

Face aux défis de l'Anthropocène, s'inspirer de l'écologie pour innover ?

Elsa T. Berthet¹ et Vincent Bretagnolle²

¹UMR SADAPT, INRA, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, 16 rue Claude Bernard, 75005 Paris, France

²CEBC, UMR 7372, CNRS & Université de la Rochelle, 79360 Villiers-en-Bois, France

Introduction

Alors que l'humanité a été étudiée par les sciences humaines et sociales essentiellement sous l'angle des relations entre les êtres, qu'elles soient sociales, économiques ou organisationnelles, le lien entre les hommes et leur environnement a souvent été éludé. L'analogie faite par les sciences de gestion entre l'écosystème naturel et l'écosystème d'affaires en est représentative : Moore (1993), et la plupart des auteurs qui ont repris cette analogie, ont souligné la nécessité de prendre en compte la diversité des organisations et de leurs rôles, de leurs interdépendances et de leur dynamique collective, mais ont négligé la notion de « milieu », pourtant si cruciale en écologie. Depuis plusieurs siècles le monde occidental distancie l'Homme de la Nature ; la notion même de « civilisation » témoigne d'ailleurs de l'effort des hommes pour dépasser le stade de l'humanité primitive et de s'affranchir des contraintes de leur « milieu ». C'est ce qu'ont permis (ou promis) les grandes révolutions qu'a connues l'humanité, telles que la révolution agricole, la révolution industrielle et, dans une certaine mesure, la révolution numérique. Pour autant, cet affranchissement n'est que partiel, et l'indépendance de l'homme vis-à-vis de la nature n'est qu'une illusion, en témoignent les effets de la crise environnementale actuels et à venir sur notre espèce.

Cette contribution au colloque de Cerisy « Entreprise, responsabilité et civilisation. Un nouveau cycle est-il possible ? » vise à porter une attention renouvelée aux travaux de recherche en écologie, en particulier sur la façon dont ils éclairent la situation de crise environnementale, et potentiellement civilisationnelle, dans laquelle nous sommes aujourd'hui. Nous aborderons dans un premier temps, dans une brève perspective historique, la façon dont les écologues ont introduit des concepts permettant de prendre en compte un nombre croissant d'interactions et de rétroactions, entre le vivant et le non

vivant, et, plus récemment, entre l'Homme et la Nature, ainsi que la dynamique de ces interactions. Dans un deuxième temps, nous montrerons dans quelle mesure ces connaissances en écologie nous éclairent sur la crise environnementale contemporaine, en particulier les phénomènes qualifiés de grande accélération et d'Anthropocène. Nous aborderons alors la question de l'impact potentiel de ces bouleversements sur notre civilisation, en nous appuyant sur les travaux précurseurs de Meadows et d'autres plus récents portant sur les dynamiques de civilisations. Enfin, nous proposerons une piste qui nous semble prometteuse pour tenter de dévier la trajectoire dans laquelle l'humanité s'est lancée : la mobilisation des concepts et connaissances de l'écologie pour ouvrir de nouveaux champs d'innovation.

L'écologie, science pour comprendre la complexité du vivant

Bien qu'étant une discipline scientifique récente, l'écologie a largement évolué au niveau de ses contours, de ses objets de recherche ou encore des champs scientifiques mobilisés.

Analyser les interactions au sein du vivant

L'ambition de l'écologie de comprendre le tissu du vivant remonte au concept d'« **économie de la nature** » (*oeconomia naturae*), introduit en 1749 par Linné, que ce dernier définit comme « la très sage disposition des êtres naturels, instituée par le Souverain Créateur, selon laquelle ceux-ci tendent à des fins communes et ont des fonctions réciproques ». C'est toutefois en 1866 qu'Haeckel, disciple de Darwin, introduit le néologisme « **oecologie** » pour désigner la « science des relations de l'organisme avec l'environnement, comprenant, au sens large, toutes les conditions d'existence ».

Au cours de son histoire, l'écologie n'a cessé d'introduire de nouveaux concepts qui ont permis de prendre en compte une gamme toujours plus vaste d'interactions, entre individus, entre espèces ou encore entre les êtres vivants et leur environnement. Les biogéographes, tels Humboldt, s'intéressant à la compréhension de la localisation des plantes sur terre ainsi qu'à leur physiologie, introduisent le concept d'« **associations végétales** », pour étudier à la fois les relations sol-plante, les relations plantes-facteurs abiotiques et les relations plantes-plantes, au sein d'unités d'analyses aux conditions physico-chimiques considérées comme homogènes, les « stations ». Ce concept ne prend toutefois pas en compte les relations animaux-plantes ni les phénomènes de rétroactions entre les plantes et leur milieu. Le concept de « **successions végétales** », introduit par des écologues américains tels que Clements au tournant du XXe siècle, désigne un processus dynamique selon lequel une communauté constituée d'un ensemble de plantes vivant dans un même milieu subit l'action de ce milieu et le modifie en retour, ce qui favorise l'installation de nouvelles espèces. Le milieu n'est donc plus considéré comme un objet donné et immuable, mais un objet qui co-évolue avec les espèces qui y vivent. Ces

interactions réciproques conduisent également à une certaine régulation du système. Cependant, les relations animaux-plantes ne sont toujours pas considérées. Elles le deviennent avec l'introduction du concept de « **communautés biotiques** », employé par Adams en 1904 pour étudier les végétations successives en fonction des conditions passées et présentes, ainsi que les différentes formes de vie animale qui y sont associées (Acot 1988). Dans un premier temps, l'analyse des dynamiques de populations au sein des communautés biotiques a tendance à se focaliser sur les relations proie-prédateurs et à occulter les interactions entre les animaux et leur milieu. Ainsi, dans ces travaux, sont négligés la question de la disponibilité en ressources, ainsi que l'hétérogénéité du milieu, qui, pourtant, conditionnent les comportements et les déplacements des espèces.

C'est en 1935 que Tansley introduit le concept d'« **écosystème** ». Il estime que pour comprendre l'évolution d'une communauté, il ne suffit pas de prendre en compte les interactions entre espèces, il faut aussi considérer celles entre les êtres vivants et les facteurs abiotiques (le milieu). C'est pourquoi il lui semble indispensable d'intégrer systématiquement ces facteurs abiotiques à l'unité écologique étudiée, et de considérer cet ensemble comme un système au sens physique, compris dans d'autres systèmes, et lui-même composé de sous-systèmes. Il souligne que « tous ces systèmes sont organisés, car c'est le résultat inévitable des interactions et ajustements mutuels de leurs composants ». En introduisant ce concept, Tansley cherche donc à rendre visibles un ensemble de régulations écologiques jusqu'alors non prises en compte par les écologues. L'écosystème devient une unité d'analyse dans laquelle on peut étudier les cycles de matière et d'énergie, réaliser la synthèse entre l'écologie végétale et l'écologie animale, établir le lien entre l'organique et l'inorganique ; en ce sens, l'écosystème devient un nouveau paradigme de l'écologie. Par ailleurs, Juday démontre en 1940 que l'on peut calculer des valeurs énergétiques en calories, et qu'à l'aide de cette unité on peut décrire la structuration trophique de la biocénose (Acot 1988). Les écologues mettent alors en évidence que les liens entre l'organique et l'inorganique sont structurés de manière **circulaire** et non linéaire. Lindeman introduit la notion de « cycle trophique », et confirme le besoin de changement de paradigme en écologie afin que le vivant et le milieu ne soient plus considérés comme des entités séparées. Cette avancée théorique, enrichie par le développement des approches mathématiques et de modélisation, va introduire un nouveau courant de l'écologie, l'approche écosystémique. Cette approche nouvelle, à la fois plus complexe et systémique, invitera les écologues à puiser dans de nouvelles connaissances, celles de la thermodynamique ou de la théorie générale des systèmes. Les écologues vont ainsi développer de nouveaux modèles pour tenter de caractériser le fonctionnement des écosystèmes (Golley 1991).

Dans la modélisation des écosystèmes initiée par Tansley et Lindeman, puis développée par Odum, le milieu physico-chimique est considéré comme homogène. Cette représentation de l'écosystème était d'ailleurs tirée

essentiellement d'études de l'écologie des lacs. Depuis, pour beaucoup d'écologues, l'écosystème est vu comme un système d'interactions « contenu » dans un milieu physique plutôt que comme une entité indissociablement physique et biologique. Le milieu physique est considéré comme un ensemble de facteurs représentés par des variables de forçage dans un modèle (Blandin 2007). Par ailleurs, l'homme est souvent non pris en compte, ou alors en tant que facteur perturbateur des écosystèmes. Une telle représentation est critiquée de manière croissante, notamment par les géographes mais aussi par les écologues.

Ainsi émergent peu à peu de nouveaux courants en écologie, au début des années 1980 pour intégrer l'hétérogénéité (variabilité spatiale) constatée de manière systématique (populations, écosystèmes) et l'influence grandissante de l'Homme sur les écosystèmes: le concept de « **paysage** » (Forman and Godron 1986) permet de prendre en compte l'hétérogénéité spatiale à des échelles spatiales relativement larges, ainsi que l'action de l'homme sur le milieu (Burel and Baudry 1999). L'écologie du paysage conduit à considérer différemment les perturbations, facteurs de la dynamique des écosystèmes pouvant être d'origine abiotique (tempêtes, incendies, éruptions volcaniques, inondations...), biotique (épidémies, invasions de ravageurs...) ou anthropique (agriculture, exploitation forestière, urbanisation...). Les perturbations ne sont plus seulement vues comme exogènes et négatives, mais elles sont étudiées comme facteurs structurant les écosystèmes. L'hétérogénéité, tant spatiale que temporelle, prend un statut conceptuel (Blandin 2009), et conduit notamment au développement de recherches en écologie spatiale sur les métapopulations et métacommunautés, qui s'intéressent aux mouvements et flux d'organismes, de matière, de gènes et d'énergie entre différentes zones. Ce courant étudie notamment la réponse des individus, des populations et des communautés à la variabilité de l'environnement.

Plus récemment les chercheurs du réseau *Resilience Alliance* ont introduit le concept de « **socio-écosystème** » (Berkes and Folke 1998) afin de prendre en compte de manière plus explicite les interactions entre les hommes et les écosystèmes dans lesquels ils évoluent. Ce concept conduit de facto l'écologie à interagir avec d'autres disciplines. Les hommes sont considérés comme une composante active du système et non comme une entité extérieure. Un tel concept vise à mieux prendre en considération la complexité des interactions existantes entre l'homme et la nature (Liu et al. 2007). De nouvelles variables sont introduites et analysées, de manière à caractériser finement les interactions entre le compartiment social et le compartiment écologique de ces systèmes. De nouveaux concepts, tels que celui de « services écosystémiques » (ou bénéfiques que les hommes peuvent tirer des écosystèmes - (MEA 2005)), sont également introduits par les tenants de l'écologie économique. Différentes représentations et modélisations des socio-écosystèmes (Ostrom 2007, Collins et al. 2011, Bretagnolle et al. 2019) ont été proposées. Des difficultés majeures pour la modélisation et la compréhension des dynamiques de tels systèmes sont la

multiplicité de variables à prendre en compte et la difficulté à les mesurer. Ainsi ce concept de socio-écosystème, s'il permet de porter un regard nouveau sur les relations Homme-Nature en mettant en lumière une sorte de « métabolisme socio-écologique », et invite à dépasser les frontières disciplinaires pour les appréhender, tend à simplifier le fonctionnement du système social (Latour 2017), et n'est probablement pas suffisant pour étudier un certain nombre de phénomènes tels que les ordres sociaux ou encore les processus de création collective.

Caractériser les dynamiques complexes au sein du vivant

Des systèmes dynamiques complexes et non linéaires

Une difficulté majeure liée aux systèmes vivants est qu'ils sont dynamiques, complexes et non-linéaires. Les systèmes étudiés en écologie, tels que les écosystèmes, sont constitués de composantes nombreuses et hétérogènes, dont le fonctionnement individuel va conditionner le fonctionnement global du système, sans que ce fonctionnement résulte exactement de la somme des fonctionnements individuels : le tout n'est pas la somme des parties, et il existe des propriétés émergentes des systèmes extrêmement complexes à prédire. Le fait que ces systèmes complexes aient un comportement non-linéaire implique par ailleurs que les conséquences ne sont pas proportionnelles aux causes. En raison de la stochasticité de l'environnement, qui conditionne le fonctionnement du système, et des divers phénomènes de rétroactions associés à des réponses non linéaires (Walker et al. 2004, Liu et al. 2007) comprenant des effets de seuil, des effets d'héritage (*legacy effects*) ou encore des décalages temporels (*time lags*), le comportement de ces systèmes non-linéaires peut changer brusquement et est très difficilement prévisible.

L'écologie fait donc appel à de nombreuses théories, puisées en partie dans des disciplines différentes, telles que la théorie de l'entropie, de l'émergence, des catastrophes, du chaos, et puise donc beaucoup dans les modélisations mathématiques pour comprendre et prédire le comportement des systèmes, à partir de leurs propriétés, des paramètres environnementaux, et du temps.

Croissance, limitation, stabilité et rétroactions en écologie

Le développement de la cybernétique va fortement influencer les nouvelles modélisations des écosystèmes. Le rôle de cette discipline est de prévoir l'évolution du comportement de l'objet modélisé dans le temps. Elle s'inspire des théories de l'information et de la communication et les applique aux phénomènes de régulation chez l'animal ou la machine. Elle aide ainsi à comprendre comment les systèmes vivants évoluent de façon relativement stable dans le temps, malgré les perturbations fréquentes auxquels ils sont soumis. Son concept central est celui de « **rétroaction** ». Il en existe deux sortes : la rétroaction positive, qui a un effet amplificateur, et la rétroaction négative qui a un effet compensateur.

La **capacité de charge** (*carrying capacity*) est un cas majeur de rétroaction négative au sein des écosystèmes. Il s'agit de la taille maximale de la population d'un organisme qu'un milieu donné peut supporter. Sa valeur est liée à la qualité de l'habitat, à la disponibilité en nourriture et en eau, et aux autres éléments indispensables à la vie. Dans la plupart des situations, si une population atteint la capacité de charge du milieu dans lequel elle évolue, les contraintes vont peser de manière croissante sur sa démographie. Généralement, l'effectif de cette population va tendre selon une asymptote correspondant à la capacité de charge, ou bien osciller autour de cette valeur. Toutefois, il arrive que la taille de la population dépasse franchement la capacité de charge ; une telle situation entraîne alors ce que les écologues anglophones qualifient d'*overshoot and collapse*, c'est-à-dire un effondrement de la population à un niveau bien plus faible que la capacité de charge (voir figure 1).

Mettre ici la figure 1

Théoriquement, un système parfaitement autorégulé impliquerait de pouvoir revenir à son état initial, suite à une perturbation. Cependant, tous les systèmes qui « fonctionnent » sont dans un état de déséquilibre thermodynamique dans la mesure où ils ne cessent d'échanger de l'énergie avec leur environnement. Ainsi, dès la fin des années 1940, certains écologues tels que Gabrielson (cité par Blandin 2009), soulignaient leurs réserves vis-à-vis de la notion d'équilibre de la nature : « le terme « équilibre de la nature » tel qu'il est généralement admis, a peu de sens pour moi. (...) Toute mon expérience de terrain indique qu'il y a en permanence un changement d'ajustement entre compétiteurs au sein des communautés écologiques. Ces ajustements basculent parfois violemment dans un sens ou dans un autre, sans interférence humaine. Aussi l'« équilibre de la nature », si tant est que cela signifie quelque chose, c'est un équilibre excessivement dynamique qui ne se maintient jamais mais bouge constamment ».

C'est dans ce cadre que se situent les travaux de C.S. Holling sur la **résilience** des écosystèmes, puis des socio-écosystèmes. (Walker et al. 2004) définissent la résilience comme « la capacité d'un système à absorber les perturbations et à se réorganiser tout en opérant des changements de manière à conserver ses fonctions essentielles, sa structure, son identité et les rétroactions. Holling et ses collègues s'inscrivent en faux contre le « mythe » de la stabilité des écosystèmes, et proposent au contraire de s'intéresser à leur dynamique non-linéaire de systèmes complexes. En fonction de sa résilience, un système évolue selon ce que Holling et Gunderson (2002) qualifient de « cycle adaptatif ». Au cours des différentes phases du cycle adaptatif, la résilience commencerait par décroître pour augmenter ensuite : les phases de croissance (r), puis de conservation (K), sont marquées par une évolution lente et donc facilement prévisible. Lors de la phase r, des espèces par exemple colonisent un milieu et mettent en place une organisation devenant optimale par rapport à la mobilisation des ressources. Ce système devient alors très stable (phase K) mais aussi très vulnérable, car d'une part il y a moins d'espèces, et d'autre part les espèces sont très étroitement liées

entre elles. En tant que système optimisé, il est très peu flexible. Ainsi une perturbation pourra facilement conduire à un effondrement (phase Ω) : c'est par exemple le cas d'une forêt qui prendrait feu. On entre alors dans une nouvelle phase de réorganisation qui permet de remettre à disposition un certain nombre de ressources, de rebattre les cartes, et qui peut conduire à un nouveau cycle. Holling la qualifie de *release* (phase α), et fait référence à Schumpeter et à la notion de destruction créatrice pour cette phase α .

Holling décline ce cycle à plusieurs niveaux et à plusieurs échelles et introduit la notion de « Panarchie » : un cycle adaptatif peut être perturbé par les cycles qui affectent les sous-systèmes et, au niveau supérieur, l'environnement est lui-même assimilé à un système. De multiples connexions entre ces niveaux d'organisation peuvent potentiellement intervenir, parmi lesquelles la connexion « révolte » selon laquelle des événements rapides à une échelle inférieure bouleversent des processus plus lents à une échelle supérieure, et la connexion « mémoire » qui rend compte du fait que le renouvellement du cycle est conditionné par la phase K (conservation) du niveau supérieur. Un tel effet va permettre d'atténuer les effets de perturbations futures.

Selon Walker et al. (2004), il existe plusieurs façons d'augmenter la résilience d'un système, ou encore d'augmenter ses bassins d'attraction (ensemble de valeurs de variables d'état au sein duquel le système tend à rester stable). Il peut s'agir d'en augmenter la latitude (élargir la gamme de ces valeurs pour laquelle le système peut conserver sa structure et ses fonctions), d'accroître la résistance du système (sa capacité à absorber des chocs sans se modifier), de diminuer sa précarité (s'éloigner des seuils ou modifier les valeurs de ces derniers), ou encore d'améliorer la gestion des interactions entre les échelles du système (jouer sur la panarchie). Ainsi, appréhendée, la résilience apparaît comme une caractéristique fondamentale des systèmes à gérer.

L'éclairage de l'écologie sur la crise environnementale contemporaine

Anthropocène : l'homme modifie profondément son environnement

La population humaine est passée d'environ 650 000 individus en 1700, à 7,5 milliards actuellement. Pendant 300 000 ans (âge estimé de notre espèce), les hommes vivaient de façon nomade de chasse, de pêche et de cueillette. Ils étaient intégrés à la chaîne alimentaire, sans voir de position surplombante de super-prédateurs. Mais il y a environ 10 000 ans le développement progressif de l'agriculture a permis l'essor successif des cités, des cités-États, puis des empires (Harari and Dauzat 2015). Plus récemment, la capacité à utiliser de manière systématique et industrielle les énergies fossiles a permis aux organisations humaines de générer des transformations fondamentales dans les modes de vie (production de ressources, progrès médicaux et technologiques, etc.) qui ont

engendré une augmentation sans précédent de la démographie humaine au cours des trois derniers siècles, en même temps qu'une augmentation substantielle de la consommation de ressources par habitant. Cette augmentation démographique, et la consommation croissante (mais inégale) de ressources naturelles par l'homme, augmentent de manière considérable l'empreinte écologique de l'homme sur la planète : en 1700 l'homme utilisait moins de 5 % des écosystèmes terrestres (en superficie) ; aujourd'hui ce chiffre dépasse 75 % (Ellis et al. 2010). Environ un tiers des terres émergées sont cultivées.

Une équipe de scientifiques, menée par Will Steffen dans le cadre de *l'International Biosphere Program*, a évalué l'impact global de l'homme sur la planète. Il met en regard l'évolution de 12 facteurs socio-économiques (tels que la démographie, la consommation d'engrais ou le tourisme international) avec celle de 12 facteurs environnementaux (tels que les émissions de gaz à effet de serre, la domestication des sols ou la déforestation). Ces mesures, compilées au niveau planétaire et comparées entre elles, mettent en évidence une accélération extrêmement rapide, brutale mais surtout synchrone des dynamiques de l'ensemble de ces facteurs, des années 1950 à aujourd'hui (Steffen et al. 2015). Cette analyse confirme les interdépendances entre ces facteurs socio-économiques d'une part, environnementaux d'autre part.

En écho à ces phénomènes, Paul Crutzen a introduit le terme « Anthropocène » pour signifier que nous étions entrés dans une nouvelle époque géologique, l'homme en tant qu'espèce étant devenu une force d'ampleur tellurique (Bonneuil and Fressoz 2013). L'Anthropocène succéderait ainsi à l'Holocène, ayant débuté il y a 11 500 ans, qui lui-même faisait suite au Pléistocène ayant démarré 2,5 millions d'années auparavant. Alors que l'Holocène a été marqué par une stabilité inédite de la composition de l'atmosphère terrestre et des conditions climatiques, qui, selon de nombreux scientifiques, aurait permis le développement de l'agriculture et donc des grandes civilisations, l'Anthropocène met en évidence une rupture significative à l'échelle temporelle de l'histoire géologique. Trois grands types d'instabilités sont en faveur de la reconnaissance de l'Anthropocène : elles concernent le climat, la biodiversité et les grands cycles biogéochimiques (ibid).

L'Anthropocène se caractérise par une augmentation d'un facteur 40 de la consommation globale d'énergie entre 1800 et 2000, reposant essentiellement sur le charbon, les hydrocarbures et plus récemment l'uranium (cette augmentation étant inégalement répartie selon les pays). Par rapport à 1750, l'atmosphère s'est enrichie du fait des émissions humaines de + 150 % de méthane (CH₄), de + 63 % de protoxyde d'azote (N₂O), et de + 43 % de dioxyde de carbone (CO₂). Ces gaz à effet de serre ont déjà causé une hausse de la température de la planète de 0,9-1,1°C depuis le milieu du XIXe siècle, tandis que les scénarios du GIEC (Groupe intergouvernemental d'étude sur l'évolution du climat des Nations Unies) prévoient, selon les types de réponses politiques, entre 1,2 et 6 degrés de

plus à la fin du XXI^e siècle. En effet, la barre des +2°C par rapport à la période préindustrielle, considérée par la plupart des climatologues comme un seuil de danger, sera très difficile à ne pas dépasser en l'absence de sursaut politique international. Sachant que ces scénarios sont considérés comme optimistes puisque le réchauffement climatique, en raison des effets de rétroaction et d'emballlement, pourrait être plus fort que prévu. Les conséquences de ce réchauffement sont difficiles à anticiper car une faible variation de la température moyenne du globe peut entraîner des changements brutaux et désordonnés (cf. paragraphe précédent sur la non-linéarité des systèmes planétaires) : la fonte des glaces et la montée des océans sont par exemple déjà bien plus rapides que ne l'avaient prévu les experts (IPCC 2019).

La dégradation généralisée de la biosphère est le deuxième élément témoignant du basculement dans l'Anthropocène. Avec un taux de disparition des espèces près de 1000 à 10 000 fois plus élevé que la normale, les biologistes parlent de 6e extinction (Ceballos et al. 2015). Plus de 600 espèces de vertébrés ont disparu depuis le XVI^e siècle ; au rythme actuel, 20 % des espèces pourrait avoir disparu d'ici 2050, les premières espèces concernées étant les amphibiens (IPBES 2019). Le Planet Living Index (du WWF) montre que 50 à 67% (60% en moyenne) du nombre des vertébrés a disparu en 44 ans. Une étude (Hallmann et al. 2017) a montré que près de 80 % de la biomasse d'insectes volants avait disparu des zones protégées en Allemagne dans les milieux agricoles. La biomasse des humains (32 %) et celle de leurs animaux domestiques et d'élevage (65 %) atteignent 97 % de la biomasse totale des vertébrés terrestres. L'effondrement de la biodiversité est lié à l'anthropisation : en premier lieu le changement d'usage des sols (dégradation, fragmentation, destruction des milieux) dû à l'agriculture, et dans une moindre mesure à l'urbanisation et aux infrastructures ; mais aussi la surexploitation des ressources (qui concerne par exemple les trois quarts des zones de pêche du monde) ; ou encore les espèces invasives. Aujourd'hui ce sont trois quarts des milieux terrestres et environ deux tiers des milieux marins qui sont considérés comme dégradés (IPBES 2019). Cet effondrement de la biodiversité est accéléré par le changement climatique, qui cause des modifications des conditions de vie si rapides que beaucoup d'espèces ne peuvent s'adapter ou migrer ; notamment l'acidification des océans (+ 26 % par rapport à la période préindustrielle) qui menace la vie aquatique (voir références dans Bonneuil et Fressoz 2013).

Une troisième transformation majeure témoigne de notre entrée dans l'Anthropocène : il s'agit de celle des cycles de l'eau, de l'azote et du phosphate. La modification du cycle continental de l'eau est massive avec le drainage de la moitié des zones humides de la planète et la construction de barrages retenant 15 % du flux hydrologique de l'ensemble des cours d'eau. Le cycle de l'azote a quant à lui été radicalement transformé par les combustions industrielles et la fabrication d'engrais de synthèse, qui génèrent des flux d'azote deux fois plus importants que le flux naturel (ce dernier est essentiellement dû à la fixation

symbiotique). La surutilisation des engrais azotés contribue par ailleurs aux émissions de gaz à effets de serre (monoxyde d'azote), à la pollution de l'eau par les nitrates et à l'eutrophisation des lacs et des cours d'eau. Les flux anthropiques du phosphore sont huit fois plus importants que le flux naturel. Sur les 20 millions de tonnes extraites chaque année des mines de phosphate, principalement pour servir d'engrais, près de la moitié finit dans les océans, conduisant à leur anoxie déjà observée dans certains estuaires (ibid.).

Ainsi, si la stabilité climatique des 10 000 dernières années de l'Holocène a permis le développement de civilisations sur les cinq continents, l'entrée dans l'Anthropocène s'annonce chaotique. Selon (Rockström et al. 2009) ces trois facteurs (climat, biodiversité, cycles biogéochimiques) conditionnant le fonctionnement du système Terre parmi les neuf identifiés comme cruciaux, ont déjà atteint un seuil de basculement brutal, ce qui peut entraîner des réactions en chaîne d'autant plus imprévisibles que tous ces facteurs et processus sont interdépendants. Latour (2017) résume cyniquement la situation ainsi : « Au lieu de maîtres et possesseurs de la nature, nous voici chaque jour un peu plus emberlificotés dans les immenses boucles de rétroaction du système terre. » Nos modes de vie vont s'en trouver directement affectés. La sécurité alimentaire est concernée en premier lieu, puisque le changement climatique a d'ores et déjà posé un manque à gagner de 4 à 5 % par rapport à 1980 sur la production mondiale de blé et de maïs. Nos lieux de vie également, car si actuellement, 20 à 30 millions de personnes migrent chaque année suite à une catastrophe naturelle, les Nations Unies prévoient le double aux environs de 2030 et ce chiffre pourrait largement augmenter par la suite.

La notion d'Anthropocène fait cependant l'objet de controverses. Celles-ci portent tout d'abord sur la pertinence d'introduire une nouvelle ère géologique. L'Anthropocène ne concernerait au plus que quelques siècles, alors que les stratigraphistes sont plutôt habitués à travailler à l'échelle des 4,5 milliards d'années de la terre. Par ailleurs, pour inscrire l'Anthropocène comme nouvelle époque géologique, il faut des ruptures stratigraphiques. Bonneuil et Fressoz (2013) listent trois arguments en faveur de cette position : la modification profonde de la composition atmosphérique, l'extinction actuelle de la biodiversité, et enfin, l'urbanisation, les infrastructures, les activités minières et agricoles, mais aussi le relargage de substances nouvelles dans les écosystèmes telles que les composés issus de la chimie des hydrocarbures ou encore les radionucléides, qui laisseront tous des signaux stratigraphiques notables. Les controverses sur la notion d'Anthropocène portent également sur la question de sa datation. Crutzen propose de le faire débiter en 1784, date du brevet de James Watt sur la machine à vapeur, symbole du commencement de la révolution industrielle. Cette date marquerait la rupture majeure à la fois environnementale et civilisationnelle de l'entrée dans la société thermo-industrielle fondée sur les énergies fossiles (ibid.). Mais d'autres spécialistes développent des thèses alternatives : l'Anthropocène pourrait avoir débuté après l'apparition d'Homo

sapiens il y a 200 000 ans qui, avec le feu et la chasse, a provoqué la disparition de la mégafaune sur presque tous les continents ; ou encore il y a 5000 ans avec le déploiement de l'agriculture et la déforestation ; ou enfin à la fin de la seconde guerre mondiale, en raison des émissions de radionucléides.

Cependant, comme le soulignent Bonneuil et Fressoz (ibid.), « en attendant que les stratigraphes s'accordent, le concept d'Anthropocène est déjà devenu un point de ralliement entre géologues, écologues, spécialistes du climat et du système terre, historiens, philosophes, citoyens et mouvements écologistes pour penser ensemble cet âge dans lequel l'humanité est devenue une force géologique majeure ». La notion d'Anthropocène connaît ainsi depuis quelques années une popularité croissante, et, par sa définition même, se soustrait aux partages disciplinaires, et en particulier à la scission entre les sciences de l'homme et les sciences de la nature. En effet, pour la première fois dans l'histoire de la planète, une époque géologique serait définie par la capacité d'action d'une espèce, l'espèce humaine (Beau and Larrère 2018). Derrière la notion d'Anthropocène se cache en réalité une pluralité de récits et de thèses : par ex. lui préférer le terme « Capitalocène » qui reconnaîtrait les différences de responsabilités entre Etats vis-à-vis du changement global, ou encore, relativiser le caractère nouveau de l'impact de l'homme sur la planète. Néanmoins, la notion d'Anthropocène invite à nous poser la question de notre responsabilité en tant qu'humains, et à mieux comprendre les causes et les effets de ces modifications pour pouvoir penser les moyens juridiques, techniques, sociaux, économiques et politiques pour s'y adapter et les infléchir (ibid).

Comprendre les risques d'effondrement

Rapport Meadows : capacité de charge versus croissance

En 1968 émane de l'OCDE le Club de Rome, une instance rassemblant scientifiques, économistes, fonctionnaires et industriels de 52 pays pour réfléchir à la complexité des problèmes auxquels est confrontée l'humanité (*Predicament of Mankind*). Le Club de Rome commande à Dennis Meadows qui dirige une équipe au Massachusetts Institute of Technology (MIT) un rapport, qui sera publié en 1972, intitulé *The Limits to Growth* (traduit en français sous le titre « Halte à la croissance ? »). Dans le sillage des travaux de Malthus et de ceux de Forrester, cette étude s'appuie sur une modélisation mathématique de l'écosystème mondial (le modèle World 3) intégrant seulement cinq variables fondamentales : les ressources alimentaires, les ressources naturelles non renouvelables (pétrole, charbon, métaux), la production industrielle, la pollution, et enfin la démographie mondiale. Après avoir modélisé ces variables à l'aide d'un nombre limité d'équations non linéaires, et leurs interactions, les scientifiques ont procédé à des simulations sous différents scénarios. Les résultats sont une augmentation de la quantité d'aliments par personne, de la production industrielle, de la population, mais aussi des pollutions, tandis que les ressources disponibles diminuent drastiquement. L'analyse met en évidence un dépassement des limites matérielles et un risque d'effondrement (*overshoot and collapse*) dans la première moitié du XXI^e siècle, la quantité de ressources disponibles ne permettant plus de soutenir

l'augmentation démographique et la croissance économique, et ce quel que soit le scénario. Le rapport met en évidence l'illusion d'une croissance infinie. Ses principales conclusions sont les suivantes : si les rythmes observés de croissance démographique, de surconsommation des ressources et de pollutions se poursuivent, les limites à la croissance seront atteintes dans le prochain siècle avec pour résultat un déclin incontrôlable des conditions de vie et de notre capacité industrielle. Toutefois, il est possible de corriger cette dérive et de s'orienter vers des conditions de développement écologiquement soutenables. Enfin, si la population humaine opte pour cette dernière solution, plus tôt elle le fera, plus grandes seront les chances de succès.

Dès sa sortie, ce rapport fut sévèrement critiqué, en particulier par les économistes, notamment parce qu'il était considéré qu'il sous-estimait le rôle d'innovations technologiques possibles et qu'il ignorait le mécanisme des prix dans les rétroactions prévues dans les modèles utilisés (à noter que le modèle ne contient ni équation ni paramètre économique). Pourtant, Turner (2008, 2012) propose de remettre à jour les analyses du MIT, et de comparer les simulations de Meadows et al. (1972) avec les données réelles de 1972 à 2002. Il reprend les trois scénarios proposés par le MIT : *standard run* – ou « *business as usual* » ; *comprehensive technology* qui mise tout ou presque sur le développement des technologies et enfin *stabilized world* qui propose à la fois des solutions technologiques et politiques pour atteindre un état d'équilibre pour plusieurs facteurs (démographie, confort matériel, quantité de nourriture et de services par personne). Turner montre que les données réelles confirment que nous sommes dans la trajectoire du *standard run*, qui risque de mener à un effondrement entre 2020 et 2030, alors que seul le scénario *stabilized world* pourrait l'éviter.

Bien que certains auteurs (tels que Castro (2012)) estiment que Turner avance des résultats pessimistes, et que des voix s'élèvent pour mettre en avant le fait que le progrès technologique va permettre de reculer ce pic de quelques années, il devient évident que nous ne pourrions l'éviter à moins de changer drastiquement de trajectoire civilisationnelle. Aujourd'hui, en effet, plusieurs éléments nous conduisent à penser que nous atteignons le pic dont il est question dans la simulation de Meadows et al. (1972). D'après les modèles en effet, le premier des paramètres qui devrait montrer des signes d'inflexion est la nourriture per capita. Or les quantités de poissons pêchés diminuent alors que l'effort de pêche continue d'augmenter (Rousseau et al. 2019), en raison d'un effondrement des stocks de poissons dans les océans (Watson and Pauly 2001). On observe aussi dans de nombreux pays, notamment en France, une stagnation, voire une baisse des rendements agricoles (par exemple pour le blé, le tournesol et la vigne), liée à la diminution de la fertilité des sols et à l'augmentation des aléas climatiques (Schauberger et al. 2018). En tout état de cause, Bonneuil et Frescoz (2013) soulignent que les sociétés humaines vont devoir faire face dans les prochaines décennies à des changements d'état du système Terre auquel le genre

Homo apparu il y a 2,5 millions d'années n'avait jusqu'ici jamais été confronté, et donc auquel il n'est ni adapté biologiquement ni préparé culturellement.

Capacité de charge et risque d'effondrement des civilisations

Aujourd'hui, les menaces qui pèsent sur la survie de l'humanité suscitent un intérêt croissant pour la compréhension des facteurs affectant la persistance ou l'effondrement de civilisations à travers la planète et à travers les âges. De nombreux scientifiques ont analysé les dynamiques de populations humaines avec une variété d'outils et de cadres d'analyse. Les principales questions traitées par ces chercheurs sont : quels sont les grands facteurs conditionnant l'évolution des civilisations ? Pourquoi certaines persistent et d'autres disparaissent ? L'analyse la plus célèbre (ou tout au moins médiatisée) est celle de (Diamond 2005), qui a mené une étude comparative de cas en s'appuyant sur un grand nombre de données historiques, anthropologiques et écologiques. Par son approche interdisciplinaire il cherche à identifier un certain nombre d'invariants. Tainter (1990), lui, mobilise la théorie des réseaux, de l'économie de l'énergie et de la complexité pour modéliser les dynamiques des grandes civilisations. Il cherche notamment à comprendre les liens entre dynamique des civilisations et complexité. Toynbee, dans son *Etude de l'Histoire* a lui aussi comparé différentes dynamiques de civilisations et a cherché à en comprendre les invariants, de manière à produire une théorie générale de l'histoire et de la civilisation. Quant à Turchin et son équipe du Seshat¹, ils ont construit une base de données considérable sur les dynamiques de civilisation. Croisant des approches mathématiques et de modélisation (notamment multi-agents) avec les données sociologiques et historiques, selon une discipline nouvelle appelée Cliodynamique, ces scientifiques analysent comment émergent ou évoluent les civilisations. Enfin, Motesharrei et al. (2014) ont élaboré un modèle écologique pour essayer de comprendre les relations entre disponibilité des ressources, répartition des ressources au sein d'une société, et dynamique de cette société.

Les dynamiques de civilisations se composent toujours d'une phase d'émergence, puis d'une phase de développement, et enfin soit une phase de persistance, soit un déclin. Les différences sont plutôt liées soit à la temporalité, soit à la gravité du déclin et à ce qu'il advient de la civilisation après son déclin (invasion, isolement, etc.). La place des interactions entre civilisations et disponibilité des ressources naturelles, quoique n'étant pas toujours considérée comme étant le principal facteur de dynamique des civilisations, est toujours présente. La notion de capacité de charge est au cœur des travaux de Diamond et de Motesharrei. Mais au-delà de la quantité de ressources disponibles, ces auteurs analysent également la répartition de ces ressources au sein des sociétés. Le fait qu'une petite partie de la population exploite une majeure partie de cette même population ou des écosystèmes, pourrait conduire à des effets d'emballement menant à l'extinction. D'autres travaux s'appuient sur la connaissance des

¹ voir SESHAT, <http://seshatdatabank.info/methods/>

conditions environnementales pour comprendre l'émergence de sociétés complexes. Turchin et al. (2013) ont notamment montré que l'on pouvait prédire de manière robuste, via des modèles multi-agents prenant en compte les conditions géographiques et écologiques, les lieux et dates d'émergence de grandes sociétés de -1500 à +1500 après JC.

Pour Tainter, le lien aux ressources est plus secondaire puisque l'auteur s'intéresse essentiellement au degré de complexité atteint par une société donnée. Mais selon sa théorie, les sociétés s'effondrent lorsque leurs investissements dans la complexité sociale requièrent trop d'apports en énergie (qui peut se traduire par la conquête de terres, la fourniture de nourriture, etc.), pour lesquels le retour marginal sur investissement devient trop faible. En quelque sorte, un cercle vicieux s'installe lorsque les ressources viennent à manquer, qu'une société se complexifie, et qu'elle nécessite par conséquent encore plus d'énergie pour fonctionner. Tainter souligne que dans la vie d'une civilisation, il peut y avoir des diminutions ponctuelles de la complexité qui vont être plutôt bénéfiques pour la pérennité de cette société. *A fortiori*, l'effondrement d'une civilisation consiste en une simplification des institutions, conduisant à une moindre spécialisation économique et professionnelle, moins de flux d'information, moins de contrôle centralisé, etc. On retrouve ici la métaphore du cycle adaptatif de Holling (1973) qui met en évidence que la phase d'effondrement d'un écosystème consiste à passer d'un état très structuré à un état chaotique lors duquel les ressources sont redistribuées, si bien que l'écosystème peut se réorganiser différemment et persister, donc être résilient.

Ces différents auteurs se sont tous intéressés aux facteurs de persistance des civilisations. Selon Diamond et Motesharrei, certaines civilisations perdurent en évitant de dépasser la capacité de charge ou en y revenant, par exemple en limitant la démographie ou en limitant le prélèvement des ressources. D'autres civilisations, comme en Papouasie-Nouvelle Guinée, ont su élaborer des solutions innovantes pour régénérer les ressources, voire augmenter la capacité de charge du socio-écosystème. Les auteurs identifient un certain nombre de conditions sociopolitiques permettant le succès d'une civilisation face à une situation de crise : il s'agit notamment de la prise de conscience de la situation, soit par la population, si celle-ci est capable d'auto-organisation, soit par une élite, si la société est beaucoup plus complexe ou son territoire géographique est très étendu, ce qui rend difficile la compréhension globale de l'état des ressources et de la société. Ainsi, une élite éclairée peut contribuer à mettre en place des règles de gouvernance et d'organisation conduisant à une gestion durable des ressources.

Mobiliser l'écologie pour innover ?

Identifier les piliers d'une trajectoire de résilience

Les connaissances qui s'accumulent sur l'état des ressources, des écosystèmes, sur la pollution ou encore sur le changement climatique, éléments auxquels notre civilisation contribue et est soumise, nous invitent à changer rapidement et radicalement de paradigme. Il semble aujourd'hui plus que risqué de continuer sur les utopies de croissance infinie, de domination de la nature par l'homme, ou encore de pouvoir illimité de la technologie. Cependant, face à tant de complexité, de non-linéarité, de rétroactions propres au fonctionnement des systèmes vivants, on peut se sentir dépassé, voire inhibé pour agir. Or l'écologie, qui a développé au cours de ces deux siècles de nombreuses connaissances et de nombreux concepts permettant de mieux comprendre le fonctionnement du vivant mais aussi des systèmes complexes, pourrait être davantage mobilisée, non seulement pour identifier des prises pour l'action mais aussi pour innover. Nous indiquons ici deux champs d'innovations pour lesquels l'écologie peut aider à l'exploration, et qui contribueraient potentiellement à tendre vers une civilisation plus résiliente : il s'agit d'une part de reboucler entièrement les flux biogéochimiques et d'autre part de régénérer la diversité, les deux n'étant pas incompatibles, probablement synergiques même. Ces deux pistes de solutions ne sont pas exhaustives, mais elles nous semblent primordiales.

Reboucler les cycles biogéochimiques

Pendant longtemps, notre civilisation a pensé que l'on pouvait puiser de manière indéfinie dans les ressources, et que les rejets (de déchets, de substances toxiques, etc.) qui sont inhérents à toute utilisation de matière ou d'énergie, étaient éliminés naturellement. L'écologie montre que l'on ne peut penser les flux de matière et d'énergie comme linéaires, mais qu'il faut les penser de manière circulaire. Diverses actions peuvent être envisagées : limiter les flux, notamment le prélèvement des ressources, par la sobriété, l'optimisation ou encore la substitution ; régénérer les ressources et leurs flux, via le recyclage, la réutilisation ou encore les innovations technologiques ; limiter les pertes, les fuites, le gaspillage. Dans cette perspective, de nouveaux rôles peuvent être imaginés pour les organisations, quel que soit leur statut juridique. On peut s'inspirer à cette fin des écosystèmes naturels car la majeure partie des êtres vivants, qu'il s'agisse de bactéries, de champignons ou d'animaux de tous ordres, jouent un rôle dans le bouclage des cycles. Leurs fonctions sont extrêmement variées : décomposition de molécules, synthèse de nouvelles, recyclage, fixation, stockage, transport, etc. Ces fonctions sont conditionnées par des relations trophiques, de mutualisme, etc. mais aussi par les dynamiques de populations de ces divers organismes et les mécanismes d'adaptation et de co-évolution entre eux et leur milieu. Aujourd'hui, beaucoup de propositions sont faites pour favoriser une économie circulaire ; mais ces initiatives restent localisées géographiquement ou au sein de secteurs économiques. Comment penser la circularité à diverses échelles et de manière trans-sectorielle ? Serait-il possible de mettre en place une économie permacirculaire (Bourg and Arnsperger 2017) visant à reboucler les cycles biogéochimiques à diverses échelles, y compris celle de la planète ? Qu'il s'agisse

de fonctions, d'interactions entre organisations, de structuration des cycles, de transformation des ressources, etc., le champ d'innovation à explorer est très large.

Régénérer la diversité

En opposition aux mouvements de standardisation et de normalisation résultant de l'industrialisation, de nombreux travaux en écologie mettent en avant l'importance de la diversité et de l'hétérogénéité à tous les niveaux d'organisation du vivant, et à toutes les échelles : du gène à la biosphère, en passant par les organismes et les écosystèmes. La biodiversité, au sens large (incluant les relations entre espèces mais aussi les paysages), permet en effet d'assurer des interactions et des rétroactions conditionnant non seulement le fonctionnement des écosystèmes, mais aussi leur résilience (Walker et al. 2004, Oliver et al. 2015). Régénérer la biodiversité est par exemple au cœur des réflexions de l'agro-écologie, qui cherche à renouveler les pratiques agricoles de manière à favoriser la biodiversité (cultivée ou non) de la parcelle au paysage, et à régénérer les processus écologiques détruits par les pratiques actuelles (Gaba et al. 2015, Sirami et al. 2019).

Qu'il s'agisse de boucler les cycles biogéochimiques ou de régénérer la biodiversité, l'objectif est le même : il s'agit de régénérer les potentiels des écosystèmes, c'est-à-dire leur capacité à fonctionner, à se régénérer en cas de perturbation, à évoluer pour s'adapter aux conditions changeantes, et à produire sur le long terme des ressources dont les hommes, notamment, ont besoin. Selon Hatchuel et Segrestin (2007), « un potentiel représente des promesses pour l'avenir, mais il n'existe et ne peut être valorisé qu'au présent ». Préserver les potentiels des écosystèmes, c'est maintenir un maximum d'options pour répondre aux défis planétaires à venir ; et c'est ce que Holling (1973) qualifie d'approche de gestion basée sur la résilience. Pourrait-on évaluer l'action des entreprises à l'aune de leur capacité à maintenir les potentiels des écosystèmes ?

Organiser l'innovation pour la résilience

Innovier en préservant les processus écologiques clés

Comment mobiliser les concepts et connaissances de l'écologie dans nos raisonnements d'ingénierie et de gestion des écosystèmes ou des ressources ? Georgescu-Roegen (1971) souligne qu'il ne suffit pas de s'intéresser au flux de matières et à leurs stocks, mais qu'il faut aussi considérer les fonds, c'est-à-dire les facteurs de production des flux. Or ces fonds peuvent être gérés, combinés, conçus, etc. En nous inspirant de ses travaux, nous avons introduit la notion de fonds écologique (Berthet 2013, Berthet et al. 2016). Un fonds écologique est un ensemble minimal de régulations écologiques permettant de maintenir le fonctionnement d'un écosystème. En d'autres termes, ce sont des caractéristiques minimales permettant d'assurer la résilience écologique d'un socio-écosystème. Des recherches en écologie sur des socio-écosystèmes donnés peuvent aider à identifier des propriétés écologiques essentielles à respecter. Mais

si celles-ci sont nécessaires, elles ne sont pas suffisantes. Les fonds écologiques peuvent être considérés comme des points de départ de raisonnement de conception collectifs (Berthet et al. 2019), impliquant une diversité d'acteurs, qui eux-mêmes peuvent avoir des intérêts divergents (mais un intérêt commun, la résilience de leur socio-écosystème). Ce point de vue invite à changer de paradigme, et de passer de celui de la maximisation des flux de ressources à celui de la préservation des fonds écologiques.

Penser de nouveaux écosystèmes d'innovation

Au-delà des raisonnements, et sur un plan plutôt organisationnel, l'écologie peut là encore être une source d'inspiration pour repenser les interactions entre les organisations au sein de nos sociétés. L'analogie entre l'écosystème d'affaires -ou écosystème d'innovation et l'écosystème naturel a largement été employée en sciences de gestion. Cependant, cette analogie présente au moins deux limites majeures : d'une part, comme indiqué dans notre introduction, elle néglige la notion de milieu et s'intéresse essentiellement aux relations entre « êtres vivants » ou organisations ; or les travaux sur la capacité de charge des écosystèmes montrent qu'une telle négligence conduit à sous-estimer les risques d'effondrement de nos sociétés. D'autre part, cette analogie met essentiellement l'accent sur les relations de prédation et de compétition entre les organisations, alors que les mutualismes sont plus importants et sont extrêmement variés au sein de la biosphère, assurant des fonctions de protection, d'apport de nutriments, de reproduction, de dispersion, etc. L'étude et la construction d'écosystèmes d'affaires gagneraient à prendre en compte de manière plus fine les différentes formes de mutualismes, de symbioses et de coopérations pouvant exister entre les organisations les composant, voire à en inventer de nouvelles. Les recherches sur les nouvelles formes de solidarités ou de gouvernance des communs, notamment, pourraient probablement s'en inspirer.

Conclusion

Ce que nous dit l'Anthropocène, c'est que nous sommes probablement actuellement dans la phase K du cycle adaptatif de Holling à l'échelle mondiale : notre société est largement optimisée, mais est de moins en moins résiliente. Souhaitons-nous en assurer la persistance ? ou bien atténuer les effets de son potentiel effondrement ? ou encore inventer une société plus résiliente ? Il semble aujourd'hui nécessaire d'identifier ce qui serait collectivement désirable, de manière à mobiliser et à coordonner tous les acteurs, qu'ils soient citoyens, décideurs politiques, collectivités ou entreprises.

Nous avons cherché à présenter ici un panorama rapide des principales évolutions de l'écologie en tant que discipline scientifique, mais aussi des recherches récentes éclairant la crise environnementale contemporaine et les dynamiques des civilisations. A travers ce panorama, nous avons souligné les apports de l'écologie pour appréhender la complexité du vivant.

Pour surmonter la crise de l'action à laquelle notre civilisation est actuellement confrontée, nous proposons de nous inspirer davantage de ces apports, et ce à différents niveaux. Il s'agit d'une part de rendre possible l'action, en mobilisant les concepts et connaissances de l'écologie pour concevoir des innovations techniques, de nouvelles organisations, de nouveaux systèmes de production, etc. permettant de mieux protéger l'environnement, voire de régénérer les écosystèmes. D'autre part, il s'agit de renouveler les rôles des différents acteurs et organisations qui composent notre société, ainsi que leurs formes d'interactions, en s'inspirant de tout ce qui conditionne le fonctionnement du vivant, et d'inventer ainsi de nouveaux écosystèmes d'innovations contribuant à rendre notre civilisation plus résiliente.

Bibliographie

- Acot, P. (1988). Histoire de l'écologie, Presses Universitaires de France.
- Beau, R. and C. Larrère (2018). Penser l'anthropocène, Presses de Sciences Po.
- Berkes, F. and C. Folke (1998). Linking sociological and ecological systems: management practices and social mechanisms for building resilience, Cambridge University Press, New York, New York, USA.
- Berthet, E. T., V. Bretagnolle, S. Lavorel, R. Sabatier, M. Tichit and B. Segrestin (2019). "Applying ecological knowledge to the innovative design of sustainable agroecosystems." Journal of applied ecology **56**(1): 44-51.
- Berthet, E. T., B. Segrestin and G. M. Hickey (2016). "Considering agroecosystems as ecological funds for collective design: New perspectives for environmental policy." Environmental Science & Policy **61**: 108-115.
- Berthet, E. T. A. (2013). Contribution à une théorie de la conception des agro-écosystèmes : Fonds écologique et inconnu commun. PhD, Mines Paristech - INRA.
- Blandin, P. (2007). L'écosystème existe-t-il? Le tout et la partie en écologie. Le tout et les parties dans les systèmes naturels. T. Martin. Paris, Vuibert: 21-46.
- Blandin, P. (2009). De la protection de la nature au pilotage de la biodiversité, Editions Quae.
- Bonneuil, C. and J.-B. Fressoz (2013). L'événement Anthropocène: la Terre, l'histoire et nous, Seuil.
- Bourg, D. and C. Arnsperger (2017). Écologie intégrale: Pour une société permacirculaire, Presses Universitaires de France.
- Bretagnolle, V., M. Benoît, M. Bonnefond, V. Breton, J. Church, S. Gaba, D. Gilbert, F. Gillet, S. Glatron and C. Guerbois (2019). "Action-orientated research and framework: insights from the French long-term social-ecological research network." Ecology and Society **24**(3).
- Burel, F. and J. Baudry (1999). Écologie du paysage : concepts, méthodes et applications. Paris, Lavoisier.

- Castro, R. (2012). "Arguments on the imminence of global collapse are premature when based on simulation models." GAIA-Ecological Perspectives for Science and Society **21**(4): 271-273.
- Ceballos, G., P. R. Ehrlich, A. D. Barnosky, A. García, R. M. Pringle and T. M. Palmer (2015). "Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction." Science advances **1**(5): e1400253.
- Collins, S. L., S. R. Carpenter, S. M. Swinton, D. E. Orenstein, D. L. Childers, T. L. Gragson, N. B. Grimm, J. M. Grove, S. L. Harlan and J. P. Kaye (2011). "An integrated conceptual framework for long-term social-ecological research." Frontiers in Ecology and the Environment **9**(6): 351-357.
- Diamond, J. (2005). Collapse: How societies choose to fail or succeed, Penguin.
- Ellis, E. C., K. Klein Goldewijk, S. Siebert, D. Lightman and N. Ramankutty (2010). "Anthropogenic transformation of the biomes, 1700 to 2000." Global ecology and biogeography **19**(5): 589-606.
- Forman, R. T. T. and M. Godron (1986). Landscape Ecology. New York.
- Gaba, S., F. Lescourret, S. Boudsocq, J. Enjalbert, P. Hinsinger, E.-P. Journet, M.-L. Navas, J. Wery, G. Louarn and E. Malézieux (2015). "Multiple cropping systems as drivers for providing multiple ecosystem services: from concepts to design." Agronomy for Sustainable Development **35**(2): 607-623.
- Georgescu-Roegen, N., Ed. (1971). The entropy Law and the economic process, Harvard University Press.
- Golley, F. B. (1991). "The ecosystem concept: A search for order." Ecological Research **6**(2): 129-138.
- Hallmann, C. A., M. Sorg, E. Jongejans, H. Siepel, N. Hofland, H. Schwan, W. Stenmans, A. Müller, H. Sumser and T. Hörren (2017). "More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas." PloS one **12**(10): e0185809.
- Harari, Y. N. and P.-E. Dauzat (2015). Sapiens: une brève histoire de l'humanité, Albin Michel.
- Hatchuel, A. and B. Segrestin (2007). "La société contre l'entreprise? Vers une norme d'entreprise à progrès collectif." Droit et société(1): 27-40.
- Holling, C. S. (1973). "Resilience and stability of ecological systems." Annual review of ecology and systematics **4**: 1-23.
- Holling, C. S. and L. H. Gunderson (2002). "Resilience and adaptive cycles." Panarchy: Understanding transformations in human and natural systems: 25-62.
- IPBES (2019) Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services - Advance unedited version – 6 May 2019
- IPCC (2019) Climate change and land. Summary for Policymakers.
- Latour, B. (2017). Où atterrir?: comment s'orienter en politique, La découverte.
- Liu, J., T. Dietz, S. R. Carpenter, M. Alberti, C. Folke, E. Moran, A. N. Pell, P. Deadman, T. Kratz, J. Lubchenco, E. Ostrom, Z. Ouyang, W. Provencher, C. L. Redman, S. H. Schneider and W. W. Taylor (2007). "Complexity of Coupled Human and Natural Systems." Science **317**(5844): 1513-1516.

- MEA, M. E. A. (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. C. Island Press. Washington (DC).
- Meadows, D. H., J. Randers and W. W. Behrens III (1972). *The Limits to Growth: A Report to The Club of Rome (1972)*, Universe Books, New York.
- Moore, J. F. (1993). "Predators and prey: a new ecology of competition." *Harvard business review* 71(3): 75-86.
- Motescharrei, S., J. Rivas and E. Kalnay (2014). "Human and nature dynamics (HANDY): Modeling inequality and use of resources in the collapse or sustainability of societies." *Ecological Economics* 101: 90-102.
- Oliver, T. H., M. S. Heard, N. J. Isaac, D. B. Roy, D. Procter, F. Eigenbrod, R. Freckleton, A. Hector, C. D. L. Orme and O. L. Petchey (2015). "Biodiversity and resilience of ecosystem functions." *Trends in ecology & evolution* 30(11): 673-684.
- Ostrom, E. (2007). "A diagnostic approach for going beyond panaceas." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104(39): 15181-15187.
- Rockström, J., W. Steffen, K. Noone, Å. Persson, F. S. Chapin III, E. F. Lambin, T. M. Lenton, M. Scheffer, C. Folke and H. J. Schellnhuber (2009). "A safe operating space for humanity." *nature* 461(7263): 472.
- Rousseau, Y., R. A. Watson, J. L. Blanchard and E. A. Fulton (2019). "Evolution of global marine fishing fleets and the response of fished resources." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116(25): 12238-12243.
- Schauberger, B., T. Ben-Ari, D. Makowski, T. Kato, H. Kato and P. Ciais (2018). "Yield trends, variability and stagnation analysis of major crops in France over more than a century." *Scientific reports* 8(1): 16865.
- Sirami, C., N. Gross, A. B. Baillod, C. Bertrand, R. Carrié, A. Hass, L. Henckel, P. Miguet, C. Vuillot and A. Alignier (2019). "Increasing crop heterogeneity enhances multitrophic diversity across agricultural regions." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116(33): 16442-16447.
- Steffen, W., W. Broadgate, L. Deutsch, O. Gaffney and C. Ludwig (2015). "The trajectory of the Anthropocene: the great acceleration." *The Anthropocene Review* 2(1): 81-98.
- Tainter, J. (1990). *The Collapse of Complex Societies*. Cambridge, Cambridge University Press.
- Turchin, P., T. E. Currie, E. A. Turner and S. Gavrillets (2013). "War, space, and the evolution of Old World complex societies." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110(41): 16384-16389.
- Turner, G. M. (2008). "A comparison of The Limits to Growth with 30 years of reality." *Global environmental change* 18(3): 397-411.
- Turner, G. M. (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): 116-124.
- Walker, B., C. S. Holling, S. Carpenter and A. Kinzig (2004). "Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems." *Ecology and society* 9(2).

Watson, R. and D. Pauly (2001). "Systematic distortions in world fisheries catch trends." Nature **414**(6863): 534.