables de contrôle qui ont été retenues comme les plus adéquates par les chercheurs pour juger du niveau de variabilité du processus dans son ensemble (cf. annexe 2). Par exemple, pour le climat, la variable de contrôle retenue a été la concentration de CO₂ atmosphérique, et la valeur de sa limite planétaire a été évaluée à 350 molécules de CO₂ par million de molécules d'air (ppm). Or nous avons aujourd'hui dépassé le cap des 400 ppm (Dlugokencky & al. 2014 ; Ramonet & Delmotte 2016).

⁴ C'est ce critère qui a d'abord été retenu comme variable de contrôle pour mesurer le risque lié à la perte d'intégrité de la biosphère dans son ensemble (Rockström et al. 2009). En effet, la diminution du degré de biodiversité représente une menace majeure pour les capacités futures d'adaptation de la vie biologique au sein du système-Terre. La variable de contrôle retenue a donc été le taux d'extinction, mesuré en nombre d'extinctions par an pour un million d'espèces. La valeur de la limite planétaire était ici de 10 extinctions d'espèces par an pour un million d'espèces, et nous sommes aujourd'hui *au minimum* au-delà de 100 (Steffen & al. 2015b ; Ceballos & al. 2015). Cependant, en plus de la perte de biodiversité *génétique* que cette variable mesure, dans les derniers travaux, une autre variable de contrôle a été ajoutée : la perte de biodiversité *fonctionnelle* (cf. infra).

⁵ La quantité de biomasse n'est cependant pas à elle seule un indicateur de qualité écologique : elle peut aussi traduire un déséquilibre comme c'est le cas avec l'eutrophisation (cf. infra).

1.1) Origines économiques

1.1.1) Appropriation économique par prédation dans la biosphère

La menace anthropique peut d'abord être tout à fait directe lorsque c'est l'appropriation des ressources fournies par les populations sauvages elles-mêmes qui est le but visé par l'activité économique dans le secteur primaire⁶. C'est le cas pour les végétaux, avec l'exploitation du bois⁷ et d'autres matières, et pour les animaux, avec la chasse et la pêche⁸. Dans ces différents cas de figure, on peut donc parler d'*appropriation par prédation*, puisque ce sont bien les autres êtres vivants eux-mêmes qui sont arrachés à leur milieu naturel pour être intégrés dans le système économique.

1.1.2) Développement économique « en dehors » de la biosphère

Mais en second lieu, la pression économique humaine sur le reste du monde biologique peut aussi être le résultat plus indirect de multiples activités poursuivant un autre but que l'appropriation du vivant en tant que telle. Celles-ci vont néanmoins générer *comme sous-produit* une transformation fatale du milieu biologique, s'exprimant par la destruction de l'habitat naturel (qui est, dans l'ensemble, le premier facteur de la perte de biodiversité (WWF 2016)) ou par son invasion par des espèces étrangères et des substances perturbatrices ou pathogènes. Ce second type d'interférence est le plus répandu parmi nos activités économiques (en tout cas au prisme de leur importance monétaire). Il s'illustre tout d'abord, dans le secteur primaire, par notre régime d'extraction des

⁶ Le secteur primaire est ici vu comme la part de l'économie regroupant toutes les activités d'extraction et de production directe des matières premières, vivantes ou non vivantes (pas seulement l'agriculture, l'exploitation forestière, la pêche et l'élevage donc, mais aussi l'exploitation minière). Le secteur secondaire comprend quant à lui toutes les activités de transformation de ces matières (« l'industrie » au sens premier du terme) et le secteur tertiaire, toutes les activités économiques restantes, ne faisant pas partie des deux premiers secteurs (globalement, l'industrie des services).

⁷ Notre consommation globale de bois n'a jamais été aussi haute qu'aujourd'hui : elle équivalait à 108m³ par seconde en 2015 (FAOSTAT 2017). Cette consommation repose en petite partie sur des forêts gérées par l'homme afin de produire du bois en quantité renouvelable, mais avant tout, là où c'est encore possible, sur l'appropriation directe du bois venant des forêts naturelles existantes. Ces arbres représentent une quantité colossale de biomasse végétale qui disparaît chaque année, et les écosystèmes qui disparaissent avec eux constituent des réserves presque irremplaçables de biomasse et de biodiversité. En conséquence, il ne reste plus de nos jours en Europe aucune forêt primaire (c'est-à-dire de forêt n'ayant pas ou presque pas été perturbée par l'action humaine) à part quelques massifs isolés en Europe de l'Est et en Scandinavie. À l'échelle mondiale néanmoins, les réserves de bois naturel directement appropriables demeurent importantes. Globalement, on estime qu'entre 15 et 18 millions d'hectares de forêts primaires disparaissent chaque année dans le monde (FAO 2016a ; Hansen & al. 2013) ce qui équivaut à 5 ou 6 fois la superficie de la Belgique tous les ans (et le calcul prend en compte la croissance des forêts naturelles et la reforestation humaine, qui atténuent donc la perte bien que la densité et la diversité biologique des milieux replantés soit sans commune mesure avec celle des forêts primaires qui disparaissent). L'appropriation directe du bois (et des autres produits forestiers) n'est cependant pas le seul facteur de cette déforestation (cf. infra).

⁸ En 2016, selon la FAO, 89.05% des stocks de poisson étaient soit pêchés, surpêchés, éteints ou récupérant de la surpêche. Nous pêchons à un rythme beaucoup trop intense pour que les stocks de poissons puissent se reproduire durablement (un tiers des poissons sont pêchés à des rythmes insoutenables biologiquement) et néanmoins, la consommation mondiale de poisson continue d'augmenter (FAO 2016b) ce qui en combinaison avec d'autres facteurs, laisse craindre une disparition massive voire totale des poissons en milieu naturel, peut-être d'ici deux ou trois décennies (Hutchings & Reynolds 2004 ; Worm & al. 2006 ; McCauley & al. 2015). À titre d'illustration, en comparaison avec le début de l'ère industrielle, plus de 90% de la biomasse initiale des grands poissons, dont nous pêchons les proies, a déjà disparu aujourd'hui des océans (Jackson 2008).

matières premières (matériaux de construction⁹, ressources minières¹⁰ et combustibles fossiles¹¹ confondus) mais surtout, dans les secteurs secondaires et tertiaires, par la production des infrastructures et des différents biens de consommation à laquelle ces matières sont destinées, et

⁹ Le sable et les agrégats rocheux employés dans la construction constituent le type de matériaux le plus massivement arraché à la nature par l'homme chaque année (environ la moitié de la masse de tous les matériaux extraits soit près de 40 milliards de tonnes sur une année (Schaffartzik & al. 2014)). Avec le déclin des ressources terrestres, ces matériaux sont maintenant essentiellement puisés dans les écosystèmes aquatiques (rivières et zones côtières ou maritimes). Bien que les conséquences de l'exploitation de ces milieux soient camouflées, elles sont énormes : l'extraction et le dragage du substrat détruisent directement les écosystèmes et les organismes qu'ils abritent et entraînent la perte et la dégradation de l'habitat terrestre suite à l'érosion des côtes et des bassins de rivières. La diminution de la quantité de sédiments qui circule dans l'environnement et la perturbation des chaînes trophiques qui s'ensuivent menacent des écosystèmes entiers, et la perte nette de biomasse et de biodiversité liée à ces activités est donc significative (Pitchaiah 2017).

¹⁰ Depuis les années 90, la production mondiale de métaux et de terres rares a atteint des niveaux sans précédent – environ 6.5 milliards de tonnes de minerais extraits pour l'année 2010 (Bihouix & de Guillebon 2010 ; Alonso & al. 2012 ; Mayer & al. 2016). Or les techniques d'extraction et de traitement de ces éléments minéraux sont connues pour leur caractère perturbateur : la déforestation et les excavations massives nécessaires à l'exploitation des gisements détruisent les habitats ; au cours de l'extraction et du traitement in situ, on utilise des substances particulièrement toxiques qui terminent leur course dans la nature (cyanide, acide sulfurique...) ainsi que des quantités énormes d'eau douce qui sont ainsi détournées des écosystèmes ; tandis que les éléments métalliques eux-mêmes se propagent dans l'environnement, contaminant l'air ambiant et les cycles de l'eau et des nutriments. Ces perturbations sont des menaces directes pour la faune et la flore, et la biodiversité est sévèrement touchée dans les écosystèmes investis (Jain & al. 2016). De telles menaces sont certes relativement localisées, mais les substances libérées se diffusent à une large échelle et les accidents (comme la catastrophe de Minas Gerais au Brésil en 2015) en démultiplient les impacts, qui touchent aussi cruellement les populations locales. De surcroît, la naissance d'activités d'extraction en haute mer, promises à un fort développement face aux signaux de pics des gisements terrestres et à une demande mondiale toujours en expansion, devrait étendre le problème aux écosystèmes d'eau profonde. En effet l'exploitation des fonds océaniques qui regorgent de certains métaux (or, nickel, cobalt...) est aujourd'hui possible, mais les techniques d'extraction sont délétères : elles ratisseront directement le substrat et détruiront l'habitat alors que ces écosystèmes sont les derniers à n'avoir pas encore été véritablement perturbés par l'homme, et qu'ils hébergent d'énormes réserves de biodiversité très fragiles qui connaîtront des dommages irréversibles (Van Dover & al. 2017).

¹¹ Malgré le développement des énergies vertes, notre consommation d'énergie fossile n'a jamais été si élevée qu'aujourd'hui, et elle continue d'augmenter en même temps que celle de l'énergie en général (BP 2017). Or l'extraction et l'acheminement du charbon, du pétrole et du gaz a des impacts semblables à celui des autres matières premières sur les écosystèmes, entraînant leur destruction et leur fragmentation ainsi qu'une part de pollution chimique inévitable et des perturbations sismiques importantes, avec des pertes subséquentes de biodiversité que ce soit sur terre ou en mer (Butt & al. 2013). En outre, de même qu'avec les minerais, l'industrie fossile répond aussi au pic annoncé du flux de ressources conventionnelles par le développement de techniques écologiquement plus nocives. En effet la part des pétroles et gaz dits « non conventionnels » (sables bitumineux, gaz et pétroles de schiste) croît au sein du mix énergétique, et ceux-ci sont appelés à un développement suivi dans les années à venir si la demande mondiale d'énergie continue d'augmenter. Or, leur exploitation implique une déforestation, des déplacements de terrain, un usage d'eau douce, une pollution atmosphérique et une contamination de l'eau et des sols par des substances toxiques qui n'a pas d'équivalent dans l'extraction des ressources conventionnelles. Les écosystèmes locaux sont donc directement détruits à une large échelle lors de l'exploitation, et les boues toxiques qui s'accumulent sur place ont une période de décantation de plusieurs siècles et sont donc fort susceptibles de polluer les nappes phréatiques et de libérer leurs substances (plomb, arsenic, mercure...) dans l'écosystème global depuis les rivières et les sols jusqu'à l'océan, ce en quoi elles s'ajoutent aux pertes collatérales de la ressource elle-même, qu'il n'est pas possible de récupérer dans sa totalité lors de l'extraction et du raffinage (un septième de tout le pétrole produit à partir des sables bitumineux en Alberta est rejeté dans l'environnement). Les conséquences pour le vivant sont évidentes bien qu'elles soient encore mal comprises dans leurs interactions : asphyxie, intoxication par bioaccumulation ou disparition pure et dure des populations suite à celle de l'habitat (Rosa & al. 2017 ; TAMEST 2017 ; Grant & al. 2013 ; Grant & al. 2015).

qui constituent le support de nos économies de services. En effet l'urbanisation¹², le développement des réseaux de transports et la construction d'infrastructures productives (comme par exemple les barrages hydroélectriques¹³ mais aussi de nombreux autres équipements industriels) contribuent à détruire, fragmenter ou homogénéiser l'habitat naturel, entraînant des pertes de biomasse et de biodiversité dans les écosystèmes. Les biens de consommation industriels, quant à eux, libèrent en masse des substances perturbatrices dans la nature (par exemple les gaz à effet de serre¹⁴ mais aussi une multitude d'autres substances plus directement toxiques encore) et monopolisent d'importantes quantités de ressources biophysiques au cours de leur cycle de production et d'utilisation, détournant celles-ci des écosystèmes. Cette consommation et ces déchets tendent, de près ou de loin, à perturber l'habitat et à entraver la reproduction de la vie dans son milieu naturel. C'est le cas pour des secteurs productifs dont le caractère polluant et intensif en ressources est évident, comme les transports motorisés, mais aussi pour des produits apparemment plus propres, comme les nouvelles technologies¹⁵ ou les dérivés pétrochimiques les plus courants – typiquement, les plastiques et textiles synthétiques¹⁶.

¹² Une étude menée sur plus de 50 villes pour les oiseaux, et plus de 100 villes pour les plantes, a montré que la densité des espèces (le nombre d'espèces au km²) plonge en milieu urbain : seuls 8% des espèces natives d'oiseaux et 25% des espèces natives de plantes y sont recensées en comparaison avec les estimations faites pour le même milieu en l'absence d'urbanisation (Aronson & al. 2014).

¹³ La construction d'infrastructures hydroélectriques connaît un essor considérable depuis quelques années (Zarfl & al. 2014), or l'hydroélectricité et la construction de barrages par l'homme de manière générale a un important coût écologique : « Contrairement à ce que disent les promoteurs des grands barrages, ils ne constituent pas une source d'énergie renouvelable. Ils ont altéré 60 % des rivières et des cours d'eau du monde. De leur fait, les écosystèmes d'eau douce voient disparaître espèces et habitats plus vite que n'importe quel autre écosystème. » (Monabay, cité par Magdelaine 2016).

¹⁴ Le réchauffement climatique aggrave en effet la perte d'intégrité de la biosphère. Dans l'état actuel, on estime que 2,8% des espèces vivantes vont s'éteindre à cause du réchauffement des températures. Mais si le scénario « business-as-usual » d'émissions de gaz à effet de serre se confirmait (avec au moins +4.3°C en 2100, cf. point 1.2) c'est une espèce sur six qui risquerait alors l'extinction du seul fait du réchauffement des températures, et cette proportion irait jusqu'à une sur quatre en Amérique du Sud (Urban 2015).

¹⁵ Au-delà du bilan carbone de l'usage des nouvelles technologies (équivalent voire supérieur à celui de l'industrie aéronautique) le traitement des déchets informatiques et des déchets électroniques en général constitue aujourd'hui un enjeu environnemental majeur. À l'échelle globale, la quantité de déchets électroniques produite chaque année est comprise entre 40 et 50 millions de tonnes (Baldé & al. 2015) et on estime que moins de 30% de ceux-ci sont traités selon les normes environnementales en vigueur, et seuls 12,5% effectivement recyclés. Or ces déchets sont particulièrement nocifs : aux États-Unis, bien qu'ils ne représentent que 2% de la masse enfouie dans le sol ou emmagasinée dans les décharges, ils totalisent 70% de la toxicité (EPA 2011). Par la contamination de l'air, des eaux et des sols depuis leurs lieux de traitement ces déchets électroniques diffusent en effet dans les écosystèmes une pollution toxique sous la forme de métaux lourds et persistants (non-biodégradables) comme le plomb, le cadmium, le lithium ou le mercure, qui s'accumulent dans la biosphère et circulent tout le long des chaînes trophiques, entraînant l'empoisonnement et/ou la disparition de la faune et la flore (l'homme n'étant pas épargné en bout de chaîne) (McAllister 2013).

¹⁶ Les textiles synthétiques constituent en fait le déchet que nous rejetons de la manière la plus massive dans les océans, sans nous en rendre compte : en effet à chaque lavage des vêtements synthétiques, des fibres plastiques microscopiques finissent dans l'eau et sont rejetées vers les écosystèmes aquatiques car elles ne sont pas récupérées par les stations de filtrage. De nombreux morceaux de plastique de plus grosse taille sont par ailleurs à la dérive dans les océans, et ceux-ci sont responsables de la mort de nombreux animaux qui les confondent avec de la nourriture. Les micro-plastiques par contre ne sont pas mortels mais s'accumulent le long des chaînes trophiques. Ainsi une étude américaine de 2015 réalisée sur différents étals de marchés permet de se rendre compte de l'ampleur de la situation actuelle. À Makassar (Indonésie), des débris plastiques ont été retrouvés dans 28% des poissons. Sur les marchés californiens, 25% des poissons et 33% des

1.1.3) Appropriation économique par domestication de la biosphère

Néanmoins, le troisième et dernier type d'intervention invite à ne jamais sous-estimer le poids du secteur primaire dans la perte d'intégrité de la biosphère, car il surpasse vraisemblablement les deux derniers réunis en termes d'impacts biophysiques. En effet, à la base même de nos économies, dans les domaines de l'agriculture¹⁷ et de l'élevage¹⁸ (ou même de l'aquaculture), l'homme endommage aussi la biosphère en la *domestiquant*, remodelant directement à cette fin le milieu et les formes de vie qui le peuplent. Ici, cette transformation n'est plus un sous-produit, mais bien l'objectif explicite et paradoxal de l'activité économique : le but visé est de favoriser le renouvellement de certaines formes de vie bien précises au cours du temps, en vue de perpétuer leur appropriation économique, mais au prix de transformations écologiques qui s'avèrent nocives pour la reproduction de la vie dans son ensemble. Ce type « hybride » d'intervention humaine dans la biosphère (à la fois préservateur et prédateur, qu'on pourrait voir comme une forme de colonisation) suppose en effet la destruction des habitats précédents afin d'y installer un cadre écologique propice seulement aux formes de vie que l'homme s'approprie (et encore, ce cadre s'avère même nocif pour ces formes de vie elles-mêmes, comme on le verra plus bas). Au total, de telles activités *d'appropriation par domestication* constituent la menace la plus importante pour le monde biologique en termes physiques malgré leur poids monétaire très réduit dans l'économie mondiale (moins de 6% du PIB pour l'agriculture et l'élevage en 2016 (CIA 2016)). De même, à travers les trois types d'intervention distingués ci-dessus, force est de constater que le secteur primaire dans son ensemble (toutes activités productives et extractives confondues) contribue à la perte d'intégrité de la biosphère dans une mesure totalement disproportionnée par rapport à sa part dans le PIB (pas plus de 10% de l'économie mondiale en 2016 (Banque Mondiale 2017) contre une pression biophysique catastrophique bien décrite dans les notes 7, 8, 9, 10, 11, 17, 18 et dans les points 1.2 et 1.3). Il ne s'agit pas de masquer ici le fait que l'expansion économique humaine dans les secteurs secondaires et tertiaires, c'est-à-dire

12

coquillages étaient concernés. Au total, 67% des espèces vendues contenaient des débris plastiques (Rochmann & al. 2015)

¹⁷ L'agriculture cause environ 70% de la perte de biodiversité terrestre. En particulier, l'expansion des cultures dans les prairies, les savanes et les forêts contribue fortement à cette perte le défrichage en vue de la mise en place de zones de pâture ou de culture étant la première cause de la déforestation et de la destruction de l'habitat naturel en général à l'échelle mondiale (TEEB 2015). L'usage des pesticides employé dans l'agriculture industrielle est également une cause majeure : en réalité, une toute petite partie des espèces touchées par les pesticides, soit, moins de 0,5% de celles-ci, est visée initialement par leur application, mais la toxicité et « l'efficacité » de ces produits détruit une part énorme de la biomasse et de la biodiversité qu'ils ne visaient pas à supprimer au départ (ibid.). Les fertilisants qui sont utilisés pour augmenter le rendement des plantes sont par ailleurs responsables d'une augmentation sans précédent du nombre de zones mortes dans les écosystèmes aquatiques, qui a été multiplié par 500 en quarante ans (Noone & al. 2012). Enfin l'agriculture est de loin la première industrie consommatrice d'eau douce de l'humanité, avec des conséquences radicales sur les écosystèmes dont elle détourne cette ressource vitale (Hoekstra & Mekkonen 2012).

¹⁸ Si on enlève les terres gelées et désertiques, environ la moitié de la surface des terres émergées sur la planète (51 millions de km²) est aujourd'hui employée pour l'agriculture ou l'élevage. Au sein de cette moitié, 77% (soit 40 millions de km²) sont utilisées directement ou indirectement pour la reproduction du bétail, c'est-à-dire soit comme zones de pâture, soit comme zones de cultures agricoles produisant de quoi le nourrir. (WWF 2016). Une autre statistique sur l'élevage: aujourd'hui, seuls moins de 2% environ de toute la biomasse des mammifères terrestres serait encore faite d'animaux sauvages, les plus de 98% restants étant constitués de populations directement prises en charge par l'homme, c'est-à-dire lui-même, son bétail et ses animaux domestiques (Smill 2011, estimations pour l'an 2000).

apparemment « en dehors » de la biosphère¹⁹, a aussi des conséquences physiques significatives sur le monde biologique. Néanmoins, force est de constater qu'il existe une asymétrie frappante entre d'un côté, l'impact des activités du secteur primaire sur la biosphère, de loin le plus lourd, et d'un autre côté, la part de leur production de valeur économique dans le calcul du PIB, de loin la plus réduite.

1.2) Conséquences écologiques

En résumé, les conséquences générales de toutes ces interventions économiques humaines sur la biosphère peuvent être mesurées par quelques chiffres. La perte de biodiversité, pour commencer, est aujourd'hui tellement rapide que le taux contemporain d'extinction des espèces vivantes (faune et flore confondue) a été évalué à très certainement plus de 100 fois (Ceballos & al. 2015) et probablement 1000 fois celui qui aurait cours sans nous dans la nature (De Vos & al. 2014). Ainsi, si l'on isole juste les animaux vertébrés, le nombre documenté d'espèces éteintes en milieu naturel au cours du seul vingtième siècle (477) aurait vraisemblablement dû mettre, en l'absence de l'homme, entre 8000 et 10 000 ans pour disparaître (Ceballos & al. 2015). Du point de vue des populations, la tendance est la même : 32% de toutes les espèces animales étudiées sont en déclin en nombre d'individus et en étendue géographique (Ceballos & al. 2017) et chaque année, le nombre total d'animaux vertébrés sauvages sur la planète baisse en moyenne de 2% (WWF 2016).²⁰ De surcroît, que ce soit du point de vue des extinctions d'espèces ou de leur déclin, les rythmes atteints actuellement sont non seulement plus élevés que jamais, mais aussi en phase d'accélération (Cardinale & al. 2012). La double perte de la diversité génétique et de la densité de sa distribution au sein de la biosphère (de moins en moins de populations de moins en moins répandues) s'intensifie donc, et elle s'accompagne d'un autre problème : au sein des écosystèmes, lorsque des espèces déclinent ou disparaissent, elles le font rarement seules.

13

En effet, dans la nature, chaque perte biologique est susceptible d'en entraîner une autre, et de générer ainsi des perturbations dans le reste de l'écosystème. Ces pertes en série qu'on appelle en écologie des *effets de cascade* peuvent avoir lieu de deux manières : soit à travers la toile du réseau alimentaire, lorsque par exemple la disparition d'une population de proies induit celles de ses prédateurs (Sanders & al. 2013) ; soit à travers des réseaux parallèles, où ce ne sont plus des rapports de prédation qui entrent en jeu, mais plutôt des mutualismes ou des parasitismes horizontaux entre les êtres vivants (Dunn & al. 2009). Ces relations peuvent engager un nombre élevé d'espèces et de groupes d'espèces et surtout, elles peuvent parfois contribuer au fonctionnement de l'écosystème lui-même, auquel cas on dit qu'elles remplissent une *fonction écologique*. À titre d'exemples, voici quelques fonctions écologiques communément remplies par la biosphère : produire de la biomasse, polliniser les semences, effectuer le mélange du sol, modifier l'écoulement de l'eau, disperser les graines, fixer l'azote, consommer d'autres organismes, décomposer la biomasse, faciliter la colonisation et la réorganisation du milieu.... Dans le cas où des interactions biologiques entre différents organismes supportent effectivement une fonction écologique dans ce genre, la perte de

¹⁹ Cette idée est bien sûr superficielle : d'une part nous faisons nous-mêmes, en tant qu'êtres humains, partie de la biosphère, et d'autre part même dans nos villes et derrière nos ordinateurs, nous sommes toujours en fin de compte rattachés économiquement à l'appropriation plus ou moins directe de la biosphère non-humaine par le tissu distendu des échanges qui s'étendent depuis le secteur primaire jusqu'au consommateur final. Où que nous agissions économiquement sur la planète, le vivant en tout cas au départ, n'est donc jamais bien loin.

²⁰ Ce qui ne veut pas dire que les invertébrés soient épargnés, au contraire : deux tiers des populations d'invertébrés suivies par les scientifiques sont en déclin, de 45% en moyenne (Dirzo & al. 2014).

ces interactions peut alors aller jusqu'à altérer la productivité et les caractéristiques physiques du milieu, et mettre en péril l'équilibre de tout celui-ci²¹. En général, les fonctions écologiques ne sont cependant pas l'apanage de la biosphère : elles peuvent aussi être supportées par des interactions avec des substances inorganiques dans le cadre de processus écologiques qui dépassent le monde biologique en tant que tel (par exemple, la pollinisation des semences ou la dispersion des graines peut très bien être effectuée par l'action du vent, qui joue lui-même un rôle dans de multiples autres processus écosystémiques, participant à remplir d'autres fonctions écologiques encore que celles reprises ici). La déstabilisation de fonctions écologiques est donc un problème transversal qui touche tous les processus écosystémiques considérés sur la figure 1, et pas juste la perte d'intégrité de la biosphère.

Néanmoins, c'est ce problème spécifique que tente de capturer, sur la figure 1, la subdivision du processus de perte d'intégrité de la biosphère en deux sous-processus, liés mais distincts : d'un côté perte de diversité *génétique* (chute de la biodiversité entre les espèces et au sein des espèces, via le déclin progressif des populations) ; de l'autre perte de diversité *fonctionnelle* (disparition des fonctions écologiques assurées par les espèces en interaction). Bien qu'il soit encore difficile de quantifier précisément cette seconde menace, notamment parce qu'elle est spécifique aux écosystèmes et aux fonctions écologiques considérées, on pense que les espèces qui disparaissent ou qui déclinent perdent en fait des interactions avec leurs voisins dans la majorité des cas (80%) et que ces effets de cascade (ou « coextinctions ») sont même plus rapides et plus brusques en général que les extinctions elles-mêmes (Valiente-Banuet & al. 2014). Cela ne veut pas nécessairement dire qu'une fonction écologique est menacée par chaque coextinction, mais on constate en tous les cas qu'au plus un milieu est divers, au plus la stabilité et la performance des fonctions écologiques qu'il remplit est élevée (Cardinale & al. 2012 ; TEEB 2010). Bien que non reprise dans la figure 1, qui envisage des risques globaux, la probabilité d'une perte définitive ou d'une détérioration sévère des fonctions écologiques remplies par la biosphère est donc d'ores et déjà tout à fait considérable en de nombreuses régions localisées du globe (Steffen & al. 2015b).

14

En somme, le maintien d'un minimum de biodiversité au sein des populations animales et végétales qui peuplent le monde biologique, avec les interactions fonctionnelles qui les lient, est donc crucial non seulement pour l'intégrité de la biosphère, mais aussi pour celle du système-Terre dans son ensemble : un seuil minimal de diversité génétique est ce qui permettra en dernière instance à la partie vivante de la planète de continuer à évoluer et à s'adapter de la façon la plus résiliente possible à l'avenir face à des chocs non-biologiques – dont la gravité et la fréquence augmenteront avec le changement climatique (cf. infra) – et un minimum de diversité fonctionnelle est ce qui empêchera que ne s'effondrent les multiples interdépendances locales par lesquelles s'opèrent actuellement les échanges d'énergie et de matière qui sous-tendent le fonctionnement des écosystèmes. Et pourtant, les tendances actuelles sont claires : il devient de moins en moins probable que ces minimums vitaux puissent être maintenus à terme, et il est donc de plus en plus probable que les équilibres constitutifs du système-Terre tel que nous le connaissons soient eux-

²¹ Comme par exemple lorsque l'effondrement en série des populations de certains pollinisateurs, perturbe la reproduction des plantes à un point tel que les animaux dépendant eux-mêmes de ces plantes voient leur population décliner, et que les rendements agricoles humains s'en trouvent impactés (Lever & al. 2014) tandis qu'à cause de la perte de densité végétale, la température, l'humidité et la structure des sols du milieu se voient eux-mêmes modifiés en conséquence (Anderson & al. 2011).

mêmes, dans un futur plus si lointain, impactés de manière catastrophique par la dégénérescence qui est à l'œuvre dans le monde biologique (Barnosky & al. 2012 ; McDougall & al. 2013 ; Steffen & al. 2015b). En effet, il est à prévoir que tels impacts ne seront pas des réponses linéaires, mais bien des changements brusques et imprévisibles. Autrement dit, les pertes liées à la dégradation de la biosphère ne seront pas graduelles et proportionnelles à cette dégradation elle-même : l'équilibre général d'un écosystème peut être maintenu de façon résiliente pendant un certain temps malgré une dégradation accrue, puis tout d'un coup, s'effondrer brusquement sous le coup d'effets de cascade accélérés, car la vitesse du changement dans un écosystème augmente avec la perte de biodiversité (Cardinale & al. 2012). De tels phénomènes de rupture seront d'autant plus brusques qu'il est particulièrement difficile de repérer scientifiquement les signes avant-coureurs de ces effondrements, malgré d'importantes avancées récentes dans ce domaine (Servigne & Stevens 2015).

1.3) Conséquences économiques

Menace de premier plan pour le système-Terre, de tels risques d'effondrements au sein de la biosphère annoncent également, en toute logique, des périls majeurs pour notre système économique. En effet de nombreuses fonctions écologiques remplies par les êtres vivants nous rendent ce qu'on appelle en économie des *services écosystémiques*, à savoir des bénéfices directs ou indirects que nous retirons du fonctionnement naturel d'un écosystème, et qui ont parfois une valeur économique irremplaçable mais qui sont susceptibles de se détériorer ou de disparaître en même temps que les êtres et les écosystèmes qui les performant (Méral 2016). Les fonctions écologiques (ou écosystémiques) précédemment décrites sont donc le support des services écosystémiques eux-mêmes. Théoriquement, tous les services écosystémiques sont nécessairement reliés à des fonctions écologiques, mais toutes les fonctions écologiques ne fournissent pas forcément des services écosystémiques. En fait, la condition pour qu'une fonction écologique soit reconnue comme intervenant dans un service écosystémique est simplement que la valeur directe ou indirecte de cette fonction soit reconnue économiquement par l'homme. C'est une des raisons pour lesquelles il a été difficile jusqu'ici de dresser un inventaire consensuel des services écosystémiques dont nous bénéficions : ceux-ci sont aussi nombreux que notre dépendance à l'égard de l'écosystème est importante, et il est donc possible d'en reconnaître un nombre indéfini, mais cette reconnaissance est un exercice toujours en cours, avec des méthodes d'évaluation parfois très différentes (cf. infra).

Les services écosystémiques sont donc un concept fondamental pour concevoir l'interface entre le domaine de l'écologie et celui de l'économie. Néanmoins, pour beaucoup d'économistes encore, qui tendent à pratiquer une analyse ne prenant pas directement en compte les phénomènes ayant lieu en dehors de la sphère des échanges marchands, ces échanges entre l'homme et la nature ne sont pas reconnus comme étant du ressort de l'analyse économique à proprement parler. Il importe donc maintenant d'aller à l'encontre de cette vue en examinant quelques exemples de services écosystémiques mis en péril par la perte d'intégrité de la biosphère, et dont la perte ou la dégradation pourrait générer dans le futur (ou génère d'ores et déjà) des impacts significatifs sur notre économie, en montrant au passage que de tels problèmes sont de toute évidence du domaine de la science économique.

Avant de commencer, notons que par souci de concision, je ne me concentrerai ici que sur les bénéfices *économiques et écologiques* que nous retirons de ces services écosystémiques. En effet les

travaux majeurs sur la question (MEA 2005 ; TEEB 2010) distinguent trois grandes catégories d'apports des services écosystémiques aux hommes : non seulement des bénéfices « économiques » (au sens de strictement monétaires) mais aussi des bénéfices écologiques et des bénéfices socio-culturels. En pratique, la dimension socio-culturelle sera ici largement gardée en dehors de mon analyse tandis que les dimensions écologiques et « économiques » s'entrecroiseront en fait inextricablement dans ma description des problèmes matériels rencontrés dans l'économie, et ne seront séparées analytiquement que par des unités de compte (biophysiques pour la première, monétaires pour la seconde). C'est en fait, une autre définition de ce qui est « économique » ou non qui est ici en jeu, et qui vise à considérer l'interface entre les systèmes économiques et les systèmes naturels comme le réel domaine de l'économie, et comme l'objet légitime de la science économique. Cette approche prévaudra autant pour l'analyse de la biosphère que pour celle des phénomènes qui suivront (changement climatique et autres processus). Dans ce contexte, j'utiliserai fréquemment (comme cela a déjà été le cas plus haut) des indicateurs et des méthodologies pourtant controversées et limitées pour pratiquer une telle analyse, tels que le PIB ou des modèles néo-classiques d'équilibre général, utilisant le marché comme unique référence économique. C'est un choix délibéré : j'emploierai ceux-ci non pas pour leur intérêt théorique, mais plutôt malgré lui, pour ce qu'ils permettent de dire en négatif sur la science et le système économique dominants. En effet on verra que d'une part même tous ces instruments de mesure et de calcul a priori déconnectés de la réalité écologique sont aujourd'hui forcés de révéler, dans la langue même parlée par le système économique, son addiction aux services invisibles des écosystèmes qu'il malmène, et que d'autre part ils vont me permettre de mettre en lumière la contradiction fondamentale entre la façon dont le système économique comptabilise la valeur de la nature, et la façon dont il l'utilise pour se développer (une contradiction qui n'est pas une entrave mais un moteur).

16

Cela étant, je vais maintenant traiter dans le détail le cas de quatre services écosystémiques supportés spécifiquement par la biosphère, afin de montrer la façon dont leur perte ou leur dégradation peut se répercuter sur l'économie : a) la reproduction des ressources halieutiques en milieu naturel ; b) la pollinisation animale des cultures humaines ; c) la diversité biochimique des composants médicinaux naturels pour le marché pharmaceutique et ; d) la fertilité des sols agricoles.

1.3.1) Ressources halieutiques

On peut tout d'abord s'inquiéter de la possibilité de reproduction biologique à moyen terme (2-3 décennies)²² de ce qu'on appelle les « ressources halieutiques », c'est-à-dire tous les poissons et les autres animaux aquatiques (coquillages, crustacés, mollusques) qui rentrent dans notre alimentation. En effet, à l'heure actuelle, ces animaux sont sérieusement menacés de disparition par une combinaison de facteurs qui se renforcent les uns les autres (acidification, pollution et réchauffement des eaux²³, phénomènes d'hypoxie²⁴ et surtout, surpêche (cf. note 8)) et qui ne

²² Tout au cours de cette analyse, ce que j'entends par court/moyen/long terme sont les échelles de temps suivantes : court terme – moins d'une décennie ; moyen terme – deux ou trois décennies au maximum ; long terme - d'ici la fin du siècle.

²³ Dans certaines régions (par exemple la côte nord-ouest de l'Amérique du Nord), l'acidification de l'océan a déjà des impacts mortels sur les populations de certains crustacés et coquillages importants sur le plan commercial, car elle les empêche de former leurs coquilles ou leurs carapaces. La pollution quant à elle, se présente sous des formes variées, qui interagissent avec des effets encore très mal connus mais probablement délétères, qui impacteraient non seulement la reproduction des ressources mais aussi leur qualité sanitaire. Le réchauffement de l'océan en ce qui le concerne a des impacts sur la distribution des espèces et sur les réseaux

montrent tant qu'à présent aucuns signes d'atténuation²⁵. Or la reproduction annuelle de ces ressources supporte à l'échelle mondiale via l'industrie de la pêche, entre 140 et 260 millions d'emplois selon les estimations (FAO 2016b ; Teh & Sumaila 2013)²⁶ tandis que la valeur économique totale de cette industrie se situe entre 220 et 235 milliards de dollars par an (Noone & al. 2012 ; Sumaila & al. 2016)²⁷. En cas de déclin radical des pêcheries, en particulier suite à une probable disparition massive des poissons, des conséquences économiques non-négligeables seraient donc à prévoir, mais lesquelles ? Comme il n'existe pas d'études économétriques sur le sujet, il est difficile d'apporter une réponse quantitative précise. On peut donc se faire une idée des risques encourus en analysant rapidement l'histoire économique du secteur halieutique, qui est celle du développement alterné de deux types d'interventions économiques différentes afin de produire la même ressource : *appropriation par prédation* (pêche) et *appropriation par domestication* (aquaculture).

En quelques lignes, cette histoire est la suivante : après une croissance soutenue pendant les années d'après-guerre, le volume mondial de la capture de poissons en milieu sauvage (qui jusque-là, était virtuellement la seule forme de production de la ressource halieutique) a cessé d'augmenter à partir de la fin des années 1980. Ce volume a depuis, atteint un plateau oscillant autour des 90 millions de tonnes annuelles, mais n'est jamais plus parvenu à croître malgré une intensification (subsidée²⁸) de la surpêche (FAO 2016b). La demande mondiale n'ayant cependant pas cessé d'augmenter depuis lors, on a donc assisté à un développement spectaculaire de l'aquaculture pour continuer à satisfaire la consommation humaine de poisson (cf. annexe 4). Ainsi, alors que la part de poissons issus de l'élevage ne représentait que 7% de notre alimentation en 1974, elle est devenue majoritaire depuis 2014, et cette proportion est appelée à croître plus encore dans les années à venir en même temps qu'une demande mondiale qui continue de s'intensifier (ibid).

17

alimentaires de certaines pêcheries, avec une migration vers des plus hautes latitudes et des eaux plus profondes, avec des retombées sur les captures de nombreuses nations côtières (Noone & al. 2012).

²⁴ L'hypoxie est une conséquence de l'eutrophication, c'est-à-dire du sur-enrichissement des eaux par des nutriments et de la matière organique. Celle-ci se traduit par une désoxygénisation du milieu aquatique dans les zones de rejet de ces matières, créant ce qu'on appelle des « zones mortes » où la vie animale devient impossible sous l'eau à cause de l'absence d'oxygène. Bien que localisées, ces zones peuvent atteindre des proportions énormes, et leur nombre documenté augmente d'année en année (Noone & al. 2012). Se reporter au point 1.4 pour plus de détails.

²⁵ Plus de 40% des écosystèmes marins doivent déjà aujourd'hui faire face en même temps à au moins deux de ces cinq menaces (Noone & al. 2012) et les risques pesant sur la reproduction des pêcheries sont donc bien réels, y compris à moyen terme. En effet, les impacts de la surpêche dans certaines parties du globe se font déjà percevoir : c'est le cas en Méditerranée ou dans la Mer Noire, où les quantités pêchées annuellement connaissent un déclin marqué depuis 25 ans, et la situation devrait en toute logique gagner de plus en plus de zones de pêche dans le futur si les tendances actuelles continuent (FAO 2016b).

²⁶ Ces chiffres diffèrent selon qu'on tente ou non d'intégrer la pêche de proximité, souvent non commerciale, dont le poids est difficilement estimable avec précision. En outre, ces estimations prennent en compte non seulement la pêche mais aussi tous les emplois liés qu'elle génère (de la mise en conserve du poisson à la gestion de la chaîne de production, en passant par la construction de navires et d'infrastructures), or la part de ceux-ci ne peut être qu'estimée approximativement, car les statistiques de l'ILO les regroupent sous des catégories hétéroclites.

²⁷ Pêche et activités liées comprises. Cette industrie ne représente dès lors, en termes économiques, qu'une fraction très réduite du PIB mondial (0,3% environ) mais en termes humains, une part disproportionnément grande de l'emploi et de la subsistance, surtout si on prend en compte la pêche de proximité. Ainsi en incluant aussi l'aquaculture, et en dépassant la question de l'emploi ou du revenu en tant que tels, 12% de la population mondiale au total dépendrait aujourd'hui directement de la reproduction (naturelle ou domestiquée) des ressources halieutiques pour subsister sur un plan matériel (FAO 2016b).

²⁸ Cf. Sumaila & al. 2012.

Partant de ce constat d'une possibilité de substitution entre les deux types de production de la ressource halieutique, si l'on veut tenter de savoir ce qui pourrait arriver *ex post* sur un plan économique si la totalité des pêcheries disparaissaient dans le futur, il faudrait donc imaginer un monde dans lequel toute notre consommation de poisson serait satisfaite par l'aquaculture²⁹. Dans une telle situation, trois considérations suggèrent des perturbations économiques probables : 1) d'une part les prix des poissons élevés en aquaculture sont, structurellement, bien plus élevés que la moyenne des prix historiques des poissons pêchés en milieu naturel – 4 à 5 fois plus chers pour la majorité des variétés, et la tendance est à la hausse (Villasante & al. 2013, estimations pour 2010) ; 2) d'autre part l'aquaculture, aujourd'hui bien développée, génère pourtant presque trois fois moins d'emplois que la pêche pour une même quantité produite (FAO 2016b) et enfin ; 3) l'aquaculture nécessite un investissement en capital plus élevé que la pêche et est en partie de ce fait caractérisée, au contraire de la pêche, par un environnement compétitif oligopolistique (Villasante & al. 2013). Elle est donc bien moins accessible à la population comme source de revenu ou comme moyen direct de subsistance, dans des conditions où la reconversion effective est en général très dure pour un pêcheur devant abandonner son activité : en effet le coût d'opportunité de la pêche est bas pour la majorité des individus qui la pratiquent, à cause d'un manque d'emplois alternatifs (Sumaila & al. 2012). À terme, il est donc concevable que la disparition des ressources halieutiques en milieu naturel impacte le reste de l'économie à travers une augmentation du chômage, ainsi qu'une hausse sectorielle des prix, dont les effets subséquents sur l'économie seront incertains,³⁰ tandis que la subsistance (voire la sécurité alimentaire) de nombreuses populations serait très probablement, quant à elle, mise en péril en même temps que leur mode de vie (FAO 2016b).

1.3.2) Pollinisation animale des cultures

18

La pollinisation animale des cultures est le fruit d'un mutualisme entre certaines plantes que nous cultivons et de petits animaux (essentiellement des insectes, mais aussi des oiseaux et d'autres petits vertébrés) qui tout en se nourrissant, transportent le pollen des organes mâles de ces plantes vers leurs organes femelles (ou vers ceux d'autres plantes), permettant ainsi leur reproduction³¹. Or de nombreuses populations de ces animaux pollinisateurs (en particulier les abeilles) sont aujourd'hui en déclin, et de plus en plus d'espèces s'éteignent ou sont menacées d'extinction (2 sur 5 selon un rapport récent (IPBES 2016)³². Pourtant la pollinisation animale influence, à des degrés divers, la productivité ou la qualité d'environ 75% des types de semences les plus importantes en agriculture.³³ Au total, sans elle, on estime que 5 à 8% de la production agricole globale serait perdue (Potts & al. 2016) et qui plus est, pas la partie la moins lucrative de celle-ci : comparée aux variétés de semences non-dépendantes à l'égard de la pollinisation, la valeur marchande des variétés dépendantes est en

²⁹ En laissant de côté la question pourtant cruciale de savoir si une telle situation est *juste* ou même *physiquement possible* sur un plan social et écologique.

³⁰ Cela dépendra des secteurs et surtout, des réactions des consommateurs face à la hausse des prix. Le poisson a des biens substitués. Néanmoins, comme on le verra plus bas, l'éventualité de pressions futures simultanées sur les différents marchés alimentaires (du fait même de la perte d'autres services écosystémiques supportés par la biosphère) ne présage rien de bon de ce côté-là non plus.

³¹ Cette interaction n'est certes qu'une forme de pollinisation parmi d'autres, mais pour certaines espèces de plantes, elle est vitale. Parmi les plantes pollinisées par les animaux, on compte la plupart des fruits, des semences et des fruits à coque, ainsi que certaines cultures à haute valeur ajoutée telles que le café ou le cacao.

³² Essentiellement sous le coup des pesticides diffusés dans l'environnement par l'agriculture industrielle.

³³ Et au plus les pollinisateurs sont divers, au plus le rendement des cultures s'améliore (Potts & al. 2016).

moyenne cinq fois supérieure (Gallai & al. 2009). Par ailleurs, une fois produites, l'usage économique de ces variétés ne se limite pas, comme on pourrait le croire, à l'industrie agroalimentaire : à l'exception du bois, une étude de cas a montré qu'en Inde, 40% de toutes les marchandises végétales commercialisées dans des secteurs aussi divers que la médecine et les matériaux de construction (Rehel & al. 2009) bénéficiaient à un certain degré de la pollinisation animale au cours de leur production, tandis qu'en Europe par exemple, la production de biofuels pollinisés par les animaux a augmenté de 4,2 millions d'hectares (32%) entre 2005 et 2010 (Potts & al. 2016).

Schématiquement, on peut donc appréhender l'impact d'une disparition des pollinisateurs sur l'économie en simulant des pertes de productivité dans les différents secteurs de la production agricole, et en pondérant l'ampleur de ces pertes selon la dépendance de chaque secteur à l'égard de la pollinisation. L'output du secteur peut alors diminuer de façon plus ou moins importante, et le choc subi se propager au reste de l'économie avec des conséquences variables selon le type de produit. Une étude économétrique récente a tenté d'effectuer cette analyse avec un modèle d'équilibre général (Bauer & Wing 2016) et il est donc possible de donner une estimation monétaire des conséquences de la perte de ce service écosystémique. Dans l'hypothèse – certes tranchée – d'une perte brutale de la fonction de pollinisation animale dans toutes les régions du globe en même temps, le choc pour l'économie globale, toutes autres choses restant égales, serait alors le suivant : pour les producteurs agricoles, la perte directe d'output serait plus que compensée par la hausse des prix liée à la raréfaction de l'offre, et ceux-ci verraient en moyenne leur revenu augmenter (de 4% en moyenne, c'est-à-dire de 23 milliards de dollars en valeur agrégée). Mais pour le reste de l'économie mondiale, les conséquences seraient lourdes : celle-ci accuserait en effet sur l'année une perte de 1,25% du PIB du fait de la hausse des prix – c'est-à-dire une amputation de 443 milliards de dollars de la valeur ajoutée (Bauer & Wing 2016, estimations pour l'année 2004).

19

Cette estimation est loin d'être parfaite, notamment parce qu'elle n'intègre pas les stratégies de substitution que pourraient mettre en œuvre les producteurs pour répondre à la disparition des pollinisateurs, et qu'elle estime les impacts de cette disparition sur la structure de l'économie contemporaine alors que celle-ci n'est susceptible d'avoir lieu que plusieurs années dans le futur, avec d'autres caractéristiques structurelles probables pour l'économie mondiale. Par ailleurs elle considère des pertes brutales et globalisées, alors que dans la réalité, celles-ci seraient vraisemblablement plus progressives et inégalement distribuées. Néanmoins, des pertes brutales étant tout à fait probables à une certaine échelle, elle montre bien la sous-estimation de notre dépendance à l'égard de ce service écosystémique, et les conséquences probables de sa perte. En outre, elle a l'avantage de calculer la valeur économique de la pollinisation à partir de la « lost production value » qu'elle entraîne, ce qui évite d'autres types de calculs plus nébuleux. Et étant donné la difficulté chronique qu'ont toujours eue les économistes de prédire l'évolution de l'économie mondiale sur le long terme, effectuer cette estimation pour la structure de l'économie actuelle est peut-être en fin de compte l'approche la moins hasardeuse.

Si un tel scénario d'effondrement brutal peut paraître irréaliste à l'échelle globale, il ne faut pas sous-estimer la crédibilité d'effondrements localisés, susceptibles de se multiplier à l'avenir et de produire des effets économiques semblables. Ainsi aujourd'hui déjà, suite à la disparition des populations d'abeilles dans certaines régions de Chine, il a été nécessaire, pour y maintenir la production de pommes de faire *remplacer celles-ci par des travailleurs humains*, pollinisant les semences *au pinceau* (Goulson 2012). À un tel jeu, les abeilles sont plus compétitives que les hommes : on voit mal

comment de telles pratiques pourraient se généraliser sans entraîner au minimum une hausse sectorielle des prix, ou à défaut des pertes productives.

On voit donc, avec ces deux exemples, que des pertes liées à la dégradation ou à la disparition d'un service écosystémique supporté par la biosphère dans le secteur primaire peuvent se transmettre au reste de l'économie avec des impacts démultipliés. Économiquement, malgré leur indépendance apparente à l'égard du monde biologique, les secteurs secondaires et tertiaires de l'économie seront donc touchés indirectement par les problèmes écologiques directs rencontrés dans le secteur primaire, et ce de façon plus que proportionnelle. Néanmoins, il n'y a pas que le secteur primaire qui peut être directement touché.

1.3.3) Biodiversité médicinale

En effet, la perte d'intégrité de la biosphère peut aussi avoir un impact immédiat sur le développement de certains secteurs de pointe, comme par exemple l'industrie pharmaceutique. En effet, la nature constitue un large réservoir de diversité moléculaire permettant aux scientifiques de découvrir et de développer, par la récolte de composants naturels et par la synthèse de molécules qui s'en inspirent, des traitements pour soigner les maladies humaines.³⁴ Malgré des décennies de recherche et de « bioprospection », il est évident qu'il reste encore, dans la nature, énormément de composants aux applications prometteuses qui peuvent être découverts (Singh & Pelaez 2008 ; KPMG 2011) et pourtant, aujourd'hui plus que jamais, la diversité chimique grâce à laquelle de tels progrès seraient possibles disparaît en même temps que les organismes biologiques qui lui donnent corps. Le risque de voir disparaître des remèdes futurs en même temps que les espèces vivantes est donc bien réel.³⁵ Mais au-delà de ce que la recherche médicale et la santé humaine elle-même ont à y perdre, cette diminution de la diversité biochimique peut aussi constituer une importante perte de revenus futurs pour l'industrie pharmaceutique qui en dépend : sur les dix médicaments les plus prescrits aux États-Unis aujourd'hui, la moitié sont produits à partir de composants d'origine végétale ou animale et à l'échelle globale, le marché des médicaments issus de végétaux pèse près de 33 milliards de dollars, avec un taux de croissance annuel de 11% (Global Data 2017).³⁶

20

³⁴ Ainsi, sur les six dernières décennies, les trois quarts des substances médicales découvertes permettant de lutter contre le cancer ont été issues d'organismes naturels (Newmann & Cragg 2007) (deux tiers à partir de plantes tropicales selon le U.S. National Cancer Institute) et par exemple en ce qui concerne la leucémie, les ingrédients obtenus et synthétisés à partir d'une espèce de pervenche poussant uniquement à Madagascar ont permis d'augmenter les chances de survie des enfants atteints par cette maladie de 20 à 80%. Dans l'ensemble, des molécules tirées d'organismes biologiques ont eu et ont toujours aujourd'hui une importance primordiale pour traiter des troubles de santé aussi graves que la malaria, les problèmes de cœur, le diabète, la tuberculose ou la dysenterie, ainsi que d'autres affections moins sévères. Elles forment en outre la base de nombreuses substances médicales telles que des anesthésiants, des hormones, des enzymes, des antibiotiques ou des antiseptiques (Global Data 2017).

³⁵ Au vu des rythmes d'extinction actuels, une estimation suggère ainsi que la planète pourrait être en train de perdre un médicament majeur tous les deux ans (Groombridge & Jenkins 2000). La pervenche mentionnée plus haut, par exemple, est aujourd'hui éteinte à cause de la déforestation fulgurante que subit l'île de Madagascar.

³⁶ Les médicaments d'origine naturelle en général représentent cependant une part de moins en moins grande du marché dans son ensemble (aujourd'hui minoritaire) car les produits purement synthétiques n'ont fait que gagner du terrain ces dernières années (BEROE 2011). Néanmoins cela n'enlève rien au fait que de nombreuses molécules synthétiques sont calquées sur des molécules naturelles, ni à celui qu'en matière de recherche et développement, la récolte de nouveaux matériaux biologiques et la compréhension des interactions microbiennes dans leur milieu naturel est une condition essentielle pour continuer à développer et

Il y a quelques années, une étude s'intéressant plus spécifiquement à la biodiversité marine et à la médication contre le cancer, a ainsi tenté d'évaluer la valeur économique pour ce segment de l'industrie pharmaceutique de toutes les substances chimiques encore inconnues qui sont présentes à l'heure actuelle dans des êtres vivants sous-marins (animaux ou végétaux). L'étude estime en effet que plus de 90% des substances chimiques présentes dans les organismes marins (plusieurs centaines de milliers de substances) n'ont pas encore été découvertes par la recherche. Plus précisément, concernant le calcul de valeur, ce qui est estimé ici est donc la *valeur actuelle nette* de ces substances pour l'industrie pharmaceutique, avec un taux d'actualisation qui varie entre 15 et 2 pourcents³⁷.

Résultat, même en prenant l'estimation la moins généreuse des réserves de biodiversité marine existante, la valeur commerciale attendue de ces substances à l'avenir varierait au minimum entre 563 et 1453 milliards de dollars (Erwin & al. 2010), c'est-à-dire entre 7 et 18 fois la valeur annuelle des revenus bruts engendrés par la vente de médicaments contre le cancer en 2015, et entre 0,5 et 1,5 fois celle de tous ceux vendus cette même année sur le marché pharmaceutique (Statista 2017)³⁸. Or on sait à quel point la menace qui pèse sur l'habitat et les espèces sous-marines est sérieuse : il n'existe pratiquement plus, en mer, d'écosystème à n'avoir pas encore aujourd'hui été perturbé par l'homme, et les déclin de population (non seulement des organismes visés par la pêche (cf. supra) mais aussi des autres) y augmentent rapidement, annonçant probablement dans les années à venir, une vague d'extinctions d'espèces comparable à celle rencontrée sur terre au cours des deux derniers siècles (McCauley & al. 2015). On peut dès lors s'attendre à des pertes substantielles de valeur économique – et potentiellement, de vies humaines – dans la médication contre le cancer dans le futur, et ce d'autant plus si on prend en compte la disparition rapide des forêts tropicales (L'écosystème forestier qui disparaît le plus massivement à l'échelle globale (Hansen & al. 2013) dont les réserves de biodiversité se sont aussi prouvées cruciales pour ce secteur (cf. note 34)). Avec ce dernier cas d'étude, on constate donc que la perte d'intégrité de la biosphère ne touche pas que des industries primaires à faible valeur ajoutée comme l'agriculture ou la pêche, mais aussi l'un des secteurs parmi les plus lucratifs de l'économie. Ainsi le taux de rendement de Roche, la plus grosse entreprise vendeuse de médicaments contre le cancer (et aussi la 3^{ème} entreprise pharmaceutique au monde) était de 23% en 2015 (Statista 2017).

21

Comme pour les deux cas traités précédemment, la perte du service écosystémique qui vient d'être examinée ici (à savoir, la mise à disposition gratuite par la nature des composants médicinaux les

commercialiser des médicaments innovants dans le futur. Un environnement biologique qui perd de sa richesse et de sa diversité est donc bien un problème économique pour les firmes : la recherche en laboratoire ne permet pas systématiquement de mettre au jour par elle-même l'existence et les propriétés de certains composants circulant dans la nature ; et toutes les substances actives naturelles ne peuvent pas toujours être répliquées par la chimie de synthèse (KPMG 2011).

³⁷ Ainsi selon l'étude, la valeur actuelle nette d'un nouveau médicament contre le cancer (quels que soient ses constituants, naturels ou non) représentait en moyenne, sur l'ensemble de son cycle de vie commercial, une somme d'entre 10,3 et 26.6 milliards de dollars de revenus bruts pour l'industrie pharmaceutique (en fonction du taux d'actualisation) avec un coût de développement de 1,318 milliard de dollars et une durée de vie du brevet de 11 ans.

³⁸ Et cette valeur actualisée pourrait, au total, grimper jusqu'à 5690 milliards de dollars au maximum, avec le taux d'actualisation le plus bas et l'estimation des réserves de biodiversité marine les plus élevées, soit 72 fois la valeur annuelle des ventes de médicaments contre le cancer, et plus de 5 fois celle des ventes de toute l'industrie pharmaceutique (Statista 2017).

plus divers) n'était *qu'un exemple parmi d'autres* de services que nous sommes susceptibles de voir se dégrader suite à la perte d'intégrité de la biosphère. Au bout du compte, on peut donc s'attendre à ce que l'addition de nombreuses dégradations du même type produise des dégâts significatifs pour l'économie, selon le schéma désormais connu : des pertes marchandes disproportionnées par rapport à la valeur productive brute perdue au départ. Néanmoins, on pourrait objecter qu'il n'y a peut-être pas tellement d'exemples en réserve, et que les cas d'étude repris ici ne représentent que quelques problèmes isolés, au total relativement négligeables à l'échelle de l'économie dans son ensemble. C'est pourquoi, avant de passer à l'analyse des autres processus écologiques considérés par Steffen & al. (2015b), il importe de couper court à cette objection. Examinons maintenant, non plus un exemple ou l'autre, mais bien *le* service écosystémique le plus fondamental supporté par la biosphère. Ces impacts potentiels en cas de dégradation massive seront suffisamment considérables à eux seuls pour révéler la gravité des risques que notre économie et notre société encourent à mettre ainsi en péril l'équilibre du monde biologique. Il s'agit de la fertilité des sols agricoles³⁹.

1.3.4) Fertilité des sols

On a vu plus haut les impacts que la perte isolée de la pollinisation animale pouvait avoir, en surface, sur la productivité de certaines cultures. Mais de manière générale, dans les agroécosystèmes cultivés par les hommes, les services écosystémiques les plus fondamentaux résultent avant tout d'interactions écologiques qui sont à l'œuvre à l'intérieur même des sols terrestres. En effet, la productivité des végétaux que nous cultivons repose sur des échanges de matière organique et inorganique qui ont lieu entre la surface et la couche supérieure du sol, et ces échanges sont eux-mêmes puissamment régulés par l'interaction entre divers types d'êtres vivants remplissant des fonctions écologiques (humification et minéralisation du sol, circulation du carbone organique, rétention de l'eau, métabolisation des nutriments...) ⁴⁰ sans lesquelles la croissance des végétaux est tout bonnement impossible dans des conditions naturelles (Cameron & al. 2015 ; Lal & al. 2013 ;

22

³⁹ Et selon certains calculs, ce ne serait pas seulement le service écosystémique le plus important de la biosphère, mais du système-Terre tout entier : ainsi pour la FAO, si on effectue le total de tous les services écosystémiques dont nous bénéficions de la part de la nature, et qu'on regarde l'importance de chacun de ceux-ci pour notre bien-être, c'est le cycle des nutriments du sol qui est le premier contributeur (51% des bénéfices que nous retirons des services écosystémiques) (FAO 2011).

⁴⁰ L'humification et la minéralisation du sol sont les processus qui génèrent avec le temps, sur plusieurs centaines d'années, une couche de terre aérée canalisant et hébergeant les échanges de matière nécessaires à la croissance des végétaux dans l'écosystème (l'humus). En particulier, cette croissance des plantes est puissamment soutenue par l'action de certains micro-organismes présents au sein de l'humus, qui permettent la fixation biologique de l'azote présent dans les détritiques et les restes végétaux déposés à la surface du sol, rendant ainsi l'azote accessible aux racines des végétaux sous la forme de nutriments que celles-ci ne seraient pas capables de métaboliser directement. Ces communautés microbiennes constituent aussi un rempart souterrain contre les maladies et les agents pathogènes pouvant contaminer les plantes, ce qui permet à celles-ci d'y résister naturellement. Pour leur part, ces microbes tirent profit du carbone organique que les plantes mettent à leur disposition, ce qui donne un caractère encore une fois mutualiste à cette interaction écologique (Cameron & al. 2015). En outre, on sait que les rendements des végétaux s'améliorent en présence de certains organismes de plus grande taille et de la diversité de ceux-ci, en particulier les vers de terre (en moyenne la présence de vers de terre dans un agroécosystème mène à une hausse de 25% du rendement des végétaux (Van Groenigen & al. 2014)) mais aussi d'autres invertébrés qui contribuent, comme eux, à l'aération et à l'humification du milieu. Enfin, il est aussi avéré que la capacité des sols à retenir l'eau (eau qui est nécessaire à la croissance des plantes et dont l'absorption empêche l'érosion du milieu) dépend de leur richesse en matériaux organiques et de la multiplicité des interactions existant entre différentes sortes d'êtres vivant au sein de l'humus, cette rétention étant donc d'autant plus efficace que la biodiversité est grande (Gobat & al. 2010 ; Cardinale & al. 2012).

Power 2010). Ainsi, bien que la quantité de la biomasse présente dans le sol et la diversité de cette biomasse sont vitales pour la fertilité des terres cultivées, l'intégrité de cette biosphère souterraine indispensable à l'homme est gravement dégradée par nos activités. En réalité, ce qu'on nomme généralement la *dégradation des sols* désigne en bonne partie celle de toutes les interactions biologiques qui organisent ce milieu souterrain.⁴¹ Leur perte ou leur dégradation est essentiellement le fait du développement de l'agriculture industrielle elle-même, mais aussi, dans une moindre mesure, celui du développement économique dans son ensemble, car l'expansion urbaine et industrielle a généralement lieu sur des terres qui seraient cultivables par ailleurs.⁴² Concentrons-nous ici sur la dégradation directement liée aux pratiques agricoles.

La dégradation des sols par l'agriculture industrielle est donc le résultat de certaines pratiques menant à la désintégration des équilibres biophysiques qui les constituent. Au moins cinq processus doivent être soulignés : 1) la plantation des surfaces agricoles sous la forme de monocultures⁴³ ; 2) le non-retour au sol de la matière organique après les récoltes⁴⁴ ; 3) la compaction et l'imperméabilisation du milieu souterrain en conséquence des labours répétés et des lourdes pressions exercées par la machinerie agricole ; 4) la contamination des sols par des intrants polluants tels que les pesticides et les fertilisants⁴⁵ et enfin, en conséquence de ces quatre premiers phénomènes ; 5) une sensibilité accrue des surfaces agricoles à l'érosion, qui est en quelque sorte la forme finale sous laquelle la nature elle-même vient alors condamner la lente reconstitution

⁴¹ Matières inertes et biomasse sont cependant indissociablement liées dans le remplissage des fonctions écologiques d'un agroécosystème, et les impacts sur la partie inorganique des sols (telle que la compaction de ceux-ci en profondeur par les machines, qui contribue à les rendre impénétrables pour le vivant et pour les différents fluides et substances qui y circulent) sont aussi une dimension majeure de leur dégradation.

⁴² En ce qui concerne ces pressions venant « du dehors », mentionnons l'impact de l'urbanisation qui s'étend sur des terres cultivables (Krausmann & al. 2013b) et du développement des activités extractives, notamment minières, car elles participent à la compaction du sol ou à son affaissement par l'usage d'une machinerie lourde ou de procédés extractifs destructeurs, ainsi que par une pollution environnementale directe (Jain & al. 2016). Le changement climatique en général est également un facteur non négligeable dans la dégradation indirecte des sols par l'homme, puisque le réchauffement excessif de ceux-ci peut entraîner un dessèchement et une disparition de la base organique qui supporte les cultures, bien que jusqu'à un certain point et en particulier pour certaines plantes, le réchauffement et l'augmentation du carbone en circulation dans l'air puisse également stimuler la productivité des végétaux et la photosynthèse (Taub 2010). Dans l'ensemble, le réchauffement climatique aura des conséquences négatives sur la productivité agricole, mais ces impacts varieront régionalement et pourront être positifs dans certaines régions du globe et négatifs dans d'autres (Rosenzweig & al. 2014).

⁴³ Qui génèrent des pertes en cascade de biodiversité.

⁴⁴ En effet les végétaux qui poussent dans les écosystèmes domestiqués par les hommes ont précisément pour but d'être récoltés et expédiés ailleurs, et ne retournent donc pas au sol au terme de leur cycle de vie, privant la terre des matières premières permettant sa régénération naturelle. De surcroît, la pratique qui prévaut aujourd'hui dans un nombre croissant d'exploitations agricoles consiste à tenter de compenser ces pertes en utilisant des engrais chimiques phosphatés et azotés pour augmenter directement le rendement de la plante sans se soucier de son support, le sol. Ces pratiques camouflent une dégradation qu'elles sont incapables de compenser sur le long terme. À l'inverse, la pratique du compostage vise à imiter ce qui se passerait dans la nature et à amender le sol du champ lui-même afin de permettre la reconstruction de l'humus. (Gobat & al. 2010).

⁴⁵ En effet les pesticides, qui sont dispersés volontairement par l'homme dans le but d'éliminer certaines espèces bien spécifiques, touchent en réalité la grande majorité des espèces présentes dans l'écosystème. Les intrants, par ailleurs, surchargent le sol en fertilisants azotés et polluent les nappes phréatiques. Concrètement, l'efficacité de ces produits entraîne la fin de la vie dans le sol, ce qui réduit radicalement la productivité naturelle de celui-ci sur le long terme. Ces interventions révèlent en réalité une tentative de combler le manque de biodiversité des surfaces exploitées, et donc l'incapacité de l'agroécosystème à s'autoréguler.

biologique du sol local. En effet, la fine couche de matière organique qui se constitue naturellement à la surface des champs, et qui permettrait en temps normal de lentement régénérer l'humus hébergeant les multiples interactions écologiques grâce auxquelles l'agroécosystème est fertile et résilient sur le long terme, est d'autant plus facilement emportée par les agents de l'érosion (les eaux et le vent) si le milieu a déjà été dépeuplé de sa vie et amputé de sa capacité d'absorption du fait des quatre pratiques humaines mentionnées précédemment.

En fin de compte, toutes ces pratiques illustrent l'absurdité prédatrice de *l'appropriation du vivant par domestication* dans sa forme agroindustrielle. En visant à accroître et à renouveler uniquement la production des ressources végétales spécifiques qu'il a décidé de s'approprier par la mise en œuvre d'une logique productive industrielle, l'homme dégrade en effet les conditions de vie de tous les organismes vivant dans le voisinage immédiat de celles-ci, alors que ce sont ces formes de vie elles-mêmes qui déterminent la qualité et la fertilité du sol sur lequel les plantes poussent. Leur disparition met alors en péril la productivité et la reproduction des formes de vie végétales que l'homme cherchait à cultiver, et donc sa propre sécurité alimentaire. À supposer que de telles pratiques se poursuivent à l'avenir dans l'agriculture⁴⁶, quels sont les impacts écologiques et économiques de long-terme auxquels il faudrait alors s'attendre pour ce secteur et pour le reste de l'économie ?

Le mieux est d'abord de souligner par quelques chiffres la réalité plus qu'inquiétante de la situation actuelle : aujourd'hui, la dégradation des sols se propage à un rythme croissant à l'échelle planétaire, en particulier sous la forme de l'érosion, rendant de plus en plus de terres improductives. Chaque année, ce sont entre 70 000 et 140 000 km² de surfaces arables qui sont condamnées (soit entre 12 et 25% du territoire français) (FAO & ITPS 2015) et au total, on estime qu'environ 33% des terres initialement adaptées à la culture ont ainsi été perdues aujourd'hui, à un rythme qui dépasse de loin celui des processus naturels qui permettraient en temps normal de reconstituer les sols. L'érosion se produit en effet à une vitesse 100 fois supérieure à la leur, ceux-ci pouvant mettre jusqu'à 500 ans pour générer une couche de seulement 2,5 cm d'humus dans les conditions naturelles de formation de l'agroécosystème (Cameron & al. 2015). Enfin, en prenant en compte non seulement la dégradation des terres mais aussi la désertification (qui n'est qu'un autre mot pour désigner la disparition de la matière organique contenue dans les sols sous le coup de leur assèchement) on estime que c'est aujourd'hui plus de la moitié (52%) des terres utilisées pour l'agriculture à l'échelle globale qui sont "modérément ou sévèrement" affectées par le phénomène (TEEB 2015) générant ainsi une pression inouïe sur le secteur primaire de nos économies. Ces premières considérations révèlent donc que la perte du service écosystémique indispensable aux économies humaines qu'est la fertilité du sol n'est pas qu'une éventualité future. Elle est un processus écologique en cours.

Mais sur un plan économique, si l'on veut évaluer les impacts de ce phénomène en se concentrant sur les pertes productives qu'il génère (depuis le secteur agricole jusqu'à l'économie dans son ensemble) on est confronté à une série de problèmes. Tout d'abord, si la majorité des études globales entreprises sur le sujet ont estimé les impacts de l'érosion des sols, soit l'aspect le plus visible du problème, elles ne se sont pour la plupart pas penchées sur ceux de la dégradation des

⁴⁶ Ce qui aujourd'hui encore malgré le caractère publiquement et scientifiquement dénoncé de ces pratiques, reste la tendance dominante du système, soumis à une forte résistance au changement de la part de groupes d'intérêt économiques et politiques puissamment ancrés dans un régime d'innovation qui donne la priorité au développement du modèle agroindustriel existant (Vanloqueren & Baret 2013).

terres en général, qui sont l'indicateur le plus complet en la matière et dont les impacts peuvent donc être beaucoup plus élevés que ceux de l'érosion à elle seule. Ensuite, même parmi les études disponibles sur la dégradation des sols, les estimations sont complexes car les effets négatifs réels générés localement par celle-ci sont souvent compensés par un usage croissant de fertilisants, qui masque les pertes de productivité effectives. Enfin, la nature même de la valeur accordée aux biens ou aux services écosystémiques perdus du fait de la dégradation des sols varie en fonction des études et fondamentalement, la comptabilisation dépend fortement du point de vue des parties prenantes, amenant à une variation considérable dans les estimations des impacts⁴⁷ (FAO 2017).

En outre, des complications méthodologiques s'ajoutent à ces difficultés. Mentionnons ici une étude récente, qui a estimé la valeur totale des services écosystémiques perdus annuellement en conséquence du phénomène de dégradation des sols dans son ensemble : ceux-ci s'élèveraient à entre 6300 et 10600 milliards de dollars, soit entre 10 et 17% de la valeur du PIB mondial (ELD 2015). Les auteurs utilisent pour ce faire le cadre d'analyse de la *valeur économique totale* : celui-ci vise à prendre en compte diverses formes de valeurs, valeurs d'usage (valeur directe, valeur indirecte, valeur d'option) et valeurs de non-usage (valeur d'existence, valeur de leg, et « *stewardship value* ») et à les combiner par différentes méthodes d'évaluation (valeur économique perdue mais aussi préférences révélées et préférences déclarées) afin de donner une estimation de la valeur économique totale du service, en exprimant celle-ci sous forme monétaire. Comme elle l'indique explicitement, l'étude puise en partie ses estimations de référence et sa méthodologie chez Costanza & al. (1997 ; 2014) qui ont posé les standards pour ce genre d'exercice – fortement critiqué depuis les origines en théorie économique (Smith 1997 ; Turner & al. 1998). Inévitablement, l'exercice entrepris dans ce mémoire, à savoir estimer l'impact général que pourrait avoir sur l'économie la perte ou la dégradation future des services écosystémiques, implique la critique d'une telle méthode, et l'adoption d'une position méthodologique personnelle claire. Il convient donc de s'arrêter un instant sur cette question, et de la considérer dans une perspective plus générale.

25

Bien que la méthode défendue par les auteurs mentionnés ait le mérite de chercher à rendre visibles les bénéfices invisibles que nous tirons des écosystèmes, et qu'en cela elle soit déjà plus attentive à la valeur économique réelle d'un service écosystémique pour l'économie humaine qu'une simple *monétarisation* de celui-ci au prix du marché (méthode qui s'arrête à la somme d'argent qu'on verse en moyenne pour accéder au service via les facteurs de productions humains qui se l'approprient), cette forme d'évaluation a aussi un important défaut : elle cherche à rendre visibles sous forme monétaire des choses qui ne trouvent pas à s'exprimer ainsi dans la réalité. On pourrait objecter que c'est précisément là le problème, et qu'il faudrait justement que la valeur marchande de ces services écosystémiques corresponde dans la réalité aux estimations qui en sont faites avec cette méthode, ou en tout cas que cette valeur s'en rapproche, car ces estimations sont plus proches de sa valeur économique réelle. Néanmoins c'est cette dimension normative, intégrée directement dans le dispositif d'évaluation, qui semble précisément fragiliser l'analyse. Il ne s'agit pas de critiquer cette méthode car l'évaluation monétaire de la nature serait condamnable en soi, pour des raisons morales, mais plutôt parce qu'elle n'a pas de sens empiriquement : qu'on le veuille ou non, sur un plan positif, la nature n'est pas rémunérée par la monnaie. La valeur d'échange est du domaine des hommes ; tenter de comptabiliser la nature non-humaine sous cette forme ne peut donc constituer

⁴⁷ Ce qui semble bien être un problème inhérent à toute évaluation économique des coûts d'une dégradation environnementale en général.

qu'une approximation sans signification théorique⁴⁸ qui ne nous éclaire pas sur le rôle réel joué par les services écosystémiques pour le fonctionnement de l'économie – c'est-à-dire ce qui fait leur valeur économique véritable. En effet, ceux-ci sont utiles à l'économie précisément *parce qu'ils* sont non-marchands, et qu'ils n'ont donc au départ, aucune valeur monétaire (cf. partie 2). Si l'on souhaite à tout prix visualiser la valeur des services que la nature nous rend sous une forme monétaire, une façon plus acceptable de procéder est alors la suivante : d'abord supposer que le service écosystémique considéré disparaît, puis estimer le coût marchand qu'engendrerait son remplacement par des facteurs de production humains rémunérés. On ne peut pas toujours appliquer cette méthode de façon rigoureuse à cause du manque de données empiriques,⁴⁹ mais elle donne en toute circonstance des résultats plus sensés théoriquement : elle comptabilise sous forme de valeur d'échange les dimensions du service écosystémique qui, au moins hypothétiquement, sont susceptibles de prendre un jour cette forme en pratique indépendamment de l'évaluation normative imposée par l'analyse elle-même.

Ici, la méthode d'analyse de la valeur des services écosystémiques qui est défendue afin de mener à leur reconnaissance (puisque c'est toujours bien de ça qu'il s'agit) est la suivante : loin de nier la valeur d'échange, il faut utiliser ce langage, puisque c'est celui du système économique. Néanmoins, il ne faut pas pour autant attendre de lui qu'il puisse exprimer des réalités qui lui sont étrangères, et c'est pourquoi l'évaluation monétaire du service doit toujours se restreindre à l'évaluation de la perte de valeur d'échange générée en pratique dans la sphère de la production marchande lorsque l'écosystème se dégrade, autant que possible lorsque des cas d'étude ou des données empiriques suffisamment détaillées permettent d'éviter des estimations strictement hypothétiques. En ce qui concerne les impacts non marchands bien réels liés à la dégradation du service écosystémique considéré, on peut alors les examiner séparément, avec le langage non-monétaire qui leur convient, mais la position qui est défendue ici est qu'aggréger et évaluer ces dimensions non-marchandes sous forme monétaire ne fait que rendre la valeur économique réelle du service plus équivoque. En effet, ontologiquement et empiriquement, la valeur économique d'un service écosystémique est *d'abord* non-marchande. Ensuite, une fois cette valeur non-marchande appropriée par l'homme, une partie de celle-ci trouve à s'exprimer sous forme de valeur marchande dans l'économie. Mais elle n'est qu'une fraction transformée de la valeur économique totale du service, fraction rendue visible au marché par la monnaie. Dès lors, l'évaluation monétaire du service ne paraît pertinente, sur le plan empirique, que si elle se base sur une mise en évidence de cette fraction, à savoir la valeur d'échange perdue dans la sphère de la production lorsque le service écosystémique se dégrade, ou à défaut lorsqu'on fait l'hypothèse qu'il se dégrade. Cette démonstration empirique, ou cette mise en garde hypothétique, paraît solide analytiquement pour arriver à cette conclusion particulière, en termes normatifs, que les services écosystémiques méritent des efforts marchands de protection bien

26

⁴⁸ Ce qui est visible dans un autre travers de ce type d'évaluation : l'étude ci-dessus, par exemple, compare les valeurs monétaires imaginaires qu'elle a estimées pour les sols, avec la valeur du PIB lui-même. Ce faisant, elle semble nous dire que ces grandeurs sont rapportables les unes aux autres. Or c'est faux, ou en tout cas ce rapport n'a pas le même sens que celui qu'il prétend implicitement avoir : puisqu'avec la méthode d'évaluation utilisée, il serait possible de calculer des estimations monétaires supérieures au flux total de monnaie qui circule dans le PIB, la comparaison entre ces deux valeurs ne nous informe pas sur la part de la richesse que les sols contribuent à produire dans l'économie, mais sur un rapport purement arbitraire.

⁴⁹ Ou aussi tout simplement parce que certains services écosystémiques paraissent tellement indispensables à notre économie qu'il en devient illusoire de comptabiliser tous les services humains de substitution qui pourraient compenser leur disparition.

supérieurs à la valeur marchande qu'on accorde aux biens et services économiques dont ils *subsistent* la production. À l'inverse, chercher à quantifier sous forme de valeur d'échange l'ensemble de la valeur économique d'un service écosystémique, alors qu'en pratique cette valeur économique totale n'est jamais rémunérée sous forme monétaire dans l'échange⁵⁰ risque toujours d'introduire une forme de normativité en même temps que d'ambiguïté au sein de l'analyse, et donc un obstacle de plus en vue d'une possible reconnaissance économique et politique de la valeur du service.

Ainsi, comme on l'a déjà vu plus haut et comme on le verra encore plus bas, on va pouvoir mettre en évidence le fait général suivant : toute la valeur des services écosystémiques que nous ne *comptabilisons pas* lors de l'appropriation de ceux-ci dans le secteur primaire est en fait la *condition de réalisation de la valeur ajoutée* dans les secteurs supérieurs, car les pertes totales de valeur d'échange enregistrées en conséquence de la perte des services écosystémiques se révèlent *disproportionnellement plus élevées à l'échelle de l'économie que celles qu'enregistre le secteur dans lequel la valeur du service en tant que tel est appropriée*.⁵¹

Pour revenir à la question de la dégradation des sols, et en laissant de côté les différends méthodologiques mentionnés plus haut, on pourrait reprendre ici les estimations monétaires de l'étude de l'ELD afin d'appuyer cette conclusion. Ainsi, selon cette étude, la perte de l'ensemble des services écosystémiques supprimés annuellement par la dégradation des sols équivaldrait à plus de 5 fois la valeur marchande du secteur agricole dans l'économie (au minimum, car ce rapport peut aller jusqu'à 10 fois la valeur du secteur en prenant l'estimation la plus haute de la valeur des pertes) (ELD 2015, p. 61). Dès lors, en partant de l'hypothèse que la valeur économique estimée pour la dégradation de ces services écosystémiques équivaut à celle qu'engendre pour l'homme leur consommation ou plutôt leur appropriation,⁵² on observe une contradiction : alors que l'agriculture est le secteur qui est en contact direct avec les services écosystémiques fournis par le sol et est le plus responsable de leur dégradation effective, celui-ci ne retire pas de celle-ci une valeur marchande égale mais bien inférieure (en termes absolus) à celle estimée par les auteurs pour la valeur des pertes. Cette disproportion entre valeur marchande du secteur agricole, et valeur des services qu'il s'approprie en les dégradant ne signifie bien sûr pas que l'agriculture détruit de la valeur lors de l'appropriation : au contraire, c'est le signe qu'un excédent considérable de la valeur des services écosystémiques est en fait, approprié à travers l'agriculture sous forme de valeur ajoutée par les autres secteurs de l'économie (dans un rapport qui pourrait ainsi aller de 1 à 10). On reviendra sur le sens de cette contradiction dans la partie 3.

27

⁵⁰ La fraction marchande de la valeur du service, quant à elle rémunérée, n'est pas sa valeur économique réelle. Elle n'en est que le résultat : en fait, théoriquement, cette valeur monétaire est juste celle du facteur de production humain qui s'approprie le service (ou plutôt, celle cédée aux hommes qui détiennent ou actionnent ces facteurs, et que l'on rémunère à travers eux).

⁵¹ Comme on l'a vu cette dynamique peut aussi avoir lieu sans passer par la médiation du secteur primaire, mais cette médiation en donne le schéma général, qui correspond à la grande dynamique de développement économique qu'on observe depuis deux siècles, à savoir le dépassement successif, en termes d'importance économique, du secteur primaire par le secteur secondaire puis tertiaire.

⁵² Hypothèse certes critiquable : elle n'a qu'une valeur didactique. Des estimations plus rigoureuses sont considérées plus bas.

Mais finalement, en tâchant de dépasser une réflexion hypothétique et de faire usage des estimations empiriques les plus réalistes, la meilleure indication qu'on puisse donner des conséquences économiques de la perte de fertilité des sols dans le futur est probablement la suivante : au rythme où les terres arables sont impactées actuellement, et face à une demande de nourriture qui continue d'augmenter en même temps que la population et la croissance économique, la convention des Nations Unies contre la désertification prévoit que la dégradation des sols entraîne dans les 25 prochaines années une diminution de 12% de la production agricole, susceptible d'amener à une flambée des prix de la nourriture pouvant aller jusqu'à +30% sur la période (UNCCD 2014). Les conséquences économiques d'une telle hausse des prix sont prévisibles : à part les producteurs agricoles dont les terres auront été préservées, qui sont susceptibles d'en bénéficier, le reste de l'économie en pâtira très probablement. Les consommateurs finaux verront leur pouvoir d'achat diminuer, avec des conséquences plus graves pour les plus démunis, tandis que des pertes de valeur ajoutée sont à prévoir dans les secteurs secondaires et tertiaires. En effet les industries transformatrices de l'agroalimentaire et le secteur de la grande distribution pourront soit répercuter l'entièreté de la hausse du prix sur les consommateurs finaux, soit diminuer leurs marges. Si elles choisissent la première solution, comme on peut s'y attendre, les salaires réels des travailleurs devront donc augmenter en conséquence, et les répercussions se propageront alors au reste de l'économie. À défaut, elles se transformeront en luttes sociales.

Ce passage de l'économique au social permet de souligner un point crucial. Fondamentalement, en ce qui concerne la relation sol-agriculture en particulier, et la relation nature-économie en général, il faut accepter que le jeu des prix sur un marché n'est pas suffisant pour comprendre l'ensemble des risques qui se jouent dans la réalité face à la dégradation des services écosystémiques. L'agriculture nous le montre plus que tout autre secteur. En effet, alors même qu'elle emploie 1,4 milliards de personnes à l'échelle globale, soit environ un tiers de tous les actifs (Potts & al. 2016), celle-ci n'est pas juste une activité commerciale et une source de revenu comme une autre. Au-delà de la perte de valeur ajoutée, le risque encouru ici par la perte du service écosystémique unique qu'est la fertilité des sols agricoles est avant celui de mettre en péril ce qui n'est autre qu'une source directe de subsistance et une condition absolue de la sécurité alimentaire pour une partie tout à fait significative de l'humanité. Et mettre en péril le bien-être immédiat des populations, c'est aussi mettre en péril la stabilité des conditions institutionnelles dans lesquelles l'économie opère. Si par exemple, dans les 10 années à venir, 50 millions de personnes sont bel et bien forcées comme on le pense d'émigrer de leur lieu de vie à cause de la désertification (ELD 2015), on peut s'attendre à des répercussions socio-politiques et socio-économiques majeures. Pour s'en faire une idée, il est bon de prêter attention à ce qui est peut-être l'événement humanitaire le plus tragique de ces dernières années, dans lequel une telle dynamique a été en cause, à savoir le conflit syrien.

Ainsi, on sait aujourd'hui que la sécheresse intense qui a eu lieu entre 2007 et 2010 en Syrie est indispensable pour comprendre l'émergence de ce conflit local aux enjeux globaux, et en particulier l'enracinement de l'État Islamique dans cette partie du Moyen-Orient. La sécheresse en question a en effet entraîné, dans les années qui ont précédé le conflit, une perte massive de fertilité des sols dans les zones rurales de la Syrie, avec des pertes également massive d'output agricole, ce qui a poussé vers les villes un nombre significatif d'anciens ménages d'agriculteurs (1,5 millions de

personnes) ayant ainsi perdu leur source directe de revenu et de subsistance⁵³. Or, dans une situation où la crise économique de 2008 avait déjà fortement accentué la misère urbaine, il est établi que l'entassement de nouvelles populations appauvries et sans travail dans les banlieues de grandes villes comme Damas ou Alep qui a résulté de cette émigration forcée, ainsi que la hausse accrue des prix des denrées alimentaires que les pertes productives agricoles avaient entraîné en premier lieu, sont deux facteurs qui ont directement renforcé les tensions ayant mené à l'éclatement de la guerre civile en 2011 (Kelley & al. 2015). Par ailleurs, quand on observe les cartes des territoires qui ont été le plus durement touchés par la sécheresse dans les années précédant le conflit, et ceux qui ont été ensuite contrôlés par Daesh au cours de celui-ci, on est forcé de constater que celles-ci sont presque identiques (cf. annexe 5). Au bout du compte, la perte de fertilité des sols a donc été un facteur d'instabilité économique et politique sans lequel on ne peut pas comprendre la crise syrienne⁵⁴.

Cet exemple montre bien qu'on peut difficilement résumer l'importance économique de la fertilité des sols agricoles pour le bien-être matériel humain, et pour la stabilité de l'économie en tant que telle, en recourant seulement à des indicateurs monétaires. Comprendre l'importance de la biosphère pour l'économie humaine c'est donc prendre en compte à la fois les effets économiques qui transitent par le marché et ceux qui agissent directement sur le bien-être humain ou qui, non pas économiques à proprement parler mais plutôt socio-politiques, conditionnent néanmoins l'équilibre institutionnel dans lequel l'économie opère. Ceci étant, les dynamiques présentées dans les quatre exemples précédents, monétaires ou non, chiffrées ou non, ne peuvent bien sûr être considérées comme des estimations imparables, et moins encore comme des prédictions. Néanmoins, ces analyses ont permis de montrer que notre système économique repose en partie, de manière significative, sur l'appropriation régulière des bienfaits de certains services écosystémiques qui nous sont pourvus par la biosphère, et ce, alors même que les activités économiques que ces services *subsidient* directement ne représentent en général, selon nos calculs, qu'une fraction très réduite de la valeur produite dans l'économie. Bien que notre dépendance à l'égard de ces services nous soit ainsi rendue invisible, passé un certain seuil de perturbation de la biosphère, elle pourrait nous être cruellement rappelée par le tribut disproportionné que toute l'économie devra payer pour cette transgression. Ce tribut pourra prendre différentes formes : pertes productives et amputation décuplée de la valeur ajoutée, impacts sur le bien-être immédiat et les conditions sanitaires, augmentation du chômage ou encore tensions politiques de plus ou moins grande importance pour l'économie elle-même. Mais quelle que soit la forme, à en croire le cadre d'analyse des limites

29

⁵³ En outre, on sait que cette sécheresse particulièrement intense et prolongée ne peut s'expliquer à partir des seules variations saisonnières : son ampleur est directement liée au changement climatique d'origine anthropique (Kelley & al. 2015).

⁵⁴ Et les effets totaux de cette crise sur l'économie syrienne elle-même sont bien évidemment sans appel : les pertes cumulées pour l'économie depuis le début du conflit s'élèvent en Syrie à 226 milliards de dollars, soit 4 fois le montant du PIB du pays en 2010, et ce nombre continue d'augmenter, tandis que plus des trois quarts des Syriens en âge de travailler sont aujourd'hui sans emploi (9 millions de personnes) et que les pertes institutionnelles et de capital humain sont gigantesques, sans même parler des morts, blessés et déplacés générés par le conflit (plus de la moitié de population a été déplacée) (Banque Mondiale 2017a). Cela étant, il est presque cynique d'utiliser ces chiffres pour appuyer mon point de vue : de toute évidence, des facteurs éminemment plus politiques entrent directement en jeu dans le conflit, et expliquent sa durée et son intensité. Les enjeux de celui-ci dépassent donc de loin la relation mise en évidence plus haut à l'égard de la dégradation des sols. Celle-ci reste néanmoins un exemple du caractère à part dont sont dotés les services écosystémiques qui nous sont rendus par les sols dans les relations nature-économie.

planétaires, nous avons d'ores et déjà mis en branle au sein de la biosphère, les processus écologiques qui peuvent nous conduire dans un futur assez proche au dépassement du seuil critique.

2) Le changement climatique et les autres processus

2.1) Origines économiques du changement climatique

L'influence avérée de l'homme sur l'évolution du climat et l'importance de celui-ci pour l'équilibre du système-Terre a déjà été rappelée plus haut. Si on veut avoir une idée plus précise de la répartition des activités économiques humaines selon leur contribution à l'effet de serre, on peut se reporter à l'annexe 3.⁵⁵ Mais dans l'ensemble, du point de vue climatique, le développement économique peut être vu ici comme un seul et même grand processus cumulatif qui d'une part, démultiplie les sources d'émission de gaz à effet de serre (en particulier le dioxyde de carbone) à travers la combustion d'énergies fossiles (en particulier le pétrole) ou l'usage industriel d'autres substances ; et d'autre part, détériore ou détruit les remparts écosystémiques permettant la captation de ces gaz (tels que les puits naturels permettant la séquestration du carbone : les océans et la biomasse terrestre) ou l'atténuation du réchauffement des températures de manière plus générale. Au total, c'est ici le secteur secondaire de l'économie qui contribue le plus à ces perturbations, à cause de la part élevée de l'industrie et de la production d'énergie primaire dans l'émission de gaz à effet de serre, mais dans l'ensemble, le poids de chacun de nos trois secteurs économiques dans cette contribution est relativement similaire (cf. annexe 3).

2.2) Conséquences écologiques

La nature des responsabilités économiques humaines en matière climatique étant claire, il faut maintenant donner une idée des risques écologiques et économiques concrets que nous encourons du fait de ces perturbations écosystémiques dont nous sommes la source. En effet, bien que la conscience climatique globale soit de plus en plus affirmée, la gravité actuelle du dérèglement du climat et la rapidité avec laquelle il pourrait continuer à se dérégler à l'avenir sont encore trop souvent sous-estimées dans les analyses contemporaines, comme cela a notamment été le cas dans le dernier rapport du GIEC (2014). En particulier, deux lacunes de l'analyse économique existante doivent être comblées : a) la non-prise en compte, dans l'estimation des impacts économiques, de certaines réponses incertaines du système climatique qui pourraient se déclencher au-delà d'un seuil donné du réchauffement des températures, susceptible d'aggraver le phénomène du réchauffement et ses conséquences; b) la considération quasi-systématique du problème du réchauffement climatique à un horizon 2100, et non à des échéances plus proches.

2.2.1) Boucles de rétroaction

Si on reprend les critères de Steffen & al. (2015b) en matière de climat (voir note 3 et figure 1) et qu'on suppose que les tendances actuelles d'émissions de gaz à effet de serre continueront au même rythme dans les années à venir, le système climatique rentrerait alors dans ce qui a été défini comme

⁵⁵ Dans l'ordre, les secteurs qui émettent le plus de gaz à effet de serre sont l'industrie (28,6%), l'agriculture et la foresterie (élevage compris) (23,9%), le bâtiment (18,6%), les transports (14,4%) et la production directe d'énergie (11%) (GIEC 2014).

sa zone d'alerte (en rouge sur la figure 1)⁵⁶ d'ici une génération seulement (en 2036 selon une évaluation récente (Muller 2016))⁵⁷. Or l'enjeu écologique est le suivant : passé un seuil critique situé quelque part au-delà de la limite planétaire du climat (déjà dépassée) mais plus probablement encore, dans cette zone d'alerte dont nous rapprochons à grande vitesse, les réponses du système-Terre en matière climatique sont susceptibles de ne plus du tout être linéaires. Ainsi, plutôt que de voir se produire simplement un réchauffement de la température s'amplifiant de manière graduelle avec le volume des gaz à effet de serre accumulés, passé ce seuil invisible, ce sont des augmentations accélérées et imprévisibles de la température qui pourront se produire, accentuant gravement le risque de déclencher un emballement climatique global et irréversible (Lenton & al. 2008 ; Steffen & al. 2015b). Plus précisément, on pense aujourd'hui que de telles accélérations seront le fait de ce qu'on appelle des *boucles de rétroaction climatique*, au fonctionnement incertain mais dont on appréhende de mieux en mieux les tendances lourdes. Ces boucles désignent des situations dans lesquelles une composante du système climatique est modifiée par le changement climatique, puis agit en retour sur celui-ci. De telles séquences peuvent en théorie être positives (accentuer le phénomène du réchauffement) ou négatives (l'atténuer) (Van Nes & al. 2015). Néanmoins, toutes celles qui ont été identifiées jusqu'à présent comme pouvant se déclencher à cause du réchauffement futur, et dont on comprend les effets, sont des boucles de rétroaction positives (CNRS 2017)⁵⁸.

Avant d'expliquer le fonctionnement des boucles de rétroaction qui pourraient précipiter un emballement du réchauffement climatique, prenons le temps de bien comprendre ce que la situation actuelle signifie : nous sommes déjà dans la zone d'incertitude du changement climatique (cf. figure 1) et la probabilité qu'un tel emballement se produise un jour ou l'autre dans le futur à cause du réchauffement qui nous est promis par les quantités de gaz à effet de serre qui ont d'ores et déjà été accumulées jusqu'ici, existe donc dès à présent quoi que l'on fasse à l'avenir pour réduire nos émissions. La question qui est traitée ici est celle du renforcement de cette probabilité, et de l'estimation du moment où elle pourrait se matérialiser en pratique avec toutes les conséquences économiques que cela entraînerait.

Concrètement, à partir d'un certain seuil de réchauffement qui varierait entre +2 et +4°C⁵⁹ on sait désormais que les quatre boucles de rétroaction climatique suivantes au moins pourront se déclencher et accélérer le phénomène du réchauffement : 1) l'accentuation de l'effet de serre généré par les gaz déjà accumulés aujourd'hui dans l'atmosphère⁶⁰; 2) la libération dans

⁵⁶ C'est-à-dire le moment où il passerait le cap des 450ppm de CO2 dans l'atmosphère.

⁵⁷ Le calcul de cette échéance, qui prend en compte non seulement nos émissions annuelles mais aussi le taux d'augmentation de celles-ci au cours de la dernière décennie, pourrait être marginalement revu au vu des tendances les plus récentes : en effet en moyenne au cours des trois dernières années, nos émissions annuelles de dioxyde de carbone n'ont pas augmenté, bien qu'il soit difficile de dire si cette tendance persistera sur le long-terme (BP 2017). Cette stabilisation éventuelle pourrait faire en sorte que nous repoussions l'échéance de quelques années, mais il faut bien comprendre qu'elle ne signifie rien d'autre que cela : le niveau annuel de nos émissions est tellement élevé dans l'absolu que nous rentrerons dans la zone d'alerte en 2040 quoiqu'il arrive même si celles-ci sont stabilisées.

⁵⁸ Le rôle joué par les nuages dans le système climatique, par exemple, a été identifié comme une boucle de rétroaction, mais on ne comprend pas encore bien son fonctionnement et on ignore donc si son effet sera positif ou négatif au bout du compte.

⁵⁹ Par rapport à la moyenne pré-industrielle, c'est-à-dire la moyenne des températures qui prévalaient pour la période 1850-1900. Aujourd'hui, nous avons déjà dépassé cette référence de +0,85°C en moyenne.

⁶⁰ À cause d'une plus grande agitation, sous le coup de la chaleur, des molécules qui y sont déjà présentes.

l'atmosphère de nouveaux gaz d'origine non anthropique jusqu'ici retenus prisonniers à la surface de la Terre⁶¹ ; 3) la diminution voire le passage sous zéro du pourcentage de carbone retenu naturellement sur Terre par les « puits » terrestres et océaniques (voir point suivant) ; et 4) la perte de l'effet « albédo » des zones glaciaires suite à la fonte de celles-ci⁶² (CNRS 2017). Tous ces risques d'emballement, susceptibles pour plusieurs d'entre eux de se matérialiser au cours du siècle si les émissions se poursuivent au rythme actuel – et même si elles sont atténuées au rythme prévu par les contributions nationales de l'Accord de Paris⁶³ – annoncent donc à long-terme des perturbations plus sérieuses et surtout plus imprévisibles encore que celles mises en avant par le GIEC dans son dernier rapport. Les estimations du GIEC, mettant de côté ces phénomènes de boucles, ont pourtant été utilisées comme scénario de référence dans quasiment toutes les modélisations économiques contemporaines des effets du changement climatique.

2.2.2) Horizon de l'analyse

Entrer d'ici vingt ans en zone d'alerte et s'approcher ainsi d'un seuil critique pour notre futur, en termes de gaz à effet de serre cumulés dans l'atmosphère, est une chose. Voir se manifester sur Terre toutes les perturbations climatiques que cette transgression nous promet, en termes d'emballement effectif des températures et d'autres répercussions biophysiques bien concrètes, en est une autre.

Apparemment, même en tentant de prendre en compte les possibles emballements futurs du système, il demeure que les impacts réels les plus dramatiques du changement climatique⁶⁴ auront vraisemblablement lieu à une échéance relativement lointaine, plusieurs générations humaines encore nous en séparant (Forzieri & al. 2017). À cet égard, on comprend donc que l'échéance 2100 ait pu devenir la référence internationale en matière de réchauffement, car c'est à un tel horizon que des perturbations réellement catastrophiques devraient se concrétiser pour la majorité de la population mondiale (toujours dans l'hypothèse que rien ne vienne infléchir radicalement nos émissions dans un futur immédiat). Cependant, si on veut estimer de façon réaliste les conséquences économiques du changement climatique dans les années à venir, la question se pose aussi de savoir comment et à quel moment les premières perturbations climatiques significatives pourraient commencer à se manifester, peu importe qu'elles soient moins graves que les désastres qui arriveront d'ici la fin du siècle. C'est pourquoi il est aussi nécessaire, dans l'analyse économique, de considérer des échéances moins lointaines, de l'ordre de quelques décennies seulement.

32

⁶¹ Comme le méthane retenu prisonnier dans le pergélisol (sol terrestre gelé en permanence à proximité des pôles) qui sera libéré par le réchauffement de la température de ces sols au-dessus de zéro.

⁶² L'effet albédo est le réfléchissement des rayons solaires vers l'espace par les étendues gelées, grâce à leur couleur blanche, qui permet de minimiser dans ces zones la chaleur solaire conservée à la surface. Dans le futur, si les glaces fondent, les espaces découverts par celles-ci auront une couleur plus sombre et réfléchiront donc beaucoup moins la lumière solaire. Ils emmagasineront donc une quantité de chaleur plus importante à la surface de la Terre.

⁶³ En suivant celles-ci, nous dépasserions en effet les +3°C, ce qui est plus que le seuil de +2°C au-delà duquel l'emballement est susceptible de se déclencher (Raftery & al. 2017).

⁶⁴ Ainsi, on estime par exemple qu'en Europe, à la fin du siècle, 2 personnes sur 3 seront confrontées à des vagues de chaleur potentiellement mortelles, à des inondations et à d'autres phénomènes météorologiques perturbateurs majeurs en raison du réchauffement climatique. Cela représente 350 millions de personnes dans 31 pays différents. Au total, on estime que le nombre de morts liés au climat s'élèvera, entre 2070 et 2100, à 152 000 personnes par an, ce qui représente 50 fois le nombre actuel, tandis que les sécheresses pourraient diminuer l'eau et la nourriture accessible à 138 millions de personnes (Forzieri & al. 2017).

Ainsi en gardant toujours pour hypothèse que les tendances actuelles d'émission restent inchangées à moyen terme, on estime aujourd'hui que l'entrée de la planète dans un régime de températures inédites par rapport à celles expérimentées tout au cours de l'Holocène devrait être atteint au cours de la décennie 2040 dans la majorité des régions habitées, et même à partir de la décennie 2030 dans certaines d'entre elles. Au total, en 2050, cinq milliards de personnes sur Terre vivraient déjà sous un régime climatique entièrement nouveau (Mora & al. 2013). À partir de ce moment, les conséquences du changement climatique deviendront alors un risque immédiat et bien réel pour une partie majoritaire de la population, et plus seulement une certitude théorique lointaine. Reprenons donc ici une étude de l'OCDE publiée en 2015 permettant de visualiser les périls « minimaux » que l'économie mondiale encourt à l'horizon 2060 en conséquence du changement climatique. J'insiste sur « minimal » car cette étude laisse de côté l'éventualité des emballements mentionnés plus haut et sous-évalue donc très probablement les problèmes économiques à venir⁶⁵. En effet, si on tente d'intégrer les effets de tels risques dans les estimations de l'impact économique du réchauffement climatique, on se retrouve sans surprise avec une fourchette bien plus large d'impacts potentiels et avec une probabilité bien plus grande de scénarii catastrophiques pour l'économie (Burke & al. 2015) ce que ce rapport laisse donc de côté.

2.3) Conséquences économiques

Voici néanmoins quelques-unes de ses conclusions. Tout d'abord, il estime que de façon générale, dans les décennies à venir, les dommages marchands générés par le changement climatique (dont certains sont déjà observables aujourd'hui) devraient progressivement se généraliser et augmenter avec le temps à un rythme *plus rapide que la croissance économique elle-même*. En 2060, ceux-ci pourraient ainsi être compris entre 1% et 4,4% du PIB mondial, ce qui reviendrait en effet, à compenser négativement la croissance supposée de l'économie. Les impacts les plus lourds seraient vraisemblablement liés à la diminution de la productivité du travail (que ce soit dans l'industrie ou dans les services) et à la chute des rendements agricoles, ces deux derniers facteurs pouvant générer à eux seuls des impacts négatifs de plus de 2% du PIB mondial⁶⁶. En outre, s'il est vrai que des répercussions économiques *positives* du changement climatique auront aussi lieu dans certaines régions et dans certains secteurs de l'économie, dans l'ensemble 23 des 25 régions mondiales considérées dans l'analyse subiront des conséquences négatives nettes, pouvant dépasser les 5 ou 6% du PIB régional en 2060 dans certaines parties du globe (OCDE 2016).

On pourrait largement critiquer cette étude ; non seulement pour des raisons méthodologiques – sur le plan économique les estimations pour 2060 utilisent pour évaluer l'évolution future de l'économie mondiale une modélisation d'équilibre général certes dynamique et très complexe mais dont on peut douter des capacités à prédire l'évolution de l'économie sur longue période, et sur le plan écologique, comme cela a été mentionné, ces estimations laissent de côté des circonstances aggravantes majeures ; mais aussi pour des raisons axiomatiques – elle postule une croissance économique ininterrompue jusqu'en 2060 et au-delà, ce qui, notamment pour des raisons

⁶⁵ Ce que les auteurs de l'étude reconnaissent explicitement cf. OCDE 2016 pp. 13 & 16.

⁶⁶ Dans l'agriculture, la prise en compte de l'effet fertilisant de l'augmentation de CO2 fera cependant diminuer cet impact négatif, mais il ne le compensera pas complètement. Ainsi, on estime que depuis 1980, les productions mondiales de maïs et de blé ont reculé de 3,8% et de 5,5% respectivement par rapport à une simulation sans changement climatique (Lobell & al. 2011).

écologiques (Meadows & al. 2004 ; Turner 2014 ; Jackson & Webster 2016) mais aussi pour des raisons « endogènes » à la dynamique de l'économie, est un scénario d'évolution de l'économie mondiale qui est de plus en plus remis en question au sein de la science économique contemporaine (Gordon 2012). Par ailleurs, elle ne prend pas en compte une série d'impacts non monétaires, mais qui exerceront une pression bien réelle sur l'économie de manière indirecte : d'une part les impacts immédiats du changement climatique sur le bien-être humain, en particulier ses conséquences sanitaires⁶⁷ : d'autre part la dégradation de la stabilité institutionnelle, avec les irrptions de violence sociale et politique (et en fin de compte, militaire) que le changement climatique est susceptible de déclencher et d'accentuer dans plusieurs endroits du globe.⁶⁸ Néanmoins l'étude révèle bien, au-delà du caractère hasardeux de ses estimations, une tendance lourde : les impacts du réchauffement sur l'économie seront significatifs dans les années à venir, et ils ne seront pas positifs.

Au bout du compte, que représentent tous ces dommages annoncés dans la sphère marchande de l'économie ? En fait, les pertes économiques futures engendrées par le changement climatique ne sont autres que la dégradation ou la perte des services écosystémiques qui nous sont fournis par les écosystèmes que le climat régule. La définition de la notion de service écosystémique qui est utilisée ici, à savoir *un bénéfice économique direct ou indirect retiré des fonctions écologiques performées par les écosystèmes*, autorise une vision large du phénomène, et permet ainsi de souligner l'omniprésence des échanges économiques entre l'homme et la nature, *invisibilisés* et pourtant indispensables économiquement. Les études mobilisées ici, à l'inverse, minimisent leur importance : ainsi, si l'OCDE considère bel et bien dans son analyse la perte d'une série de services écosystémiques, ces pertes sont reprises sous une section spécifique et séparées du reste des pertes productives. De la sorte, le rapport considère que ces perturbations ne représenteront au total que des dommages marchands équivalents à 1% de la valeur totale du PIB en 2060. Mais cette comptabilisation est directement tributrice d'une conceptualisation restrictive des services écosystémiques : en effet du point de vue adopté ici, les pertes de la productivité du travail industriel ou des rendements agricoles – par exemple – qui sont analysées pour elles-mêmes par l'OCDE sont un point d'arrivée, pas un point de départ. Elles ne sont en fait que l'expression des pertes liées à la dégradation des services écosystémiques (fertilité des sols d'un côté, salubrité de l'environnement physique de l'autre) offerts par les écosystèmes que le climat régule, et par lesquels le système-Terre

34

⁶⁷ Qu'on peut lire par exemple dans une radicale augmentation des décès liés à des vagues de chaleur potentiellement mortelles: à l'échelle globale, on estime que 74% de la population sera exposée à celles-ci en 2100 si les émissions continuent de croître au même rythme. (Mora & al. 2017).

⁶⁸ Un exemple de ces tensions a été donné plus haut avec le rôle joué par la sécheresse dans la crise syrienne, et il existe un autre cas similaire : au Nigeria, on sait ainsi que les conflits ethniques sanglants de ces dernières années sont intimement liés à l'assèchement du lac Tchad en partie sous le coup du réchauffement climatique, qui a entraîné l'émigration de nombreuses populations d'agriculteurs depuis le nord – majoritairement musulman – vers le sud – majoritairement catholique et pastoral – y alimentant ainsi le terreau combiné de misère économique et de disparités ethniques duquel Boko Haram a émergé. De manière plus générale, le président français Emmanuel Macron a lui-même déclaré au G20 il y a deux mois qu'on ne pouvait pas prétendre agir efficacement contre le terrorisme sans une action résolue contre le changement climatique et l'armée américaine et l'OTAN, dans des rapports publiés en 2015, considèrent explicitement celui-ci comme un « multiplicateur de menaces » sur le plan militaire et géostratégique. Enfin le nombre croissant des réfugiés climatiques, qui sont eux-mêmes directement impliqués dans les dynamiques précédentes, est appelé à croître de façon *exponentielle* avec le temps, et à aggraver ainsi plus encore les tensions sociales existantes, en particulier en ce qui concerne l'Europe et la « crise des migrants » à laquelle elle fait face depuis deux ans. Vu la tendance du réchauffement climatique, cette crise n'en est donc pas une au sens où elle serait passagère. Elle est plutôt une crise structurelle.

subsidie en réalité le développement des secteurs économiques en question (l'agriculture d'un côté, et tous les secteurs dans lesquels le facteur travail est impliqué, de l'autre). De fait, économiquement, les facteurs de production qui sont à l'oeuvre dans ces secteurs opèrent en *s'appropriant* la valeur non-marchande des services écosystémiques⁶⁹ pour produire grâce à celle-ci, une part de la valeur économique qui est sanctionnée dans l'échange (la valeur marchande).⁷⁰ Mais lorsque le fonctionnement des écosystèmes est endommagé sous le coup du changement climatique, la valeur économique appropriable par les facteurs de production humains diminue proportionnellement à la diminution de la valeur des services écosystémiques eux-mêmes, et en conséquence, c'est la contribution des facteurs à la production de valeur marchande qui diminue : quand les sols s'assèchent et perdent leur fertilité, les récoltes diminuent, et les prix agricoles augmentent ; quand l'air et l'environnement physique est plus pollué, les travailleurs sont moins productifs, et la marge des firmes diminue. Passé un certain stade de dégradations climatiques, ces pertes physiques peuvent comme nous le montre l'OCDE devenir suffisamment lourdes pour faire décroître au cours du temps la valeur marchande produite dans l'économie. Une dépression économique globale pourrait donc, dans un futur pas si lointain, être le prix à payer pour l'inaction climatique de ces dernières décennies.

2.4) Les autres processus écosystémiques

Si jusqu'à présent, j'ai décidé d'insister en particulier sur la dégradation des services écosystémiques liés à la perte d'intégrité de la biosphère et au changement climatique, c'est parce que ces deux phénomènes sont considérés comme étant de rang supérieur par les auteurs dont les critères écologiques ont structuré mon analyse (Steffen & al. 2015b). En effet, ces deux processus écosystémiques opèrent au niveau du système-Terre dans son ensemble, et ils coévoluent depuis 4 milliards d'années, formant les systèmes englobants au sein desquels tous les autres processus opèrent, tout en étant régulés par eux. Ils sont donc en quelque sorte les vecteurs principaux des changements environnementaux qui sont à l'oeuvre dans le système-Terre, et on sait que leur perturbation individuelle peut entraîner à elle seule des enchaînements catastrophiques susceptibles de faire basculer tout le système vers un nouvel état d'équilibre impropre à la poursuite du développement de la civilisation humaine à l'échelle globale (ibid.).

Néanmoins, cela ne veut pas dire que les autres phénomènes repris sur la figure 1 peuvent être négligés pour autant. En effet la perturbation de ceux-ci est également directement susceptible d'affecter le bien-être humain, et elle peut aussi conduire indirectement à la transgression définitive des seuils de rupture climatique ou biosphérique mentionnés plus haut. Il importe donc, à défaut de tous pouvoir les considérer avec autant de détail que pour les deux processus précédents, de donner un aperçu suffisant des risques écologiques et économiques que nous encourons face à la perturbation de ces processus de rang « normal ». Examinons brièvement ici, quatre d'entre eux : un pour chaque niveau de gravité défini dans le cadre d'analyse de départ (les segments rouge, jaune et

⁶⁹ Que l'on ne souhaite pas ici, contrairement aux auteurs mentionnés plus haut, exprimer en des termes monétaires : elle est précisément une valeur qui est empiriquement non-marchande (non rémunérée) donc gratuite pour les agents économiques qui se l'approprient. Par définition l'acte d'appropriation signifie la gratuité marchande.

⁷⁰ Une autre façon d'exprimer cette relation est de dire que le capital humain s'approprie la valeur non-marchande du capital naturel, à partir de laquelle il crée de la valeur marchande.

vert de la figure) ; et un dernier pour lequel un repérage quantitatif n'a pas encore pu être défini (les segments grisés de la figure).

La perturbation des cycles biogéochimiques de l'azote et du phosphore ont chacun déjà passé non seulement le cap de leur limite planétaire, mais aussi celui de leur zone d'alerte. Ils ont atteint en pratique un niveau qui a d'ores et déjà des conséquences irréversibles sur notre environnement. Concentrons-nous ici sur le cas de l'azote. Des zones entières de plages ou de pêche deviennent aujourd'hui impraticables à cause du phénomène d'eutrophisation, avec des conséquences économiques parfois bien réelles. Ainsi dans la Mer Baltique, c'est une zone de la superficie de l'Irlande qui est dans un état d'hypoxie quasi permanent (c'est-à-dire que la vie animale aquatique y est impossible) du fait de la quantité massive de fertilisants azotés qui est déversée en mer chaque année par l'érosion depuis les terres environnantes, condamnant toute activité de pêche dans ce secteur (Noone & al. 2012). Or dans un scénario « business-as-usual », la quantité d'azote réactif libérée par l'homme dans l'environnement est susceptible d'augmenter de 50% d'ici 2050, alors même que celle-ci a déjà fait doubler celle qui circulait dans la nature avant notre intervention. Cette évolution augmentera l'intensité et la fréquence de l'hypoxie côtière (ibid.). Le changement d'affectation des sols, pour sa part, se situe à l'intersection entre la perte d'intégrité de la biosphère et le changement climatique. Il vise à désigner la perte de puits naturels de carbone terrestres, à savoir la biomasse végétale et celle qui est contenue dans les sols, permettant de séquestrer à la surface une partie des gaz à effet de serre que nous émettons. Leur préservation est donc particulièrement précieuse, surtout au vu de ce qui vient d'être dit sur la gravité des risques possibles d'emballement du changement climatique. Néanmoins, ce processus est dans sa zone d'incertitude (il a donc déjà dépassé sa limite planétaire) et il s'approche dangereusement de sa zone d'alerte au vu du rythme de la déforestation. En effet, aujourd'hui, il reste 62% de la couverture forestière initiale sur la planète. A 54%, on considère que l'affectation des sols terrestres rentrera en zone d'alerte (Steffen & al. 2015b). L'eau douce se doit aussi d'être mentionnée : bien que son volume annuel soit encore contenu sous sa limite planétaire, des tensions se font déjà ressentir et le dépassement de cette limite annoncerait des conséquences désastreuses ; d'un point de vue écologique, l'accaparement de l'eau douce par l'homme accélère d'ores et déjà aujourd'hui la désertification dans de nombreuses régions du globe et entraîne des pertes de biodiversité radicale dans les écosystèmes (Verones & al. 2013), tandis que d'un point de vue économique, la raréfaction de l'eau douce est unanimement reconnue comme une sérieuse menace pour l'économie mondiale (Mekonnen & Hoekstra 2016) les sécheresses et les pénuries d'eau ayant ainsi généré 14 milliards de dollars de pertes pour les firmes en 2016 (CDP 2016). Celle-ci est aussi un danger d'envergure pour éviter la famine à toute une série de populations qui dépendent directement d'un apport en eau pour leur sécurité alimentaire. Or cette consommation va croissant, en particulier à cause du développement agricole : l'agriculture (élevage pris en compte) compte à elle seule pour 75% de la consommation totale d'eau douce par l'humanité. Les activités extractives et, dans le secteur secondaire, le refroidissement des infrastructures industrielles représentent aussi des postes importants, tandis que la consommation domestique représente quant à elle une proportion ridiculement faible en comparaison avec ces activités économiques industrialisées (Hoekstra & Mekkonen 2012). Au total, il y a aujourd'hui un débat sur la question de savoir si notre consommation annuelle d'eau douce n'aurait pas en fait, déjà dépassé sa limite planétaire (Steffen & al. 2015b ; Jaramillo & Destouni 2013). Enfin, l'introduction de nouveaux éléments chimiques est aussi un facteur préoccupant, et bien qu'elle n'ait pas encore pu être quantifiée sous forme de limite

planétaire, on connaît déjà très bien certains effets néfastes pour l'environnement et l'économie: sous le coup de la pollution de l'eau par les plastiques (qui n'est qu'un exemple parmi d'autres de ce genre de processus), on craint par exemple que la Mer Méditerranée puisse prochainement devenir impropre à la baignade, avec des conséquences lourdes pour le tourisme et aussi pour la pêche dans la région (Cozar & al. 2015).

En somme les dégradations sont multiples et évidemment, beaucoup de ces processus sont liés les uns avec les autres, que ce soit directement ou par la médiation de la biosphère et du climat. Plus leur perturbation conjointe est avancée, plus une dégradation catastrophique des divers services écosystémiques que le système-Terre nous fournit via les écosystèmes que ces processus régulent est donc envisageable, et plus les risques pour notre économie sont donc élevés. Au bout du compte, on pourrait résumer la logique mise au jour dans ces deux premières parties de la façon suivante : en premier lieu, la poursuite du développement économique humain au sein du système-Terre génère, entretient et intensifie des dynamiques de crise au sein des différents équilibres constitutifs de celui-ci ; à chaque pas, nous ne produisons pas des effets proportionnels prévisibles, mais nous augmentons plus que proportionnellement les risques de catastrophes soudaines, imprévisibles et irréversibles qui peuvent ainsi avoir lieu dans les écosystèmes ; or ces écosystèmes eux-mêmes nous fournissent, à l'interface entre l'écologie et l'économie, les services écosystémiques dont nous nous approprions la valeur non-marchande pour soutenir le développement de l'économie de marché ; finalement, lorsque les risques se matérialisent, et que ces services disparaissent ou sont brutalement dégradés, ce sont alors des pertes économiques bien réelles qui se transmettent à nous, d'abord par voie non-marchande, puis par les canaux du marché lui-même. À terme, notre modèle de développement économique sape donc les conditions de sa propre reproduction. Ou pour le dire sur un mode quantitatif: on estimait en 2005 qu'environ 60% des services écosystémiques que la nature fournit aux hommes étaient en cours de dégradation (MEA 2005) et malheureusement pour nos économies, il paraît raisonnable de supposer que ce pourcentage est encore plus élevé à l'heure actuelle.

3) D'une chronologie à une théorie de l'appropriation

Après avoir fait le point sur la réalité des bouleversements actuels et potentiels auxquels le système-Terre et le système économique sont confrontés dans la période contemporaine, une brève analyse de plus long-terme des causes et des conséquences de ces bouleversements, qui comme on l'a vu sont indissociablement écologiques et économiques, est maintenant nécessaire. En effet, c'est elle qui va permettre de donner un sens théorique au processus de développement économique qui est en cours, et aux crises qui s'annoncent. Pour donner une idée des tendances historiques dont la crise contemporaine est le résultat, considérons donc deux séries de graphiques. La première (figure 2) reprend une série d'indicateurs biophysiques visant à donner une idée de l'évolution de la partie « naturelle » du système-Terre au cours des trois derniers siècles. La seconde (figure 3) se focalise quant à elle sur l'évolution de quelques variables socio-économiques, et rend donc compte du développement de la partie « humaine » du système-Terre sur la même période de temps. Par leur mise en correspondance, ces deux séries offrent une première chronologie de la crise écologique, montrant l'empreinte croissante que « l'entreprise humaine » laisse sur la planète depuis le début de la révolution industrielle (Steffen & al. 2015a)⁷¹.

3.1) La Grande Accélération et l'Anthropocène

Si on observe effectivement un mouvement de hausse continue depuis le dix-neuvième siècle pour la majorité des variables sur les deux séries de figures, ce qui est le plus flagrant, c'est néanmoins le véritable décollage qui semble avoir eu lieu simultanément pour (presque⁷²) chacune d'entre elles à partir de la seconde moitié du siècle dernier. En effet, alors qu'il avait fallu plusieurs millénaires à la population humaine pour atteindre le milliard d'habitants dans la seconde moitié du dix-huitième siècle, celle-ci est passée, au cours du seul vingtième siècle, de 1,65 milliards à 6 milliards d'individus, et c'est entre la fin de la seconde guerre mondiale et aujourd'hui qu'elle a connu le bond le plus spectaculaire, triplant sur la période (de 2,5 à 7,6 milliards). Par ailleurs, depuis l'année 2008, le

38

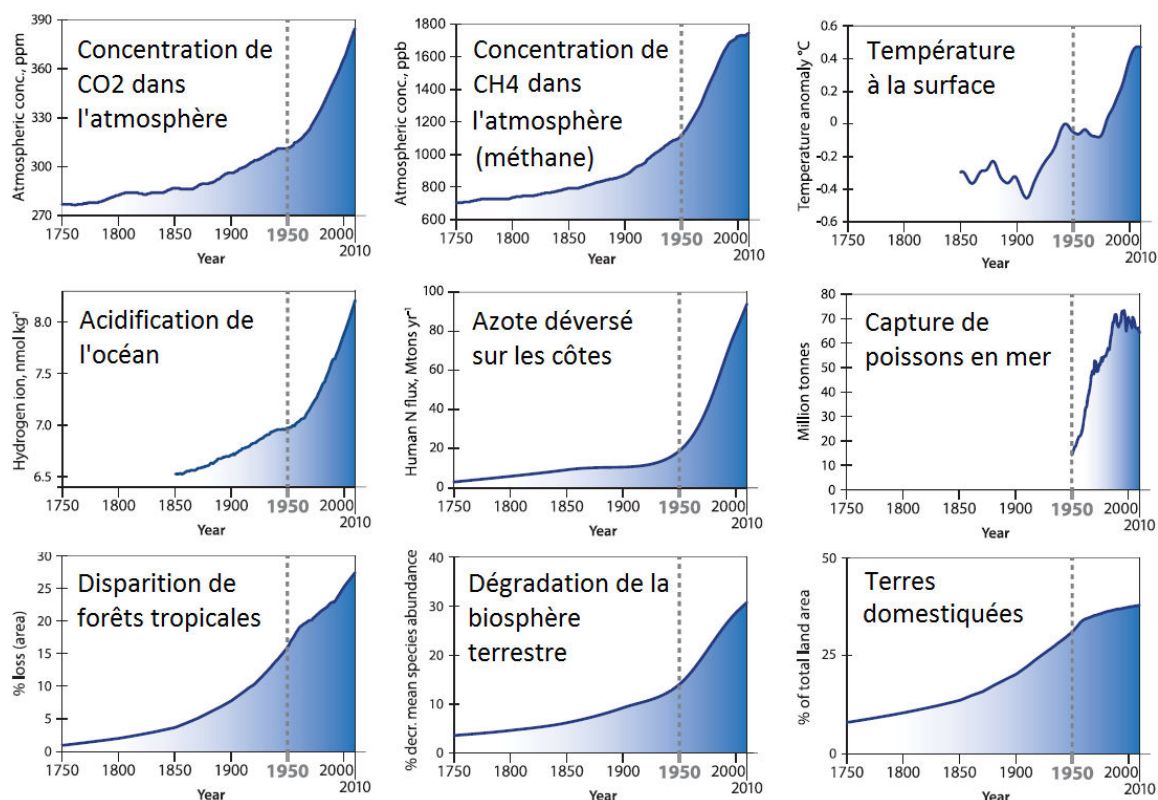
⁷¹ Au-delà de la question de savoir ce que l'expression « entreprise humaine » cache comme réalité, on peut se demander si cette façon qu'ont les auteurs mobilisés ici d'opposer analytiquement la partie « humaine » du système-Terre à sa partie « naturelle » ne risque pas de réintroduire en fin de compte, une dichotomie insidieuse, qui cimente notre conception de la nature comme étant quelque chose d'extérieur aux hommes. Sur un plan épistémologique, il paraît plus judicieux d'éviter l'anthropocentrisme, et de reconnaître que la nature est faite autant de *nature humaine* que de *nature non-humaine*. Il s'agit peut-être d'une simple querelle terminologique. Mais il faut en toute circonstance souligner que la vision de la nature comme « externalisable » (pour faire allusion à un concept d'économie environnementale) est précisément celle qui entretient sa destruction par les économies humaines.

⁷² Le pourcentage de terres domestiquées est ici la seule exception à cette tendance : bien qu'il n'ait cessé d'augmenter, on voit que sa progression a été plus lente à partir de l'après-guerre. En fait, si ce pourcentage s'est tassé, c'est paradoxalement parce qu'à l'échelle globale, l'agriculture s'est massivement industrialisée au cours des dernières décennies et qu'en conséquence, la production des terres s'est intensifiée pour une même surface disponible (Krausmann 2013a ; Vanloqueren & Baret 2013). En Belgique par exemple, le nombre d'exploitations agricoles n'a cessé de diminuer ces trente dernières années, alors que la surface cultivée est globalement restée la même. Le pays a en effet connu une baisse de 68% du nombre des exploitations sur 35 ans et c'est donc la taille moyenne de celles-ci qui a augmenté, et cette tendance est allée de pair avec une mécanisation plus conséquente et plus lourde, ainsi qu'un usage accru de fertilisants chimiques et de pesticides, pour pouvoir gérer de plus grandes surfaces et augmenter la productivité de court-terme à l'hectare (SPF Économie 2016). En elle-même, la surface arable diminue en outre en termes relatifs, du fait des limites physiques qui pèsent sur son appropriation et du processus de dégradation des sols auquel elle est soumise (Steffen & al. 2015a ; ELD 2015).

partage ville/campagne de la population mondiale qui avait prévalu jusqu'ici pendant toute notre histoire s'est finalement renversé : c'est plus de la moitié de l'humanité qui vit dans les villes aujourd'hui⁷³, avec un taux d'urbanisation sans précédent au cours des dernières décennies. En termes de substances physiques, la tendance est la même : sur l'ensemble du vingtième siècle, la consommation globale d'énergie a été multipliée par 10, l'extraction de minerais industriels par 27, et celle de matériaux de construction par 34, mais c'est bien depuis le milieu du siècle qu'une fracture a eu lieu ; notre consommation d'énergie est aujourd'hui cinq à six fois supérieure à ce qu'elle était avant la guerre, tandis que plus des trois quarts du dioxyde de carbone rejeté dans l'atmosphère et au moins 70% des minerais et des matériaux extraits l'ont été depuis lors (Krausmann & al. 2009 ; Schaffartzik & al. 2014 ; Bihouix & de Guillebon 2010) (cf. figure 4). Pour les populations non-humaines par contre, le dessin s'inverse : de 15% de la surface terrestre en 1950, les forêts tropicales n'en couvrent plus aujourd'hui que 6%, entre 1970 et 2012, le nombre d'animaux vertébrés terrestres a diminué de 58%,⁷⁴ et l'ensemble des animaux présents dans les mers a été divisé par deux (WWF 2016 ; Ceballos & al. 2017). Du côté des sols, la perte accélérée de biomasse et de biodiversité a aussi eu des conséquences désastreuses : un tiers des terres arables, autrement dit des sols suffisamment riches en matière organique pour être cultivables, ont ainsi été perdues au cours des 40 dernières années (Cameron & al. 2015). Le schéma d'ensemble est clair : au fur et à mesure que le capital industriel s'accumule, c'est donc le capital naturel qui se creuse.

Figure 2 : Tendances biophysiques

Source : Steffen & al. 2015a (sélection personnelle)



⁷³ 54,3% en 2016 selon la Banque Mondiale.

⁷⁴ Et cette proportion devrait atteindre 67% d'ici 2020.

Figure 3 : Tendances socio-économiques

Source : Steffen & al. 2015a (sélection personnelle)

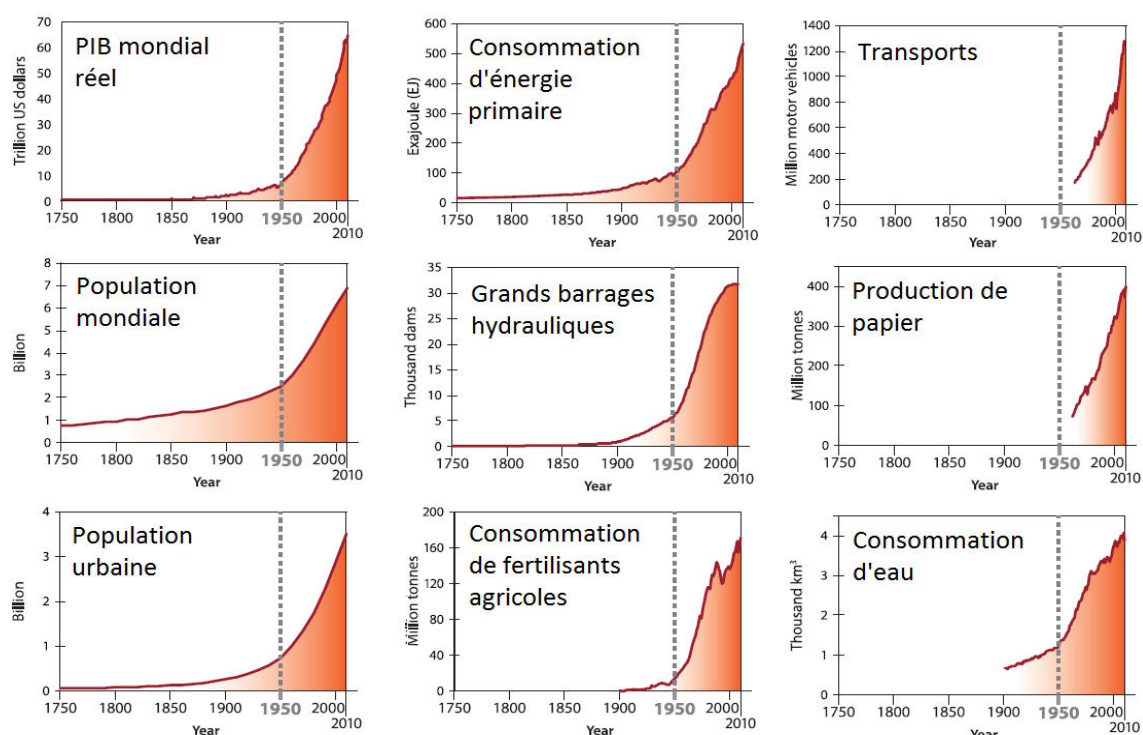
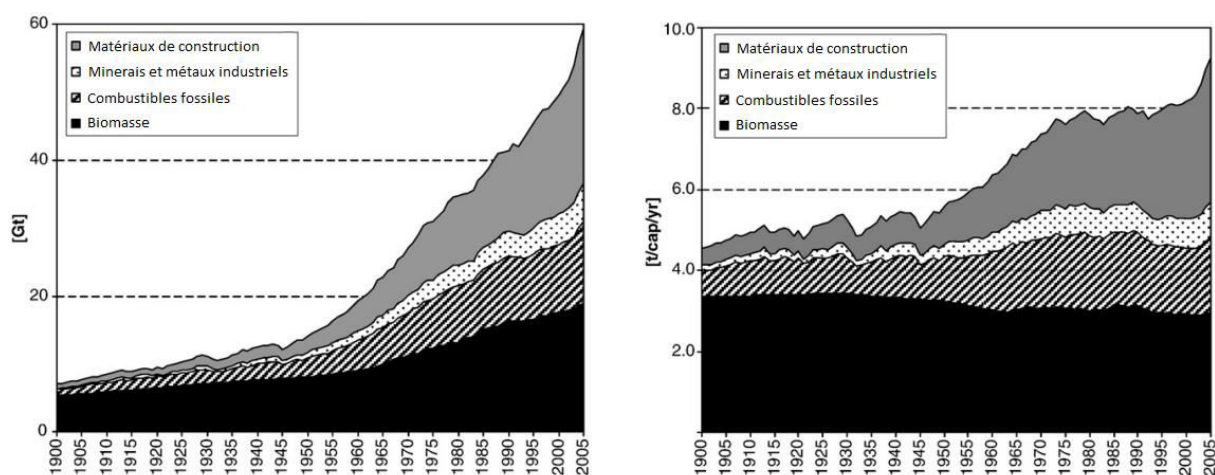


Figure 4 - Source : Krausmann & al. 2009. ⁷⁵

À gauche - matériaux totaux utilisés chaque année par l'humanité (en milliards de tonnes)
À droite - matériaux totaux utilisés chaque année par personne (moyenne globale, en tonnes)



Quand il a fallu pour la première fois donner un nom à ce décollage généralisé du milieu du siècle passé, des chercheurs ont proposé le terme de « Grande Accélération » (Steffen & al. 2007) visant à capturer à travers celui-ci « le caractère holiste, généralisé et interconnecté des transformations

⁷⁵ La figure ne reprend pas les dix dernières années, mais des travaux plus récents des mêmes auteurs (Krausmann & al. 2013a ; Schaffartzik & al. 2014) montrent que l'extraction humaine de matières premières, en particulier inorganiques (les 3 couches supérieures) s'est encore accélérée au cours de la décennie passée, dépassant les 70 milliards de tonnes par an en 2016 (Mayer & al. 2016).

qui touchent simultanément, depuis 1950, les sphères socio-économiques et biophysiques du système-Terre, dépassant de loin le seul problème du changement climatique » (Steffen & al. 2015a p. 82). L'idée de Grande Accélération permet donc de souligner, d'un point de vue socio-écologique, tout autant le caractère exceptionnel du processus de développement humain qui a été mis en marche il y a six ou sept décennies, que sa continuité par rapport à celui qui est en cours depuis le début du dix-neuvième siècle, et qui prend racine dans ce qu'on a appelé la Révolution industrielle. Cette notion a depuis lors fait école, donnant son titre à un ouvrage de référence paru l'an passé à Harvard : « La Grande Accélération. Histoire environnementale de l'Anthropocène depuis 1945 » (McNeill & Engelke 2016).

Dans le titre de cet ouvrage, une autre notion demande elle aussi à être expliquée : celle d'« Anthropocène », popularisée il y a une quinzaine d'années par le prix Nobel de chimie Paul Crutzen (Crutzen & Stoermer 2000). En introduisant ce terme, ce que Crutzen suggérait alors était que la période géologique de l'Holocène, vieille de 11 700 ans, était en fait derrière nous depuis – au moins – plusieurs décennies déjà, car les changements du système-Terre dans la période contemporaine seraient devenus suffisamment importants d'un point de vue géologique pour marquer l'entrée dans une nouvelle époque. Néanmoins pour Crutzen, contrairement à tous les points de repère précédents, la particularité de cette nouvelle ponctuation du temps géologique était qu'elle ne refléterait plus l'action des grandes forces de la nature mais bien celle d'une force géologique d'un nouveau type : l'homme lui-même (Steffen & al. 2007).

Et en effet, l'observation le confirme : plusieurs interventions de l'homme au sein du système-Terre sont devenues suffisamment importantes aujourd'hui pour laisser des marques de long-terme sur la planète, pour certaines irréversibles. En particulier, certains signes de l'activité humaine dans les strates récentes de la couche terrestre, incluant des dépôts de divers types de pollution atmosphérique, des traces de plastique, d'aluminium, de particules de béton, ou encore des isotopes radionucléaires artificiels, laisseront des marques indélébiles dans la géosphère et la cryosphère, et témoigneront donc encore de l'action transformatrice de l'homme sur son environnement dans des millions d'années. En outre, notre analyse de la transgression de certaines limites planétaires, en particulier le changement climatique et la perte d'intégrité de la biosphère, montre bien que l'homme modifie son environnement dans une mesure qui est géographiquement globale, et quantitativement suffisante pour se démarquer à l'échelle du temps planétaire⁷⁶. En conséquence, ces dernières années, la notion d'Anthropocène est devenue un enjeu scientifique à part entière : en 2017, la Commission Internationale de Stratigraphie étudie la question de savoir si le terme justifie plutôt l'ouverture d'une nouvelle ère ou période (divisions de niveau supérieur) ou bien d'une nouvelle époque⁷⁷ ou série (divisions de niveau intermédiaire) dans la terminologie des géologues.

⁷⁶ Ainsi, on parle aujourd'hui de sixième extinction de masse pour caractériser la période contemporaine sur le plan biologique, tant les pertes de vie biologique enregistrées ces dernières dizaines d'années sont colossales (le système-Terre n'en avait plus connues de semblables depuis 65 millions d'années (Ceballos & al. 2017)). En ce qui concerne le climat, la dernière fois qu'il y a eu autant de dioxyde de carbone dans l'atmosphère que les niveaux que nous sommes susceptibles d'atteindre d'ici la fin du siècle, la température moyenne à la surface du globe était supérieure de 16°C à celle que nous connaissons aujourd'hui (Kiehl 2011). Avec d'autres, ces transformations colossales, effectives ou à venir, méritent donc amplement de délimiter notre entrée dans un nouveau régime planétaire caractérisé par l'exception humaine.

⁷⁷ C'est pour ce rang géologique que penche la majorité (20,5/34) des scientifiques rassemblés dans la commission de travail sur l'Anthropocène mandatée par la Commission Internationale de Stratigraphie. Si ce repère est retenu au terme des tests stratigraphiques et des votes qui restent à conduire dans les 2-3 années à

Nous connaissons le verdict définitif d'ici deux ans environs, bien qu'un consensus émerge déjà des travaux préparatoires : l'Anthropocène est une réalité géologique (peu importe le rang) et il doit être formalisé sous une forme ou une autre (AWG 2016)⁷⁸.

Mais à la vue des graphiques précédents, on ne regarde pas seulement vers le passé, car on ne se pose pas juste la question de savoir ce qui a pu produire de telles tendances ; on se demande aussi combien de temps elles vont encore pouvoir continuer physiquement pour alimenter le fonctionnement de l'économie à l'avenir. En réalité, toute l'analyse prospective des répercussions économiques de la crise écologique qui a été menée jusqu'ici, et qui se focalisait sur les risques encourus par une poursuite de la croissance de nos activités du fait de la dégradation continue des services écosystémiques que ces activités génèrent indissociablement en négatif, est en partie incomplète. En effet, elle ne prend pas en compte l'arrivée à maturité d'un autre phénomène écologique, jusqu'ici laissé en dehors du tableau, mais qui *pourrait* pourtant être beaucoup plus tôt fatal à notre économie que la transgression des limites planétaires sur le plan productif. Il s'agit de l'épuisement ou de la saturation annoncée du flux économiquement exploitable de certaines matières premières qui ont, jusqu'à présent, été indispensables à notre développement, problématique que l'on regroupe en général sous le nom des pics de ressources.

3.2) Les pics de ressources

Mentionnons d'abord qu'avant d'être une problématique, le pic des ressources est une *théorie* : celle-ci a originellement été formulée par le géologue américain King Hubbert, lorsqu'il a prédit dès 1956 l'arrivée à échéance d'une maximisation et d'une baisse future inéluctable de la production américaine de pétrole à partir des années 70. La prédiction de Hubbert s'étant rigoureusement confirmée historiquement pour le cas des États-Unis (jusqu'au rebond de la production de pétrole américain dans les années 2000, grâce à de nouvelles conditions technologiques non prévues par Hubbert, rendant possible l'extraction des pétroles non-conventionnels (cf. annexe 6)) son principe théorique a fait l'objet de diverses élaborations, principalement autour de la question du pic du pétrole mondial, et a été appliqué à d'autres zones géographiques et à d'autres ressources.

42

À vrai dire, on a déjà rencontré un pic de ressources plus haut : le pic des ressources halieutiques. Bien que la différence qualitative soit évidente, quantitativement, la chronologie d'un pic, tel que décrite par la théorie, est en fin de compte la même pour ces matières premières vivantes qu'étaient les poissons que pour les matières premières inorganiques (minerais, métaux, combustibles fossiles et autres matériaux) dont il va être question ici⁷⁹. Les poissons vont donc nous fournir un point d'appui pour illustrer la notion (on comprendra plus loin la raison de cette analogie inattendue).

venir pour trancher définitivement la question, cela voudra donc dire que l'Holocène est officiellement terminé (mais que nous restons dans l'ère du Quaternaire) (AWG 2016).

⁷⁸ Au-delà de ces enjeux de définition, la révélation que convoque la notion d'Anthropocène n'a peut-être pas besoin, sur le fond, de l'assentiment formel des géologues pour être reçue par la société. Ce qu'elle suggère est simplement que la magnitude des changements réels que l'humanité impose à son environnement dans la période contemporaine est devenue plus importante que celle du changement naturel lui-même, et que ces changements sont en train de générer une transformation physique bien plus radicale que nous ne voulons le croire.

⁷⁹ La différence essentielle étant bien sûr que les stocks poissons peuvent se reconstituer à un rythme relativement rapide à notre échelle ; ce qui n'est pas le cas des ressources géologiques. Il n'empêche que même le rythme de reproduction biologique des poissons s'avère visiblement trop lent pour les exigences de notre système économique.

Globalement, la forme graphique d'un pic de ressource est à peu près celui d'une « bell-shaped-curve » (cf. annexe 6). Le schéma général est le suivant : lorsqu'on arrive au niveau du pic d'une ressource géologique dans une zone géographique donnée (qui peut être mondiale), la production de celle-ci va en fait atteindre un flux maximum, car il deviendra impossible⁸⁰ d'augmenter la quantité totale extractible de celle-ci par unité de temps sur l'ensemble des gisements découverts dans la zone (comme c'est le cas à l'échelle mondiale pour les poissons depuis la fin des années 80, cf. supra, pp. 16-17). Ensuite, selon la théorie, au bout d'un certain temps après que ce flux maximum ait été atteint dans la zone considérée, le flux d'extraction va nécessairement finir par y diminuer du fait de la finitude des ressources (comme on l'observe depuis plusieurs décennies pour les poissons en Méditerranée et dans la Mer Noire) car ce seront alors les réserves des gisements eux-mêmes qui vont se mettre à décliner progressivement jusqu'à l'épuisement final.

Il y a deux nuances à apporter à cette description: tout d'abord, bien que la théorie du pic d'Hubbert se soit vérifiée dans de multiples configurations extractives locales, son avatar principal (la théorie du pic du pétrole mondial) a toujours été repoussée jusqu'à aujourd'hui. En effet, si on considère l'extraction d'une ressource à l'échelle mondiale, la confrontation avec son pic peut toujours être repoussée pendant un temps grâce à la découverte de nouveaux gisements insoupçonnés, à des techniques nouvelles ou à une intensification de l'extraction⁸¹ (c'est le cas avec la surpêche pour les poissons). Ensuite, il faut souligner que même lorsque la théorie se confirme à l'échelle locale, et qu'on atteint le pic d'une ressource, le flux maximum de celle-ci peut cependant être maintenu pendant une période de temps plus ou moins longue avant de connaître un déclin : en effet un pic, graphiquement, n'est pas forcément pointu mais peut très bien être plane (cf. annexe 4 pour les captures de poisson, qui en pratique sont maximisées mais stables depuis trente ans). Pour ces raisons, qui rendent le verdict difficile, les analystes s'affrontent encore en ce qui concerne le pétrole pour savoir si le pic de celui-ci est déjà atteint ou s'il sera seulement atteint d'ici quelques années, voire d'ici quelques décennies. Selon une étude récente néanmoins (Mohr & al. 2015) il se trouve que nous aurions peut-être déjà atteint en réalité une sorte de plateau dans le flux maximum de pétrole extractible (techniques conventionnelles et non-conventionnelles confondues) qui pourrait se maintenir jusqu'à la fin du siècle avant de décliner. Mais celui-ci ne serait dès lors, plus en mesure d'augmenter, bien que l'étude estime qu'une marge de progression dans le flux soit encore possible éventuellement jusqu'en 2025, mais pas au-delà⁸².

Mais au bout du compte, si on dépasse la question du pétrole en tant que tel et qu'on considère seulement la logique théorique qui est à l'œuvre, ce que suggèrent la théorie du pic et les divers cas d'étude géologiques qui semblent s'être vérifiés depuis lors, c'est bien la chose suivante : l'atteinte d'un pic de ressource, quel qu'il soit, est synonyme d'une contrainte indépassable pour notre économie, car elle implique en pratique une situation de rationnement forcé. Faisons l'hypothèse que nous sommes confrontés à un pic au niveau mondial, peu importe la ressource. La quantité qui est alors économiquement exploitable de celle-ci par unité de temps a définitivement terminé son

⁸⁰ Dans des conditions technologiques données.

⁸¹ C'est ce qui se passe pour le pétrole notamment avec l'extraction des pétroles non conventionnels, ou avec les activités minières en eau profonde (cf. notes 10 et 11). Ces techniques d'extraction nouvelles, qui permettent de repousser le pic, ont néanmoins souvent le désavantage d'être plus délétères encore sur le plan écologique que les techniques précédentes.

⁸² L'étude suggère aussi que l'ensemble des combustibles fossiles que l'humanité est en mesure d'extraire pourrait atteindre son pic vers 2025.

ascension et la seule chose que cette quantité pourra faire à l'avenir (toutes autres choses restant égales par ailleurs) sera de se maintenir ou de décliner. En supposant que la demande reste inchangée, cette tension risque alors de se traduire au marché sous la forme d'une hausse des prix car, même si une fois au pic la quantité encore disponible de la ressource en termes de stocks⁸³ demeure parfois très importante, celle-ci n'a pas d'influence sur le volume de ressource qui est effectivement disponible sur le marché. La contrainte qui nous est imposée en termes de flux est donc bien réelle, délimitant, pour la ressource considérée, un cap d'input économique au-dessus duquel l'économie ne peut plus se permettre de produire. Au bout d'un temps après l'atteinte de ce premier cap, si les conditions technologiques restent les mêmes, les stocks de certains gisements vont eux-mêmes progressivement s'épuiser, voyant en conséquence le cap s'abaisser, exerçant une pression de plus en plus grande sur les prix et la production.

En fait, pour reprendre le schéma théorique qui a été mobilisé jusqu'ici, l'atteinte d'un pic de ressource peut aussi être conçue, d'une certaine manière, comme la perte d'un service écosystémique pour l'économie. Elle n'est pas souvent perçue comme telle dans les analyses économiques, mais on peut tout à fait la comprendre sous cette forme. Concrètement, il est vrai que la saturation ou l'épuisement d'un flux de ressources géologiques n'implique pas directement la perturbation d'une fonction écologique dans les écosystèmes du présent, car les matières inertes que nous extrayons n'interviennent plus, en général, de manière significative dans le fonctionnement global du système-Terre⁸⁴. Néanmoins, l'accessibilité de ces ressources à l'homme est bel et bien le fruit du remplissage d'une fonction écologique par les écosystèmes du passé. Le fait que nous puissions dans le futur devenir incapables d'extraire ces ressources dans les quantités souhaitées, signifie bel et bien que nous sommes en passe de dépasser le rythme auquel leur reproduction naturelle est possible. C'est ce que visait à montrer l'analogie avec les poissons. En cela, la confrontation avec un pic de ressource géologique (pétrole, minerais, métaux, gaz...) peut donc être vue comme la perte des bénéfices d'un service écosystémique. Par rapport aux services pris en compte précédemment, la différence est simplement l'échelle de temps considérée : à l'échelle du temps biologique ou du temps climatique, nous nous approprions des services écosystémiques qui étaient le produit de cycles naturels dont la reproduction se joue en années ou (au maximum) en milliers d'années ; à l'échelle du temps géologique, ces services (à savoir la formation des matières premières que nous extrayons) résultent de cycles naturels qui ont eu cours sur plusieurs millions voire plusieurs centaines de millions d'années. Le caractère irréversible de la perte de ces « services géologiques » pour notre économie est donc d'autant plus criant⁸⁵.

Dès lors sur le plan économique, à moyen terme, ce problème paraît presque plus contraignant empiriquement que la majorité des impacts économiques probables qui ont été examinés plus haut

⁸³ C'est-à-dire, au contraire du flux, sans prendre en compte d'unités de temps, mais seulement le volume des réserves restantes dans l'absolu.

⁸⁴ Ce qui n'empêche pas que notre *consommation* subséquente de ces ressources entraîne effectivement, par les rejets qu'elle génère, des perturbations écologiques profondes pour le système-Terre.

⁸⁵ Ainsi on pourrait considérer l'usage des combustibles fossiles et l'émission de gaz à effet de serre comme l'appropriation de deux services écosystémiques bien précis : d'un côté de la chaîne, appropriation de la forme d'énergie très spécifique qui nous est fournie gratuitement par le pétrole et d'autres combustibles fossiles formés sur des millions d'années par les écosystèmes ; de l'autre, appropriation de l'atmosphère, comme « poubelle écosystémique » dans laquelle rejeter les déchets liés à la consommation de ces combustibles.

avec le cadre d'analyse des limites planétaires⁸⁶. En effet, la perte de certains services écosystémiques tels que la pollinisation animale ou la reproduction des ressources halieutiques s'exprimait certes comme une menace réelle pour des secteurs isolés, mais elle restait relativement marginale pour l'ensemble de l'économie, car il existait un certain potentiel de substitution face à la rencontre avec les contraintes biophysiques à venir (ainsi on peut toujours se rabattre sur d'autres semences que celles que les animaux pollinisent, et se mettre à consommer autre chose que du poisson, ou en produire autrement). En ce qui concerne la perte future d'autres services écosystémiques plus importants et moins facilement substituables, tels qu'une perte radicale et généralisée de la fertilité des sols, ou d'autres impacts majeurs telle qu'une élévation marquée du niveau des mers ou un assèchement des cours d'eau, de telles conséquences de la transgression des limites planétaires généreront effectivement des répercussions lourdes sur l'ensemble de l'économie, et il sera dur d'y échapper par un jeu de substitution. Néanmoins, ces problèmes nous semblaient promis pour dans plusieurs décennies au minimum, voire près d'un siècle. Ici, la différence est la suivante : tout d'abord, parmi les ressources dont le flux va être prochainement maximisé ou épuisé, certaines matières paraissent jusqu'à aujourd'hui irremplaçables pour la poursuite du développement de l'économie dans les grandes normes technologiques qui sont les siennes depuis presque un siècle ; ensuite, notre confrontation future avec ces pics de ressources est annoncée, pour de nombreuses matières, dans deux ou trois décennies au maximum (moyen-terme) et même pour certaines d'entre elles, d'ici moins d'une décennie seulement (court-terme). Dès lors, en particulier pour les matières qui nous sont aujourd'hui les plus indispensables (comme le pétrole, mais aussi, par exemples, les roches phosphatées ou l'eau douce), les impacts économiques que ces contraintes écologiques généreront deviendront directement perceptibles une fois que nous arriverons au stade du pic, et leur importance augmentera encore une fois que nous aurons dépassé celui-ci. Ainsi, la différence entre la confrontation avec les limites écologiques qui ont été examinées plus haut dans le cadre d'analyse des limites planétaires, et la confrontation avec les limites imposées par les pics de ressources est la suivante : *les premières pouvaient être dépassées en pratique* (on peut toujours aller plus loin que le maximum qui est supportable écologiquement par le système-Terre ; on n'en payera le prix économique que plus tard) *tandis que les secondes ne le peuvent pas* (dès lors qu'on atteint le pic, la contrainte économique est immédiatement perceptible⁸⁷).

45

Dans ce cas-ci, la démarche analytique qui s'impose pour pouvoir apprécier les impacts économiques de la dégradation du service écosystémique (à savoir, la saturation voire l'épuisement du flux de telle ou telle ressource) est donc la suivante : il faut 1) pouvoir estimer la date probable de notre confrontation avec le pic mondial de la ressource, ainsi que son niveau et son probable comportement dans le temps (quand et à quel niveau le flux global de ressource sera-t-il maximisé,

⁸⁶ À part peut-être deux phénomènes bien précis : l'impact qu'aura probablement, au sein du processus de perte d'intégrité de la biosphère, la poursuite de la dégradation du sol sur notre agriculture, et aussi notre dépassement de la limite de consommation d'eau douce (cf. supra) mais cette dernière n'est autre qu'un pic de ressource spécifique qui a été intégré dans le cadre d'analyse des limites planétaires.

⁸⁷ Pour donner sens à cette même différence entre les deux types de contraintes écologiques, Servigne & Stevens (2015) suggèrent d'appeler les premières des *frontières*, toujours franchissables d'une façon ou d'une autre, et les secondes des *limites*, véritablement infranchissables. C'est d'ailleurs la traduction qui correspondrait le mieux au terme anglais de « planetary boundaries » (Rockström & al. 2009 ; Steffen & al. 2015b) mais pour lequel en pratique, on parle le plus souvent de « limites » planétaires dans la littérature francophone. L'appellation de « frontières » planétaires serait donc plus correcte pour désigner tous les processus qui ont été étudiés dans la première et la seconde partie.

et pour combien de temps pourra-t-il conserver ce niveau avant de décliner ?⁸⁸) ; 2) évaluer l'importance des usages de la ressource dans l'économie et prendre en considération les alternatives dont nous disposons à son égard dans la sphère de la consommation (quelle est l'élasticité de la ressource pour la production des biens et services nécessaires au bien-être collectif et quelle est notre capacité à la remplacer par des biens substitués dans la situation existante?) ; 3) prendre en considération le changement technique et les alternatives dont nous disposons dans la sphère de la production (quelles sont les éventuelles avancées technologiques pouvant nous rendre disponibles soit de nouveaux biens substitués, soit de nouveaux gisements précédemment inaccessibles ?) Avec ce cadre d'analyse en tête, il faudrait alors analyser deux problématiques distinctes : celle des ressources énergétiques et celle des autres ressources. En effet, l'énergie tient un rôle à part dans la dynamique des économies humaines, mais elle n'est pas non plus le seul facteur limitant du développement économique, puisque même une quantité infinie d'énergie ne peut réalimentement permettre de s'abstraire de la contrainte matérielle imposée par la rareté absolue des autres matières (Cleveland & Ruth 1997). On voit donc toute la complexité du sujet s'il est traité de manière rigoureuse. Bien que le traitement de la question énergétique et de la saturation du flux des matières premières soit donc indispensable pour appréhender les limitations globales qu'impose la nature au développement économique humain, cette question ne sera pas, en raison de sa complexité, développée ici. Néanmoins, quelques estimations brutes trouvées dans la littérature sur la raréfaction de certaines ressources bien spécifiques seront données plus bas pour appuyer l'analyse théorique.

3.3) L'appropriation comme condition du développement économique

Toute l'analyse menée dans la première et la seconde partie pointe vers une même conclusion : la façon dont le développement de notre économie s'est structuré historiquement, vu comme un dépassement du secteur primaire par le développement des secteurs secondaire puis tertiaire, implique autre chose qu'un progrès technique et économique endogène à la dynamique des marchés. En effet, le succès productif de notre industrie, et la valeur ajoutée de nos services, repose aussi sur un autre procédé : une appropriation de la valeur économique *non-marchande* qui est issue des écosystèmes. Précisément, dans la perspective d'économie écologique qui a été mise en avant ici, il a été montré que le développement économique est indissociable du processus par lequel les écosystèmes *subsistent* via les services écosystémiques qu'ils nous rendent, la production d'une valeur économique marchande dans le secteur primaire, sur laquelle va ensuite pouvoir s'ériger toute la valeur ajoutée de notre économie. Cette appropriation initiale, qui se manifeste à l'interface entre l'économie et l'écologie⁸⁹ repose cependant sur une négation de la valeur économique des services fournis par les écosystèmes, et c'est précisément cette négation qui permet et nécessite aussi la négation de la dignité du producteur dans ce secteur plus encore que dans les autres (les travailleurs du secteur primaire sont le plus souvent, structurellement moins bien rémunérés que

46

⁸⁸ Il est évident que la détermination précise de tels niveaux est un exercice qui donne rarement des résultats univoques, non seulement pour des raisons techniques, mais aussi surtout pour des raisons économiques et politiques, les puissants intérêts particuliers qui peuvent être directement impactés par la croyance collective dans la réalité d'un pic, ou au contraire par sa mise en doute, motivant le financement d'études contradictoires.

⁸⁹ C'est-à-dire dans le secteur primaire la majeure partie du temps, mais comme on l'a vu, pas uniquement.

ceux des autres secteurs⁹⁰). En effet, dans une logique productive marchande, là où la valeur non-marchande de la nature peut être appropriée à la source, on peut et on doit se permettre de ne rémunérer ceux par qui elle transite que par une fraction de la valeur totale dont ils se trouvent porteurs dans l'échange, car on n'a pas à rémunérer la nature à travers eux. De cette différence naîtra alors la possibilité du développement économique dans les secteurs supérieurs⁹¹.

Le système économique repose donc sur cette condition : les facteurs de production par lesquels l'appropriation primaire de la valeur est effectuée dans les écosystèmes *doivent* être rémunérés en-dessous de la valeur totale qu'ils permettent d'approprier, car la condition du développement dans la sphère marchande de l'économie est l'appropriation d'une valeur non-marchande *disproportionnellement plus grande* dans les écosystèmes. C'est la raison pour laquelle on peut douter qu'il soit envisageable pour les agents économiques qui sont soumis aux règles du système de payer le « prix environnemental optimal » des produits qu'ils échangeraient en internalisant les « externalités négatives » dans la transaction. En effet, les externalités négatives représentent en réalité le *mode de fonctionnement optimal* de l'échange économique : pour servir le développement de l'économie, la part internalisée (ou « marchandisée ») de la nature doit être au départ, la moins élevée possible par rapport à sa part externalisée (ou non-marchande, et appropriée)⁹² afin de pouvoir maximiser la part marchandisée dans les échanges suivants (condition même de la réalisation du profit qui sous-tend les échanges marchands). Mais que se passe-t-il si ces énormes réservoirs de valeur gratuitement appropriable que constituent les écosystèmes sont mis en péril par les troubles qui ont lieu aujourd'hui au sein du système-Terre, du fait même du régime d'appropriation que nous avons mis en place ? Le développement économique peut-il encore continuer sans entraves ? C'est ce passage aux limites que l'on peut déjà constater aujourd'hui dans des industries primaires telles que la pêche commerciale⁹³ ou l'agriculture industrielle⁹⁴ : avec le

47

⁹⁰ En effet, pour prendre l'agriculture pour exemple, un fait stylisé des économies contemporaines qu'elles soient « développées » ou « en développement », est bien que les travailleurs agricoles ont un niveau de revenu nettement inférieur aux travailleurs de la plupart des autres secteurs (Alvarez 2015 ; O'Keefe 2015).

⁹¹ En termes d'économie politique marxiste, on dirait que l'accumulation du capital par l'exploitation des travailleurs dans les secteurs supérieurs, est rendue possible à la base par l'exploitation des travailleurs du secteur primaire, et plus encore par l'appropriation disproportionnée de la nature que cette exploitation rend possible à travers eux.

⁹² En réalité ces deux valeurs qui cohabitent en permanence dans l'échange sont difficilement comparables puisqu'elles n'ont pas les mêmes unités de compte : la première est monétaire et la seconde, non-monétaire (mais tout aussi *économique* du point de vue adopté ici). C'est la volonté de pouvoir les comparer qui a justifié les exercices d'évaluation de type « Costanza » qui ont été critiqués plus haut. Bien que ces calculs soient, comme on l'a déjà dit, assez hasardeux, Costanza & al. (2014) estimaient qu'en 2011 la valeur globale des services rendus aux hommes par les écosystèmes, en termes monétaires, totalisait jusqu'à 2 fois et demi celle du PIB de cette année, et ce malgré une baisse dans la valeur de ces services à l'échelle globale au cours des dernières décennies (suite à leur dégradation). Avec toutes les réserves qu'on peut avoir pour ce genre de comparaison, cela soutient néanmoins notre hypothèse selon laquelle une appropriation par l'économie de marché d'un volume disproportionné plus grand de valeur non-marchande par rapport au volume de valeur marchande produit est une condition de cette dernière.

⁹³ Aujourd'hui la « rente en ressource » de la pêche est négative : les états doivent la subsidier pour qu'elle puisse continuer à être productive via une intensification de la surpêche, mobilisant au total des ressources marchandes supérieures aux revenus qu'elle génère (Sumaila & al. 2013). Les coûts écologiques qui doivent ainsi être compensés sont pourtant appelés à s'accroître, puisque qu'il s'agit d'une spirale négative : si la surpêche s'intensifie, c'est parce que la pression déjà exercée par la surpêche passée rend les poissons de plus en plus rares et de moins en moins accessibles. Néanmoins, la fonction de ces marchandises dans le reste de l'économie (supporter la création de valeur ajoutée) justifie que les états sacrifient des ressources marchandes

temps, les coûts écologiques de long-terme, d'abord invisibles, que l'appropriation humaine imposait à la nature dans ces secteurs afin de garantir les profits de court-terme qu'ils permettaient de générer dans ce secteur et dans les autres, muent progressivement en pertes productives à mesure que l'échéance du long-terme se rapproche de nous, et ces pertes finissent par réduire la part de la valeur qui est appropriable par l'homme à court-terme. En conséquence, ces pertes augmentent donc la part de la production qu'il devient nécessaire d'internaliser dans les circuits de la valeur marchande⁹⁵, et rendent ainsi les produits des secteurs correspondants plus coûteux sur le marché, alors que la logique du développement économique commande précisément de diriger une part maximale de cette valeur vers les secteurs supérieurs, qui sont ainsi vus comme « créateurs » de valeur ajoutée. En réalité, il faudrait plutôt dire qu'ils étaient jusque-là subsidiés par l'appropriation de la valeur dans les secteurs qui rencontrent aujourd'hui leurs limites.

C'est le même phénomène qui se présente en théorie lors de la confrontation avec un pic de ressources : alors même que les prix des matières premières sont structurellement bas depuis quelques décennies, précisément parce que le système a besoin d'une appropriation maximale de la valeur naturelle (donc d'une rémunération minimale de sa part marchande) pour pouvoir propulser la machine de la croissance, des pics de plusieurs ressources essentielles commencent à être pris de plus en plus au sérieux dans la littérature⁹⁶, annonçant le risque de devoir payer à l'avenir un prix de

supérieures à celles qu'elles génèrent directement pour les producteurs, car la valeur économique de cette fonction (une valeur non-marchande) est en réalité bien supérieure à celle des produits qui la supportent.

⁹⁴ La situation est semblable aujourd'hui pour l'agriculture industrielle dans les pays développés : on sait qu'elle est directement dépendante des subsides des états pour rester compétitive à l'échelle internationale, mais surtout que les coûts écologiques de ce secteur sont probablement les plus élevés à l'échelle de tout le système-Terre, et qu'ils se répercutent puissamment sur l'output du secteur lui-même (cf. supra). Néanmoins, le maintien de cet output, et de prix suffisamment bas dans ce secteur est indispensable au développement de l'économie : si les prix de l'alimentation augmentent, c'est le pouvoir d'achat qui diminue (à salaire inchangé) et la consommation qui se réduit dans les autres secteurs.

⁹⁵ Ainsi, quand il n'y a plus d'abeilles pour fournir gratuitement le service de pollinisation à cause des coûts écologiques générés par l'utilisation des pesticides, on peut les remplacer par des hommes, mais cette main d'œuvre est rémunérée, et moins productive, que les pollinisateurs non-humains. De même, quand il n'y a plus suffisamment de poissons appropriables dans la nature, on peut aussi faire le choix de développer l'aquaculture, mais c'est encore une activité où il faut, soi-même, entretenir un service écosystémique (la reproduction des poissons) que les océans nous offraient gratuitement auparavant (d'où un prix des poissons 4 à 5 fois plus cher en aquaculture qu'en pêche en milieu naturel). De même en agroforesterie, où il faut aujourd'hui administrer et replanter les forêts si l'on veut en exploiter le bois, là où il était directement appropriable par le passé ; de même en agriculture, où l'usage intense de fertilisants (dont les prix d'achat à la tonne sont souvent comparables à ceux auxquels les récoltes se vendent) est devenu indispensable à la poursuite de la production face à la perte de fertilité naturelle du sol. Celle-ci offrait pourtant le même service que les engrais, mais sans avoir à être monnayée. On pourrait multiplier les exemples, la logique reste la même : la part de valeur non-marchande appropriable diminue avec la crise écologique, et la part de valeur marchande qu'il faut injecter dans la production pour compenser cette perte augmente (au détriment des autres secteurs).

⁹⁶ Comme par exemple, certains métaux et minerais cruciaux pour des industries aussi importantes que l'automobile ou la pétrochimie (Schoolderman & Mathlener 2012) ; ou aussi les roches phosphatées, qui sont indispensables à la synthèse des fertilisants utilisés dans l'agriculture industrielle (Cordell 2009) ; ou encore le sable (le matériau le plus utilisé par l'homme dans l'économie) qui est massivement requis dans le secteur de la construction afin de permettre le coulage du béton (UNEP 2014). Si les coûts d'extraction de ces ressources augmentent démesurément dans le secteur primaire mondialisé, ou que la demande finit par y dépasser l'offre, une hausse du prix de ces matières pourrait entraîner des répercussions importantes pour les secteurs supérieurs. Cette éventualité n'est qu'une autre expression de l'hypothèse générale qui est ici faite sur le rôle joué par l'appropriation de la valeur non-marchande de la nature dans le développement économique : si les

plus en plus cher pour faire rentrer ces morceaux de nature qui nous sont indispensables dans la sphère marchande de l'économie. Ce risque, c'est celui de voir diminuer grandement, par là-même, la quantité de « valeur ajoutée » qui pouvait être créée jusque-là en maximisant la part de valeur non-marchande appropriée dans les premiers stades de l'échange entre l'économie et la nature. Cette tendance est aujourd'hui à l'oeuvre dans le secteur de l'énergie : en effet les coûts de production y rencontrent une hausse de long-terme (Goldman Sachs 2013) et en particulier, on observe que sur les quinze dernières années, la quantité de valeur marchande qu'il a été nécessaire d'avancer par nouveau baril de pétrole (« capital expenditure per new barrel ») a augmenté de 10,9% annuellement, tandis qu'elle n'avait augmenté que de 0,9% par an au cours des quinze années précédentes (Kopits 2014). Cette augmentation du coût de l'appropriation génère des tensions évidentes du côté de l'offre, car les firmes voient leurs marges diminuer à moins d'augmenter leurs prix. Vu le comportement très particulier du marché du pétrole ces dernières années, il est dur de savoir dans quelles mesure ces tensions ont pu ou non se transmettre par les prix au reste de l'économie. Ce qui est sûr par contre, c'est que selon l'Agence Internationale de l'Énergie, du fait de ces rendements d'extraction en baisse par unité de capital (un moindre rapport entre valeur appropriée et valeur marchande sacrifiée pour un même baril) les firmes pétrolières rechignent à investir dans de nouvelles opérations de prospection, et qu'en conséquence, si de nouvelles capacités de production ne sont pas mises sur le marché dans les années à venir, la demande de pétrole pourrait dépasser l'offre après 2020, entraînant une forte hausse des prix (AIE 2017).

En somme, que ce soit sous la forme d'une dégradation des écosystèmes résultant de la transgression des frontières planétaires (partie 1 et 2) ou sous celle de la confrontation avec les limites productives imposées par les pics de ressource à venir (point précédent), on pressentira peut-être mieux encore la logique des crises économiques qu'annonce la crise écologique à l'aide de quelques analogies. D'un point de vue biophysique tout d'abord, il est tentant de voir ces crises futures comme des répercussions, au sein du système économique, d'un *effet de cascade* qui débutera dans les écosystèmes, ou encore, de percevoir leur déclenchement à venir ou en cours comme celui de *boucles de rétroactions économiques négatives* qui, à l'instar du climat, voient un élément constitutif du système économique dégradé par le fonctionnement-même de celui-ci (ici, les services écosystémiques) produire en retour sur la dynamique de l'économie ses propres effets négatifs. À l'inverse d'un point de vue économique, on pourrait aussi voir les perturbations qui s'annoncent comme le résultat d'une sorte d'*effet multiplicateur écologique*, se propageant depuis le secteur primaire directement touché par la crise écologique vers les secteurs supérieurs apparemment épargnés en premier lieu, transformant ainsi des pertes d'abord relativement restreintes de la valeur économique brute en pertes décuplées de la valeur ajoutée. Dans tous les cas, le mouvement est le même : passé un certain seuil la nature répondra à une appropriation économique excessive par une suspension des subsides qu'elle versait aux hommes, et par une inversion des termes de l'échange ; à présent, c'est contraint que l'homme devra la « rémunérer »,

49

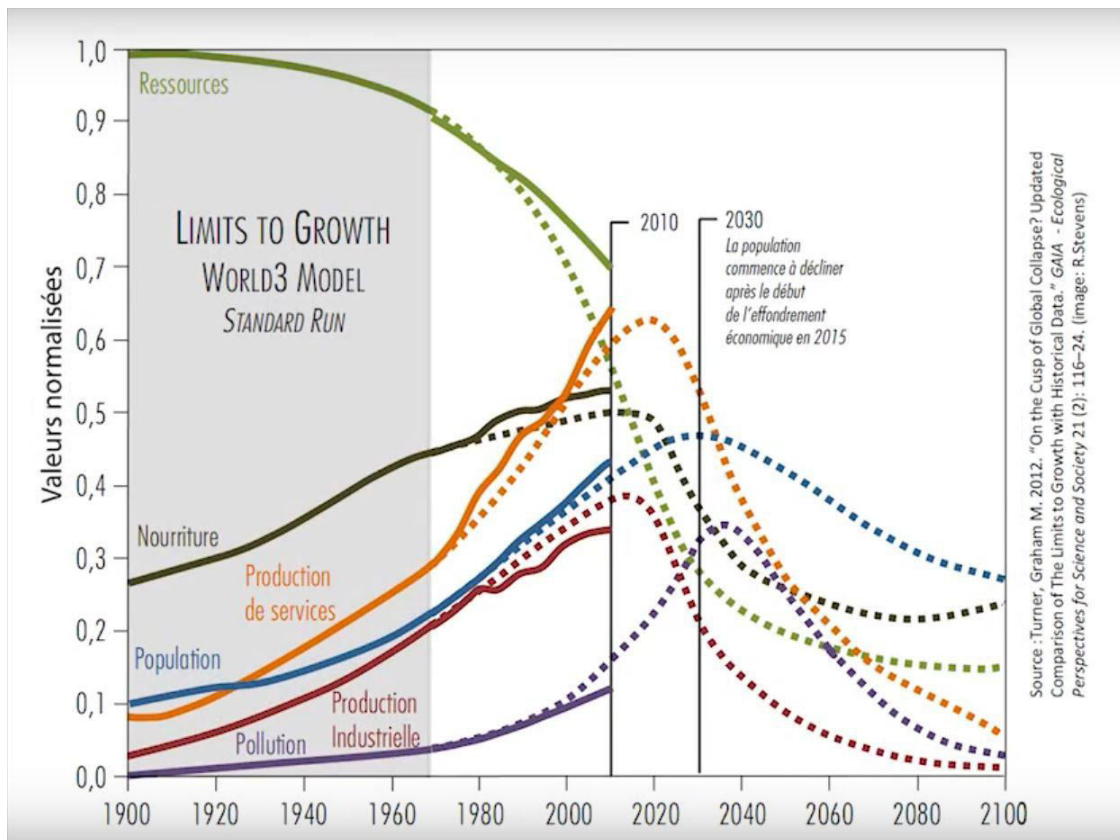
coûts écologiques grandissent disproportionnément dans le secteur primaire, la fonction même que ce secteur remplit pour le système économique dans son ensemble (c'est-à-dire, constituer un réservoir de nature appropriée à bas coût) pourrait bien finir par être mise en péril, et entraîner ou renforcer une tendance à la crise au sein du système.

ou à tout le moins l'intégrer dans ses calculs sous la forme d'une part croissante de valeur qui devra être sacrifiée par nos économies pour imiter et reproduire les services non-marchands que les écosystèmes leur offraient jusqu'alors.

Et en réalité, selon certains économistes, il n'est pas impossible que nous soyons d'ores et déjà à l'orée d'une telle crise. Ainsi pour Gaël Giraud (Giraud 2016), la dépression qu'a connue le PIB mondial en 2015 pourrait même être lue en vérité comme les prémises de ce qui était annoncé par le rapport des Meadows au club de Rome sur les limites à la croissance (Meadows & Meadows 2004). En effet, au cours de l'année 2015, l'ensemble des pays (une cinquantaine) dans lesquels l'Agence Française de Développement intervient (à l'exception de la Chine et de l'Inde) ont vu leur PIB se contracter de 20%. Résultat : une diminution du PIB nominal de 5% en 2015 qui a été à première vue suivie d'une reprise de la croissance en 2016 (qui est néanmoins toujours sous son niveau nominal de 2013 pour cette année) bien que plus fondamentalement il soit légitime d'être assez sceptique sur le contenu productif réel de la croissance de ces dernières années, au vu des innovations comptables récentes qui ont été mises en place par les Nations Unies pour stimuler artificiellement les taux de croissance de l'économie mondiale (comptabilisation de la R&D et des dépenses militaires comme actifs, et inclusion de la vente de drogues et de la prostitution dans les calculs, ainsi que de la contrebande et d'autres activités semi-légales) (Fox 2014).

En effet, on n'a pas toujours bien compris ce que le rapport Meadows de 1972 nous disait : comme le soulignent Jackson et Webster (2016), la projection standard du modèle World3 ne suggérerait pas juste que la croissance était limitée dans le sens où elle atteindrait un plateau ; le modèle mettait bel et bien en avant le risque d'une raréfaction absolue des ressources disponibles passé un certain niveau de croissance de l'économie, forçant un ralentissement contraint de la production industrielle entraînant un effondrement progressif autour de l'année 2015 (cf. figure 6). En toute circonstance, l'enjeu n'est pas de prouver ici qu'un effondrement économique serait imminent du fait d'un début de dépression plus ou moins observable du PIB mondiale. Il s'agit simplement de montrer les correspondances immédiates entre tendances dépressives du système économique, et crises de plus long-terme du système-Terre (frontières planétaires et contraintes de ressources). Ainsi, pour conclure en reprenant le cadre d'analyse de la théorie de la régulation, il est probable que le nouveau type de crise économique aux racines écologiques que nous sommes ainsi appelés à connaître au cours du XXIème siècle (des crises « exogènes » du point de vue de la théorie de la régulation, car liées à des chocs naturels externes et non à des mécanismes « endogènes » aux formes institutionnelles, et donc considérées explicitement comme le type de crise le moins grave que peut rencontrer a priori le système économique cf. Boyer 2015, p. 82) devienne très vite beaucoup plus déterminant que ce que la théorie ne le suggère à première vue. En fait, sans préjuger de savoir si l'économie s'effondrera nécessairement comme l'annonce le rapport Meadows, il est probable que ces crises exogènes (qu'on ne conçoit comme « exogènes » que si on exclut artificiellement les chocs non-marchands de la logique interne à l'économie et ses institutions) puissent à tout le moins dans le futur, par la gravité accrue des perturbations structurelles qu'elles vont générer au cours du temps dans la sphère marchande de l'économie, faire naître de façon autonome des crises économiques et institutionnelles de rang supérieur, telle qu'une crise du régime d'accumulation lui-même (ou au minimum, favoriser leur émergence).

Figure 5 : Comparaison des prédictions du scénario de référence du rapport Meadows avec les données historiques (cf. annexe 7 pour des tests plus visibles) Source : Turner 2012.



51

Conclusion : l'appropriation dans un système capitaliste

Jusqu'ici, toutes les estimations et les exemples mobilisés dans ce travail ont été *globaux* ou à tout le moins, se sont voulu illustratifs de la situation dans sa *globalité*. Pour ce faire, ils ont par là-même consciemment effacé les multiples différenciations sociales, géographiques et politiques qui tissent la toile complexe du système économique dans la réalité. Cette indistinction avait un objectif précis : celui de dresser un tableau non-polémique (ou le moins polémique possible) des périls encourus par l'économie humaine à l'aube de l'Anthropocène, afin d'établir à tout le moins que la perturbation écologique du système-Terre par une activité économique prométhéenne ne peut se faire indéfiniment sans générer en retour, une perturbation du système économique lui-même.

Maintenant que cet objectif est rempli, il est temps que cette fiction s'écroule. En conséquence, c'est ici que pour une page ou deux, on va enfin laisser tomber la narration en « nous » et le recours à des termes qui effacent la dimension politique de la crise écologique, en particulier la notion d'un « développement économique » apparemment profitable à tous, comme s'il reflétait celui de la « civilisation humaine » dans son ensemble, sans distinctions de races, de nations, de classe ou de genre. Avant de conclure, j'aimerais donc souligner comment au contraire, les responsabilités, les

dommages et les bénéfices économiques de la crise écologique, se répartissent de manière très inégale à la surface du globe et au sein de la société.

Tout d'abord, il est évident que la crise écologique ne touche pas tous les pays de la même façon. Si l'on veut s'en faire une idée à partir d'un graphique assez saisissant, qui se préoccupe en particulier de la vulnérabilité des différents pays au changement climatique en fonction de leur niveau de préparation, on peut se reporter à l'annexe 8. Celle-ci met assez clairement en évidence un « pattern » dans la façon dont les différentes régions du monde souffriront de la crise dans les années à venir : les pays du Nord, qui sont aussi les plus développés, sont préparés à y faire face, et en sécurité relative puisque les impacts du changement climatique sur cette région du globe seront moindres dans un premier temps ; les pays du Sud, quant à eux sous-développés, manquent donc cruellement de préparation et sont particulièrement vulnérables puisque ce sont eux qui sont exposés aux dangers les plus dévastateurs. Mais en fait, pour comprendre cette réalité, il serait plus judicieux plutôt que de parler d'un anonyme « système économique » dans lequel on retrouverait des « pays développés » et des « pays en développement » qui passeraient simplement par les mêmes stades économiques à des moments différents, de partir d'un autre point de départ analytique. Pour comprendre pourquoi la crise climatique en particulier, et la crise écologique en général, touchent ces deux catégories de pays de façon si différenciée, il serait plus logique de partir du point de vue des théoriciens du système-monde et de la théorie de la dépendance, et d'analyser ce qui n'est autre que le système capitaliste mondialisé.

Dans un tel système, l'accumulation de capital au sein des zones centrales de l'économie mondiale repose sur un maintien structurel dans le sous-développement des économies situées dans les zones périphériques. Il n'y a donc pas de hasard à ce que les unes soient préparées, et les autres non. Quand on se penche un peu sur la question, il est frappant de constater à quel point les rapports de domination économiques mondialisés épousent en fait, la domination écologique d'une partie de la planète par une autre. C'est pourquoi certains suggèrent qu'il y a une correspondance structurelle entre l'asymétrie centre/périphérie et l'asymétrie extraction/transformation des matières (Bunker 1985 ; Hornborg & al. 2007) : les économies productives du centre, à forte valeur ajoutée et à teneur intensive en capital, bénéficient des activités d'extraction de la périphérie via le commerce international ou via des IDE encadrés par les programmes d'ajustement structurel des institutions transnationales⁹⁷. Ces pays du centre peuvent alors s'approprier à travers les économies dominées de la périphérie, un capital naturel à coût extrêmement réduit, qui est indispensable pour produire les marchandises à haute valeur ajoutée de leurs industries nationales (marchandises qu'ils revendront ensuite aux états et aux bourgeoisies des périphéries en protégeant jalousement leurs monopoles technologiques et en soignant à leur faveur les termes de l'échange). En particulier, cette appropriation des matières premières est donc rendue possible tout en évitant aux pays du Nord d'avoir à supporter sur leur propre sol les immenses coûts écologiques de long-terme que nécessite

⁹⁷ Ces investissements directs étrangers prennent de plus en plus la forme de ce qu'on appelle « les nouvelles enclosures » via un accaparement des terres qui chasse des populations de leur lieux de vie dans la périphérie pour y installer des activités extractives ou agroindustrielles au bénéfice d'entreprises venant des pays du centre. En Colombie par exemple, le pourcentage du territoire national vendu sous forme de concessions minières, le plus souvent à des multinationales étrangères, s'élève à plus de 40% de toutes les terres du pays (Swampa & Antonelli 2010). En outre, après avoir exploité la ressource et généré d'importants profits de court-terme sur le territoire concédé, les multinationales du Nord quittent le plus souvent ces pays en revendant leurs concessions mais en laissant derrière elles des dommages écologiques considérables, qui seront subis par les populations locales elles-mêmes.

localement leur extraction (déforestation, pollution chimique, érosion des sols...) et dont pâtissent ainsi les pays du Sud. L'échange inégal a donc une dimension écologique tout autant qu'économique. En outre, les économies du centre ont tendance depuis plusieurs décennies à exporter leurs industries productives (souvent polluantes) vers les pays de la périphérie, ce qui d'un point de vue comptable, fait apparemment diminuer leur *intensité matérielle*, mais pas leur *empreinte matérielle* réelle : elles ne font encore une fois que faire subir les coûts locaux de la pollution à d'autres économies que les leurs en transférant la production sur leur sol, et les matières transformées par les industries rentrent alors dans les bilans de ces économies étrangères sans qu'elles leur appartiennent pour de bon. Les pays du centre s'appuient ensuite sur un commerce international aussi libre que possible pour satisfaire néanmoins leurs besoins économiques par l'échange, grâce à des traités bilatéraux ou multilatéraux conçus à leur bénéfice.

Mais les différenciations nationales et géographiques ne sont pas les seuls problèmes qui ont été laissés de côté dans cette analyse. Si par exemple, on veut comprendre pourquoi ce sont aujourd'hui une centaine d'entreprises seulement qui, du point de vue de la production, sont à l'origine de 71% des émissions de gaz à effet de serre mondiales (Griffin 2017) ou, sous l'angle de la consommation, pourquoi ce sont les 10% de personnes les plus riches sur la planète qui engrangent 50% de ces mêmes émissions (Gore 2015), il faut aussi se poser la question en termes des classes sociales et de la logique productive qui dominent le système. En réexaminant attentivement les cas d'étude analysés plus haut (perte de fertilité des sols, disparition des pêcheries...) on se rendra compte en outre que ce sont toujours les classes les plus défavorisées qui pâtissent le plus directement et le plus durement des conséquences écologiques et économiques de la dégradation des écosystèmes. En particulier, on sait par exemple qu'il y a en Afrique un lien direct entre la perte de fertilité des sols et la prévalence des famines (Sanchez 2002) tandis que l'extrême majorité des pêcheurs se concentrent dans les zones périphériques de l'économie mondiale (85.5% en Asie et 9,3% en Afrique) où cette activité est une source pratiquement irremplaçable de revenu ou de subsistance pour les populations (FAO 2016b). Ce que la disparition des pêcheries est donc susceptible de générer, c'est ce que Marx appelait la prolétarianisation : avec la disparition des ressources halieutiques du milieu naturel à moyen-terme, tous ces pêcheurs qui disposaient d'un métier et d'une source de subsistance ne passant pas nécessairement par le salariat, vont voir disparaître celles-ci en même temps que les pêcheries, et être forcés d'émigrer afin de vendre leur force de travail sur le marché (à supposer qu'un marché du travail existe bel et bien pour les accueillir).

L'accumulation du capital par la classe dominante est ainsi une entreprise fondamentalement nocive, non seulement pour les fractions les plus fragiles des classes dominées, mais aussi bien évidemment pour les écosystèmes. Ce qui se passe en fait, c'est que la valeur d'échange que les producteurs marchands cherchent à tirer de la nature en la transformant en marchandise, rentre en conflit frontal avec la valeur d'usage que les ressources biophysiques ainsi marchandisées avaient en premier lieu dans les écosystèmes, pour les hommes et pour la nature elle-même. En effet le problème est que la valeur d'échange de la nature, telle qu'elle est reconnue par le marché, est générale, abstraite (tout ce qui compte est son caractère échangeable et la mesure dans laquelle elle peut l'être). La valeur d'usage de la nature, quand à elle, est particulière, concrète (ce qui compte est le rôle que le « morceau de nature » considéré joue dans l'écosystème local dont il est un élément, avec les processus écologiques auxquels il a partie liée) (Burkett 2006). Dans sa dimension temporelle, cette contradiction s'exprime de la façon suivante : le rythme de reproduction du capital (toujours plus rapide et dicté par les conditions abstraites du marché) entre en contradiction frontale avec le

rythme de reproduction des processus biophysiques eux-mêmes (qui doit respecter son temps propre, dicté par les lois de la physique et le fonctionnement des écosystèmes) (Moore 2011). Il en est ainsi autant de la disparition des ressources halieutiques, que de la dégradation des sols ou que de l'épuisement des matières premières : l'appropriation capitaliste dépasse le rythme auquel les écosystèmes peuvent reconstituer le stock de capital naturel approprié.

En outre, il est frappant de se rendre compte que sur un plan économique, le sort que le capital réserve à la nature est le même que celui qu'il réserve aux femmes. En effet, de même que le capital doit nécessairement s'approprier la valeur non-marchande des services qui lui sont rendus par les écosystèmes pour pouvoir accumuler de la valeur d'échange, il s'approprie également pour ce faire la valeur non-marchande d'un autre type de services : le travail domestique reproductif *non rémunéré* rempli par les femmes. Les distinctions de genre doivent donc également être prises en compte dans l'analyse de la logique productive capitaliste qui produit la crise écologique. En fait, du point de vue d'une économie politique marxiste attentive au travail des femmes et à celui des écosystèmes, c'est donc la loi de la valeur marxienne elle-même qui peut être réinterprétée, afin d'être plus complète dans sa formulation : en effet la valeur d'échange d'une marchandise, dans une économie capitaliste, équivaut au temps de travail socialement nécessaire à sa production, qui est le résultat d'une exploitation du travail par le capital dans la sphère de la production marchande. Néanmoins, il apparaît clairement que *la condition même* de cette exploitation créatrice de valeur marchande est l'*appropriation* d'une part plus grande encore de valeur non-marchande, puisée dans les deux réservoirs attitrés du système : la nature humaine incarnée par les femmes, et la nature non-humaine dans son ensemble, incarnée par les écosystèmes, leurs produits et leurs services⁹⁸. Seul le capital est assez fou pour penser que le travail est la seule source de la valeur. Et c'est précisément ce qui entraîne l'humanité dans la tourmente écologique. Aujourd'hui, alors même qu'une solution aussi prometteuse que l'agro-écologie dispose de toutes les caractéristiques nécessaires pour supplanter le modèle agroindustriel qui détruit notre environnement⁹⁹ celle-ci se heurte à un problème de taille ; malheureusement pour elle, elle n'a pas une productivité *par travailleur* qui peut rivaliser avec celle de l'agriculture industrielle. Alors même qu'elle est plus productive à l'hectare, et supprime les pressions qui détruisent la productivité de la terre à long-terme, le système capitaliste n'a pas intérêt à développer un modèle qui sera plus lourd en termes de nombre de travailleurs requis pour une même quantité produite, car ce qu'il rémunère (et déteste rémunérer) c'est précisément le travail, et pas la terre (qu'il préfère s'approprier).

54

Dès lors, toutes ces considérations invitent à réfléchir à la façon dont l'histoire environnementale elle-même a été racontée. Les notions d'Anthropocène et de Grande Accélération sont certes utiles pour signifier l'impact économique colossal qu'à l'homme sur son environnement aujourd'hui. Néanmoins, en se concentrant trop exclusivement sur les événements survenus lors du siècle passé, et en adoptant un point de vue « géo-quantitatif », ces deux notions tendent à négliger l'importance majeure, pour expliquer et comprendre la situation contemporaine, de processus sociologiques et

⁹⁸ Cette critique est en fin de compte très proche, avec un autre vocabulaire et d'autres référents, de celle entreprise par Kate Raworth (Raworth 2017) qui nous montre à quel point on néglige dans la science économique dominante le rôle des échanges non-monnaïres (qu'il s'agisse de l'échange social, du travail non rémunéré des femmes ou des services écosystémiques performés par la nature) et en conséquence leur importance pour la politique économique.

⁹⁹ Et les conditions de notre propre sécurité alimentaire.

économiques qui plongent en fait leurs racines jusque dans les dix-neuvième et dix-huitième (Gonzales de Molina & Toledo 2014 ; Malm 2016) voire les seizième et quinzième siècles européens (Moore 2015). Sans prendre en compte ces processus sociaux, on ne fait pas une *histoire* mais une simple *chronologie* de la crise. En outre, au-delà de son caractère quantitativiste, le problème de la notion d'Anthropocène est qu'elle considère implicitement la nouvelle époque géologique qui s'annonce comme la responsabilité d'un seul et même homme (l'« Anthropos » !), comme si l'espèce humaine pouvait être vue comme indifférenciée. C'est un biais qui tend à camoufler les importants problèmes d'équité et de domination qui animent aujourd'hui même le déroulement de la crise écologique (Bonneuil & Fressoz 2013 ; Malm & Hornborg 2014) tandis que sur un plan historique, la notion d'Anthropocène efface ainsi même le conflit de classe qui est inhérent à la genèse de cette crise. Or c'est bien dans l'histoire des luttes sociales du capitalisme industriel du XIX^{ème} siècle et des conquêtes du capitalisme marchand des siècles précédents que l'on peut se rendre compte à quel point le conflit entre bourgeoisie et prolétariat et la dynamique d'accumulation du capital ont été des forces motrices pour l'avènement des rapports entre société et nature qui mènent aujourd'hui à la crise écologique contemporaine (Malm 2016 ; Moore 2015). Dès lors, il se pourrait bien que l'ère écologique dans laquelle nous entrons ne soit pas simplement celle de l'homme, mais plutôt celle du capital.

Enfin, les nouvelles dynamiques de crise qui ont été étudiées plus haut prennent sens à l'aune de la relation entre la nature et le capital, et pas simplement la nature et le marché (en effet en pratique, l'économie de marché est toujours dominée par le capitalisme). Ainsi, comme l'a formulé O'Connor dans un travail fondateur pour le marxisme écologique (O'Connor 1988), la contradiction à laquelle le capitalisme doit faire face à l'ère de la crise écologique est la suivante : non plus seulement une tendance endogène à la crise de surproduction, mais également le risque grandissant d'une crise de *sous-production*, qui découle des pressions imposées aux écosystèmes par le capital lui-même. Elle n'est autre que cette tendance décrite plus haut qui, du côté de l'offre, voit la part de la production que le capital doit lui-même reproduire dans les circuits de la valeur marchande croître sans cesse à mesure que la valeur appropriable dans les écosystèmes se réduit sous le coup de leur dégradation. Passé un certain stade, c'est alors l'accumulation du capital elle-même qui peut être mise en péril, les coûts internalisés dans la production pour remplacer le capital naturel devenant trop importants pour encore permettre la réalisation d'un profit.

Pour conclure, revenons à Donald Trump. Si le gouvernement de la nation capitaliste la plus puissante de la planète joue à nier la réalité de la crise écologique, ce n'est pas parce que celui-ci manque d'une bonne information. Au contraire, il faut voir ce déni organisé comme le produit d'une stratégie très bien informée, dont l'objectif est de pousser jusqu'à son maximum l'accumulation du capital et la réalisation du profit dans des conditions où celles-ci sont précisément les causes de la crise écologique en cours. Reconnaître la réalité de celle-ci, et la nécessité de la combattre, cela voudrait dire ouvrir la voie à de possibles restrictions sur l'appropriation capitaliste qui est, à court-terme, la condition même des profits pour la classe dominante. À l'inverse, pour les classes et les nations dominées, celle-ci est la promesse assurée d'une douloureuse descente aux enfers écologiques. Bruno Latour, dans un texte récent (Latour 2017) met bien le doigt sur ce que cette stratégie signifie : en fait, ce que Trump et la frange du capitalisme américain dont il est le héraut ont décidé de faire en niant publiquement la réalité de la crise écologique, c'est de s'affranchir de la fiction d'un monde commun qu'il faudrait préserver ensemble, utopie qui restreint le développement de leur puissance de classe. Si les périphéries, à l'intérieur de leur propre nation ou

en dehors, doivent en souffrir, c'est un autre problème. Peu leur importe que le monde brûle, si ce sont toujours eux qui règnent sur le tas de cendres.

Bibliographie

AIE (2017) « Global oil demand to lag supply after 2020 unless new investments are approved soon », Agence Internationale de l'Énergie. News. 6 mars 2017. Adresse : <https://www.iea.org/newsroom/news/2017/march/global-oil-supply-to-lag-demand-after-2020-unless-new-investments-are-approved-so.html>

ALONSO, E., SHERMAN, A. M., WALLINGTON, T. J., EVERSON, M. P., FIELD, F. R., ROTH, R. & KIRCHAIN, R. E. (2012) « Evaluating rare earth element availability: A case with revolutionary demand from clean technologies », *Environmental science and technology*, 46, pp. 3406-3414.

ALVAREZ, J. A. (2015) « The Agricultural Wage Gap : Evidence from Brazilian Micro-Data », Princeton University, Economics Department. Adresse : https://scholar.princeton.edu/sites/default/files/jalvarez/files/the_agricultural_wage_gap.pdf

ANDERSON, S. H. & al. (2011) « Cascading effects of bird functional extinction reduce pollination and plant diversity », *Science*, 331 (6020), pp. 1068-1071.

ARONSON, M. F. J. & al. (2014) « A global analysis of the impacts of urbanization on birds and plants diversity reveals key anthropogenic drivers », *Proceedings of the Royal Society B*, 281 (1780), DOI: 10.1098/rspb.2013.3330

AWG (2016) «Media Note : Anthropocene Working Group », Press Release August 2016, University of Leicester. Adresse : <http://www2.le.ac.uk/offices/press/press-releases/2016/august/media-note-anthropocene-working-group-awg>

BALDÉ, C.P., WANG, F., KUEHR, R. & HUISMAN, J. (2015) « The global e-waste monitor – 2014 » United Nations University, IAS – SCYCLE, Bonn, Allemagne. Adresse : <http://i.unu.edu/media/unu.edu/news/52624/UNU-1stGlobalE-Waste-Monitor-2014-small.pdf> Page 22-24

BANQUE MONDIALE (2017) Entrées : « Urban Population (% of total) » ; « Agriculture, valeur ajoutée (% du PIB) » ; « GDP (current US\$) ». Adresse : <http://data.worldbank.org/>

BANQUE MONDIALE (2017a) « The Toll of War : The Economic and Social Consequences of the Conflict in Syria », Adresse : <http://www.worldbank.org/en/country/syria/publication/the-toll-of-war-the-economic-and-social-consequences-of-the-conflict-in-syria>

BARLES, S. (2014) « Perturbations du cycle de l'azote et impacts associés », Université Paris 1 Panthéon Sorbonne, Canal-U. Adresse : https://www.canal-u.tv/video/canal_uved/perturbations_du_cycle_de_l_azote_et_impacts_associes.15717

BARNOSKY, A. D. & al. (2012) « Approaching a state shift in Earth's biosphere », *Nature*, 486, pp. 52-58.

BAUER, D. M. & WING, I. S. (2016) « The macroeconomic costs of catastrophic pollinator decline », *Ecological Economics*, 126 (C), pp. 1-13.

BEROE (2011) « Nagoya Protocol and its Implications on Pharmaceutical Industry », BEROE Inc – Advantage Procurement. Adresse : https://de.slideshare.net/beroe_inc/nagoya-protocol-and-its-implications-on-pharmaceutical-industry

BIHOUIX, P. & DE GUILLEBON, B. (2010) « Quel futur pour les métaux ? », EDP Sciences, Les Ulis, France.

BONNEUIL C. & FRESSOZ J.-B. (2013) « L'événement Anthropocène », Editions du Seuil, Paris.

BOYER, R. (2015) « Économie politique des capitalismes. Théorie de la régulation et des crises », La Découverte, Collection Grand Repères, Paris, France.

BP (2017) « Statistical Review of World Energy 2017 », BP Private Limited Company. Adresse : <http://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf>

BUNKER, S. G. (1985) « Underdeveloping the Amazon : Extraction, unequal exchange and the failure of the modern state », Chicago University Press, Chicago.

BURKE, M., DYKEMA, J., LOBELL, D. B., MIGUEL, E. & SATYANATH, S. (2015) « Incorporating Climate Uncertainties into Estimates of Climate Change Impacts », *Review of Economics and Statistics*, 97 (2), pp. 461-471.

58

BURKETT, P. (2006) «Marxism and ecological economics», Leiden : Brill.

BUTT, N. & al. (2013) « Biodiversity Risks from Fossil Fuel Extraction », *Science* 342 (6157), pp. 425-426.

CAMERON, D., OSBORNE, C., HORTON, P. & SINCLAIR, M. (2015) « A sustainable model for intensive agriculture », Grantham Center Briefing Note: December 2015, University of Sheffield, U.K.

CARDINALE, B. J. & al. (2012) « Biodiversity loss and its impact on humanity », *Nature*, 486 (7401), pp. 59-67.

CDP (2016) «Thirsty Business : Why Water is Vital to Climate Action», 2016 Annual Report of Corporate Water Disclosure. Adresse : <https://b8f65cb373b1b7b15feb-c70d8ead6ced550b4d987d7c03fcdd1d.ssl.cf3.rackcdn.com/cms/reports/documents/000/001/323/original/CDP-Global-Water-Summary-2016.pdf?1479378540>

CEBALLOS, G. & al. (2015) « Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction », *Science Advances*, 1 (5), 1400253.

CEBALLOS, G., EHRLICH, P. R. & DIRZO, R. (2017) « Biological annihilation via the ongoing sixth mass extinction signaled by vertebrate population losses and decline », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114 (30), pp. 6089-6096.

CIA (2016) « CIA World Factbook 2016 », Central Intelligence Agency of the United States, Langley, États-Unis. Adresse : <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/>

CLEVELAND, C. J. & RUTH, M. (1997) « When, where and by how much do biophysical limits constrain the economic process ? A survey of Nicholas Georgescu-Roegen's contribution to ecological economics », *Ecological Economics*, 22, pp. 203-223.

CNRS (2017) Entrée : « Environnement – Le changement climatique – Les rétroactions ». Adresse : <http://www.insu.cnrs.fr/environnement/le-changement-climatique-les-retroactions>, consulté le 14 août 2017.

COOK, J., NUCCITELLI, D., GREEN, S. A., RICHARDSON, M., WINKLER, B., PAINTING, R., WAY, R., JACOBS, P. & SKUCE, A. (2013) « Quantifying the consensus on anthropogenic global warming in the scientific literature », *Environmental Research Letter*, 8 (2), 024024.

CORDELL, D. et al. (2009) "The story of phosphorous : Global food security and food for thought", *Global Environmental Change*, 19 (2), pp. 292-305.

COSTANZA, R. & al. (1997) « Value of the world's ecosystems services » *Nature*, 387, pp. 253-260.

COSTANZA, R. & al. (2014) « Changes in the global values of ecosystem services », *Global Environmental Change*, 26, pp. 152-158.

COZAR, A. & al. (2015) « Plastic Accumulation in the Mediterranean Sea », *PLOS One*, 10 (4), e0121762.

CRUTZEN, P. J. & STOERMER, E. (2000) « The „Anthropocene“ », *Global Change Newsletter*, 41, pp. 17-18, International Geosphere-Biosphere Programme.

DAILY, G. C. (ed.) (1997) « Nature's services: societal dependence on natural ecosystems », Island Press, Washington DC.

DE VOS, J., JOPPA, N., GITTLEMAN, J. L., STEPHENS, P. R. & PIMM, S. L. (2014) « Estimating the normal background rate of species extinction », *Conservation Biology*, 29 (2), pp. 452-462.

DIRZO, R. & al. (2014) « Defaunation in the Anthropocene », *Science* 345 (6195), pp. 401-406.

DLUGOKENCKY, E.J., HALL, B.D., MONTZKA, S.A., DUTTON, G., MUHLE, J. & ELKINS, J.W. (2014) « Atmospheric composition: Long-lived greenhouse gases », dans "State of the Climate in 2013", *Bulletin of the American Meteorological Society (BAMS)*, S33-S34.

DUNLAP, R. E. & McCRIGHT, A. (2011) « Organized Climate Change Denial » in DRYZEK, J. S., NORGAAARD, R. B. & SCHLOSSBERG (ed.) « *Oxford Handbook of Climate Change and Society* », Oxford University Press, New York.

DUNN, R. R. & al. (2009) « The sixth mass coextinction : Are most endangered species parasites and mutualists ? », *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 276 (1670), pp. 3037-3045.

ELD (2015) « The value of land. Prosperous lands and positive rewards through sustainable land management », *The Economics of Land Degradation Initiative*, Edited by Naowi Stewart (UNU-INWEH). Adresse : http://www.eld-initiative.org/fileadmin/pdf/ELD-main-report_05_web_72dpi.pdf

EPA (2011) « Electronics Waste Management in the United States Through 2009 » U.S. Environment Protection Agency, May 2011, EPA 530-R-11-002.

ERWIN, P. M., LÓPEZ-LEGENTIL, S. & SCHUHMANN, P. W. (2010) « The pharmaceutical value of marine biodiversity for anti-cancer drug discovery », *Ecological Economics*, 70, pp. 445-451.

FAO (2011) «The state of the world's land and water resources for food and agriculture», Food and Alimentation Organization of the United Nations, Rome, Italy.

FAO & ITPS (2015) « Status of the World's Soil Resources – Main Report », Food and Alimentation Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy.

FAO (2016a) « Global Forest Assessment 2015 : How are the world's forests changing ? Second Edition », Food and Alimentation Organization of the United Nations, Rome, Italy.

FAO (2016b) « The State of World Fisheries and Aquaculture 2016. Contributing to food security and nutrition for all », Food and Alimentation Organization of the United Nations, Rome, Italy.

60

FAO (2017) FAO Soils Portal, Entrée : « Cost of Soil Erosion ». Adresse : <http://www.fao.org/soils-portal/soil-degradation-restoration/cost-of-soil-erosion/en/> consulté pour la dernière fois le 17 août 2017.

FAOSTAT (2017) Entrée : « Forêts Production et Commerce ». Adresse : <http://www.fao.org/faostat/fr/#data/FO>, consulté le 28 juillet 2017.

FARREL, J. (2015) « Network structure and influence of the climate change counter-movement », *Nature Climate Change*, 6, pp. 370-374.

FORZIERI, G., CESCATTI, A., BATISTA E SILVA, F. & FEYEN, L. (2017) « Increasing risk over time of weather related-hazards to the European population : a data-driven prognostic study », *The Lancet Planetary Health*, 1 (5), pp. 200-208.

FOX, B. (2014) « Sex and drugs drive EU growth surge », *EU Observer*, 17 octobre 2014. Adresse : <https://euobserver.com/news/126110>

FUNK, G. & KENNEDY, B. (2016) « Public views on climate change and climate scientists » in « Politics of Climate », Pew Research Center, 04/10/2016. Adresse : <http://www.pewinternet.org/2016/10/04/public-views-on-climate-change-and-climate-scientists/>

GALLAI, N., SALLES, J.-M., SETTELE J. & VAISSIÈRE, B. E. (2009) « Economic Valuation of the vulnerability of world agriculture confronted with pollinator decline », *Ecological Economics*, 68 (3), pp. 810-821.

GLOBAL DATA (2017) Entrée : « Pharmaceutical ». Adresse : <https://www.globaldata.com/healthcare/research-areas/pharmaceutical/>

GIEC (2014) « Changements climatiques 2014: Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat » [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer], GIEC, Genève, Suisse.

GIRAUD, G. (2016) « Le point de vue de Gaël Giraud, chef économiste de l'AFD », Interview vidéo, Association Adrastia. Consultable en ligne sur la chaîne Youtube de l'AFD (Agence Française de Développement). Adresse : <https://www.youtube.com/watch?v=49BMrVaV-ol>

GOBAT, J. M., ARAGNO, M. & MATTHEY, W. (2010) « Le sol vivant: Bases de pédologie, Biologie des sols », Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse.

GOLDMAN SACHS (2013) « Higher Long-Term Prices Required by a Troubled Industry », *Equity Research*, Goldman Sachs, 12 avril 2013.

GONZALES DE MOLINA M. & TOLEDO V. M. (2014) « The Social Metabolism. A Socio-Ecological Theory of Historical Change », Springer International Publishing, Suisse.

61

GORE, T. (2015) « Extreme Carbon Inequality. Why the Paris Deal must put the poorest, lowest emitting and most vulnerable people first », *Oxfam Media Briefing*, Oxfam Charity. Adresse : https://www.oxfam.org/sites/www.oxfam.org/files/file_attachments/mb-extreme-carbon-inequality-021215-en.pdf

GORDON, R. J. (2012) « Is US Economic Growth Over ? Faltering Innovations confront the Six Headwinds », *NBER Working Paper Series*, Cambridge, Massachussets.

GOULSON, D. (2012) « Decline of bees forces China's apple farmers to pollinate by hand », *China Dialogue*, 02/10/2012. Adresse : <https://www.chinadialogue.net/article/show/single/en/5193-Dcline-of-bees-forces-China-s-apple-farmers-to-pollinate-by-hand>

GRANT, C. J. & al. (2015) « Marcellus and mercury: Assessing potential impacts of unconventional gas extraction on aquatic ecosystems in northwestern Pennsylvannia », *Journal of Environmental Science and Health*, 50 (5), pp. 482-500. DOI: 10.1080/10934529.2015.992670

GRIFFIN, P. (2017) « CDP Majors Report 2017 », *The Carbon Majors Database*, CDP Report July 2017. Adresse : <https://b8f65cb373b1b7b15feb-c70d8ead6ced550b4d987d7c03fcdd1d.ssl.cf3.rackcdn.com/cms/reports/documents/000/002/327/original/Carbon-Majors-Report-2017.pdf?1499691240>

GRANT, J., ANGEN, E. & DYER S. (2013) « Forecasting the impacts of oilsands expansion », Pembina Institute, Canada. Adresse : <http://www.pembina.org/reports/oilsands-metrics.pdf>

GROOMBRIDGE, B. & JENKINS, M. D. (2000) « World Atlas of Biodiversity: Earth's Living Resources for the 21st Century », The United Nations Environment Protection Program World Conservation Monitoring Center, University of California Press, Berkeley, USA.

HANSEN M. C. & al. (2013) « High Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change », Science, 342, pp. 850-853.

HABERL, H., FISCHER-KOWALSKI, F., KRAUSMANN, F. & WINIWARTER, V. (ed.) (2016) « Social Ecology. Society-Nature Relations Across Time and Space », Springer International Publishing, Suisse.

HOEKSTRA, A. Y. & MEKONNEN, M. M. (2012) « The water footprint of humanity », Proceedings of the National Academy of Sciences, 109 (9), pp. 3232-3237.

HORNBORG A., McNEILL J. R. & MARTINEZ-ALIER J. (editors) (2007) « Rethinking Environmental History. World-System History and Global Environmental Change », AltaMira Press, Plymouth (U.K.).

HUTCHINGS, J.A. & REYNOLDS, J. D. (2004) « Marine fish population collapse: Consequences for Recovery and Extinction Risk », Bioscience, 54 (4), pp. 297-309.

IPBES (2016) « Summary for policymakers of the assessment report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services on pollinators, pollination and food production. » Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Bonn, Germany.

JACKSON, J. B. (2008) « Ecological extinction and evolution in the brave new ocean », Proceedings of the National Academy of Science, 105, pp. 11458-11465.

JACKSON, T. & WEBSTER, R. (2016) «Limits Revisited : A review of the limits to growth debate», APPG on limits to growth. April 2016.

JAIN, R. K., CUI, Z. & DOMEN, J. K. (2016) « Environmental Impacts of Mining » dans JAIN, R. (dir.) « Environmental Impacts of Mining and Mineral Processing: Management, Monitoring and Auditing Strategies », Butterworth-Heinemann, Oxford, UK.

JARAMILLO, F. & DESTOUNI, G. (2015) « Comment on “Planetary Boundaries : Guiding Human Development on a Finite Planet” », Science, 348 (6240), 1217.

KELLEY, C. & al. (2015) « Climate Change in the Fertile Crescent and implications of the recent Syrian drought », Proceedings of the National Academy of Science, 112 (11), pp. 3241-3246

KIEHL, J. (2011) « Lessons from Earth's Past », Science, 331 (6014), pp. 158-159.

KING, M. (2015) « Climate Change, Water Scarcity and Violent Extremism in Iraq and Syria », Elliott School of International Affairs, The George Washington University. Adresse : <http://slideplayer.com/slide/7337265/>

KOPITS, S. (2014) « Oil and Economic Growth : A Supply-Constrained View », Presentation to the Center on Global Energy Policy, Columbia University, 11 février 2014.

KPMG (2011) « Biodiversity and Ecosystem Services. Risk and Opportunities Analysis within the Pharmaceutical Sector », KPMG Sustainability and The Natural Value Initiative, KPMG Advisory N.V.

KRAUSMANN, F. et al. (2009) « Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century », *Ecological Economics*, 68, 10, pp. 2696-2705.

KRAUSMANN, F. & al. (2013a) « Global trends and patterns in material use », *Materials Research Society Online Proceedings Library*, 1545. DOI: <https://doi.org/10.1557/opl.2013.107>

KRAUSMANN, F. & al. (2013b) « Global human appropriation of net primary production doubled in the 20th century », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110 (25), pp. 10324-10329.

KUMP, L. R., KASTING, J. F. & CRANE, R. G. (2008) « The Earth System », Pearson Publishing, New Jersey.

LAL, R. (2013) « Soils and Ecosystems Services » dans LAL, R. & al. (ed.) « Ecosystems services and Carbon Sequestration in the Biosphere », Springer International Publishing, Dordrecht.

LATOUR, B. (2017) « L'Europe refuge » dans GEISELBERGER, H. (dir.) « La grande régression », Premier Parallèle, Paris. Adresse : www.bruno-latour.fr/sites/default/files/P-180-GEISELBERGER.pdf

LENTON, T.M. & al. (2008) « Tipping elements in the Earth's climate system », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105 (6), pp. 1786-1793.

63

LE QUÉRÉ, C., RAUPACH, M.R., CANADELL, J.G. & al. (2009) « Trends in the sources and sinks of carbon dioxide » *Nature Geoscience*, 2, pp. 831-836.

LEVER, J. J. & al. (2014) « The sudden collapse of pollinator communities », *Ecology Letters*, 17 (3), pp. 350-359.

LOBELL, D. B. & al. (2011) « Climate trends and global crop production since 1980 », *Science*, 333 (6042), pp. 616-620.

MAGDELAINE, C. (2016) « L'hydroélectricité, les barrages hydroélectriques », *Notre Planète*. Adresse : <https://www.notre-planete.info/ecologie/energie/hydroelectricite.php>, consulté le 29 juillet 2017.

MALM A. (2016) « Fossil Capital. The Rise of Steam Power and the Roots of Global Warming. » Verso Books, London.

MALM A. & HORNBORG A. (2014) « The geology of mankind ? A critique of the Anthropocene narrative », *The Anthropocene Review*, 1, pp. 62-69.

MARIN C. (2015) « Vulnérabilité au changement climatique et niveau de préparation », *Le Monde diplomatique*, novembre 2015. Adresse : <https://www.monde-diplomatique.fr/cartes/vulnerabilite-climat>

MAYER, A., SCHAFFARTZIK, A., KRAUSMANN, F. & EISENMENGER, N. (2016) « More than the Sum of its Parts: Patterns in Global Material Flows » dans HABERL, H. & al. « Social Ecology. Society-Nature Relations Across Time and Space », Springer International Publishing, Suisse.

MEA (MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT) (2005) « Ecosystems and Human Well-Being: Opportunities for Businesses and Challenges for Industry », World Resources Institute, Washington DC, USA.

MEADOWS, G. RANDERS, J. & MEADOWS, D. (2004) « Limits to Growth : The thirty Year Update », Earthscan.

MÉRAL, P. (2016) « Les racines économiques de la notion de service écosystémique » dans MÉRAL, P. & PESCHE, D. (ed.) « Les services écosystémiques. Repenser les relations nature et société », pp. 75-98, Editions Quae, Versailles.

MEKONNEN, M. M. & HOEKSTRA A.Y. (2016) « Four billion people facing severe water scarcity », Science Advances, 2 (2), pp. e1500323

McALLISTER, L. (2013) « The Human and Environmental Impacts of E-Waste », Population Reference Bureau USA. Adresse : <http://www.prb.org/Publications/Articles/2013/e-waste.aspx>

McCAULEY, D.J. & al. (2015) « Marine Defaunation: Animal Loss in the Global Ocean », Science, 347 (6219), p. 1255641

McDOUGALL & al. (2013) « Diversity loss with persistent human disturbance increases vulnerability to ecosystem collapse », Nature, 494 (7435), pp. 86-89.

McNEILL, J. R. & ENGELKE, P. (2016) « The Great Acceleration: An Environmental History of the Anthropocene since 1945 », Harvard University Press, Cambridge.

MOHR, W., WANG, J. ELLEM, G., WARD, J. & GIURCO, D. (2015) « Projections of fossil fuel by country », Fuel, 141, pp. 120-135.

MOORE J. W. (2011) « Beyond metabolic rift : A theory of crises in the capitalist world-ecology », Journal of Peasant Studies, pp. 1-44.

MOORE J. W. (2015) « Capitalism in the Web of Life », Verso Books, New York.

MORA, C. & al. (2013) « The projected timing of climate departure from recent variability », Science, 502, pp. 183-187.

MORA, C. & al. (2017) « Global risk of deadly heat », Nature Climate Change, 7, pp. 501-506.

MUFSON, S. (2017) « Rick Perry just denied that humans are the main cause of climate change », Washington Post, 19/06/2017. Adresse : <https://www.washingtonpost.com/news/energy-environment/wp/2017/06/19/trumps-energy-secretary-just-denied-that-man-made-carbon-dioxide-is-the-main-driver-for-climate-change>

MULLER, O. (2016) « The Low Carbon Economy Index 2016 », PricewaterHouseCoopers, Paris.

NEWMANN, D. J. & CRAGG, J. M. (2007) « Natural products as sources of new drugs over the last 25 years », *Journal of Natural Products*, 70, pp. 461–477.

NOONE, K., SUMAILA, R. & DIAZ, R. J. (2012) « Valuing the ocean », Draft Executive Summary, Stockholm Environment Institute.

OCDE (2016) « Les conséquences économiques du changement climatique », Editions OCDE, Paris.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1787/9789264261082-fr>

O'CONNOR, J. (1988) "Capitalism, Nature, Socialism : a theoretical introduction", *Capitalism, Nature, Socialism*, 1 (1), pp. 11-38.

O'KEEFE, D. (2015) « Down on the Farm : Agricultural Workers receive lower wages than other workers », *Chicago Policy Review*, 13 février 2015. Adresse :
<http://chicagopolicyreview.org/2015/02/13/down-on-the-farm-agricultural-workers-receive-lower-wages-than-other-workers/>

PIMENTEL, D. & al. (1995) « Environmental and economics costs of soil erosion and conservation benefits », *Science*, 267 (5201), pp. 1117-1123.

PITCHAIAH, P. S. (2017) « Impacts of Sand Mining on Environment: A Review », *SSRG International Journal of Geo Informatics and Geological Science*, 4 (1), pp. 1-6.

POWER, A. G. (2010) « Ecosystem services and agriculture : tradeoffs and synergies », *Philosophical Transactions of The Royal Society B :Biological Sciences*, 365 (1554), pp. 2959-2971.

POTTS, S. G. et al. (2016) « Safeguarding pollinisators and their values to human well-being », *Nature*, 540 (7632), pp. 220-229, DOI: 10.1038/nature20588.

RAFTERY, A. E., ZIMMER, A., FRIERSON, D. M. W., STARZ, R. & LIU, P. (2017) “ Less than 2°C warming by 2100 unlikely”, *Nature Climate Change*,

RAMONET, M. & DELMOTTE, M. (2016) « Un seuil record de CO2 franchi dans l'Hémisphère Sud », Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement LCSE (CNRS-CEA-UVSQ) & Institut Polaire Français IPEV, Communiqué de presse national, Paris.

REHEL, S. A. & al. (2009) « Benefits of biotic pollination for non-timber forest products and cultivated plants », *Conservation and Society*, 7, pp. 213-219.

RIBES, A., ZWIERS, F. W., AZAÏS, J.-M., NAVEAU, P. (2017) « A new approach to climate change detection and attribution », *Climate Dynamics*, 48 (1-2), pp. 367-386.

ROCKSTRÖM J. & al. (2009) « A safe operating space for humanity », *Nature*, 461, pp. 472-475.

ROCHMANN, C.M. & al. (2015) « Anthropogenic debris in seafood: Plastic debris and fibers from textiles and bivalves sold for human consumption », Scientific Reports, 5, 14340.

ROSA, L., DAVIS, K. F., RULLI, F. C. & D'ODORICO P. (2017) « Environmental consequences from oil production from oil sands », Earth's Future, 2 (5), pp. 158-170. DOI: 10.1002/2016EF000484

ROSENZWEIG, C. & al. (2014) «Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison », Proceedings of the National Academy of Sciences, 111 (9), pp. 3268-3273.

SANCHEZ, P. A. (2002) "Ecology. Soil fertility and Hunger in Africa", Science, 295 (5562), pp. 2019-2020.

SANDERS, D. & al. (2013) « The loss of indirect interactions leads to cascading extinctions of carnivores », Ecology Letters, 16 (5), pp. 664-669.

SCHAFFARTZIK, A. & al. (2014) «The global metabolic transition: Regional patterns and trends of global material flows, 1950–2010», Global Environmental Change, 26, pp. 87–97.

SCHEFFER M. & al. (2001) «Catastrophic shifts in ecosystems », Nature, 413 (6856), pp. 591-596.

SCHOOLDERMAN, H. & MATHLENER, R. (2012) « Minerals and metals scarcity in manufacturing : the ticking time bomb », PricewaterhouseCoopers Accountants N.V. Adresse : <https://www.gilcommunity.com/files/4113/6318/4685/impact-of-minerals-metals-scarcity-on-business.pdf>

66

SINGH, S. B. & PELAEZ, F. (2008) « Biodiversity, chemical diversity and drug discovery », Progress in drug research, 65 (141), pp. 143-174.

SERVIGNE, P. & STEVENS, R. (2015) « Comment tout peut s'effondrer. Petit traité de collapsologie à l'usage des générations présentes », Anthropocène, Seuil, Paris.

SMILL, V. (2011) « Harvesting the biosphere: The human Impact », Population and Development Review, 37 (4), pp. 613-636.

SMITH, K.V. (1997) « Mispriced planet », Regulation, 20, pp. 6–17.

SPF ÉCONOMIE (2016) « Chiffres clés de l'agriculture 2016 », Direction Générale Statistiques – Statistics Belgium, Bruxelles, Belgique. Adresse : http://statbel.fgov.be/fr/binaries/FR_Kerncijfers%20landbouw_2016_Web_tcm326-279479.pdf

STATISTA (2017) Entrée: « Global Pharmaceuticals Industry : Statistics & Facts ». Adresse : <https://www.statista.com/topics/1764/global-pharmaceutical-industry/>

STEFFEN, W., CRUTZEN, P.J. & McNEILL, J.R. (2007) « The Anthropocene: Are humans now overwhelming the great forces of Nature? » *Ambio* 36, pp. 614-621.

STEFFEN, W., BROADGATE, W., DEUTSCH, L., GAFFNEY, O. & LUDWIG, C. (2015a) «The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration », *The Anthropocene Review*, 2 (1), pp. 81-98.

STEFFEN, W., RICHARDSON, K., ROCKSTRÖM, J., CORNELL, S. E., FETZER, I. & al. (2015b) « Planetary Boundaries: Guiding human development on a changing planet », *Science*, 347 (6223), pp. 1259855-1 – 1259855-10.

SUMAILA, U. R., CHEUNG, W., DYCK, A., GUEYE, K., HUANG, L., LAM, V. & al. (2012) «Benefits of Rebuilding Global Marine Fisheries Outweigh Costs», *PLOS ONE*, 7 (7), e40542. Adresse : <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0040542>

SUMAILA, U. R., BELLMANN, C. & TIPPING, A. (2016) « Fishing for the future: An overview of Challenges and Opportunities », *Marine Policy*, 69, pp. 173-180.

SWAMPA, M. & ANTONELLI, A. (2010) « Minería Transnacional », Biblos, Buenos Aires.

TAUB, D. R. (2010) «Effects of Rising Atmospheric Concentrations of Carbon Dioxide on Plants », *Nature Education Knowledge*, 3 (10), 21.

TAMEST (2017) « Six key impact areas of shale oil and gas development in Texas », The Academy of Medicine, Engineering and Science of Texas, Sciencedaily. Sciencedaily, 19 juin 2017. Adresse : <https://www.sciencedaily.com/releases/2017/06/170619092211.htm>

67

TEEB (2010) « The Ecosystems of Economics and Biodiversity. Mainstreaming the Economics of Nature: A Synthesis of the Approach. Conclusions and Recommendations of TEEB », Earthscan, London.

TEEB (2015) « TEEB for Agriculture & Food: an interim report », Programme des Nations Unies pour l'Environnement, Genève, Suisse. Adresse : http://img.teebweb.org/wp-content/uploads/2015/12/TEEBAgFood_Interim_Report_2015_web.pdf

TEH, L. C. L. & SUMAILA, U. R. (2013) « Contribution of marine fisheries to worldwide employment », *Fish and Fisheries*, 14 (1), pp. 77-88.

TELLES, T. S., GUIMARAES, M. F. & FALCI DECHEN, S. C. (2011) « The costs of soil erosion. Literature Review », *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35 (2). DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000200001>

TURNER, G. (2012) « On the Cusp of Global Collapse ? Updated Comparison of the Limits to Growth with Historical Data », *GAIA, Ecological Perspectives for Science and Society*, 21 (2), pp. 116-124.

TURNER, G. (2014) « Is global collapse imminent ? » Melbourne Sustainable Society Initiative, Research Paper n°4, Melbourne University.

TURNER, R.K., ADGER, W.N. & BROUWER, R. (1998) « Ecosystem services value, research needs, and policy relevance: a commentary », *Ecological Economics* 25, 61–65.

UNCPP (2014) «Land in Numbers », Secretariat of the United Nations Convention to Combat Desertification, Bonn , Allemagne.

http://www.unccd.int/Lists/SiteDocumentLibrary/Publications/Land_In_Numbers_web.pdf

UNEP (2014) « Sand, rarer than one thinks », *Ecosystem Management, Environmental Governance, Resource Efficiency*. United Nations Environment Program. Adresse : https://na.unep.net/geas/getUNEPPageWithArticleIDScript.php?article_id=110

URBAN, M. (2015) « Accelerating extinction risk from climate change », *Science*, 348 (6234), pp. 571-573.

VALIENTE-BANUET, A. & al. (2014) « Beyond species loss: The extinction of ecological interactions in a changing world », *Functional Ecology*, 29 (3), pp. 299-307.

VAN DOVER, C.L. & al. (2017) « Biodiversity loss from deep-sea mining », *Nature Geoscience*, 10, pp. 464-465, DOI: 10.1038/ngeo2983. Publié en ligne le 26 juin 2017.

VAN GROENINGEN, J. W. & al. (2014) « Earthworms increase plant production: a meta-analysis », *Scientific Reports*, 4, 6365.

VANLOQUEREN, G. & BARET, P. (2013) « Des laboratoires aux champs : Les enjeux d'un changement de paradigme » dans CASSIERS I. (dir.) « Redéfinir la prospérité », Éditions de l'Aube, La Tour d'Aigues.

VAN NES, E. H. & al. (2015) « Causal feedbacks in climate change », *Nature Climate Change*, 5, pp. 445-448.

VILLASANTE, S. & al. (2013) « Why are prices in Wild Catch and Aquaculture Industries so Different? », *Ambio*, 42 (8), pp. 937-950.

WIKE, R. (2016) « What the world thinks about climate change in 7 charts », Pew Research Center. Adresse : <http://www.pewresearch.org/fact-tank/2016/04/18/what-the-world-thinks-about-climate-change-in-7-charts/>

WOOD, A., STEDMAN-EDWARDS, P. & MANG, J. (2013) «The Root Causes of Biodiversity Loss», Routledge, London.

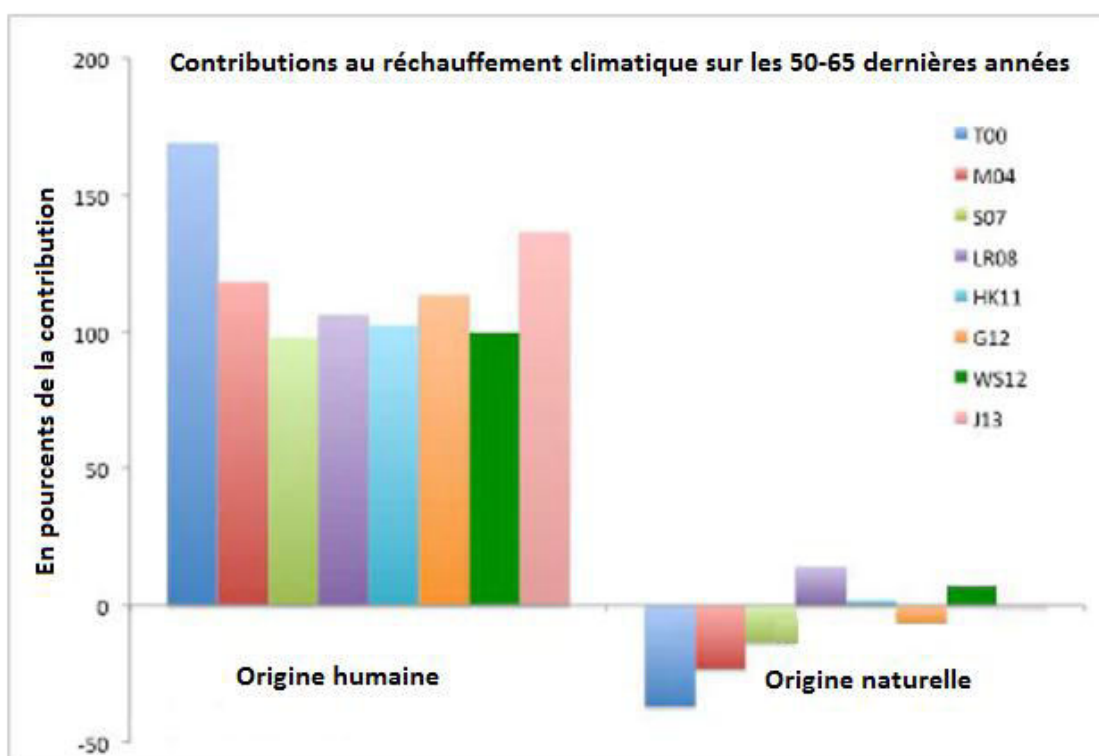
WWF (2016) « Living Planet Report 2016. Risk and resilience in a new era », WWF International, Gland, Suisse.

ZARFL, C. & al. (2015) « A global boom in hydropower dam construction », *Aquatic Sciences*, 77 (1), pp. 161-170.

Annexes

Annexe 1 : Volume de la part anthropique du réchauffement climatique comparée à sa part naturelle depuis la fin de la seconde guerre mondiale – compilation de données des 15 dernières années, indépendantes les unes des autres et utilisant des méthodologies diverses. La contribution négative de la nature s'explique par la séquestration du carbone et d'autres agents du forçage anthropique par la biomasse terrestre. Ces chiffres ont été confirmés par les derniers travaux du GIEC (cf. GIEC 2014, p. 47) et par une étude plus récente encore (Ribes & al. 2017).

Source du graphique : <https://skepticalscience.com/graphics.php?g=57>



Sources :

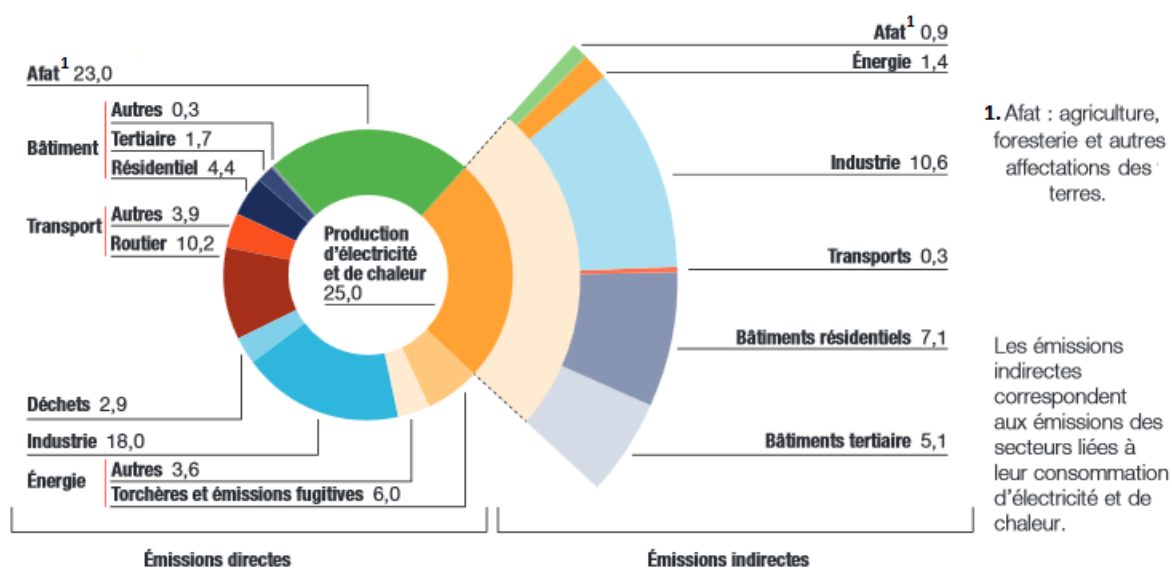
Tett & al. 2000 (T00 en bleu foncé), Meehl & al. 2004 (M04 en rouge), Stone & al. 2007 (S07 en vert clair), Lean & Rind 2008 (LR08 en mauve), Huber & Knutti 2001 (HK11 en bleu clair), Gillett & al. 2012 (G12 en orange), Wigley & Santer 2012 (WS12 en vert foncé) et Jones & al. 2013 (J13 en rose).

Annexe 2 (en anglais) : Variables de contrôle, limites planétaires (avec les zones d'incertitude dont chaque limite planétaire est la borne inférieure respective) et valeurs actuelles de la variable de contrôle pour chacun des onze processus écologiques retenus par Steffen & al. (2015b)

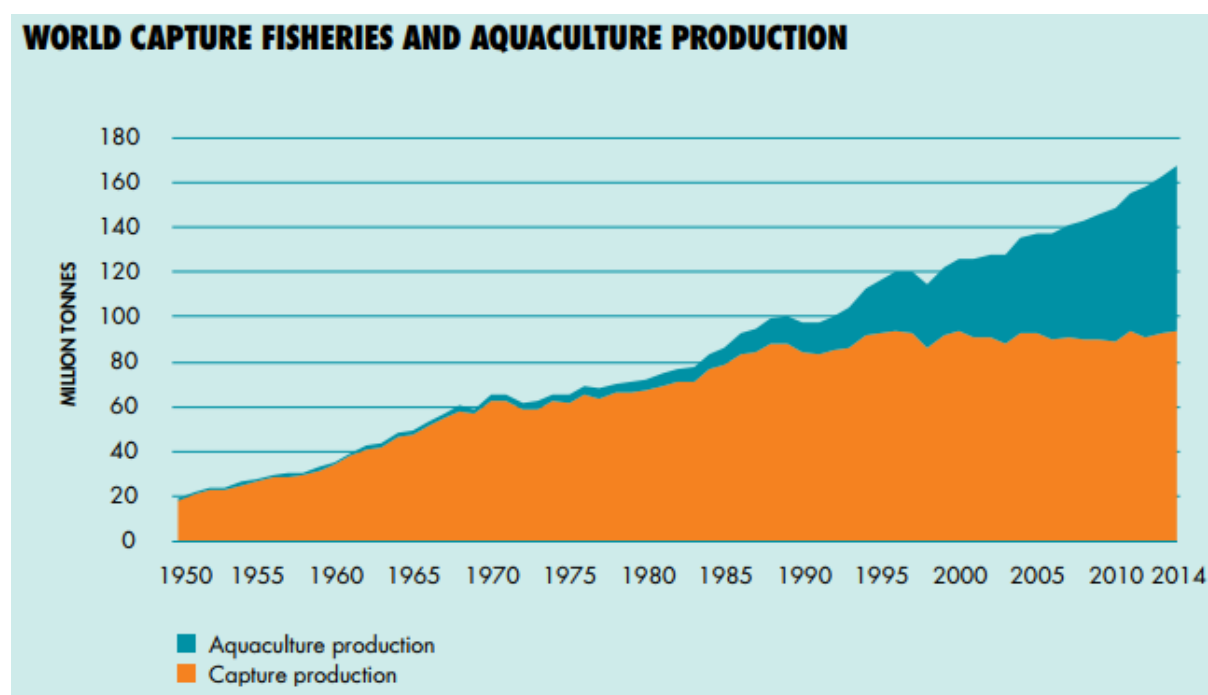
Earth-system process	Control variable(s)	Planetary boundary (zone of uncertainty)	Current value of control variable
Climate change	Atmospheric CO ₂ concentration, ppm	350 ppm CO ₂ (350–450 ppm)	398.5 ppm CO ₂
	Energy imbalance at top-of-atmosphere, W m ⁻²	+1.0 W m ⁻² (+1.0–1.5 W m ⁻²)	2.3 W m ⁻² (1.1–3.3 W m ⁻²)
Change in biosphere integrity	<i>Genetic diversity:</i> Extinction rate	< 10 E/MSY (10–100 E/MSY) but with an aspirational goal of ca. 1 E/MSY (the background rate of extinction loss). E/MSY = extinctions per million species-years	100–1000 E/MSY
	<i>Functional diversity:</i> Biodiversity Intactness Index (BII)	Maintain BII at 90% (90–30%) or above, assessed geographically by biomes/large regional areas (e.g. southern Africa), major marine ecosystems (e.g., coral reefs) or by large functional groups	84%, applied to southern Africa only
	Note: These are interim control variables until more appropriate ones are developed		
Stratospheric ozone depletion	Stratospheric O ₃ concentration, DU	<5% reduction from pre-industrial level of 290 DU (5%–10%), assessed by latitude	Only transgressed over Antarctica in Austral spring (~200 DU)
Ocean acidification	Carbonate ion concentration, average global surface ocean saturation state with respect to aragonite (Ω_{arag})	≥80% of the pre-industrial aragonite saturation state of mean surface ocean, including natural diel and seasonal variability (≥80%–≥70%)	~84% of the pre-industrial aragonite saturation state
Biogeochemical flows: (P and N cycles)	<i>P Global:</i> P flow from freshwater systems into the ocean	11 Tg P yr ⁻¹ (11–100 Tg P yr ⁻¹)	~22 Tg P yr ⁻¹
	<i>P Regional:</i> P flow from fertilizers to erodible soils	6.2 Tg yr ⁻¹ mined and applied to erodible (agricultural) soils (6.2–11.2 Tg yr ⁻¹). Boundary is a global average but regional distribution is critical for impacts.	~14 Tg P yr ⁻¹
	<i>N Global:</i> Industrial and intentional biological fixation of N	62 Tg N yr ⁻¹ (62–82 Tg N yr ⁻¹). Boundary acts as a global 'valve' limiting introduction of new reactive N to Earth System, but regional distribution of fertilizer N is critical for impacts.	~150 Tg N yr ⁻¹

Earth-system process	Control variable(s)	Planetary boundary (zone of uncertainty)	Current value of control variable
Land-system change	<i>Global:</i> Area of forested land as % of original forest cover	<i>Global:</i> 75% (75–54%) Values are a weighted average of the three individual biome boundaries and their uncertainty zones	62%
	<i>Biome:</i> Area of forested land as % of potential forest	<i>Biome:</i> Tropical: 85% (85–60%) Temperate: 50% (50–30%) Boreal: 85% (85–60%)	
Freshwater use	<i>Global:</i> Maximum amount of consumptive blue water use ($\text{km}^3\text{yr}^{-1}$)	<i>Global:</i> $4000 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$ ($4000\text{--}6000 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$)	$\sim 2600 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$
	<i>Basin:</i> Blue water withdrawal as % of mean monthly river flow	<i>Basin:</i> Maximum monthly withdrawal as a percentage of mean monthly river flow. For low-flow months: 25% (25–55%); for intermediate-flow months: 30% (30–60%); for high-flow months: 55% (55–85%)	
Atmospheric aerosol loading	<i>Global:</i> Aerosol Optical Depth (AOD), but much regional variation		0.30 AOD, over South Asian region
	<i>Regional:</i> AOD as a seasonal average over a region. South Asian Monsoon used as a case study	<i>Regional:</i> (South Asian Monsoon as a case study): anthropogenic total (absorbing and scattering) AOD over Indian subcontinent of 0.25 (0.25–0.50); absorbing (warming) AOD less than 10% of total AOD	
Introduction of novel entities	No control variable currently defined	No boundary currently identified, but see boundary for stratospheric ozone for an example of a boundary related to a novel entity (CFCs)	

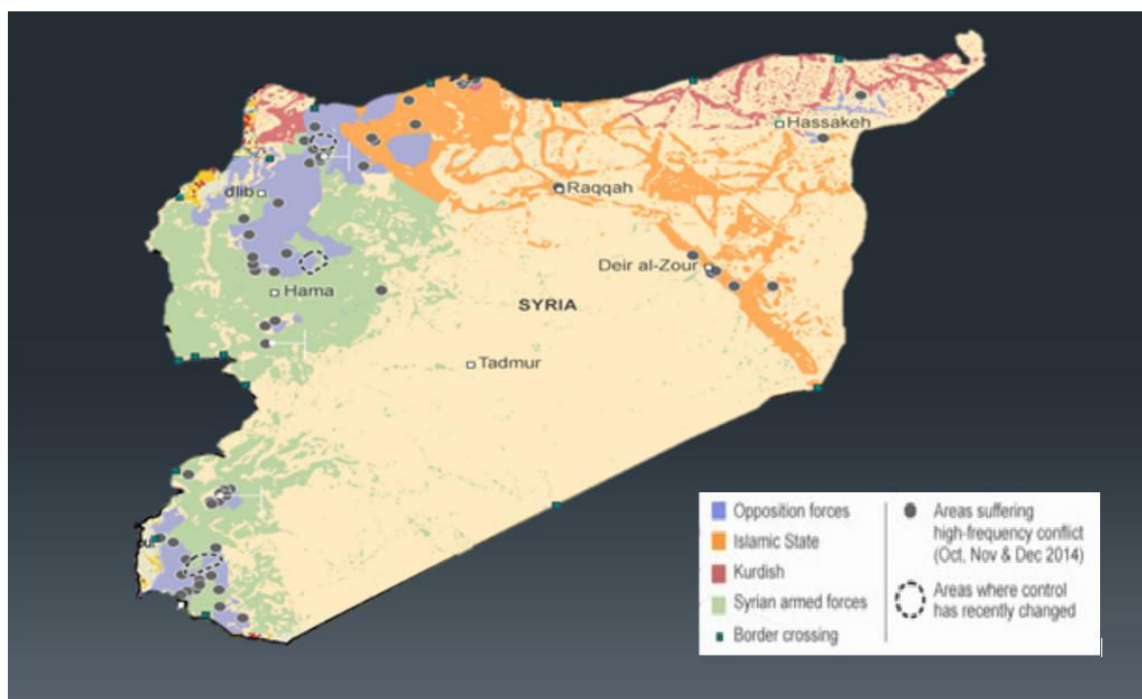
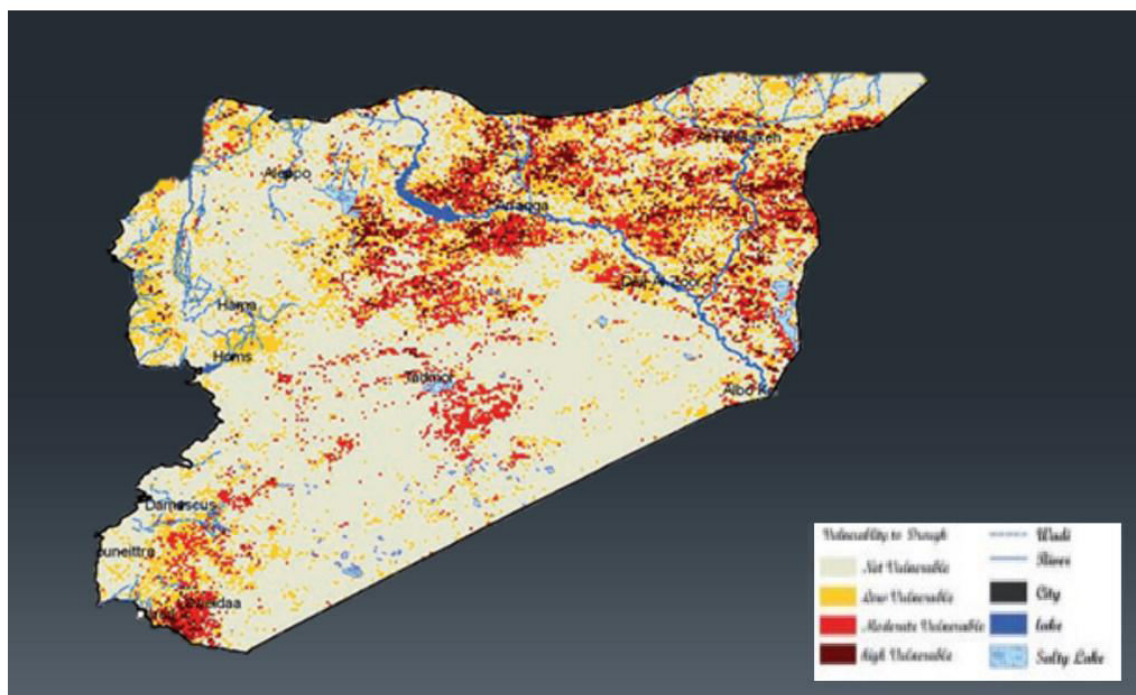
Annexe 3 : Émissions de gaz à effet de serre par secteur en pourcents du total d'équivalents CO2 (GIEC 2014)



Annexe 4 : Production totale de poisson depuis les années 50 (pêcheries marines + aquaculture) (FAO 2016b)

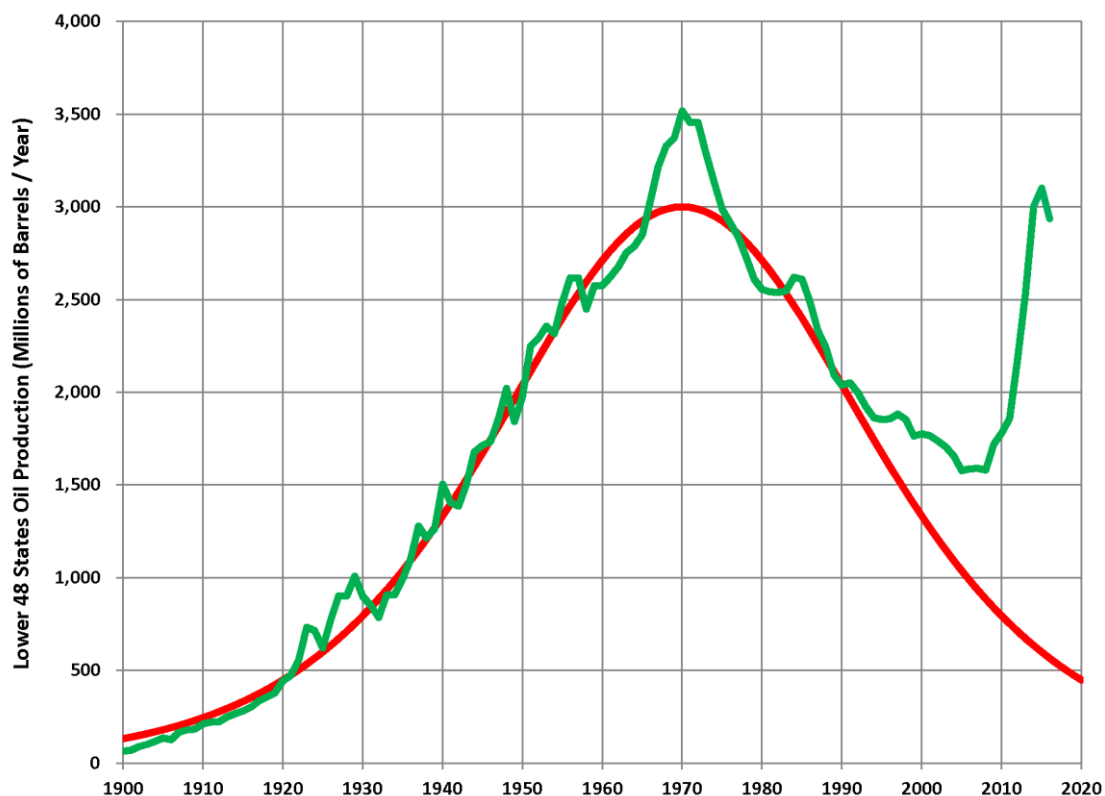


Annexe 5 : Comparaison entre les territoires touchés par la sécheresse syrienne d'avant le conflit et ceux contrôlés par l'Etat Islamique au cours du conflit. Sur la première carte, les points rouge et rouge foncé montrent les zones les plus gravement touchées par la sécheresse.
Source : ONU et BBC, repris par King (2015).



Annexe 6 : Prédiction du pic de Hubbert du pétrole pour les 48 États principaux des États-Unis en 1956 (en rouge) et production réelle de pétrole par ceux-ci jusqu'en 2014 (en vert).

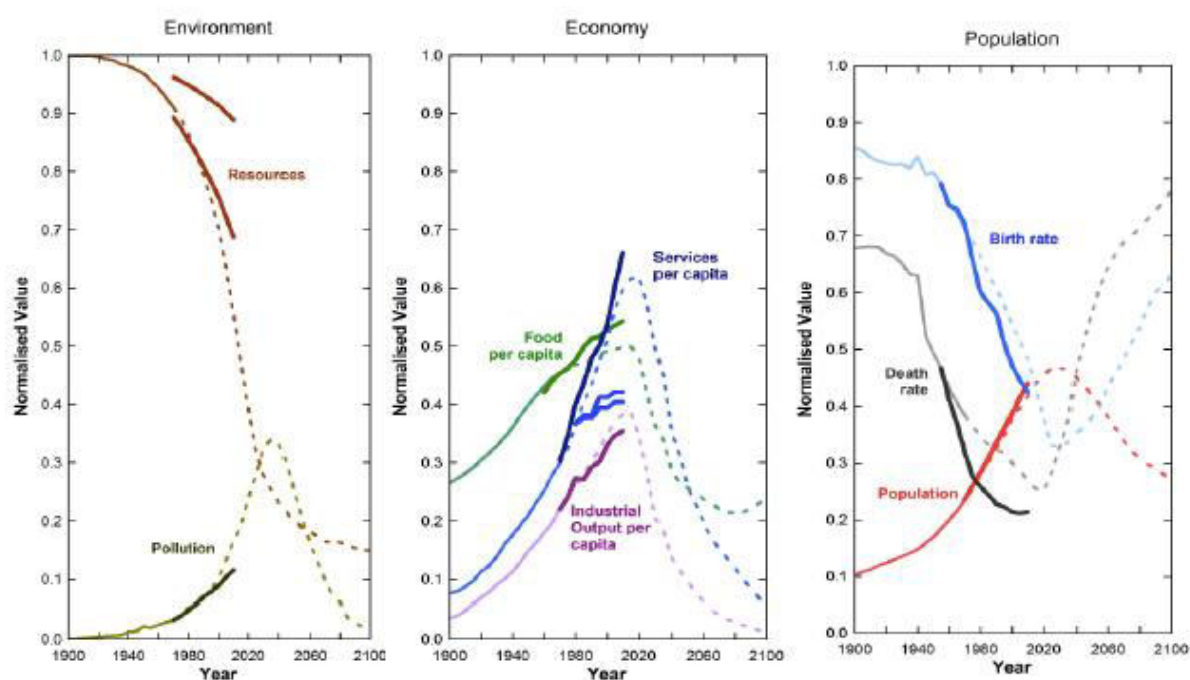
Source : https://en.wikipedia.org/wiki/Hubbert_peak_theory#/media/File:Hubbert_Upper-Bound_Peak_1956.png (Creative Commons)



75

Annexe 7 : Back-Test du modèle World3 des Meadows par rapport aux tendances historiques.

Source : Turner 2014.



Annexe 8 : Niveau de la menace climatique et capacités d'adaptation par pays.

Source : Marin 2015.

