UNE AUTRE TERRE

LEXIQUE ILLUSTRÉ D'UNE NATURE À PROTÉGER

PRÉFACE DE PIERRE RABHI



OLIVIER DANGLES FRANÇOIS NOWICKI BELEN MENA

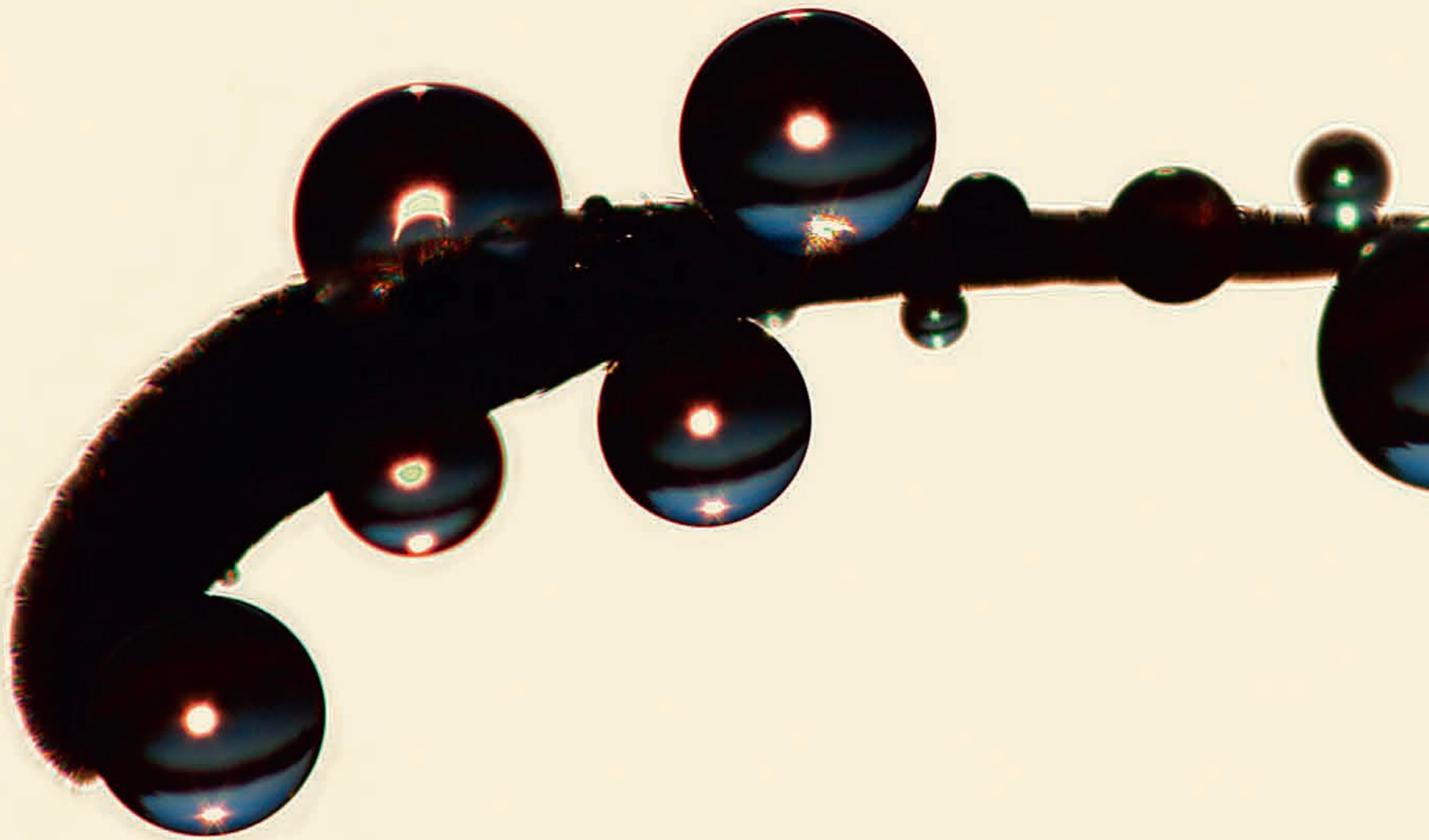
IRD Éditions

UNE AUTRE TERRE

LEXIQUE ILLUSTRÉ D'UNE NATURE À PROTÉGER

À LA MÉMOIRE DE JACQUES WEBER

JACQUES AVAIT ÉCRIT LA PRÉFACE DE NOTRE PREMIER LIVRE, *COULISSES DE NOS CAMPAGNES*,
DANS LAQUELLE IL EXPRIMAIT SON SOUHAIT DE VOIR LES HUMAINS «AU CŒUR» D'UN PROCHAIN OUVRAGE.
CETTE IDÉE NOUS EST DEPUIS RESTÉE DANS LA TÊTE…
NOUS LUI DÉDIONS AUJOURD'HUI CE LIVRE.





« Il semble raisonnable de croire que plus nous pouvons focaliser notre attention sur les merveilles et les réalités de l'univers qui nous entoure, moins nous aurons goût pour la destruction de notre espèce. L'émerveillement et l'humilité sont des émotions saines et elles ne peuvent coexister avec l'envie de destruction. »

Rachel Carson, 1952





« Apprendre à un enfant à ne pas écraser du pied une chenille est aussi important pour l'enfant que pour la chenille. »

Bradley Miller, 1987

Textes : Olivier Dangles
Photos : François Nowicki et Olivier Dangles
Conception graphique : Belén Mena
Traitement des images : Gustavo Miguel Moya

Photo de couverture :
Chevêche d'Athéna posée devant un graffiti – France.

Photos précédentes en double page :
Gouttes de rosée sur les antennes d'un papillon Hespéride – France.
Agrégation de chenilles – Équateur.
Photo suivante en double page :
Bateau de pêche et pélicans – Équateur.

La loi du 1er juillet 1992 (code de la propriété intellectuelle, première partie)
n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article L. 122-5, d'une part,
que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage du copiste
et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses
et les courtes citations dans le but d'exemple ou d'illustration, « toute représentation
ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou
de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (alinéa 1er de l'article L. 122-4).
Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait
donc une contrefaçon passible des peines prévues au titre III de la loi précitée.

© IRD, 2014
ISBN : 978-2-7099-1875-6

UNE AUTRE TERRE

LEXIQUE ILLUSTRÉ D'UNE NATURE À PROTÉGER

OLIVIER DANGLES
FRANÇOIS NOWICKI
BELÉN MENA

IRD Éditions
INSTITUT DE RECHERCHE
POUR LE DÉVELOPPEMENT
Marseille, 2014

SOMMAIRE

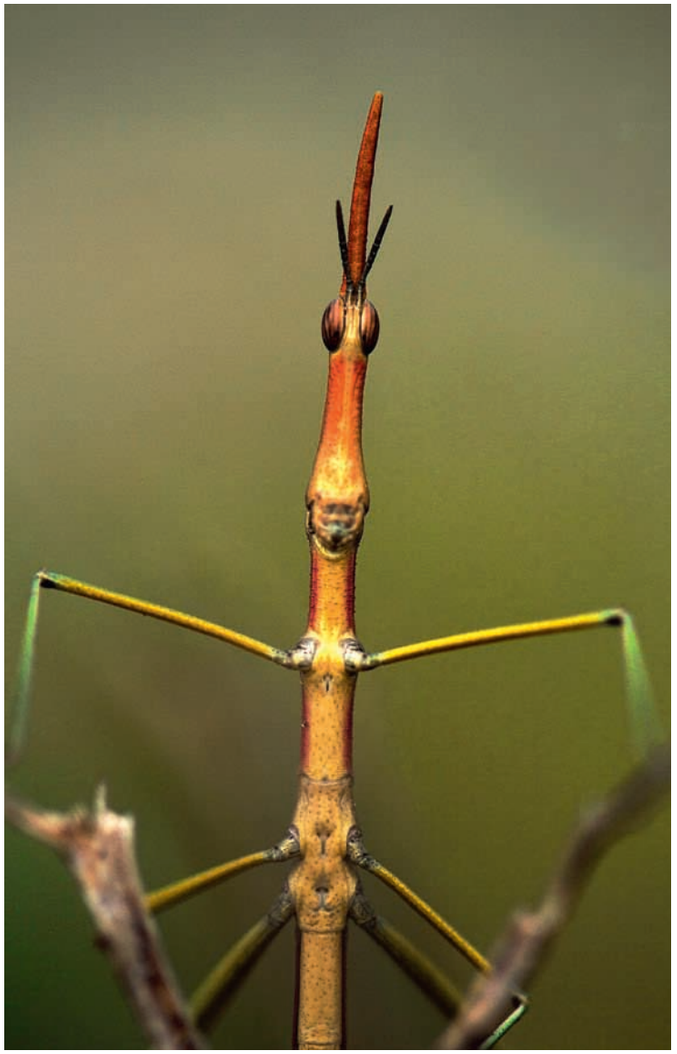
AVANT-PROPOS 12
RELECTURE 14
PRÉFACE 16

PARTIE I : LES LIMITES DE LA TERRE 20

1. Empreinte humaine 24
2. La parabole du nénuphar 26
3. Anthropocène 28
4. Changement climatique 32
   - Événements climatiques extrêmes 34
   - Fonte des glaces 36
   - Élévation du niveau des mers 38
5. Acidification des océans 40
6. Contaminants atmosphériques 44
7. Déchets et pollutions chimiques 46
8. Altération du cycle des éléments nutritifs 48
   - Eutrophisation 50
   - Appauvrissement des sols 52
   - Méthane et pergélisols 53
9. Changement d'usage des terres 54
   - Déforestation 56
   - Intensification des sols cultivés 58
   - Salinisation 60
   - Désertification 62
   - Urbanisation et artificialisation des terres 64
10. Érosion de la biodiversité 66
    - Espèces exotiques 68
    - Impact sur les fonctions écologiques 69
    - Surpêche des réseaux trophiques 72
11. Ressources en eau douce 74
    - Eau virtuelle 76
12. Vulnérabilité 78
13. Point de basculement 80
14. Boucle de rétroaction 82
15. Résilience 84

PARTIE II : LES ESPÈCES FACE AUX CHANGEMENTS 86

16. Microclimat 90
17. Traits de vie des espèces 92
    - L'écologie des dragons 94
    - Espèces spécialistes 95
18. Espèces sentinelles 96
    - Espèces arctiques et alpines 98
    - Ectothermes tropicaux 100
19. Flux génétique 102



Phasme à crête – Équateur.

20. Pollution sensorielle 104
21. Anomalies phénologiques 106
22. Petites populations 108
23. Effets de lisière 110
24. Piège écologique 112
25. Altération des interactions écologiques 114
26. Bioamplification 116
27. Déplacement des aires de distribution 118
    Déplacements altitudinaux 120
28. Adaptation 122
29. Migration 124
    Refuges 126
30. Extinction 128
    Extinctions occultes 130
    Dette d'extinction 132

PARTIE III : LA NATURE ET LES HUMAINS 134

31. Transition démographique 138
32. Piège de la pauvreté 140
33. Le dilemme des communs 142
34. Économie verte 144
    L'équation IPAT 146
    Agriculture et marchés locaux 147
    Le paradoxe d'Easterlin 148
35. Paiement des services rendus par les écosystèmes 150
36. Protection des espaces et des espèces 152
    Sauvegarde ou partage des terres 154
    Le Problème de Noé 158
37. La restauration écologique 160
38. Alphabétisation environnementale 162
39. Idées lumineuses 164
    Esclaves énergétiques 166
    Taux de retour énergétique 168
    Aller dans l'espace 170
40. L'allégorie de la grenouille 172
    Amnésie du paysage 174
    Préférence pour le présent 176
41. Nature et religions 178
42. Des valeurs pour la nature 180
43. La nature dans les médias 182
44. Famille et réseaux sociaux 184
45. Natures humaines 186

ÉPILOGUE 188
BIBLIOGRAPHIE 190
AUTEURS 202
MERCI 204



« Quand ils auront coupé le dernier arbre, pollué le dernier ruisseau, pêché le dernier poisson, alors ils s'apercevront que l'argent ne se mange pas. »

Proverbe indien Cris



AVANT-PROPOS

« Quant aux choses de la Terre, les hommes en ont la domination tout entière. Nous jouissons des campagnes et des montagnes ; les rivières et les lacs sont à nous, nous semons les blés, nous plantons les arbres, nous donnons aux terres la fécondité par les eaux que nous y faisons venir. Nous arrêtons les rivières, nous les dressons, nous les détournons. Enfin nous nous efforçons par le travail de nos mains, de faire dans la Nature comme une autre Nature.»

Cicéron, *De la Nature des Dieux*, 44 av. J.-C.

Dans *De la Nature des Dieux*, dialogue philosophique que Cicéron écrivit vers la fin de sa vie, il est surtout question des rapports entre religion et politique. Cicéron y stipule que le monde a été créé « pour les dieux et les hommes », opinion qu'il présente comme une loi fondamentale de la nature, censée exercer une profonde influence sur la vie et la gouvernance de la cité. Si l'ouvrage de Cicéron présente pour le philosophe une analyse détaillée de la pensée divine durant l'Antiquité, il fournit à l'écologue l'un des premiers témoignages sur le rapport à la nature des sociétés antiques, rapport qui ne s'avère guère différent de celui des sociétés contemporaines. En effet, dès l'Antiquité, l'homme avait déjà profondément modifié son environnement, principalement à travers ses activités agricoles et les infrastructures qu'il avait bâties. Pour reprendre les mots de Cicéron, l'homme avait déjà créé à cette époque « *une autre nature* ».

Depuis l'époque de Cicéron, l'espèce humaine a accéléré sans commune mesure son impact sur les ressources naturelles de la Terre à travers le développement exponentiel de ses activités, principalement depuis la révolution industrielle et, de façon toujours plus pressante, lors des trois dernières décennies. Grâce aux images satellitaires, les projets Timelapse (http://world.time.com/timelapse) et World of Change (http://earthobservatory.nasa.gov/Features/WorldOfChange) permettent d'explorer l'évolution de n'importe quel endroit à la surface de la planète depuis le début des années 1980 jusqu'à nos jours. Déforestation dans l'ouest du Brésil, expansion des mines et des exploitations de gaz de schistes en Amérique du Nord, assèchement de la mer d'Aral ou urbanisation de Dubaï, les changements à la surface de la Terre sont spectaculaires de par leur ampleur et leur rapidité. De fait, la biosphère a été transformée de façon durable : même si l'homme réduisait significativement – et dans un délai relativement court – ses activités génératrices d'altération d'habitat et de modification du climat, la Terre continuerait à subir des siècles de dérèglements climatiques, de disparition d'espèces et

d'altération des écosystèmes et des services qu'ils rendent aux populations humaines. Notre espèce a, en quelque sorte, créé en un temps extrêmement court à l'échelle géologique « *une autre Terre* », une Terre significativement différente de celle qui existait lorsque l'espèce humaine est apparue.

Les changements qui ont transformé la Terre sont désormais si profonds qu'ils menacent le fonctionnement même de la biosphère, mettant *de facto* en danger le futur de l'humanité. Face à ce constat, les causes et les conséquences à plus ou moins long terme de ces changements globaux ont fait l'objet d'une multitude d'études scientifiques lors des trente dernières années. De nombreuses revues spécialisées ont vu le jour et les thématiques liées aux changements globaux sont quotidiennement à la Une des revues scientifiques les plus prestigieuses. Ces études ont facilité l'émergence de nombreux concepts et mots clés permettant de mieux comprendre l'environnement naturel en constant changement dans lequel l'homme et les autres espèces vivent désormais. Cette information scientifique, d'une importance capitale, reste cependant principalement cantonnée aux revues spécialisées, *de facto* inaccessibles au grand public qui reste majoritairement peu ou mal informé des défis de la crise environnementale à laquelle fait face l'humanité. Dans la philosophie du mouvement d'*ecoliteracy* aux États-Unis ou de l'association des Petits débrouillards en France, l'idée originelle de ce livre est de présenter un « glossaire choisi et illustré » de 45 concepts et mots clés permettant au lecteur non averti (ou averti) de comprendre (ou mieux comprendre) les caractéristiques des changements en cours sur la planète Terre et leurs interrelations avec les espèces, y compris l'espèce humaine.

L'élaboration d'un tel glossaire se confrontait aux écueils de la vulgarisation scientifique, et plus particulièrement à deux obstacles majeurs. D'une part, la liste des mots clés retenus se devait de couvrir un large spectre de disciplines scientifiques, depuis la climatologie jusqu'à la philosophie en passant par l'écologie ou encore l'économie. D'autre part, la plupart des 45 mots clés avaient fait l'objet de centaines de publications spécialisées et de nombreux livres de référence. Il pouvait ainsi paraître prétentieux, voire inepte, de s'attaquer à une telle diversité de disciplines et de faire un résumé des mots clés en plus ou moins 350 mots. C'est avec l'aide de nombreux collègues, dont la liste figure au début du livre, et que nous remercions chaleureusement, que nous avons tenté de relever ces défis d'éclectisme et de synthèse. Si nous espérons que cet exercice satisfera le grand public, les lecteurs plus avertis nous pardonneront notre manque d'expertise sur certaines thématiques et trouveront à la fin de l'ouvrage une liste de références bibliographiques clés qui étayent l'ensemble des données et affirmations présentées dans les textes. Les lecteurs cherchant des ouvrages scientifiques de synthèse du contenu de ce livre pourront se référer aux excellents ouvrages de Bert De Vries (*Sustainability science*) et Peter Kareiva et Michelle Marvier (*Conservation science*).

La vulgarisation scientifique n'était qu'une partie du défi présenté par ce livre. À l'instar de notre précédent ouvrage *Natura maxima, Une autre Terre* souhaite parier sur le pouvoir communicatif des arts visuels – graphisme et photographie – pour faciliter la diffusion à un large public de messages scientifiques parfois complexes et peu engageants au premier abord. Le mot « Terre » dans le titre peut laisser croire que le lecteur sera transporté aux quatre coins du globe, à la découverte (redécouverte) des clichés les plus symboliques d'une planète changeante : ours polaires s'agrippant à un morceau d'iceberg, réfugiés de la montée des océans sur les îlots du Pacifique, plantations de palmiers à huile à perte de vue en Indonésie… Au risque de décevoir, ce livre offre des images en provenance de huit pays seulement, une grande majorité ayant été prises en France et en Équateur. En plus de limiter l'empreinte carbone de cet ouvrage, notre sélection d'images présente d'autres avantages. L'éclectisme des photos qui la composent (portraits, bougés, paysages, macro…) permet, nous semble-t-il, de porter un regard sur une planète changeante plus intimiste que celui présenté dans les livres existants. De plus, cette sélection permet au lecteur, qu'il vive sous des climats tempérés ou tropicaux, de réaliser combien les changements sur la Terre ne sont pas seulement limités à quelques contrées lointaines, ne sont pas seulement visibles depuis un hélicoptère ou un satellite, mais peuvent être perçus sur le pas de sa porte, sur son trajet pour aller au travail ou lors d'une sortie nature en famille.

Ce livre est divisé en trois parties qui présentent chacune quinze mots clés illustrés par une ou plusieurs photographies. La photographie est parfois clairement liée au concept, d'autres fois, ce lien nécessite un peu d'imagination… Nous laissons les lecteurs se faire leur propre interprétation… Dans le cas de mots clés très vastes (par exemple le changement climatique ou le changement d'usages des terres), nous présentons également des mots clés « secondaires » qui permettent au lecteur averti de rentrer plus dans le détail. Chacune des trois parties du livre présente les changements globaux à un niveau d'organisation différent : le système Terre, les espèces sauvages et les humains. Si dans le monde réel ces trois entités sont en étroite interaction, elles réfèrent à des champs scientifiques relativement distincts, et la division en trois parties nous paraît ainsi préférable sur le plan didactique : description des changements du système Terre, description de la façon dont les espèces répondent à ces changements, description de la façon dont les humains perçoivent ces changements et leurs effets écologiques et y répondent. Afin de renforcer le didactisme de l'ouvrage, chacune des trois parties est introduite par un schéma synthétique qui décrit l'organisation générale et les interrelations entre les mots clés. Que le lecteur suive de façon disciplinée la trame du livre ou au contraire choisisse de piocher au hasard un mot clé parmi les 200 pages, nous espérons que les allers-retours entre schémas et mots clés lui permettront de se construire une vision claire et globale des défis imposés à la vie sur *Une Autre Terre*.

RELECTURE

Fabien Anthelme, *Institut de recherche pour le développement (IRD)*
Catherine Aubertin, *IRD*
Damien Banas, *Université de Lorraine*
Jérôme Casas, *Université de Tours*
Vincent Chaplot, *IRD*
Valérie Chansigaud, *Muséum national d'Histoire naturelle*
Marie-Christine Cormier-Salem, *IRD*
Franck Courchamp, Centre national de la recherche scientifique *(CNRS)*
Philippe Cury, *IRD*
Marc Dufumier, *AgroParisTech*
Stéphane Dupas, *IRD*
Thierry Dutoit, *CNRS*
Olivier Evrard, *IRD*
Sonia Kefi, *CNRS*
Xavier Lazzarro, *IRD*
Christian Le Duc, *IRD*
Isabelle Moreno, *Université Mayor San Andrés*
David Point, *IRD*
Sylvain Pincebourde, *CNRS*
Gilles Pison, *Institut national d'études démographiques*
Antoine Rabatel, *Université Joseph-Fourier*
François Roubaud, *IRD*
Marie-Lise Sabrié, *IRD*
Jean-Michel Servet, *Institut des hautes études internationales et du développement*
Jean-Emmanuel Sicart, *IRD*
Jean-François Silvain, *IRD*
Jacques Weber, *Centre de coopération international en recherche agronomique pour le développement*



Chouette effraie
dans un vieux saule – France.

En déclin sous toutes les latitudes, les vieux arbres ont une fonction écologique unique en offrant notamment des habitats à de nombreuses espèces cavicoles. Près d'une espèce d'oiseaux sur cinq dépend, à des degrés divers, des cavités fournies par les vieux arbres.



PRÉFACE

PIERRE RABHI



Ophrys mouche – France.

J'ai souvent été déconcerté et même attristé par le fait qu'un nombre considérable d'êtres humains viennent au monde sur la Terre, y séjournent et la quittent sans avoir pris conscience de sa splendeur infinie. Il est possible que le paradis céleste totalement hypothétique que le monothéisme exalte à l'envie ait ravalé la Terre à une sorte de lieu de transit vers l'éternelle félicité. Cependant, les religions affirment que cette petite oasis perdue dans un immense désert astral et sidéral est un des chefs-d'œuvre de Dieu, et donc marquée du caractère sacré. Alors pourquoi ne fait-on rien pour la garder de toutes ces profanations que sont la destruction, la pollution, l'exploitation inconsidérée ? Pourquoi est-elle ravalée par l'espèce humaine à un champ de bataille, un hypermarché, un gisement de ressources à épuiser jusqu'au dernier arbre, au dernier poisson ? Cette ambiance de pillage est tout ce qui enchante le dieu Hammon auquel l'avidité humaine sans limite rend le plus vibrant hommage. La raison seule ne peut tout éclairer. Cette obédience est comme la plus grande cause des souffrances et des malheurs qu'inflige l'homme à l'humain, et l'humain à toutes les créatures et expressions de la vie auxquelles il doit la vie. Ces considérations et les explications que nous tentons de donner à ce phénomène ne nous éclairent pas vraiment si nous faisons abstraction de la terreur engendrée par la conscience que nous avons de notre état provisoire. On sait ce que la quête éperdue de sécurité provoque dans la « vallée de larmes ». Alors sommes-nous condamnés à l'impuissance par la fatalité ? Admettre cela est un renoncement coupable. Car une autre Terre est possible, et le temps est plus que venu de s'atteler à la faire naître. Nous en avons le pouvoir si nous en avons la volonté.

Faire naître une autre Terre consiste surtout à établir un autre rapport avec elle. Il s'agit avant tout de prendre conscience de notre inconscience car la nature est chacun de nous. Nous en sommes l'une des expressions, et non la cerise sur le gâteau que nous croyons être ! Car avons-nous besoin de la nature ? La réponse est oui ! La nature a-t-elle besoin de nous ? La réponse est non ! C'est avec cette évidence qu'il nous faudra bâtir l'avenir. Le rôle essentiel que l'humain doit accomplir dans la réalité terrestre est de couronner le processus de la vie par cette vertu dont il semble seul avoir l'apanage, à savoir l'admiration. Il n'est pas impossible que cette faculté soit le fondement d'une évolution allant vers une sorte d'apothéose ou de couronnement d'un processus dont l'amour intégral serait la finalité.

Nous ne pouvons être que reconnaissants aux auteurs du présent ouvrage d'y contribuer par les images admirables et les textes enthousiasmants dont leur talent nous fait offrande. À eux notre gratitude, en espérant que leur message puisse avoir une large audience.

En toute solidarité et amitié

Pierre Rabhi
Montchamp, septembre 2014

Hêtraie – France.

Page précédente :
Punaise colobathristide – Équateur.

« “L’être humain s’est mis à torturer la terre
pour qu’elle produise toujours plus.
Il l’a couverte de bornes, de clôtures.
Il l’a lacérée avec des charrues,
poignardée avec des pioches, éventrée
avec des bulldozers et des explosifs.
Et tout cela pour permettre à toujours plus
d’hommes de s’y multiplier.
Et d’en recevoir toujours moins.“
Dans cette nuit claire du désert, peuplée
d’une assemblée d’ombres sorties des reliefs,
il semblait que cette voix sourde et grave
exprimait la pensée même de la terre. »

Jean-Christophe Rufin, *Le parfum d’Adam*, 2007

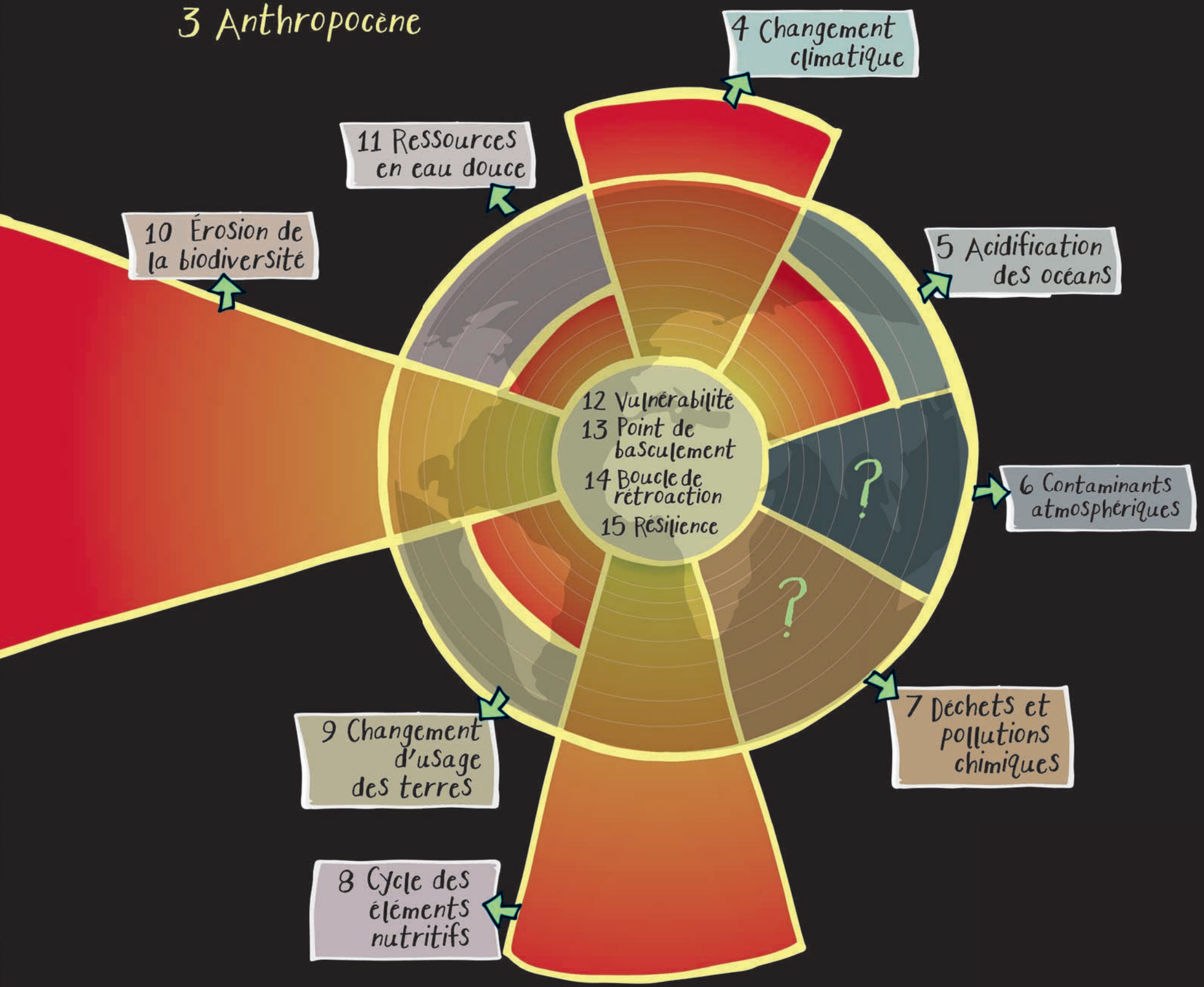




LES LIMITES DE LA TERRE

L'*empreinte humaine* (1) sur Terre, limitée dans les premiers millénaires de l'apparition de l'espèce humaine, a augmenté à un rythme *accéléré* (2) depuis la fin du XIX[e] siècle et la révolution industrielle dans les pays occidentaux. Cette empreinte est aujourd'hui si profonde que la communauté scientifique propose la naissance d'une nouvelle époque géologique, l'*Anthropocène* (3). Face aux pressions croissantes imposées à la Terre dans cette ère, un groupe de scientifiques coordonné par Johan Rockström a identifié en 2009 plusieurs processus environnementaux jouant un rôle essentiel dans le maintien d'un état de stabilité de la planète, nécessaire à la survie de l'humanité : *changement climatique* (4), *acidification des océans* (5), *contaminants atmosphériques* (6), *déchets et pollutions chimiques* (7), *altération du cycle des éléments nutritifs* (8), *changement d'usage des terres* (9), *érosion de la biodiversité* (10) et *pressions sur les ressources en eau douce* (11). Ces scientifiques ont ensuite proposé une série de repères délimitant un « espace sécurisé pour l'humanité », autrement dit, des limites environnementales de la Terre au-delà desquelles sa stabilité est compromise. Parmi ces limites, celles du changement climatique, de l'érosion de la biodiversité et de l'excès d'éléments nutritifs seraient d'ores et déjà non soutenables. Une caractéristique majeure de ces limites est qu'elles ne constituent pas des problèmes indépendants mais interagissent au sein du système Terre et de ses composantes physiques, biologiques et socio-économiques. La *vulnérabilité* (12) du système Terre face à ces limites dépend des liens entre les dynamiques complexes de ces composantes et des mécanismes d'autorégulation des systèmes vivants : mise en évidence de *points de basculement* (13) et de *boucles de rétroaction* (14). De fait, ce n'est pas tant en atteignant les limites de disponibilité des ressources que les humains épuisent la planète, mais plutôt en approchant ou même dépassant ses limites d'absorption des perturbations anthropiques, mettant ainsi en péril la *résilience* (15) de l'ensemble du système Terre.




3 Anthropocène
4 Changement climatique
5 Acidification des océans
6 Contaminants atmosphériques
7 Déchets et pollutions chimiques
8 Cycle des éléments nutritifs
9 Changement d'usage des terres
10 Érosion de la biodiversité
11 Ressources en eau douce
12 Vulnérabilité
13 Point de basculement
14 Boucle de rétroaction
15 Résilience
?
?



1. EMPREINTE HUMAINE

« On a longtemps décrit la biosphère par ses biomes naturels, entretenant l'idée passéiste d'un monde composé d'écosystèmes naturels altérés par l'homme. [...] Les biomes anthropogéniques nous racontent une histoire totalement différente, celle d'un système humain dans lequel sont enchâssés des écosystèmes naturels. Il s'agit d'un changement majeur dans l'histoire que nous racontons à nos enfants... »

Erle Ellis et Navin Ramankutty, *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2008

L'appétit des humains pour les ressources de la planète s'est accru de manière exponentielle depuis leurs humbles origines – lorsqu'ils ne consommaient pas plus que d'autres grands mammifères omnivores –, jusqu'à avoir de nos jours un impact sans précédent sur le système Terre. Si, il y a 10 000 ans, les humains et leurs animaux domestiques représentaient 0,1 % de la biomasse des mammifères, ce pourcentage atteint aujourd'hui les 90 %. Afin de mesurer cet impact, des chercheurs du Wildlife Conservation Society Institute et de l'université de Columbia aux États-Unis proposent en 2002 le concept d'empreinte humaine. Celle-ci est représentée sous la forme d'une carte globale de l'influence humaine sur la surface de la Terre, exprimée principalement en termes de perte d'habitats pour la vie sauvage et de domestication de la planète. Les êtres humains ont à ce point domestiqué la planète que, en 1995, 17 % seulement de la surface terrestre n'avait pas connu d'influence humaine directe selon les critères de densité de population humaine, d'exploitation agricole des terres, d'accessibilité à partir d'une route, d'une rivière ou d'une côte ou d'illumination nocturne détectable par satellite. Il peut sembler évident que l'empreinte humaine est moindre dans les forêts boréales ou l'Amazonie centrale, dans les grands déserts, les hautes montagnes ou les régions polaires. Toutefois, la présence des humains ne cesse de s'étendre partout sur la Terre. Portée par les vents, la pollution des grandes métropoles d'Asie du Sud-Est peut parcourir des milliers de kilomètres et atteindre les plus hauts sommets de l'Himalaya, où l'on mesure des taux de contamination atmosphérique équivalents à ceux des villes européennes. Quant à l'un des derniers territoires vierges de la planète, l'Arctique, les États riverains du Grand Nord, les sociétés d'exploration ou d'exploitation des ressources pétrolières et les acteurs du trafic maritime international ont entrepris d'en évaluer les opportunités économiques, notamment à la suite de la fonte rapide de la banquise.

Lièvre d'Europe – France.

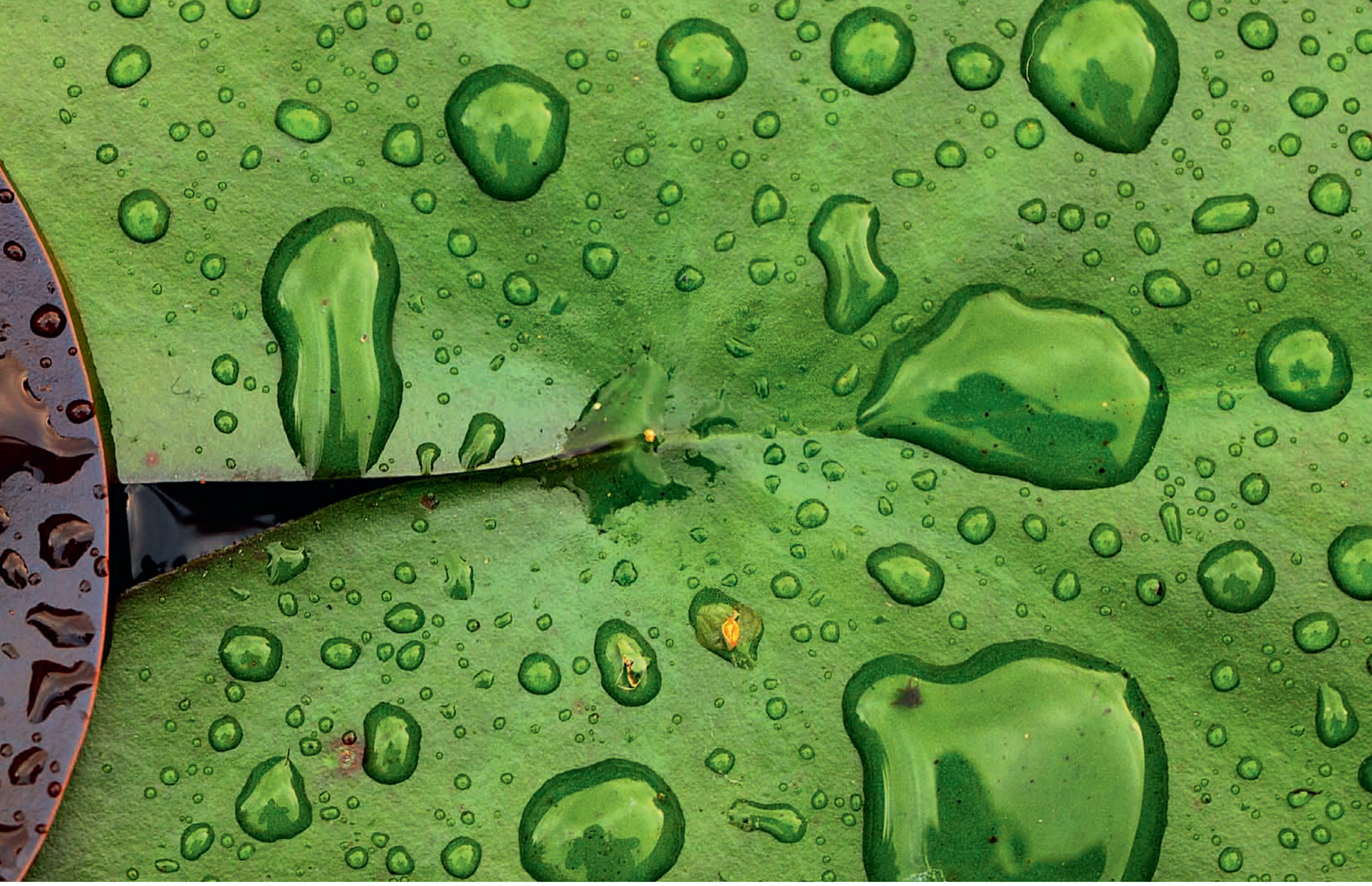


2. LA PARABOLE DU NÉNUPHAR

« Supposez que vous êtes propriétaire d'un étang sur lequel pousse un nénuphar. Le nénuphar double de taille chaque jour. Si l'on n'y fait rien, il couvrira l'étang en 30 jours, étouffant les autres formes de vie dans l'eau. Pendant longtemps, le nénuphar semble petit et vous décidez de ne pas le couper jusqu'à ce qu'il couvre la moitié de l'étang. Quel jour cela arrivera-t-il ? Le vingt-neuvième bien sûr. Vous avez un jour pour sauver votre étang. »

David Meadows et collaborateurs, *The Limits to Growth*, 1972

Le 12 mars 1972, quatre chercheurs du Massachusetts Institute of Technology parrainés par un groupe de réflexion basé en Suisse – le Club de Rome – publiaient un rapport modélisant les conséquences possibles du maintien de la croissance économique sur le long terme. Les auteurs utilisaient la devinette enfantine du nénuphar dans leur rapport afin d'illustrer un phénomène mathématique fondamental : la croissance exponentielle dans un domaine fini. Cette croissance exponentielle décrit en effet la dynamique récente dans les domaines où l'empreinte humaine est forte, tels que le captage d'eau, les investissements financiers, l'utilisation des pesticides, le tourisme international, les communications et les transports.



Nénuphars – France.

Si cette croissance exponentielle trouve son origine au début de la révolution industrielle, la vitesse d'accroissement de l'empreinte humaine sur la Terre a véritablement « changé de braquet » à partir de la fin des années 1940, phase décrite comme la *grande accélération*. Jean Dorst l'écrivait déjà en 1966 dans la préface de son livre avant-gardiste *Avant que nature meure* : « Tous les phénomènes auxquels l'homme est mêlé se déroulent à une vitesse accélérée et à un rythme qui les rend presque incontrôlables. » La notion d'accélération constitue aujourd'hui une caractéristique majeure de l'Anthropocène en raison de ses implications en termes de réponse des systèmes physiques, biologiques et humains aux changements globaux. Ainsi, l'accélération implique que la réponse des systèmes terrestres, aquatiques et marins aux changements globaux n'est généralement pas linéaire. L'accélération des changements est également une mauvaise nouvelle pour les espèces vivantes, car les processus biologiques tels que l'adaptation ou la migration demandent un certain temps avant de se mettre en place. Enfin, pour les sociétés humaines, l'accélération signifie que plus les prises de décisions politiques en termes de mitigation et d'adaptation aux changements globaux seront repoussées, plus il sera difficile de sortir de la crise environnementale. Il est donc urgent de passer d'une phase de grande accélération (1945-2015) à une phase de développement raisonné plus respectueux de l'environnement.



Choucas des tours – France.

3. ANTHROPOCÈNE

« Puisque rupture il y a, il faut la nommer pour la voir, pour l'expliquer, pour l'autopsier, voire pour la conjurer. C'est pourquoi géologues et géophysiciens plaident aujourd'hui pour une nouvelle dénomination de l'histoire naturelle du monde : l'Anthropocène. Bienvenue dans l'ère des humains. »

Claude Lorius et Laurent Carpentier, *Voyage dans l'Anthropocène*, 2011

Dès la fin du XIX^e^ siècle, les scientifiques étaient conscients de l'influence majeure des activités humaines sur la Terre. Dans son livre avant-gardiste *Man and Nature*, publié en 1864, le diplomate américain George Marsh décrivait déjà la dimension planétaire de l'impact des activités humaines et prévenait que « la Terre [...] est en train de devenir rapidement un foyer inapproprié pour ses plus nobles habitants ». Quelques décennies plus tard, le prix Nobel de chimie Svante Arrhenius mettait en évidence la relation entre les concentrations de dioxyde de carbone engendrées par les humains et l'élévation de la température atmosphérique. Plus d'un siècle plus tard, en 2002, un autre prix Nobel de chimie, Paul Crutzen, propose le concept d'Anthropocène afin de désigner une nouvelle époque géologique, qui aurait débuté à la fin du XVIII^e^ siècle avec la révolution industrielle, période à partir de laquelle l'influence des humains sur le système Terre serait devenue prédominante. Ce concept a depuis fait l'objet de nombreux débats concernant principalement la profondeur des changements engendrés par les activités humaines (sont-ils comparables aux grands événements cosmiques, telluriques ou géologiques observés dans le passé ?), la date à laquelle faire débuter cette nouvelle époque géologique (au début de l'ère industrielle ou bien au Paléolithique lorsque les humains eurent la maîtrise du feu ?) ou encore la sémantique (le mot Anthropocène étant jugé trop anthropocentrique). Même s'il n'est pas officiellement reconnu par les géologues, l'Anthropocène s'est aujourd'hui fait une place, dans la littérature scientifique et grand public, comme une illustration marquante du passage graduel mais accéléré d'un système Terre dominé par les phénomènes naturels – du forçage solaire à l'activité tectonique en passant par la sélection naturelle – à un système dominé par les humains. Nous avons très probablement changé d'ère.

Anthropocène : une nouvelle époque géologique à partir de laquelle l'influence des humains sur le système Terre serait devenue prédominante.



Pie-grièche écorcheur – France.
(Image réalisée en collaboration avec Philippe Degaffet.)



Synallaxe flammé – Équateur.



4. CHANGEMENT CLIMATIQUE

« Le changement climatique n'est plus vraiment un problème à résoudre mais plutôt un ensemble de conditions qui se détériorent progressivement et auxquelles nous serons confrontés pendant encore très longtemps. »

David Orr, *Down to the wire*, 2009

Si le changement climatique récent est un phénomène complexe qui se manifeste par une grande diversité de modifications, l'augmentation des températures en est l'une des plus fondamentales. L'évolution des températures moyennes qui caractérisent le climat de la Terre dépend du rapport entre le rayonnement reçu du Soleil et celui renvoyé vers l'espace. Ce dernier est en partie absorbé par des gaz présents dans l'atmosphère (vapeur d'eau, CO_2, méthane), qui renvoient le rayonnement vers le sol. La répétition du processus crée l'effet de serre et provoque l'augmentation des températures. Si ce phénomène est indispensable à la vie sur Terre (sans effet de serre, la température moyenne à la surface de la Terre serait d'environ -18 °C), il est aujourd'hui amplifié par les activités humaines. Les reconstitutions du climat passé montrent en effet que les températures terrestres actuelles sont plus chaudes que celles enregistrées durant la plus grande partie de l'Holocène (derniers 11 000 ans), que le CO_2 est responsable d'environ la moitié de ce réchauffement et que le réchauffement actuel est inédit par sa rapidité. La température moyenne à la surface du globe a augmenté de 0,85 °C depuis 1880, même si cette moyenne masque des variations importantes selon les régions, certaines se réchauffant à des degrés divers, d'autres se refroidissant ou restant stables. En fonction des scénarios de développement économique (du plus sobre au plus émetteur), les modèles climatiques prévoient une élévation des températures comprise entre 0,3 °C et 4,8 °C pour la période 2081-2100, par rapport à la période 1986-2005. La raison de cette ample fourchette provient d'une double incertitude : quelles seront les émissions futures de gaz à effet de serre et quelle sera la sensibilité du climat à ces émissions ? Pour la première incertitude, avec environ deux cents tonnes de CO_2 émises chaque seconde, les scénarios les plus pessimistes prévalent, notamment du fait d'émissions en constante augmentation dans certains pays émergents, comme la Chine et l'Inde. En 2009, ces émissions ont légèrement chuté (de 1,4 %) du fait de la crise globale financière, mais leur augmentation a depuis repris son cours. La deuxième incertitude est en partie liée aux boucles de rétroactions qui peuvent soit accélérer, soit freiner le réchauffement. Les faibles incertitudes sur les processus physiques sont ainsi largement amplifiées par les complexes mécanismes climatiques.

Araignée Linyphiidae - France

Événements climatiques extrêmes

Les événements climatiques extrêmes de la dernière décennie – vagues de chaleur et de froid, fortes précipitations et sécheresses (par exemple lors de l'alternance des épisodes El Niño - La Niña sous les tropiques) – ne seraient sans doute pas survenus sans le changement climatique d'origine anthropique. En 2012, le réchauffement a provoqué la moitié de ces événements qui seront plus fréquents dans le futur, même s'il est difficile de prédire où et à quelle fréquence ils auront lieu. Les extrêmes climatiques ont déjà un impact significatif sur les communautés naturelles, la dynamique des maladies infectieuses, la production agricole, les taux de suicides ou encore les conflits civils. Pendant l'époque préindustrielle, les ralentissements économiques liés à la variabilité climatique ont été la cause dans l'hémisphère Nord de famines, d'épidémies et de guerres à grande échelle.



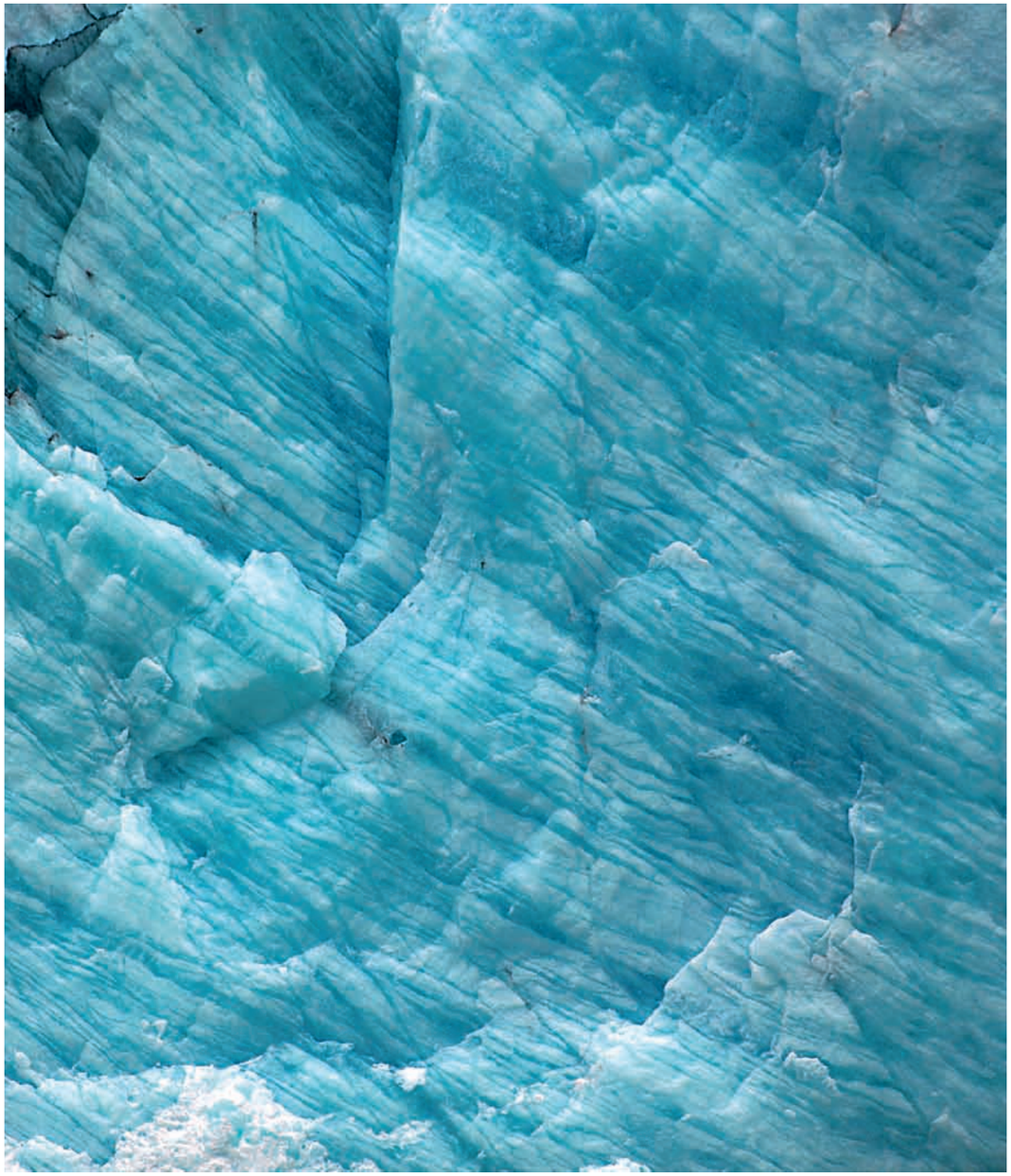
Caracara caronculé lors d'un épisode inhabituellement froid – Équateur.



Glacier Perito Moreno – Argentine.

Fonte des glaces

Le réchauffement climatique fait fondre les glaces de notre planète rapidement. En été, le volume des glaces de la banquise de l'Arctique représente à peine un quart de ce qu'il était à la fin des années 1970. La fonte est plus rapide que ce que prédisaient les modèles, si bien que la banquise arctique pourrait complètement disparaître durant la saison d'été au cours des prochaines décennies, dans le cas des scénarios d'émissions les plus pessimistes. De l'autre côté de la planète, en Antarctique, les glaces fondent dix fois plus vite qu'il y a 600 ans pendant l'été, la perte de banquise s'étant accélérée au cours des 50 dernières années, générant l'émergence de nouvelles routes commerciales. Quant aux glaciers situés dans d'autres régions du monde (principalement dans les Rocheuses, les Andes et l'Himalaya), ils montrent depuis les années 1950 un retrait sans précédent avec une accélération d'un facteur 3-4 depuis la fin des années 1970.

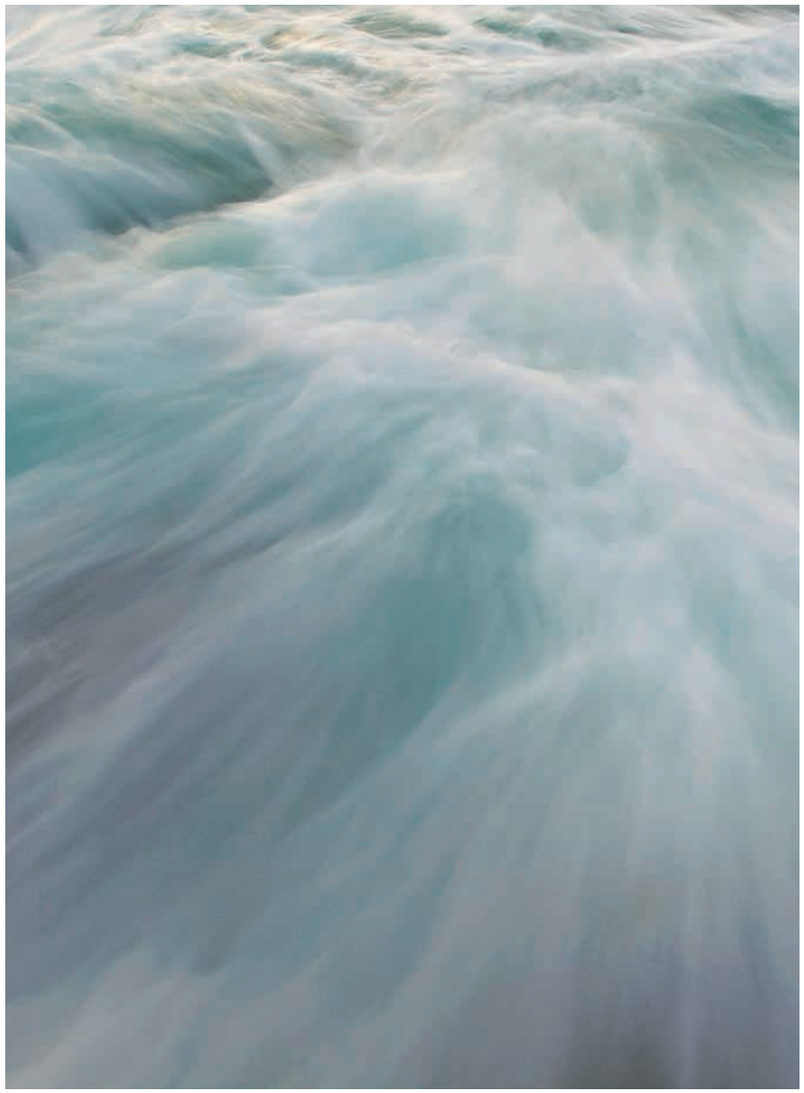


Glacier Perito Moreno – Argentine.



Étoile de mer – Équateur.

L'élévation du niveau des eaux dans le Pacifique aura de profondes conséquences sur les espèces d'invertébrés de la zone intertidale.



Vague – Équateur.

Élévation du niveau des mers

Conséquence de la fonte des glaces et de l'expansion thermique des océans, plus chauds en surface comme en profondeur, le niveau moyen global des océans a augmenté d'environ 3,1 mm par an depuis le début des années 1990, le double par rapport aux décennies précédentes. En dépit d'incertitudes considérables, la hausse moyenne d'ici à 2080-2100 pour un réchauffement modéré se situerait entre 40 et 60 cm par rapport aux niveaux enregistrés entre 1986 et 2005, hausse qui perdurera après cette date. Hétérogène à la surface du globe, cette élévation serait maximale dans le Pacifique équatorial. L'élévation du niveau marin a déjà des conséquences majeures pour les sociétés (notamment dans de nombreuses îles), la biodiversité et les services fournis par les écosystèmes.

5. ACIDIFICATION DES OCÉANS

« Un chiffre permet d'apprécier la rapidité de l'acidification en cours des océans de la planète : celle-ci se produit à un rythme jamais atteint depuis environ 55 millions d'années. »

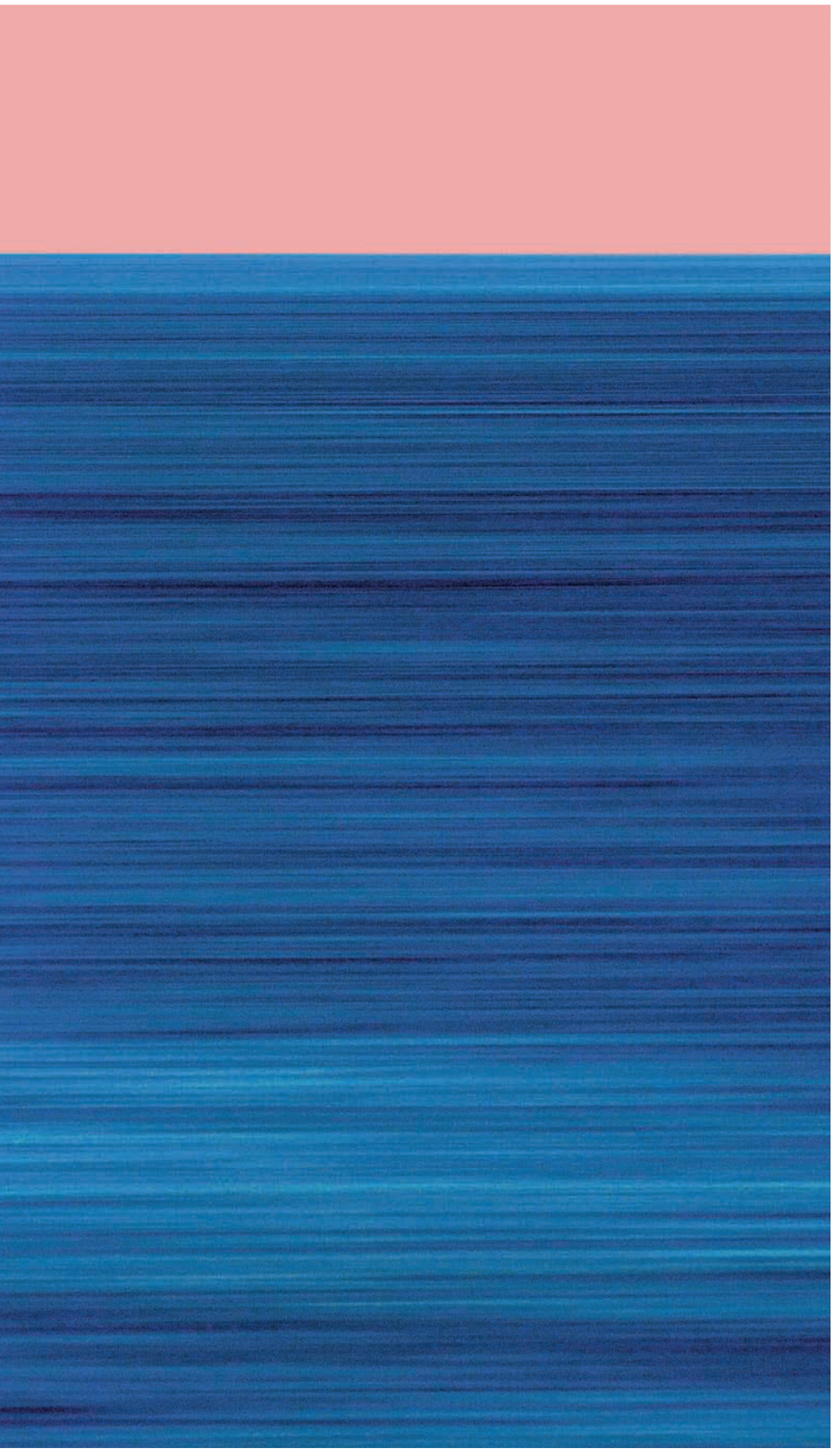
Stéphane Foucard, *Le Monde*, 2011

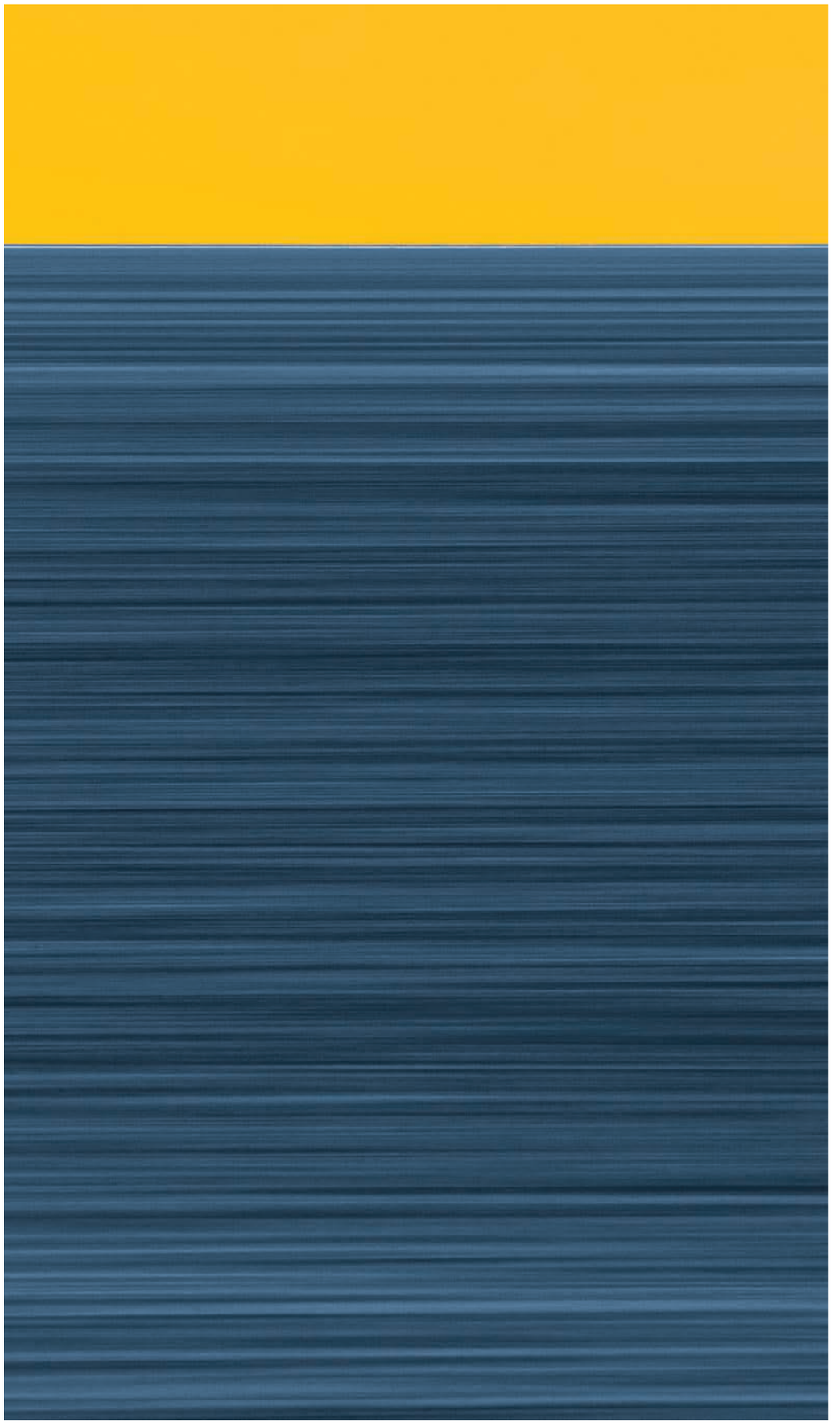
Puits naturels du carbone atmosphérique, les océans rendent un énorme service à l'humanité puisqu'on estime qu'ils ont absorbé environ la moitié du carbone émis dans l'atmosphère depuis le début de l'ère industrielle. Ce service n'est cependant pas sans prix, puisque l'absorption du carbone atmosphérique a de profondes conséquences sur la composition chimique des océans. En se dissolvant dans l'eau, le CO_2 forme de l'acide carbonique, acidifiant ainsi les océans. Combinée à l'augmentation des oxydes de soufre et d'azote, l'élévation des teneurs en CO_2 aurait contribué à une augmentation de près de 30 % de l'acidité des océans depuis le début de l'ère industrielle. Un des effets amplement documentés de ce phénomène est la diminution de la disponibilité en carbonate de calcium dans l'eau, nocive pour les organismes marins à coquille calcaire, depuis le zooplancton jusqu'aux mollusques en passant par les échinodermes et les coraux. Du fait des effets combinés de l'acidification et du réchauffement des eaux, ces derniers sont en déclin un peu partout dans le monde, depuis les Caraïbes jusqu'à la Grande Barrière en Australie, où les taux de calcification ont diminué de 14 % entre 1990 et 2005. Des études récentes montrent que l'acidification des océans pourrait également réduire la probabilité de survie de certains poissons, notamment d'espèces commerciales comme le cabillaud. L'acidification océanique agirait ainsi comme une source supplémentaire de mortalité, affectant des stocks déjà largement exploités. Les recherches sur l'acidification des océans commencent à peine – le terme a été employé pour la première fois en 2003 – et de nombreux travaux sont nécessaires afin de mieux comprendre les différences de vulnérabilité entre espèces, leur capacité d'adaptation ou encore les effets de l'acidification au niveau d'écosystèmes entiers. Mais il semble d'ores et déjà qu'il y aura plus d'espèces perdantes que gagnantes dans un monde marin plus acide.

Il semble qu'il y aura plus d'espèces perdantes que gagnantes dans un monde marin plus acide.

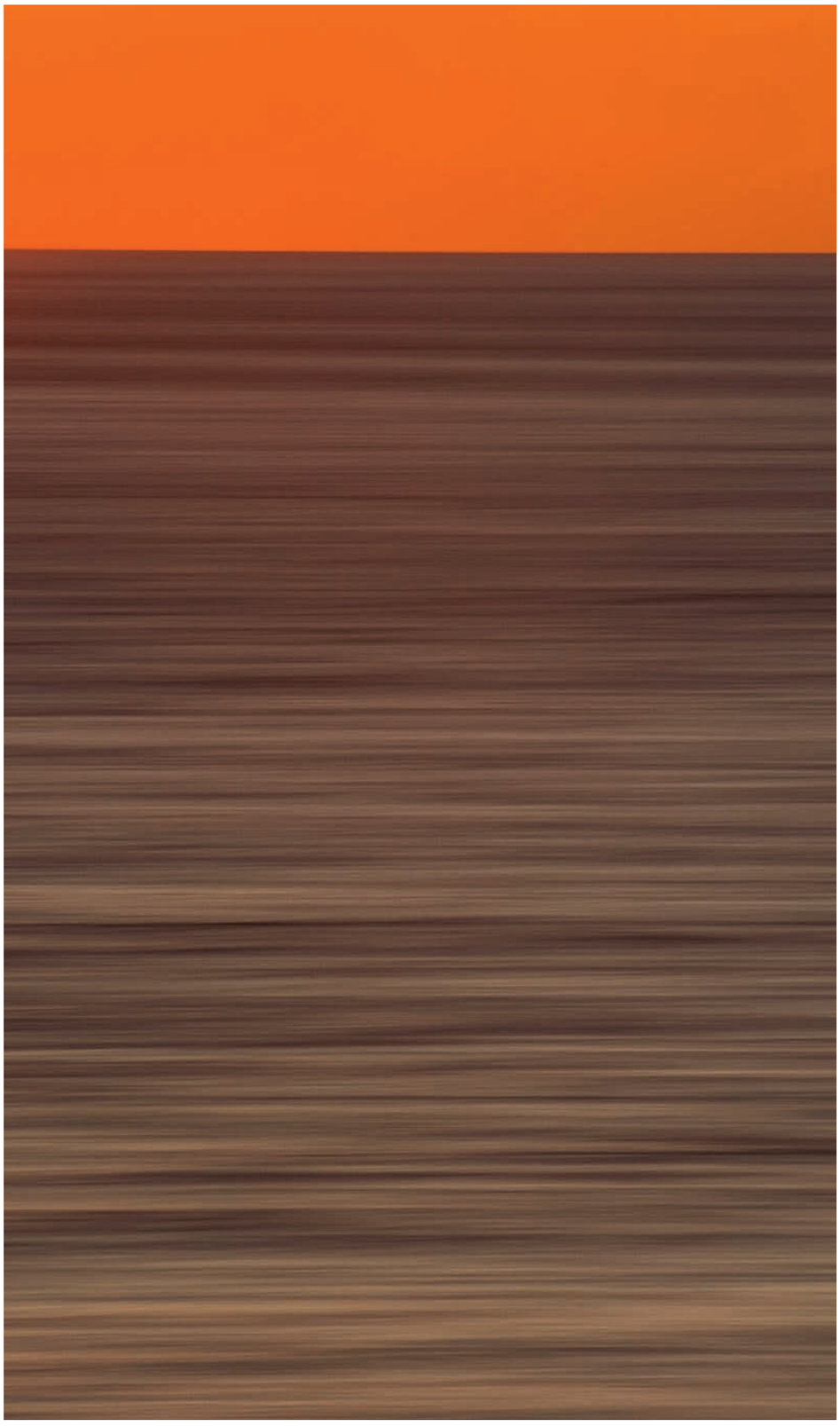


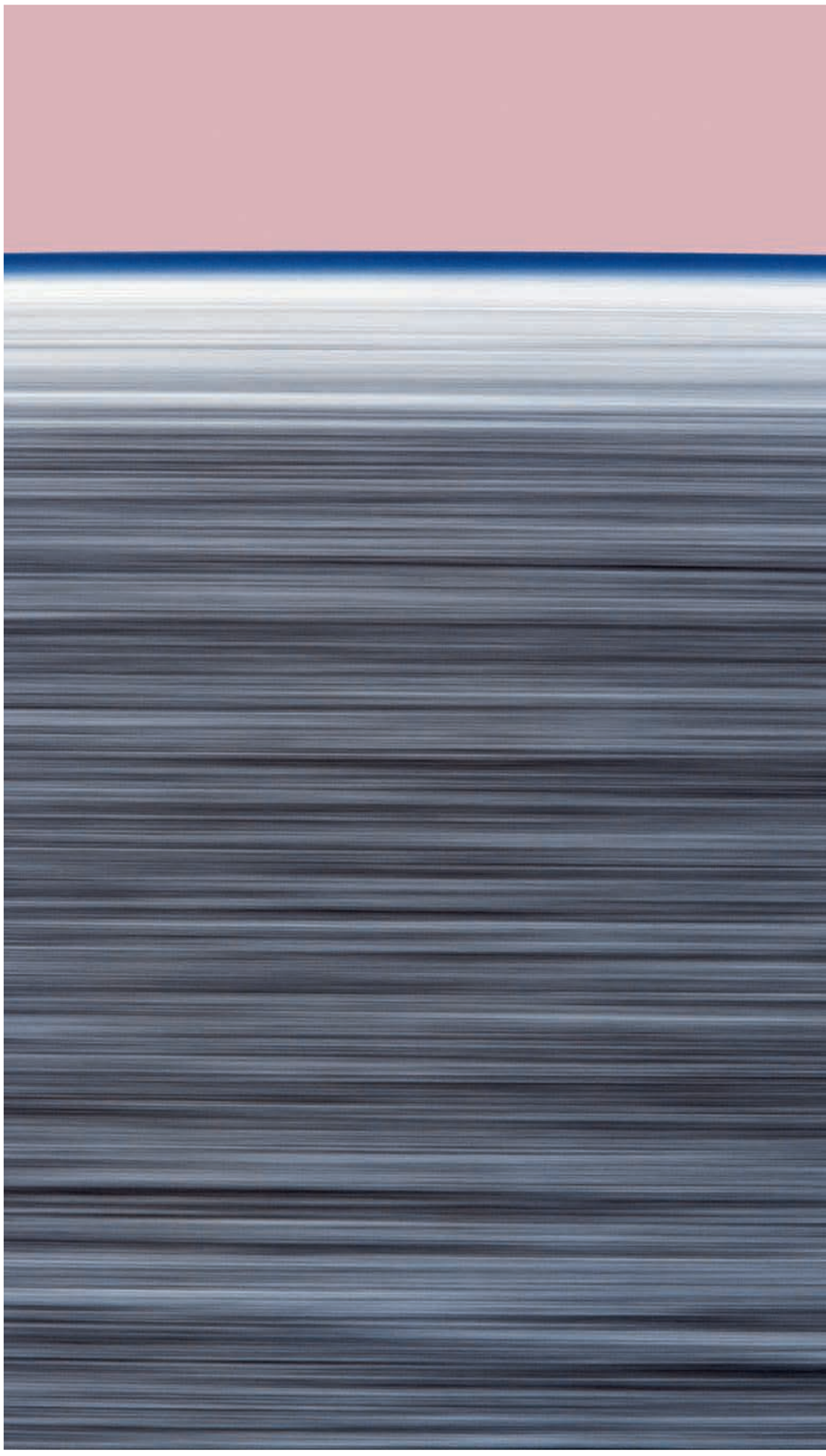
Saupes – France.





Océan Pacifique à différentes heures de la journée – Équateur.





6. CONTAMINANTS ATMOSPHÉRIQUES

« Elle distinguait seulement sur l'horizon lumineux de Paris, l'angle élargi de la gare, une vaste toiture, noire de la poussière du charbon. »

Émile Zola, *L'Assommoir*, 1877



Verdiers devant le bâtiment annexe d'un ancien haut-fourneau – France.



Corneilles noires sur la toiture noircie de suies d'une usine sidérurgique – France.

Depuis le début du XIX^e^ siècle, la combustion des énergies fossiles a généré la grande majorité des émissions de polluants qui aujourd'hui modifient considérablement la physico-chimie de l'atmosphère. L'ère industrielle a fait massivement appel à ces énergies. Et sachant que la combustion d'un baril de pétrole produit une énergie équivalente à plus de 10 ans de travail manuel, on comprend pourquoi. Aujourd'hui, sur les 43 millions de tonnes de marchandises qui sont acheminées chaque jour sur les réseaux de transport américains, *un tiers* est constitué par du charbon ou du pétrole. Lors des dernières décennies, les envolées du prix du pétrole ont redonné un nouveau souffle aux exploitations de charbon, la plus abondante mais aussi la plus polluante des énergies fossiles. Sa combustion produit deux fois plus de CO_2 que le pétrole, mais elle génère également, entre autres, du dioxyde de soufre et des particules grossières appelées suies. En participant à la formation de nuages et en se déposant sur les régions enneigées ou glacées dont elles modifient le bilan radiatif, les suies – retrouvées également lors de la combustion du bois de chauffe et du diesel, notamment des bateaux cargos – seraient le deuxième facteur anthropique de réchauffement climatique derrière le dioxyde de carbone. Au-dessus des zones les plus peuplées de la planète, les émissions de suies, poussières et autres aérosols forment des couches de brouillard qui se condensent et circulent sur de longues distances dans l'atmosphère, sous la forme d'immenses panaches de pollution. En Asie du Sud-Est, le plus célèbre voile de pollution sur Terre, le nuage brun asiatique, modifie les régimes climatiques et hydrologiques du sous-continent. Globalement, ces brouillards modifient également la couleur du ciel : auparavant d'un bleu intense, il est désormais d'un bleu laiteux dans de nombreuses régions, avec d'importantes conséquences sur la santé humaine. En 2012, la pollution de l'air a été responsable d'un décès sur huit dans le monde, soit environ 7 millions de morts. Une étude récente de l'Organisation mondiale de la santé montre que 9 citadins sur 10 vivent dans des cités dont les niveaux de polluants atmosphériques sont supérieurs aux seuils limites.



Cigogne blanche sur une décharge d'ordures ménagères – France.

7. DÉCHETS ET POLLUTIONS CHIMIQUES

« Même dans des pays aussi industrialisés que la France, encore plus de 40 % des ordures en plastique se retrouvent dans les décharges. Dans les pays émergents, ces déchets sont devenus un élément normal de l'environnement. [...] Les mers sont devenues de grandes décharges de plastique. Les scientifiques parlent même de l'accumulation de plancton plastique. [...] Au Kenya, il existe une côte de tongs sur laquelle la mer rejette par tonnes les sandales de touristes des Maldives et des Seychelles. ».

Christian Schwägerl, *L'âge de l'homme*, 2010

Qu'elles soient *diffuses*, lorsque leurs sources sont multiples et répandues, *chroniques*, lorsqu'il s'agit d'émissions répétées ou constantes, *ostensibles*, comme l'accumulation de déchets plastiques ou les marées noires, ou *insidieuses*, comme la concentration de pesticides ou de métaux lourds dans les chaînes alimentaires, les nombreuses formes de pollutions ont des effets durables sur la santé des humains et de l'environnement. Quelques chiffres : en 1990, l'American Chemical Society avait déjà recensé 10 millions de produits chimiques différents dans la nature, la plupart synthétisés artificiellement. Parmi eux, on estime que plus de 120 000 seraient présents dans les systèmes naturels. Plus de 200 substances chimiques potentiellement toxiques peuvent être décelées dans le sang du cordon ombilical d'un nouveau-né. Si le recensement individuel de ces substances dans l'environnement est souvent possible, la compréhension des effets biologiques de véritables « cocktails de polluants » – aux interactions et effets dose-réponse mal connus – reste un défi majeur pour les toxicologues de l'environnement. Les effets sur les organismes vivants peuvent par ailleurs être subtils et difficiles à mettre en évidence : ce n'est que récemment que l'on a démontré les effets néfastes sur les abeilles de faibles doses de pesticides que l'on considérait jusqu'alors sans danger pour ces pollinisateurs. Parmi les polluants et déchets générés par les activités humaines, le plastique occupe une place particulière puisque environ 260 millions de tonnes en sont produites chaque année. Le plastique se décompose très lentement dans l'environnement et y libère ses résidus chimiques. En mer, les débris plastiques s'accumulent dans cinq principaux tourbillons océaniques, le plus célèbre étant celui du Pacifique nord où les concentrations peuvent atteindre 580 000 fins débris par kilomètre carré, correspondant à une masse six fois plus importante que celle du plancton. S'ils forment en surface ce que les scientifiques ont appelé un « septième continent de plastique », ces débris sont également présents à des milliers de mètres sous la surface des océans. L'ingestion de ces particules a été démontrée chez plus de 170 espèces d'animaux marins avec des conséquences létales ou sub-létales.

8. ALTÉRATION DU CYCLE DES ÉLÉMENTS NUTRITIFS

« Grâce à Fritz Haber, les humains sont la seule espèce sur la planète, hormis les bactéries Rhizobium*, capables de fixer leur propre azote directement à partir de l'atmosphère. À cet égard, nous sommes peut-être biologiquement plus proches des pois, des haricots, ou du trèfle que de nos parents les grands singes. »*

Mark Lynas, *The God species*, 2011

À la fin du XIX^e^ siècle, Sir William Crookes, alors président de l'Association britannique pour l'avancement de la science, plaide pour une intensification de la production agricole afin de nourrir une population mondiale croissante. Où trouver cependant les engrais azotés nécessaires à la croissance des espèces cultivées et élevées ? Bien que l'azote constitue 78 % de l'atmosphère, il est inutilisable sous cette forme par la plupart des êtres vivants. Pour être biologiquement assimilable, l'azote doit être disponible sous forme d'azote dit « réactif » (nitrate, nitrites, ammoniac). En 1908, le chimiste allemand Fritz Haber fait une découverte révolutionnaire en réalisant la synthèse de l'ammoniac à partir de l'azote de l'air, permettant d'obtenir *ad libitum* des engrais azotés. Depuis les années 1960 et le développement de l'agriculture intensive, l'utilisation excessive d'engrais azotés et la combustion d'énergies fossiles ont gravement perturbé le cycle biogéochimique de ce composé. En effet, les activités humaines introduisent aujourd'hui dans la biosphère plus d'azote réactif que l'ensemble des processus naturels. L'excès d'azote réactif porte atteinte pendant plusieurs décennies à la qualité de l'environnement, car il chemine sur des milliers de kilomètres à travers l'ensemble des compartiments de la biosphère – les êtres vivants, les eaux douces et océaniques, les sols et l'air –, formant ce que l'on appelle « la cascade de l'azote ». Alors que les oxydes d'azote sont des gaz à puissant effet de serre très nocifs pour la santé, les nitrates engendrent des proliférations d'algues sur les côtes, dont la décomposition entraîne un appauvrissement en oxygène de la colonne d'eau et l'asphyxie des poissons et des coquillages. Il s'agit donc d'optimiser l'utilisation de ce composé nécessaire au maintien de la vie humaine tout en minimisant les impacts négatifs sur l'environnement et la santé. Contrôler l'excès d'azote réactif sur Terre pourrait représenter dans les prochaines décennies un défi encore plus grand que celui de diminuer les rejets de carbone. Si nous sommes technologiquement dépendants du carbone, nous sommes biologiquement dépendants de l'azote.

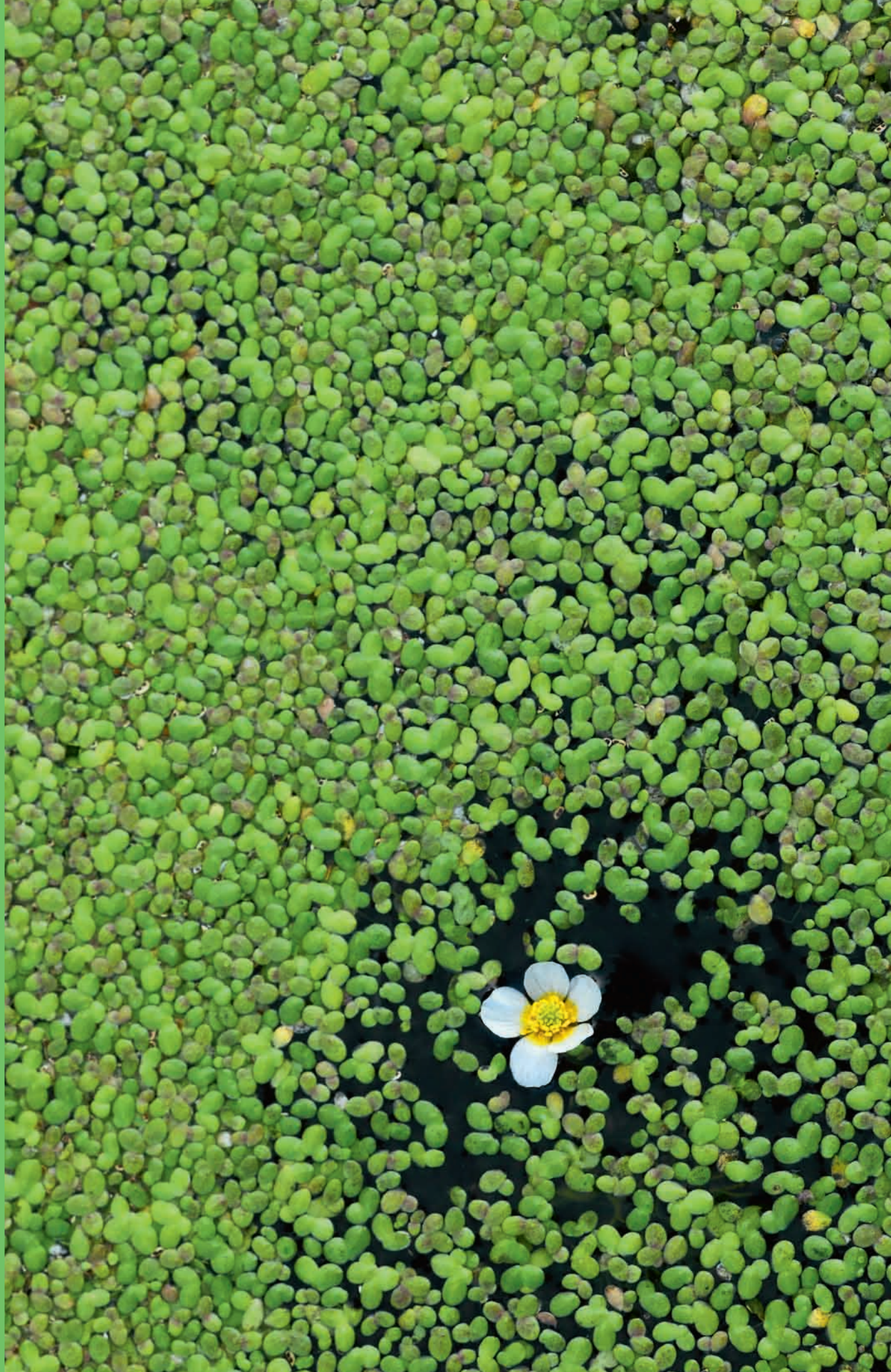
Matière organique en décomposition au pied d'un figuier étrangleur – Équateur.

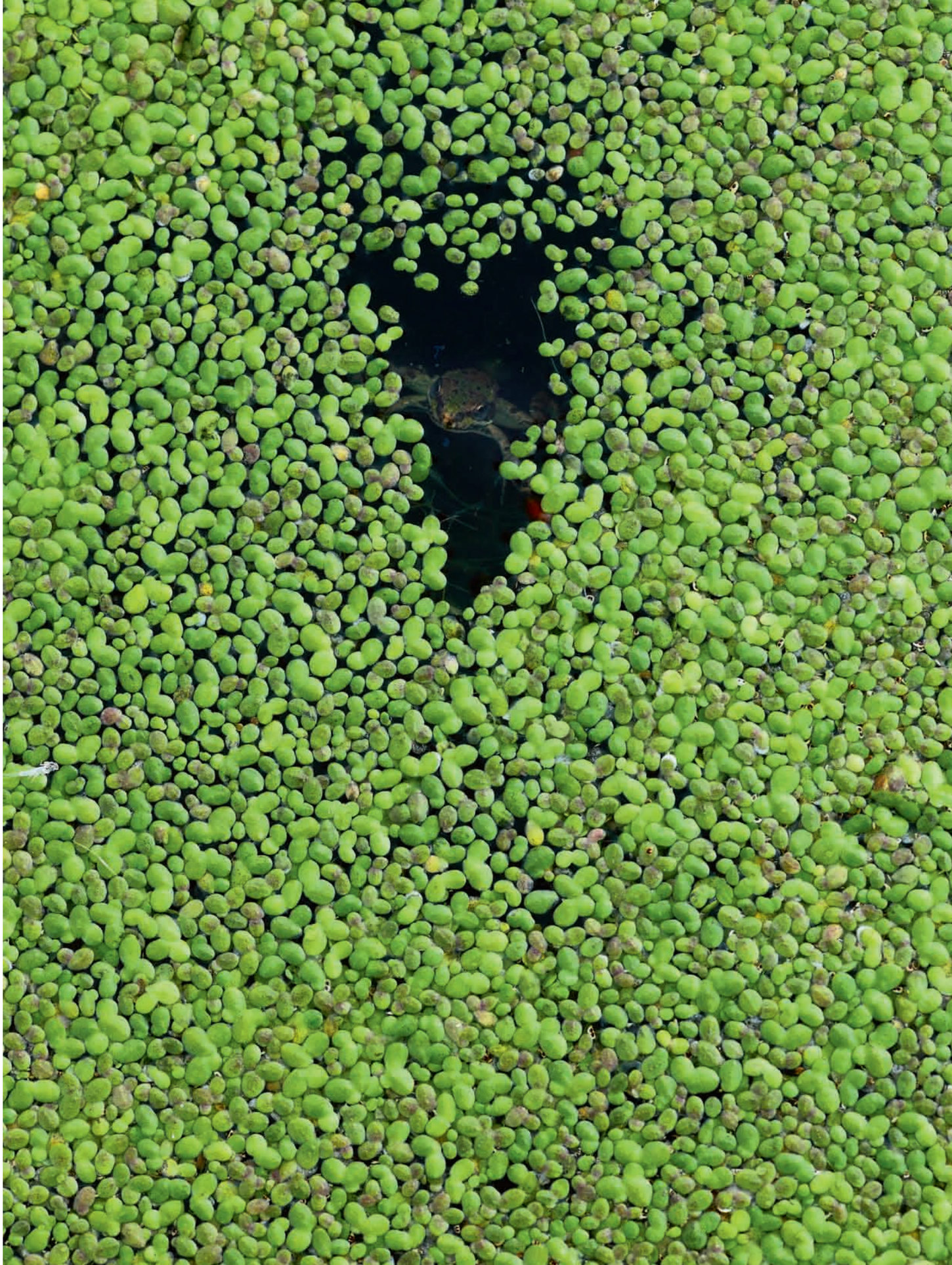
Les éléments nutritifs sont absorbés par les racines des arbres et restitués au sol par la décomposition de la litière et des racines ainsi que par les précipitations au sol et l'écoulement sur l'écorce. Ce cycle naturel est aujourd'hui menacé dans de nombreux écosystèmes par la charge excessive de certains éléments nutritifs.



Eutrophisation

Partout dans le monde, la charge excessive en certains éléments nutritifs, notamment l'azote et le phosphore, est une menace majeure pour les écosystèmes d'eau douce, côtiers et marins. Les eaux enrichies permettent la prolifération d'algues microscopiques ou de cyanobactéries, plus ou moins bien consommées par le reste de la chaîne trophique et dont la décomposition entraîne la croissance de bactéries, qui consomment elles-mêmes l'oxygène de l'eau. La carence en oxygène peut à son tour engendrer la mort d'organismes aquatiques dont la décomposition, consommatrice d'oxygène, amplifie le processus. Au niveau des embouchures de fleuves enrichis, le processus d'eutrophisation favorise l'extension des « zones mortes », couches d'eau océanique de plusieurs centaines de mètres d'épaisseur, à teneur naturellement réduite en oxygène. Sous-jacentes aux eaux de surface oxygénées, ces zones couvrent aujourd'hui près de 10 % de la superficie de l'océan mondial avec des conséquences majeures sur le fonctionnement de ces systèmes.





Lentilles d'eau, renoncule et grenouille verte – France.

Les eaux lentes enrichies par les nitrates sont propices au développement des lentilles d'eau.



Appauvrissement des sols

Alors que la révolution verte a engendré un excès d'éléments nutritifs – notamment d'azote, de phosphore et de potassium – dans les sols de nombreuses régions, dans d'autres, principalement dans les pays en voie de développement et les pays pauvres, ces éléments sont en fort déficit. Cette situation, qui menace la sécurité alimentaire de nombreuses régions (notamment en Afrique subsaharienne), est liée à un manque de réapprovisionnement en éléments nutritifs à la suite de cultures trop intensives par rapport à la capacité des sols, mais également à des pertes liées à l'érosion par le vent et l'eau qui exacerbent la dégradation des sols.

Paysage créé par l'érosion des pluies – Bolivie.



Méthane et pergélisols

Gaz issu de la fermentation de la matière organique, le méthane est stocké en grande quantité dans les sols gelés des régions polaires, les pergélisols. Le méthane ayant un pouvoir de réchauffement 21 fois supérieur au CO_2, son relargage dans l'atmosphère du fait de la fonte des glaces engendrera une accélération de l'élévation des températures. Ce réchauffement augmentera à son tour le taux de respiration microbienne des sols et la formation de méthane. Près de 50 milliards de tonnes de méthane stockées dans les pergélisols sous la mer de Sibérie orientale pourraient être libérées lors de la prochaine décennie. Une véritable bombe à retardement pour le climat.

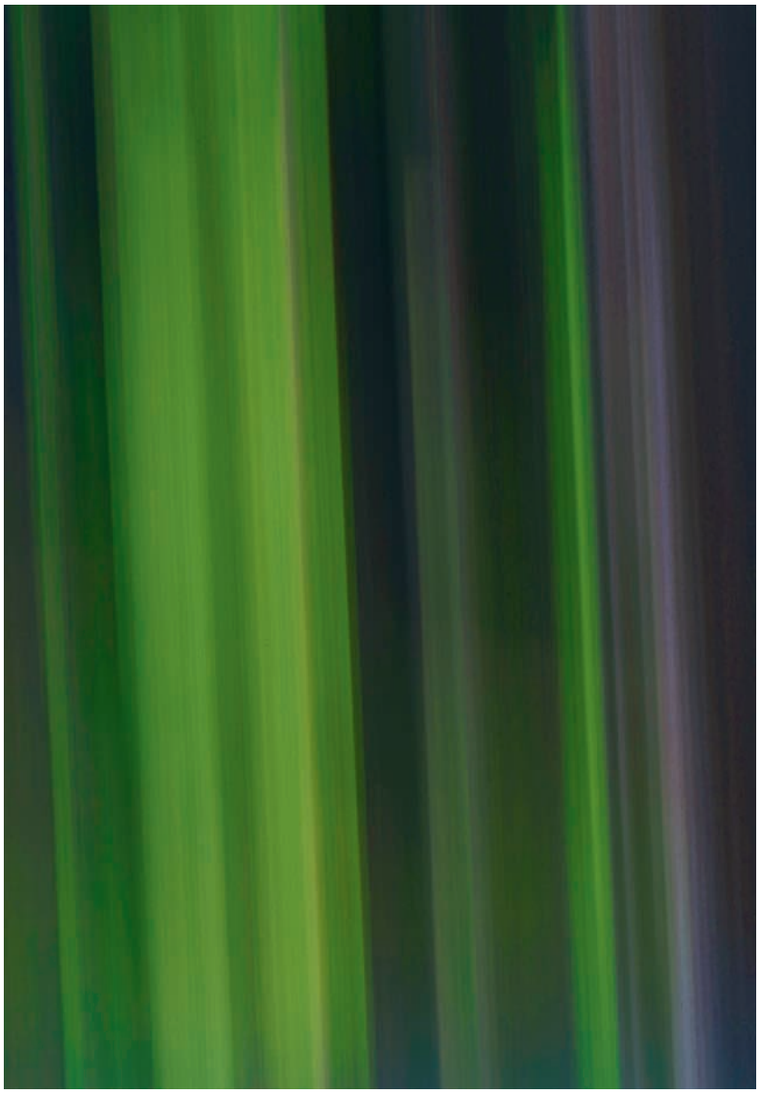
Feuille de hêtre prise dans la glace – France.

9. CHANGEMENT D'USAGE DES TERRES

« Afin d'attirer des sociétés comme la vôtre [...], nous avons renversé des montagnes, rasé des jungles, asséché des marais, détourné des fleuves, déplacé des villes, tout cela pour que vous et votre entreprise puissiez plus facilement faire des affaires ici. »

Publicité du gouvernement des Philippines (1995), magazine *Fortune*

Si le changement climatique, l'excès d'azote et l'érosion de la biodiversité sont des processus relativement lents, subtils, parfois imperceptibles, que certains peuvent ignorer voire dénier, les changements d'usages des terres sont quant à eux outrageusement visibles dans le quotidien de chacun. Ces changements d'usage affectent profondément les sols, notamment dans leur fonction nourricière et épuratrice des eaux. Dans les écosystèmes terrestres, la dynamique des changements d'usage des terres peut être classée en trois grandes catégories : la conversion de l'habitat naturel en habitat anthropisé, l'intensification de l'utilisation des habitats déjà anthropisés et le rétablissement d'une végétation naturelle dans des zones préalablement déboisées. Le premier type de changement est de loin le plus répandu, dû principalement au détournement du potentiel photosynthétique de la Terre au profit des besoins humains, sous la forme de cultures pour l'alimentation ou la production d'énergie et de prairies à bétail. Pratique remontant à quelque 10 000 ans, l'agriculture a depuis profondément modifié les paysages de notre planète. Dans la seconde moitié du XX^{e} siècle, l'agriculture intensive a été responsable des plus importants impacts environnementaux jamais générés par les êtres humains. À ce jour, les humains se sont approprié la moitié du pouvoir photosynthétique de la Terre. À l'image des Philippines, nombre de changements récents dans l'usage des terres concernent l'aménagement du territoire dans le but d'améliorer les infrastructures de transport et d'urbanisation, de faciliter l'exploitation des ressources naturelles, et *in fine* d'assurer le développement économique d'un pays – c'est du moins la logique controversée des aménageurs et des politiques. La modification de l'usage des terres interagit avec d'autres perturbations environnementales dans des boucles de rétroaction le plus souvent amplificatrices. Par exemple, les conséquences négatives de la perte d'habitats sur l'abondance et la diversité des espèces sont accrues dans les régions les plus sensibles aux changements climatiques. De même, la déforestation des forêts primaires, qui assurent le recyclage de l'eau de pluie, altère les régimes de précipitations et augmente la fréquence des sécheresses.



Plantation de conifères – France.

La superficie de monocultures intensives d'arbres augmente partout dans le monde pour faire face à la demande croissante de produits dérivés du bois.



Champ cultivé – France.

Déforestation

La déforestation constitue l'un des processus fondamentaux de la transformation des terres par l'être humain. Environ 13 millions d'hectares de forêts disparaissent annuellement sur Terre, soit l'équivalent de la surface de l'Angleterre. Si l'*élimination* de la forêt est souvent médiatisée, la *réduction* et la *modification* des forêts sont deux autres formes de déforestation. La *réduction* des forêts conduit à des processus de fragmentation et d'isolement de parcelles forestières, avec des effets néfastes sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes. Quant à *la modification* des forêts, elle se traduit par la conversion de forêts primaires en forêts secondaires ou plantations artificielles d'arbres, dans lesquelles la biodiversité est largement altérée. En 2010, les forêts primaires ou faiblement anthropisées ne constituaient que 36 % de la superficie forestière mondiale. Globalement, une superficie d'environ quatre fois la taille de la France a été déforestée dans le monde entre 2000 et 2012, dont près d'un tiers dans la zone tropicale.



Paysage déboisé dans la région de Manabi – Équateur.
Près de 95 % de la surface des forêts primaires de la côte pacifique de l'Équateur a été coupée et transformée en terres agricoles.





Chevreuil – France.

Intensification des sols cultivés

En 2005, plus de 90 %
des calories alimentaires et
environ 80 % des protéines et graisses
étaient fournies par les sols cultivés.



Chevreuil – France.

Dans sa forme la plus répandue, l'intensification de l'agriculture a transformé les sols comme aucune autre révolution auparavant. En 2005, plus de 90 % des calories alimentaires et environ 80 % des protéines et graisses étaient fournies par les sols cultivés. Les besoins d'intensification des cultures sont définis par trois principaux facteurs, aux dynamiques complexes et indépendantes : les effectifs démographiques, les régimes alimentaires et les rendements nutritionnels par unité de surface. Dans de nombreuses régions du monde, les bénéfices de l'augmentation des rendements du fait des progrès technologiques sont contrebalancés par la dégradation des terres (compaction, stérilisation), la croissance de la population et un changement des régimes alimentaires. Dans de nombreux pays (notamment émergents), l'enrichissement de l'alimentation et du niveau trophique des humains pourrait devenir la principale cause d'augmentation des surfaces cultivées dans un futur proche, dépassant ainsi le facteur démographique. À l'échelle mondiale, le nombre de personnes en surpoids excède désormais celui des mal nourris.



Salinisation

Il est fréquent que les sols des régions arides et semi-arides accumulent des sels sous forme soluble ou non. Si cette salinité est le plus souvent d'origine naturelle – alors appelée salinisation primaire –, certaines activités humaines peuvent provoquer une salinisation dite secondaire des sols, comme dans le cas de l'irrigation trop abondante des terres cultivées ou de la déforestation et du défrichage, qui diminuent la capacité d'absorption d'eau par les sols. En effet, des apports en eau trop importants par rapport à l'évaporation et aux capacités d'absorption des racines saturent les sols et provoquent l'infiltration de l'eau en profondeur. Cela crée une colonne de sol humide à travers laquelle le sel situé en profondeur diffuse vers la surface, jusqu'aux racines. De 20 à 50 % des zones irriguées sont actuellement affectées par des processus de salinisation, ce qui limite la productivité des sols. Le surplus de sel peut également contaminer les cours d'eau alentours et les nappes phréatiques.



Salar d'Uyuni – Bolivie.

À gauche :
Flamant de James – Bolivie.

Désertification

Longtemps présenté comme une simple avancée naturelle du désert sur les terres productives, le processus de désertification est dans les faits plus complexe puisqu'il désigne, selon les Nations unies, « la dégradation des terres dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches par suite de divers facteurs, parmi lesquels les variations climatiques et les activités humaines ». Ces zones occupent 38 % de la surface des continents et abritent environ un tiers de la population mondiale. En raison de conditions agro-climatiques défavorables, ces zones à faible potentiel écologique souffrent d'un manque d'investissements et d'infrastructures, d'accès au marché et de techniques de production adaptées ; elles restent pour la plupart marginalisées, en développement non durable. Ce n'est d'ailleurs pas une coïncidence si de nombreux conflits actuels, depuis l'Afghanistan jusqu'au Zimbabwe, ont lieu dans des régions arides.



Coléoptère Ténébrionide – Chili.



Au moins 25 millions de kilomètres de routes nouvelles sont prévus d'ici à 2050. De quoi faire plus de 600 fois le tour de la Terre.



Renard roux – France.

A droite :
Grand cormoran – France.

L'urbanisation fait partie d'un processus plus généralisé de modification de l'usage des terres, nommé « artificialisation des milieux ». Ce phénomène mondial, dont la croissance accélérée depuis le XX^e siècle est bien documentée par les images satellites, comprend par exemple la construction de réseaux de transport, de barrages, d'aménagements touristiques et sportifs ou encore de zones industrielles et commerciales. En 2011, environ 165 hectares de milieux naturels et terrains agricoles étaient détruits chaque jour en France, remplacés par des habitations, des zones d'activité, des aéroports ou des routes.



Urbanisation et artificialisation des terres

La Terre connaît actuellement un taux d'urbanisation sans précédent, si bien qu'en 2030, environ 60 % de la population humaine mondiale devrait vivre dans des paysages urbains. La modification des habitats engendrée par l'urbanisation est à la fois drastique et de plus en plus répandue. De grandes parcelles de terre sont dénudées, bitumées et transformées dans des proportions qui excèdent le plus souvent les autres types de modifications d'usages des terres, ce qui stérilise de façon irréversible les sols. Ces modifications drastiques font que l'urbanisation est l'une des causes majeures d'extinction et d'homogénéisation des espèces. À plus grande échelle, la chaleur générée par les villes modifie localement les courants aériens, avec des conséquences sur la température dans des régions situées à des milliers de kilomètres.

10. ÉROSION DE LA BIODIVERSITÉ

« De mémoire de rose, on n'a jamais vu mourir un jardinier. »

Bernard de Fontenelle (1657-1757), *Maximes et pensées*

La cinquième crise d'extinction d'espèces a vu disparaître les dinosaures. De nos jours, une sixième crise semble en marche.

De même que la courte vie d'une rose qui bourgeonne et flétrit en une saison ne lui permet pas d'appréhender le monde des humains, la durée de vie des humains ne devrait pas leur permettre de comprendre le cycle des espèces, de l'ordre du million d'années. À l'image de l'aphorisme de l'académicien Bernard de Fontenelle, on serait ainsi tenté d'écrire que *de mémoire d'humain, on n'a jamais vu mourir une espèce*. Mais ce serait sans compter l'exceptionnelle accélération du rythme d'érosion de la biodiversité qui s'est produite depuis l'apparition de l'être humain. Certes, la majorité des espèces ayant vécu sur la Terre depuis l'apparition de la vie sont aujourd'hui éteintes. Et au cours des temps géologiques, la composition du monde vivant a toujours été en perpétuel changement, alternance de transformations en nouvelles espèces (spéciation) et de disparitions d'espèces (extinctions). Ainsi, on s'accorde généralement à considérer que cinq grandes crises d'extinctions massives se sont succédé entre la fin de l'Ordovicien – il y a 440 millions d'années environ – et la transition Crétacé-Tertiaire – il y a 65 millions d'années – qui a vu la disparition des dinosaures. Les processus d'extinction et de diversification qui les ont suivies se sont étendus sur de très longues périodes, plusieurs dizaines de milliers d'années. Toutefois, depuis le début du XVI^{e} siècle, 76 espèces de mammifères, 133 espèces d'oiseaux et 86 espèces de plantes ont officiellement disparu, correspondant à un taux d'extinction d'espèces supérieur à celui mesuré par le passé et marquant ainsi le début d'une sixième crise d'extinction. Un taux d'extinction d'une dizaine d'espèces par million d'espèces par an constituerait un seuil au-delà duquel le renouvellement des espèces n'est plus assuré ; ce taux est de nos jours de 10 à 100 fois plus élevé, notamment dans les milieux insulaires. Face à ce constat, les dirigeants du monde entier se sont engagés en 2002, à travers la Convention sur la diversité biologique, à réduire significativement le taux d'érosion de la biodiversité à l'horizon 2010. Aujourd'hui, force est de constater que cet engagement n'a pas été tenu, loin de là.

Empreinte de dinosaure Carnotaurus – *Bolivie.*

Ce carnivore de 8 mètres de haut vivait en Amérique du Sud pendant le Crétacé, il y a 70 millions d'années. Il a disparu lors de la transition Crétacé-Tertiaire.





Espèces exotiques

Les humains ont non seulement provoqué des extinctions d'espèces, mais ils ont également introduit de nombreuses espèces hors de leur aire d'origine. La combinaison de l'érosion de la biodiversité et de l'introduction d'espèces est susceptible d'accroître la proportion d'espèces communes dans différentes régions à l'échelle mondiale, processus connu sous le terme d'homogénéisation biotique. Plus de 11 000 espèces exotiques sont présentes en Europe, principalement des plantes et des invertébrés terrestres. Environ 10 % de ces espèces ont des impacts écologiques : parmi ceux-ci, la compétition avec les espèces autochtones dont elles peuvent menacer la survie. Un phénomène similaire est observé au niveau des plantes cultivées.



Abeille mellifère et coquelicot – France.

Menacés par l'intensification des cultures, le réchauffement climatique et la propagation d'espèces exotiques et de maladies, les insectes pollinisateurs sont en déclin à l'échelle planétaire, avec de profondes conséquences environnementales et économiques.

À gauche :

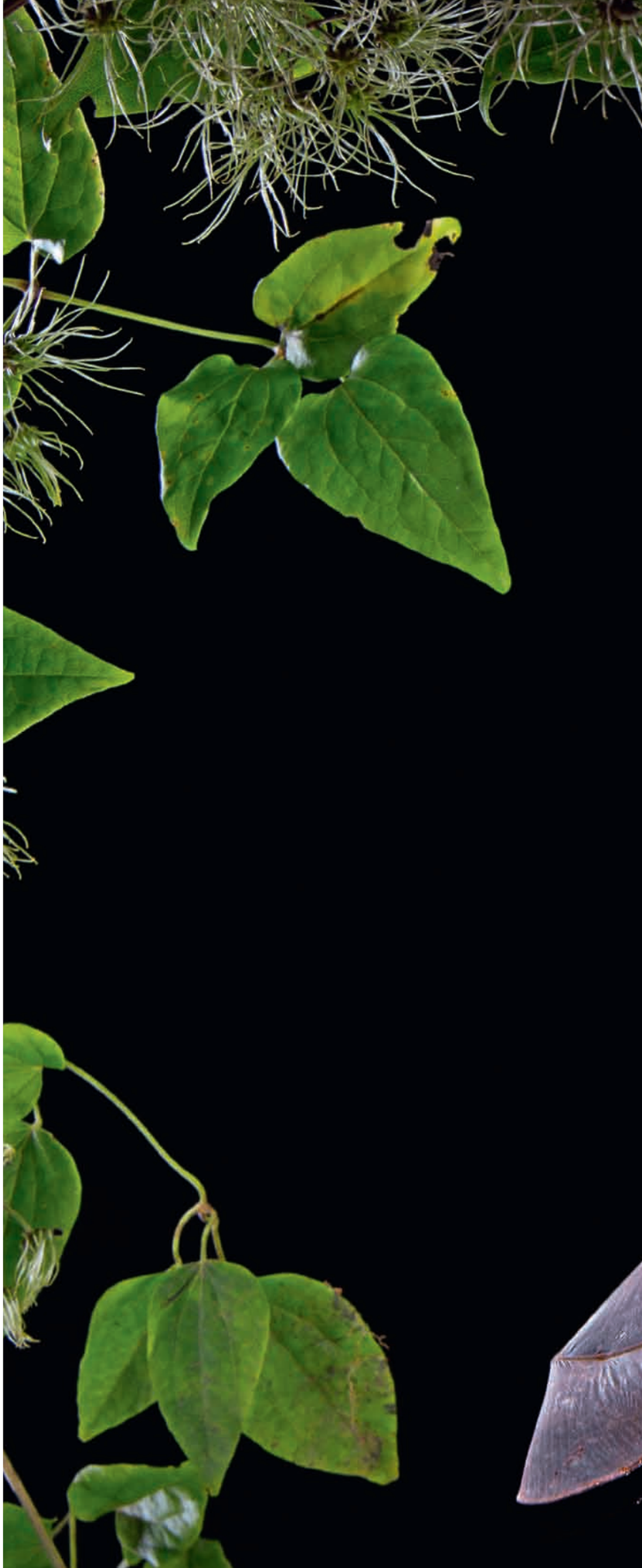
Coccinelles asiatiques – France.

Originaire du Sud-Est asiatique, cette coccinelle mangeuse de pucerons a été importée massivement en France pour la lutte biologique. Son comportement et sa prolificité en font désormais une espèce invasive, compétitrice pour les coccinelles autochtones qu'elle tend à éliminer.

Impact sur les fonctions écologiques

L'érosion de la biodiversité n'implique pas seulement le déclin du nombre d'espèces, mais également celui des fonctions écologiques qu'elles assurent. Les organismes vivants sont en effet les moteurs des processus biogéochimiques planétaires et ils influencent grandement les conditions environnementales aux échelles locale et globale. En conséquence, l'érosion de la biodiversité altère de nombreuses fonctions écologiques – pollinisation, dispersion des graines, contrôle des ravageurs – cruciales pour le bon fonctionnement et la pérennité des écosystèmes. L'érosion de la biodiversité a des impacts majeurs même dans les écosystèmes riches en espèces (récifs coralliens, forêts tropicales), car les espèces rares qu'ils hébergent possèdent des fonctions uniques, difficilement remplaçables en cas de disparition.

Grandes consommatrices d'insectes, les chauves-souris font économiser chaque année au secteur agricole des dizaines de milliards d'euros qui seraient autrement employés à lutter contre les insectes ravageurs. C'est également l'un des groupes de mammifères les plus menacés par les changements globaux.





Grand murin - France.
(Image réalisée en collaboration avec Florent Rondel et Julien Frizon)



Un tiers pour les oiseaux ! La pêche prélève une quantité importante de petits poissons qui forment l'alimentation de base des populations d'oiseaux marins. Leurs taux de reproduction commencent à décliner lorsque les stocks de petits poissons passent en dessous du tiers de leur maximum historique.

Surpêche des réseaux trophiques

« La nature sait que nos petits efforts, nos flottes et nos pêcheries ne seraient rien pour son but, que la morue vaincrait l'homme », écrivait Jules Michelet en 1861 dans son livre *La Mer*. Les ressources halieutiques des océans semblaient alors inépuisables. Un siècle et demi plus tard, 30 % des stocks de poissons sont surexploités et 57 % *pleinement* exploités. Les stocks de grands poissons prédateurs – comme l'espadon ou les requins – ont décliné en moyenne de 89 % (amplitude : 11-100 %) par rapport aux lignes de référence historiques. Pour maintenir les captures dans des océans qui se vident, les humains pêchent de plus en plus bas dans la chaîne alimentaire : 37 % de la pêche totale est désormais représentée par les petits poissons, comme les sardines ou les harengs, contre 8 % dans les années 1960. Ceux-ci servent presque exclusivement à fabriquer de la farine pour alimenter les animaux d'élevage, notamment les poissons d'aquaculture. La fin de la surpêche, l'élimination des pratiques destructives et la gestion durable de toutes les pêcheries ont été inscrites parmi les objectifs de conservation les plus importants pour 2020.



Serrans du Pérou – Équateur.

À gauche :
Pélican brun – Équateur.

11. RESSOURCES EN EAU DOUCE

« La pression sur la ressource en eau est aujourd'hui si forte que nombre des plus grands fleuves du monde, tels le Gange en Inde, le Fleuve Jaune en Chine et le Rio Grande entre les États-Unis et le Mexique, peinent à rejoindre la mer. »

Jeffrey Sachs, *Common Wealth*, 2008



Rivière Figarella – France (Corse).



Río Choqueyapu – Bolivie.

La formation de mousse blanche dans cette rivière est due aux détergents rejetés par les égouts et les usines de La Paz.

Si l'eau est considérée comme la ressource naturelle la plus essentielle à la vie, il n'en demeure pas moins que les rivières, lacs, eaux souterraines et autres réservoirs d'eau douce sont parmi les systèmes les plus menacés par les activités humaines telles que l'agriculture, l'urbanisation, l'industrialisation et les aménagements hydrauliques. Durant les 50 dernières années, en moyenne deux grands barrages ont été construits chaque jour dans le monde, représentant une quantité d'eau stockée de plus de 15 500 km^3 – volume qui couvrirait la France d'une colonne d'eau d'environ 30 m. En parallèle, l'exploitation des eaux souterraines mondiales a triplé depuis 1960. Trois pays (Inde, Chine et États-Unis) consomment à eux seuls environ un tiers des 4 000 km^3 d'eau captés dans le monde chaque année. En dépit de ces pressions, l'Organisation mondiale de la santé évaluait qu'un habitant sur trois, soit 2,4 milliards de personnes, n'avait pas accès à l'eau potable en 2013. Les problèmes liés à la ressource en eau entraînent des effets en cascade, notamment dans les pays pauvres : le stress hydrique dont souffrent les agriculteurs accélère l'exode rural et l'essor urbain, en exacerbant la question de l'assainissement. Le changement climatique pourrait aussi se rajouter sur la liste, déjà longue, des sources d'impact sur la ressource en eau car l'élévation des températures, et donc de l'évapotranspiration, a potentiellement un rôle accélérateur du cycle de l'eau. La pression sur les ressources en eau douce va continuer d'augmenter dans le futur, notamment pour alimenter une population croissante. Alors que la production de nourriture consomme déjà plus des deux tiers de l'eau prélevée dans le monde, la demande en nourriture due à la croissance démographique devrait augmenter de 70 % en 2050 par rapport à la demande actuelle. Cette pression croissante aura des effets locaux et globaux en termes de conflits politiques, de conditions de vie, de croissance économique, de risques hydrologiques, de préservation de la biodiversité et des services rendus par les hydrosystèmes.



Eau virtuelle

Le concept d'eau virtuelle représente le volume total d'eau douce nécessaire à la fabrication des biens de consommation. Par exemple, environ 13 500 litres d'eau sont nécessaires pour produire 1 kilogramme de bœuf. Même si les calculs d'eau virtuelle peuvent parfois s'avérer incertains (selon les auteurs, un même pays est parfois considéré comme exportateur ou importateur net d'eau), ce concept a le mérite d'établir un lien direct entre consommation et impact sur les hydrosystèmes. Il fait aussi de l'eau un enjeu de stratégie géopolitique. De nombreux pays externalisent leur besoin en eau par l'importation de produits « gourmands » en eau (fruits, viande), renvoyant ainsi la pression sur les ressources en eau des régions exportatrices. On estime qu'en France, un habitant consomme environ 1 875 mètres cubes d'eau virtuelle par an (trois quarts d'une piscine olympique), dont presque 40 % est externalisée. Le problème de la ressource en eau est donc global.



Grèbe huppé – France.

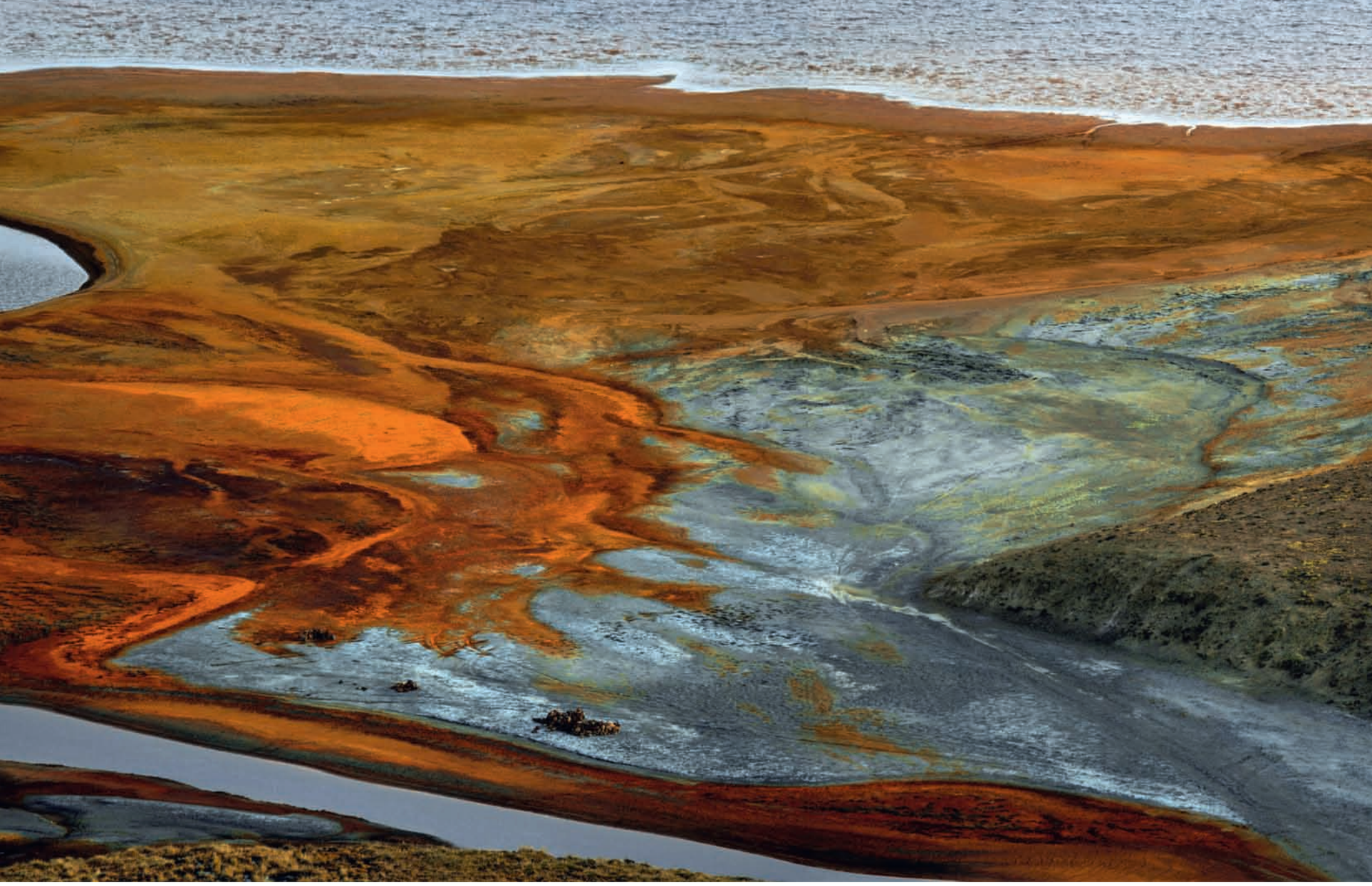


12. VULNÉRABILITÉ

« [L'homme] fatigue la Terre, cette déesse vulnérable. »

Sophocle, *Antigone*, 441 av. J.-C.

Originairement limitée au domaine médico-psychologique, la notion de vulnérabilité émerge dans les années 1980 dans le champ des sciences humaines et sociales en même temps que le concept de risque. On peut citer notamment l'influent essai du sociologue allemand Ulrich Beck sur *La société du risque* qui montre que la production sociale des richesses est désormais inséparable de la production sociale de risques (contaminants, événements climatiques extrêmes), incitant ainsi à une prise de conscience collective de la vulnérabilité des sociétés vis-à-vis de ces risques. Plus récemment, ce concept a été étendu aux sciences du développement durable, des changements globaux et de la gestion des écosystèmes, dans lesquelles il décrit le « degré d'exposition



Ruisseau drainant des terres contaminées par des rejets de mines d'étain et de plomb – Bolivie.

aux perturbations et aléas à partir duquel un système est susceptible d'être endommagé ». Le degré de vulnérabilité dépend donc à la fois de la sensibilité du système face aux événements dommageables et de la capacité d'adaptation de ce système face à ceux-ci. Ainsi, la vulnérabilité d'un système ne peut pas être évaluée uniquement en considérant l'exposition aux risques liés aux changements globaux, mais on doit aussi inclure les propriétés de résilience et de dynamique non-linéaire – telles que les points de basculement – des systèmes naturels et humains. La notion de risque étant une composante majeure des sociétés de l'Anthropocène, la connaissance de la vulnérabilité des systèmes physiques, biologiques et sociaux est donc devenue une préoccupation majeure des scientifiques et des politiques. Cette préoccupation est d'autant plus forte que la gestion de la vulnérabilité d'un système, par exemple *via* la diminution du degré d'exposition aux perturbations, crée sa propre vulnérabilité. Ainsi, le contrôle des crues diminue leur fréquence et incite au développement d'infrastructures dans des plaines inondables, rendant celles-ci vulnérables à des crues de grande ampleur. Il en est de même avec la prévention de petites pullulations d'insectes, qui augmente la probabilité de plus grandes pullulations. En d'autres termes, la gestion de petites perturbations pour rendre les systèmes moins vulnérables augmente souvent leur vulnérabilité à des perturbations majeures.

13. POINT DE BASCULEMENT

« Petites causes, grands effets. Les équilibres de la Nature sont à la merci d'une chiquenaude. »

Roger Heim, *Un naturaliste autour du monde*, 1955





À la fin des années 1950, le sociologue américain Morton Grodzins découvrait que la majorité des familles blanches de Chicago demeuraient dans leur quartier tant que le nombre de familles noires restait proportionnellement faible, mais qu'à partir d'un certain seuil d'établissement des familles noires (10-20 % de la population totale), elles quittaient le quartier en masse. Grodzins appela ce seuil *tipping point*, ou point de basculement, terme qui a depuis été largement employé en sociologie, en santé publique et, plus récemment, dans l'étude des systèmes naturels face aux changements globaux. De même que les systèmes sociaux, les systèmes naturels ne répondent pas toujours de façon graduelle à des perturbations progressives ; certains atteignent des points de non-retour à partir desquels ils basculent rapidement vers un état radicalement différent et donc vers un autre mode de fonctionnement. L'eutrophisation des lacs peu profonds est un exemple classique de ce genre de phénomène. Sous l'effet d'une augmentation graduelle d'apports extérieurs en éléments nutritifs, ces lacs peuvent soudainement passer d'un état d'eau transparente à un état eutrophisé où l'eau est turbide. Sans amélioration des conditions environnementales, il est généralement difficile de revenir à l'état d'origine du système une fois que le basculement s'est produit. Le basculement d'un état à l'autre peut survenir soit par des *effets de seuil* difficiles à anticiper – l'état du système varie peu jusqu'à ce qu'une valeur seuil de la condition environnementale soit atteinte –, soit par des *effets de massue* plus faciles à prévoir, comme lorsqu'un bulldozer rase une forêt. Si les changements d'états locaux (limités à un lac, un récif corallien) ou régionaux (patrons climatiques, dynamique des forêts) sont assez bien compris, les points de basculement à plus grandes échelles sont difficiles à identifier. Dans le passé, les éruptions volcaniques, de grandes météorites ou des modifications biogéochimiques rapides ont déclenché des points de basculements planétaires (extinctions massives, transition glaciaire-interglaciaire). En modifiant radicalement les écosystèmes et les climats locaux, les activités humaines précipitent aujourd'hui des changements d'état sans précédent qui pourraient faire basculer les conditions de vie sur Terre. Il est donc urgent d'identifier des indicateurs précoces de points de basculement.

Cascade du río Mindo – Équateur.



Anolis gemme – Équateur.

14. BOUCLE DE RÉTROACTION

« Ma thèse est que le fonctionnement physique de l'individu vivant et les opérations de certaines machines de communication les plus récentes sont exactement parallèles dans leurs efforts identiques pour contrôler l'entropie par l'intermédiaire de la rétroaction. »

Norbert Wiener, *Cybernétique et société*, 1954

S'il fut formalisé scientifiquement par Norbert Wiener, brillant mathématicien du Massachussetts Institute of Technology et père de la cybernétique, le principe de boucle de rétroaction a de tout temps fasciné les civilisations humaines. Présent dans la mythologie mésopotamienne, égyptienne, chinoise, grecque, nordique, indienne, aztèque et même australienne, l'*ouroboros* – représenté par un dragon qui mange sa propre queue – est sans doute l'une des représentations symboliques les plus anciennes et universelles de la notion de cycle et d'enchevêtrement indémaillable des causes et des conséquences. À partir des travaux de Wiener, le principe de boucle de rétroaction va « profondément impacter tous les champs scientifiques et technologiques du XX^{e} siècle, de la sociologie à l'informatique en passant par la psychologie et la biologie ». Il constitue de nos jours un concept fondamental de la science des systèmes écologiques, car il permet de décrire les interactions réciproques entre les différents éléments du système Terre. Une boucle de rétroaction entre deux éléments d'un système a lieu lorsqu'une action du premier vers le second est suivie d'une action du second vers le premier qui modifie la dynamique de celui-ci. La rétroaction est positive si une modification entraîne, dans la boucle, une intensification de la première modification, négative si elle entraîne son atténuation. Le terme de rétroaction positive (ou *retroactivation*) est très souvent employé dans le domaine du changement climatique. Certains facteurs comme l'augmentation des températures vont provoquer des effets sur le climat (par exemple la libération du méthane des pergélisols) qui à leur tour vont accentuer l'augmentation des températures. Autre exemple, dans les grandes forêts boréales du Canada, le scolyte du pin tue chaque année des millions d'hectares d'arbres, dont la décomposition génère du CO_2, augmentant le réchauffement climatique, qui lui-même étend l'aire de répartition du scolyte. Dans les deux cas, la boucle de rétroaction positive entre le climat et la biosphère enclenche un cycle qui se répète et qui accentue le phénomène.

L'*ouroboros*, le dragon qui mange sa propre queue, est l'une des représentations symboliques les plus anciennes et universelles de la notion de rétroaction.



15. RÉSILIENCE

« Les vents me sont moins
qu'à vous redoutables.
Je plie, et ne romps pas. »

Jean de La Fontaine, *Le chêne et le roseau, Fables*, 1668



Si, du temps de La Fontaine, la fable *Le chêne et le roseau* constituait une satire politique, critique d'un pouvoir royal arrogant face à un peuple soumis, elle peut de nos jours faire référence à deux stratégies opposées en termes de gestion des risques environnementaux. Comme l'écrit Sylvain Rode, chercheur en aménagement et urbanisme : « N'est-ce pas justement cette capacité à s'adapter à l'occurrence d'un aléa [stratégie du roseau] plutôt que de courir après le mirage de la maîtrise absolue de la nature par l'homme [stratégie du chêne] que requiert la situation actuelle d'incertitude liée au changement climatique ainsi que la nouvelle donne environnementale ? » La métaphore du roseau fait ainsi explicitement référence à la signification première du concept de résilience, qui désigne en sciences physiques la capacité d'un matériau à retrouver sa forme initiale après une déformation. Par analogie, l'écologue canadien Stanley Holling applique ce concept aux systèmes écologiques en montrant la capacité de certains écosystèmes à retourner à un état antérieur après une perturbation. De nombreux systèmes montrent en effet une capacité de résilience importante, depuis les hydrosystèmes qui tolèrent de faibles taux annuels de précipitations et retrouvent des bilans hydriques favorables les mois suivants jusqu'à certains coraux capables de réguler leurs taux de calcification afin de faire face à une acidification graduelle de l'eau, en passant par la résilience de certains stocks de poissons exploités. S'il n'existe pas encore de véritable théorie formalisée pour expliquer la résilience, certains facteurs tels que l'existence de boucles de rétroactions positives sont connus pour diminuer la résilience d'un système, alors que d'autres l'augmentent, comme la diversité ou l'apprentissage. Ainsi, le maintien de la diversité biologique et fonctionnelle d'un écosystème est généralement, mais pas toujours, garant d'une plus grande résilience de ses fonctions face aux perturbations anthropiques. Par ailleurs, face à des changements inéluctables, comme la montée du niveau marin, un réchauffement très fort des montagnes tropicales ou encore l'augmentation de la fréquence des événements climatiques extrêmes, il est dès à présent vital pour de nombreuses sociétés humaines de renforcer leur résilience grâce à l'apprentissage de nouvelles pratiques et attitudes, ou en puisant dans les savoirs traditionnels.

Rousserole turdoïde – France.

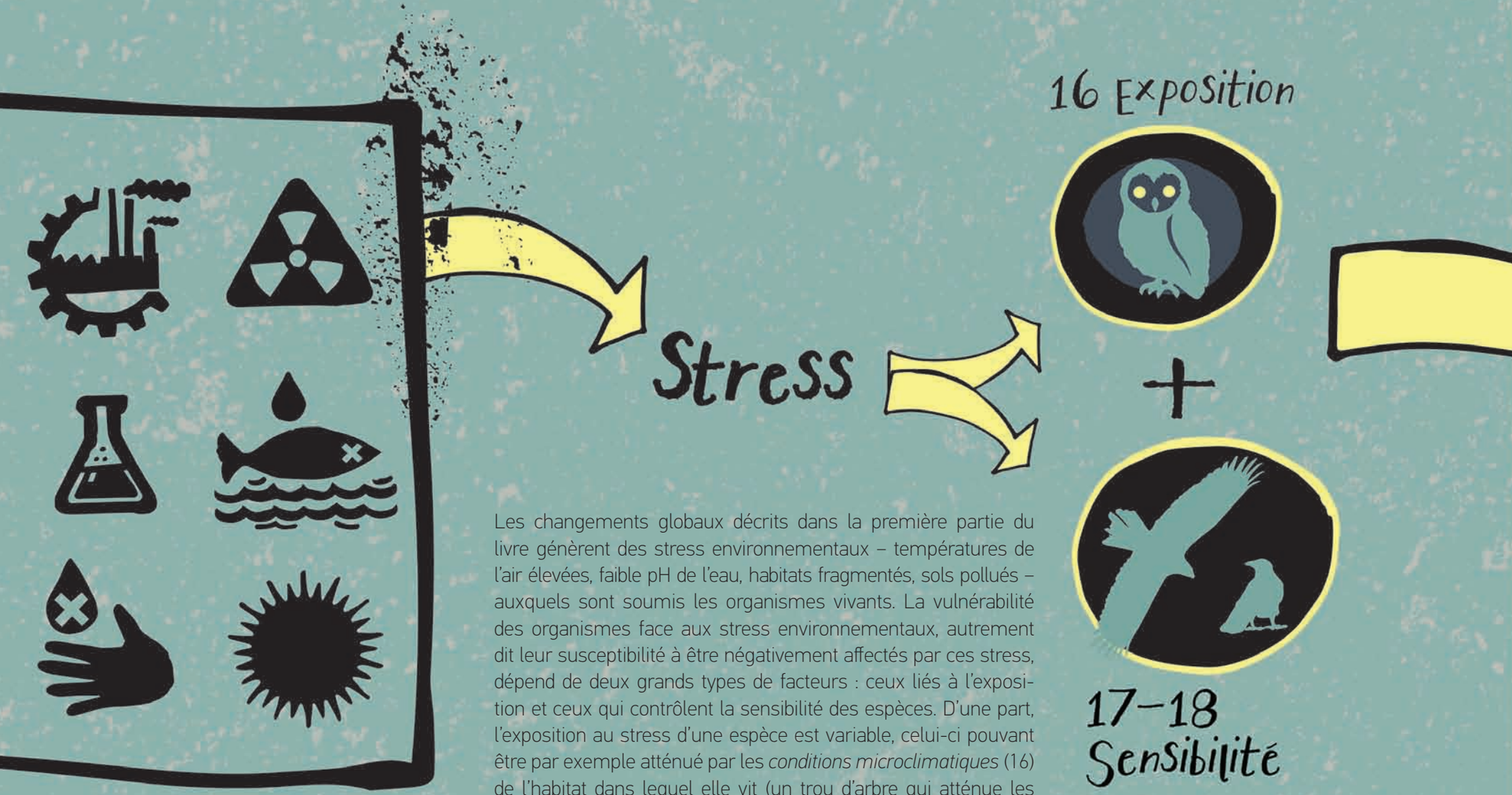
« Au cours de l'été et l'automne,
les tanuki eurent des problèmes sérieux.
À cause du recul de la forêt dû
aux constructions [...] et du mauvais temps
exceptionnel cette année-là,
la nourriture devint très dure à trouver. [...]
Les tanuki qui pouvaient se transformer
redoublèrent d'efforts pour trouver
de la nourriture chez les humains,
mais ce n'était jamais suffisant
pour les besoins des petits en croissance.
Les tanuki qui ne pouvaient pas
se transformer se voyaient obligés de hanter
les abords des fermes et des résidences
pour trouver de quoi manger.
Du coup, les tanuki les moins adroits
furent renversés par des voitures
ou bien capturés dans des pièges et tués. »

Isao Takahata, *Pompoko*, 1994

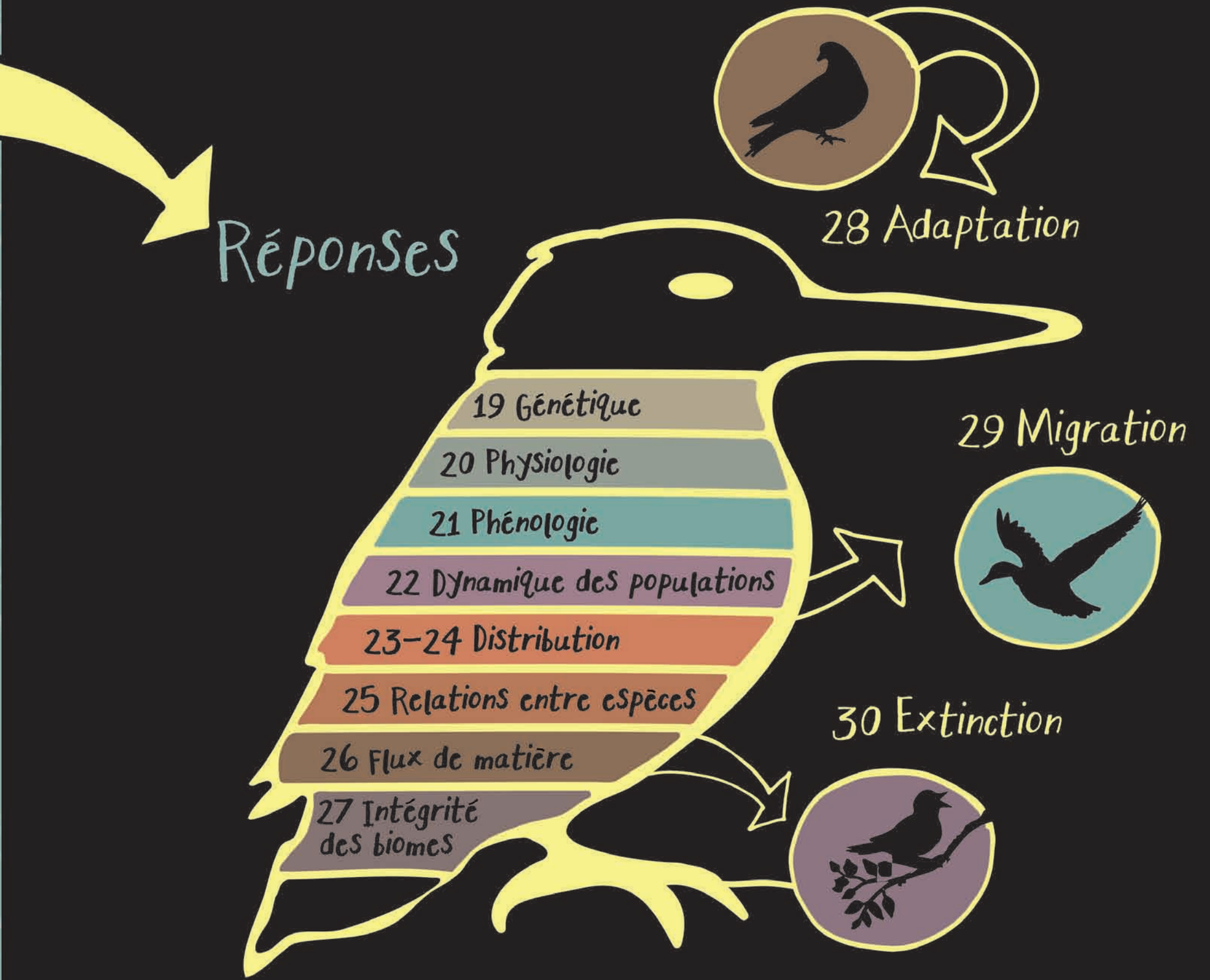


2

LES ESPÈCES FACE AUX CHANGEMENTS



Les changements globaux décrits dans la première partie du livre génèrent des stress environnementaux – températures de l'air élevées, faible pH de l'eau, habitats fragmentés, sols pollués – auxquels sont soumis les organismes vivants. La vulnérabilité des organismes face aux stress environnementaux, autrement dit leur susceptibilité à être négativement affectés par ces stress, dépend de deux grands types de facteurs : ceux liés à l'exposition et ceux qui contrôlent la sensibilité des espèces. D'une part, l'exposition au stress d'une espèce est variable, celui-ci pouvant être par exemple atténué par les *conditions microclimatiques* (16) de l'habitat dans lequel elle vit (un trou d'arbre qui atténue les variations de températures) ou au contraire amplifié. D'autre part, la sensibilité d'une espèce, d'une population ou d'un individu est déterminée par ses caractéristiques morphologiques, comportementales ou écologiques propres, ce que l'on nomme ses *traits de vie* (17). Une espèce particulièrement sensible aux changements environnementaux pourra être considérée comme une *espèce sentinelle* (18). C'est la combinaison de l'exposition et de la sensibilité aux stress qui détermine la réponse des organismes aux changements globaux, et leur répercussion à différents niveaux d'organisation du monde vivant : au niveau *génétique* (19), physiologique (*par* exemple *sensoriel* [20]), *phénologique* [21], de la *dynamique des populations* [22], de la distribution spatiale (*effet de lisière* [23], *piège écologique* [24]), des *interactions entre espèces* (25), des flux de matière (*bioamplification* [26]) ou encore de l'intégrité des biomes (*déplacement des aires de distribution* [27]). En fonction de la sévérité des répercussions qui ont lieu à tous ces niveaux d'organisation, la réponse d'une population ou d'une espèce soumises aux changements globaux se divise en trois grandes catégories : soit elle *s'adapte* (28) aux nouvelles conditions de son environnement, soit elle *migre* (29) pour rencontrer des conditions environnementales similaires à celles auxquelles elle était soumise avant le changement, soit elle ne peut ni s'adapter, ni migrer, et dans ce cas elle *s'éteint* (30), localement ou globalement.


Réponses
28 Adaptation
19 Génétique
20 Physiologie
21 Phénologie
22 Dynamique des populations
23–24 Distribution
25 Relations entre espèces
26 Flux de matière
27 Intégrité des biomes
29 Migration
30 Extinction

16. MICROCLIMAT

« Durant toute l'après-midi,
il a plu seulement au-dessus de ce stade
– notre préparateur en est témoin.
Il doit y avoir un microclimat ici. »

José Mourinho, Interview après le match Blackburn-Chelsea, 2005

Les humains ont de tout temps reconnu l'existence de microclimats dans leur environnement, que ce soit à l'échelle d'une vallée favorable à une culture, d'un massif forestier abrité du vent et retardant l'évaporation des pluies, d'une ville rafraîchie par des plans d'eau, d'un stade de football favorisant le jeu de l'équipe locale ou d'un pin parasol procurant de l'ombre. Le microclimat définit ainsi un ensemble de conditions climatiques différentes de celles du climat régional et limitées à une zone géographique plus ou moins grande. Cette notion revêt aujourd'hui une importance particulière dans la compréhension de la réponse des espèces vivantes au changement climatique. En effet, la plupart des organismes vivants ne sont pas soumis aux conditions climatiques mesurées au niveau des stations météorologiques (sur lesquelles se basent la plupart des modèles climatiques), mais à des conditions locales, allant du mètre au micron. Insectes creusant leurs galeries dans des feuilles, plantes alpines poussant au sein d'une topographie accidentée, mollusques et crustacés soumis au ressac des marées, oiseaux et mammifères nichant dans les cavités des arbres, les conditions environnementales vécues à l'échelle des organismes vivants – parfois tamponnées par rapport aux conditions régionales, parfois atteignant des valeurs extrêmes – influencent grandement leur comportement, leur survie et leur reproduction. À la différence de l'homme qui peut s'habiller ou recourir à l'air conditionné pour conserver une température tolérable, les autres espèces, notamment les ectothermes, ont pour la plupart des capacités de thermorégulation limitées. Avec un scénario d'augmentation probable de 4 °C de la température moyenne, environ 55 % des espèces végétales et 35 % des espèces animales auront perdu plus de la moitié de leur zone climatique de répartition d'ici à 2080. Afin de définir au mieux les risques pour les espèces, il est donc urgent de savoir non seulement comment l'augmentation des températures affectera les conditions microclimatiques, mais également quelles seront les capacités d'adaptation thermique des espèces.



Douroucoulis – Équateur.

Les cavités d'arbres offrent à ces singes des abris frais lorsque la température ambiante de la forêt tropicale est trop élevée.



17. TRAITS DE VIE DES ESPÈCES

« La taille importe peu.
La baleine est menacée alors que
la fourmi s'en sort très bien. »

William E. Vaughan (1915-1977)



Référence moderne à la légende de David et Goliath – ou peut-être à la théorie freudienne du développement psychosexuel –, cette phrase du journaliste américain Bill Vaughan trouve une résonance particulière en matière de conservation des espèces menacées. En effet, toutes les espèces ne sont pas « à armes égales » face aux menaces générées par les changements globaux. Leur sensibilité dépend notamment de leurs caractéristiques morphologiques, comportementales ou écologiques, c'est-à-dire de leurs « traits de vie ». Dans ce contexte, la taille importe beaucoup, en témoigne le lourd tribut payé par les grands mammifères à la fin du Quaternaire dans de nombreuses régions du monde, excepté le continent africain. Par exemple, en Australie et en Amérique du Sud, entre 74 % et 86 % de la mégafaune – incluant les mammifères de plus de 44 kg – a disparu peu de temps après l'arrivée des premiers colons, du fait de la chasse et des altérations de l'habitat. De nos jours, on observe dans plusieurs populations naturelles exposées à des stress environnementaux une tendance générale à la réduction de la taille corporelle moyenne des individus, depuis les poissons jusqu'aux ours polaires en passant par les bousiers. Avec les anomalies phénologiques et les modifications des aires de répartition, la réduction de la taille corporelle pourrait ainsi devenir la troisième réponse universelle des espèces au réchauffement



climatique. Plusieurs autres « traits de vie » (souvent corrélés entre eux) exposent davantage les populations naturelles à l'extinction globale ou locale face aux modifications de leur environnement. Parmi eux, on compte notamment le manque de mobilité d'une espèce, sa faible variabilité génétique, l'étroitesse de sa niche écologique, une position écologique en fin de chaîne alimentaire, une taille réduite d'aire de répartition ou encore de fortes interactions compétitrices avec d'autres espèces. Dans des environnements perturbés, la disparition des espèces combinant ces traits de vie laisse place à des assemblages d'espèces moins diversifiés, dominés par quelques généralistes présentant des traits de vie similaires.

Troglodyte familier (gauche) et engoulevent pauraqué (droite) – Équateur.



L'écologie des dragons

Dans un article publié dans la revue *Nature* en 1976, l'écologue australien Robert May présentait l'extinction des dragons comme une caricature des problèmes contemporains de conservation des espèces. Les dragons avaient une durée de vie très longue (entre 1 000 et 10 000 ans) ainsi qu'une faible densité de population (quelques dizaines d'individus dans toute l'Angleterre). Ils pouvaient dévorer jusqu'à 6 000 personnes par jour – de préférence des chevaliers –, ce qui engendrait des fluctuations de leurs populations liées à la disponibilité de leurs ressources alimentaires. Les dragons réunissaient ainsi tous les traits de vie d'une espèce dite de stratégie *K*, caractéristique de nombreuses espèces actuellement menacées d'extinction (grands mammifères et végétaux). Les dragons s'éteignirent à la fin du XVIII[e] siècle, probablement exterminés à la suite d'une exploitation intensive : leur tête contenait en effet des dracontites, pierres précieuses qui guérissaient l'épilepsie, prolongeaient la durée de vie et rendaient invulnérable.

Anolis Pinocchio – Équateur.

Décrit en 1953, présumé éteint puis redécouvert en 2005, ce lézard habite la forêt de nuages de Mindo et son aire de répartition est estimée à seulement une trentaine de kilomètres carrés.

À droite :
Milan des marais – Équateur.

Fait inhabituel chez les rapaces, le régime alimentaire du milan des marais est extrêmement spécialisé puisqu'il est essentiellement composé de gros escargots amphibies.



Espèces spécialistes

Particulièrement vulnérables aux facteurs d'extinction du fait de leurs fortes exigences écologiques (en termes par exemple de régime alimentaire ou d'habitat), les espèces spécialistes sont en déclin dans de nombreuses régions anthropisées. Le corollaire de ce déclin est que les espèces généralistes, écologiquement moins exigeantes et souvent en plus grand effectif, semblent bénéficier des changements globaux en colonisant de nouvelles aires de distribution. À l'échelle géologique, les espèces spécialistes présentent une durée de vie inférieure à des espèces plus généralistes et le remplacement des spécialistes par des généralistes pourrait être perçu comme un stade transitoire avant de retrouver un nouvel assemblage d'espèces nouvellement spécialisées. Encore faut-il que des habitats fonctionnels susceptibles d'accueillir ces nouvelles espèces puissent résister aux perturbations humaines.



18. ESPÈCES SENTINELLES

« … partout dans le monde les grenouilles disparaissent des étangs, des marécages, des ruisseaux et des forêts tropicales. Ces amphibiens en voie de disparition signalent-ils un danger invisible pour les hommes, tels des canaris dans une mine ? »

New York Times, "Frogs as canaries", 1990



Au XIXe siècle, les mineurs de charbon avaient pour habitude d'emmener un canari avec eux dans les galeries. Vingt fois plus sensibles que les humains aux émanations de monoxyde de carbone, ces oiseaux s'agitaient, cessaient de chanter, voire mourraient lorsqu'ils étaient exposés à ce gaz, servant ainsi de système d'alarme pour les mineurs. Dans son édition du 22 février 1990, le *New York Times* comparait les grenouilles aux canaris des mines, métaphore qui sera dès lors amplement reprise dans les médias et les publications scientifiques. Si le statut d'« espèces sentinelles de la planète » attribué aux amphibiens, notamment vis-à-vis des polluants chimiques, a été depuis mis en doute, il n'en demeure pas moins que les amphibiens subissent de nos jours des taux d'extinction 200 fois supérieurs aux taux historiques. Dans de nombreux écosystèmes du monde tels que les forêts de nuages ou les montagnes tropicales, les amphibiens sont des sentinelles très sensibles aux changements en cours tels que la perte d'habitats, la modification des conditions physiques des milieux (augmentation des UV, sécheresse) ou encore les épidémies de champignons cutanés. Plus généralement, le concept d'espèce sentinelle décrit des espèces dont l'état ou la dynamique des populations peuvent être utilisés comme indicateurs précoces du déclin d'autres espèces. Si les espèces sentinelles à l'échelle de la planète restent mal connues – à l'exception des espèces arctiques et alpines et des coraux–, nombreuses sont celles qui répondent à des perturbations plus locales de leur environnement, comme les lichens, indicateurs de la pollution de l'air, ou les larves d'insectes plécoptères, indicateurs de la qualité de l'eau. Plusieurs de ces espèces sont actuellement utilisées dans des dispositifs en laboratoire ou *in situ*, où elles sont soumises à la pollution environnementale afin d'identifier les dangers potentiels pour la santé des humains et des écosystèmes.

Dendrobate arlequin – Équateur.



Viscache des montagnes – Bolivie.

À droite :
Coléoptère Rutelinidae – Équateur.

Espèces arctiques et alpines

Les régions alpines – notamment sous les tropiques – et arctiques seront parmi les zones climatiques les plus sévèrement réduites à l'horizon de 2100. Elles sont par ailleurs affectées par d'autres perturbations d'origine anthropique telles que la modification des habitats et la pollution. De plus, de nombreuses espèces arctiques et alpines ont des aires de répartition réduites et des taux d'endémisme élevés qui les rendent plus fragiles face aux changements climatiques. En conséquence, ces espèces montrent actuellement des réductions d'aire de distribution plus fortes que celles observées dans d'autres endroits de la planète. Dans les zones de montagne, cette tendance devrait se poursuivre, notamment si l'élévation des températures est accompagnée de conditions plus sèches. Les espèces arctiques et alpines furent les premières à enregistrer des extinctions de populations du fait du récent réchauffement climatique, comme ce fut le cas pour de petits rongeurs américains, les pikas. Ces espèces constituent donc de véritables indicateurs précoces des effets biologiques du changement climatique.





Sipo vert – Équateur.



Chenille de papillon Saturniidé Ceratocampinae – Équateur.

Ectothermes tropicaux

Contrairement aux oiseaux ou aux mammifères, qui produisent leur propre température corporelle, les organismes ectothermes ont une température corporelle qui dépend des conditions extérieures. Arthropodes, reptiles ou amphibiens, une vaste majorité des espèces de la planète sont ectothermes, et la grande majorité des ectothermes vit sous les tropiques, où les conditions chaudes et humides favorisent leur développement et leur survie. Groupe très diversifié, les ectothermes tropicaux sont également les plus menacés par les changements climatiques pour deux raisons principales. Premièrement, ils sont très sensibles aux variations de température et brûlent beaucoup plus d'énergie quand il fait plus chaud – à des taux probablement insoutenables – du fait de l'augmentation de leur métabolisme. Deuxièmement, ils sont adaptés à des amplitudes thermiques moindres que leurs congénères des zones tempérées, et sortent donc facilement de ces limites vitales, même si les températures varient faiblement. Associées à d'autres stress tels que la pollution ou la perte d'habitat, les prédictions futures d'élévation des températures promettent un avenir particulièrement difficile pour les ectothermes tropicaux, à moins qu'ils n'arrivent à développer rapidement des stratégies d'adaptation.

19. FLUX GÉNÉTIQUE

« La Grande Muraille de Chine, construite pour détenir les tribus en maraude, empêche également le flux génétique entre plantes. Des membres de la même espèce poussant de chaque côté de la muraille sont génétiquement différents. »

Helen Pilcher, *Nature*, 2003

Il n'existe pas deux individus d'une même espèce qui aient exactement le même bagage génétique. De même, chaque population animale ou végétale possède une composition génétique qui lui est propre, façonnée par les mutations, la sélection naturelle ou le flux génétique avec d'autres populations. Cette diversité génétique permet aux populations de s'adapter à leur environnement changeant. Lorsque les effectifs d'une population sont réduits par l'exploitation ou la dégradation de l'habitat, sa composition génétique peut alors grandement fluctuer d'une génération à l'autre du fait du hasard, phénomène appelé *dérive génétique*. Cette dérive conduit généralement à une perte de diversité génétique au cours du temps qui peut cependant être compensée par des échanges d'individus, et donc de matériel génétique entre populations. Ainsi, si un ou deux immigrants arrivent à chaque génération dans une population isolée d'environ 100 individus, l'impact de la dérive génétique y est largement réduit. Si, face aux changements globaux, il peut s'avérer crucial d'assurer le flux génétique entre petites populations fragmentées, les échanges de gènes peuvent également être néfastes. Ainsi, une autre conséquence génétique de la fragmentation des habitats naturels est qu'elle peut augmenter l'intensité des contacts entre les populations sauvages et domestiques. Cela peut induire un processus de *pollution génétique*, c'est-à-dire une contamination par hybridation d'une population sauvage ou indigène par des populations importées par les humains ou domestiques. Ce type de pollution peut avoir des effets en matière de protection des populations, car les hybrides n'ont généralement pas le statut de protection accordé aux populations parfaitement naturelles. La notion de flux génétique est également importante pour d'autres aspects de la réponse des espèces aux changements globaux, comme dans le cas de la « contamination » de plantations non OGM par des plantations d'OGM voisines, ou pour les flux de gènes de virulence/résistance entre populations de parasites de la malaria. Le flux génétique est donc un processus à double tranchant pour les espèces vivant dans l'Anthropocène : utile pour contrer les effets de la dérive génétique, mais risqué en termes d'homogénéisation des populations et de transfert de gènes non désirables.

Chat forestier – France.

La majorité des populations de chats forestiers en Europe sont menacées par l'hybridation avec des populations de chats domestiques.



20. POLLUTION SENSORIELLE

« I amar prestar aen, han mathon ne nen,
han mathon ne chae a han noston ned ‘wilith. »

(« Le monde est changé. Je le sens dans les eaux.
Je le sens dans la terre. Je le sens dans l’air. »)

J. R. R. Tolkien, *Le Seigneur des anneaux*, 1954



La majorité des habitants de la planète vivent dans les villes, où ils sont soumis à des nuisances urbaines qui agressent leurs cinq sens : bruits de klaxon ou de décollage, éclairages nocturnes intrusifs, odeurs nauséabondes, vibrations du métro, goût de l'eau traitée. De même, de nombreuses espèces animales sont soumises dans leur environnement à des perturbations d'origine anthropique qui altèrent leur système sensoriel : audition des poissons perturbée par l'acidification des océans, perception visuelle des oiseaux et des insectes affectée par l'éclairage artificiel des zones urbaines, sens olfactif, gustatif et tactile des poissons perturbés par les polluants de l'eau, écholocation des cétacés affectée par les nuisances sonores des moteurs et des sonars. Pour les humains, la pollution sensorielle est généralement limitée aux zones urbaines et a des effets relativement bénins. En revanche, si la pollution sensorielle à laquelle sont soumis les animaux sauvages est très élevée en zone urbaine, elle est également – à l'image de l'empreinte humaine – largement répandue dans d'autres écosystèmes supposément plus naturels, depuis les océans acidifiés jusqu'aux forêts tropicales clairsemées. De plus, chez les animaux, la pollution sensorielle a de profondes conséquences sur la physiologie, le comportement, voire l'évolution de nombreuses espèces. Par exemple, la spéciation des poissons cichlidés du lac Victoria repose sur la reconnaissance visuelle des couleurs spécifiques de leurs partenaires sexuels. L'eutrophisation du lac a modifié les environnements lumineux du fait de l'augmentation de la turbidité de l'eau, perturbant la reconnaissance visuelle entre partenaires et affectant la sélection sexuelle. Ces altérations sensorielles peuvent également générer des effets boule de neige sur les interactions entre espèces et le fonctionnement des écosystèmes. Ainsi, dans certaines zones forestières naturelles, la pollution sonore générée par une industrie – localisée loin des zones habitées pour ne pas affecter les humains – peut chasser certaines espèces d'oiseaux peu tolérantes au bruit, avec des conséquences sur la dispersion des graines et la dynamique de la forêt. Indirectement, les plantes peuvent donc elles aussi être affectées par la pollution sensorielle.

Anatidé nageant sur un plan d'eau éclairé par les lumières de la ville – France.

Les éclairages publics peuvent affecter le comportement des oiseaux aquatiques en augmentant la durée des plages horaires pendant lesquelles ils peuvent repérer visuellement leur nourriture.



21. ANOMALIES PHÉNOLOGIQUES

« Les oiseaux sont des alarmes qui ne cessent de se déclencher. C'est l'hirondelle qui n'annonce plus le printemps parce qu'elle préfère passer l'hiver dans son étable, la cigogne qui s'est en partie sédentarisée, c'est l'échasse blanche qui s'implante au nord de la Loire et le héron garde-bœuf, pensionnaire de Camargue, qui batifole aujourd'hui en Baie de Somme. »

Laurent Carpentier, magazine *Le Monde 2*, 2008

De nombreux événements biologiques tels que le bourgeonnement et la floraison des plantes ou la migration et la reproduction des oiseaux dépendent des variations saisonnières du climat et sont donc susceptibles d'être perturbés par le changement climatique. L'altération de la date d'apparition de ces processus – la phénologie – est de loin la réponse biologique au réchauffement climatique la mieux documentée. Cela est en partie lié aux observations naturalistes effectuées de longue date par les agriculteurs – dont le rythme des cultures est étroitement lié aux saisons – et par les habitants des régions septentrionales qui attendaient, après un long hiver, les premiers signes du printemps – les premières hirondelles ou floraisons de jonquilles. Ce sont ainsi des données de dates



Argus – France.

De nombreuses espèces de papillons dans l'hémisphère Nord apparaissent plus tôt dans la saison et ont des périodes de vol plus longues.

Hirondelle rustique – France (à gauche).

La date de retour de migration de ces oiseaux est étroitement liée aux conditions climatiques, les printemps chauds étant propices à des arrivées plus précoces et vice-versa.
(Image réalisée en collaboration avec Philippe Degaffet)

de floraison du cerisier du Japon depuis le XV[e] siècle qui ont permis de mettre en évidence une avancée significative et constante de ces dates depuis 1952. Globalement, on observe une avancée de la plupart des événements biologiques printaniers (débourrage, floraison, sortie d'hibernation, migration et reproduction) et un retard de ceux ayant lieu à l'automne (tombée des feuilles, fructification, migrations) pour la majorité des groupes taxonomiques terrestres et aquatiques étudiés. Ce modèle n'est cependant pas universel pour plusieurs raisons : le réchauffement des températures n'est pas homogène à la surface du globe, d'autres variables climatiques que le réchauffement contrôlent la phénologie des espèces et d'autres facteurs que le climat – comme la disponibilité des ressources alimentaires – peuvent également avoir leur importance. Ainsi, on observe des retards de l'arrivée d'oiseaux migrateurs en Europe liés à des sécheresses en Afrique et des retards de la sortie d'hibernation d'écureuils terrestres dus à des neiges abondantes en fin d'année qui retardent la fonte au printemps. Lorsqu'elles impliquent des espèces répandues sur de grandes surfaces, comme dans le cas des forêts, ces anomalies phénologiques induites par le changement climatique peuvent en retour affecter le climat. Par exemple, en l'absence de stress hydrique ou thermique, le rallongement de la période d'activité des plantes pourrait augmenter la capture de CO_2 atmosphérique et atténuer ainsi le réchauffement climatique.

22. PETITES POPULATIONS

« … dans bien des cas, il faut qu'une même espèce comporte un grand nombre d'individus relativement au nombre de ses ennemis, pour pouvoir se perpétuer. »

Charles Darwin, *De l'origine des espèces*, 1859

Les petites populations ne sont pas simplement des modèles réduits de grandes populations. Lorsqu'une population devient petite, un certain nombre de processus démographiques, génétiques ou comportementaux se trouvent perturbés. Un grand nombre d'individus permet d'abord aux populations de mieux résister aux fluctuations démographiques (induites par exemple par l'exploitation des espèces par l'homme) ou aux fluctuations environnementales extrêmes (sécheresse, feux, hiver rigoureux). Il permet ensuite d'éviter les croisements consanguins qui affectent la survie ou la fécondité des individus et d'éviter la perte de diversité génétique, diversité nécessaire à l'adaptation à d'éventuels changements environnementaux. Lorsque la détérioration génétique des populations de petite taille est trop importante, elle affecte la fécondité et la population se met à décliner. Enfin, la constitution de groupes suffisamment denses est un moyen de préserver les comportements coopératifs (chasser plus efficacement ou échapper aux prédateurs) et d'assurer les interactions entre individus, nécessaires à la reproduction. Lorsque les populations sont petites et dispersées, il peut par exemple devenir difficile pour un individu de rentrer en contact avec un partenaire sexuel potentiel. Cette limitation « par le partenaire » peut également s'appliquer aux plantes, dont les visites par les pollinisateurs peuvent être moins fréquentes lorsque la distance entre les plantes augmente. Cette corrélation positive entre la densité d'une population et son taux de croissance, appelée « effet Allee », concerne de nombreuses espèces (sociales ou non) et se manifeste à des seuils d'effectifs variables. Les humains peuvent également créer artificiellement un effet Allee : si l'on attribue de la valeur à la rareté d'une espèce, son exploitation est toujours rentable même à de très faibles effectifs, ce qui peut conduire l'espèce à l'extinction. Les problèmes génétiques et démographiques peuvent s'amplifier mutuellement dans une boucle de rétroaction positive et la population entre dans un vortex d'extinction : à mesure que la taille décroît, les problèmes génétiques deviennent plus aigus, ce qui fait diminuer la taille de population encore plus rapidement et amplifie les problèmes liés à l'incertitude démographique.





Ducs à aigrettes – Équateur.
Alors qu'ils sont restreints aux forêts non perturbées d'Amérique latine, la survie des ducs à aigrettes dans les habitats favorables peut être menacée par leur faible densité qui diminue la probabilité de rencontre d'un partenaire sexuel.





23. EFFETS DE LISIÈRE

« Pour surcroît de bonheur, la lisière du bois était bordée d'une infinité de noisetiers, de mûriers et de framboisiers. »

Comtesse de Genlis, *Contes moraux*, 1806

Si, à l'instar de la comtesse de Genlis, nous percevons généralement les lisières comme des lieux naturels agréables, où il fait bon cueillir quelques fruits ou observer un animal sortir du bois, leur augmentation croissante du fait de la fragmentation des habitats représente un problème majeur pour la survie de nombreuses populations animales et végétales. En effet, lorsqu'une grande surface continue d'habitats est à la fois réduite et divisée en plusieurs fragments, les bordures de chaque fragment sont soumises à des modifications des conditions environnementales par rapport à l'intérieur de l'habitat, appelées « effets de lisière ». Dans le cas des forêts, ces effets engendrent une augmentation de l'intensité lumineuse, de la température et du vent ainsi qu'une diminution de l'humidité. En fonction de la nature de la perturbation et de l'âge des bordures, ces effets peuvent être ressentis entre 10 m et 2-3 km à l'intérieur de la forêt, et augmenter la vulnérabilité des fragments aux feux, aux tempêtes, à la colonisation des espèces exotiques, aux espèces généralistes. Les effets de lisière ont des conséquences particulièrement néfastes dans les forêts tropicales car, en premier lieu, ils créent des conditions environnementales drastiquement différentes de celles de la forêt, caractérisées par une structure complexe unique et un microclimat humide et sombre auxquels sont adaptées un grand nombre d'espèces. En second lieu, ces forêts sont souvent rapidement colonisées par les populations humaines du fait de la pression démographique et des activités d'exploitation des ressources non contrôlées, notamment dans les pays en voie de développement où se trouvent la majorité des forêts tropicales. En Amazonie brésilienne, jusqu'à 50 000 km de nouvelles bordures de forêt sont créées chaque année. Si les lisières d'habitats sont une composante omniprésente des paysages fragmentés, leurs effets sont cependant extrêmement variables d'une localité à l'autre. Ainsi, les lisières peuvent avoir des effets positifs tels que des augmentations locales de la diversité en espèces ou un rôle de couloirs à graines, en promouvant leur dispersion par les mammifères.

Chevreuil – France.

24. PIÈGE ÉCOLOGIQUE

« Personne, voyant le mal, ne le choisit, mais attiré par l'appât d'un bien vers un mal plus grand que celui-ci, l'on est pris au piège. »

Épicure (341 - 270 av. J.-C.), *Sentences vaticanes*



Busards cendrés juvéniles au nid – France.
Photographie réalisée dans le cadre d'une opération de protection.



Busard cendré femelle – France.

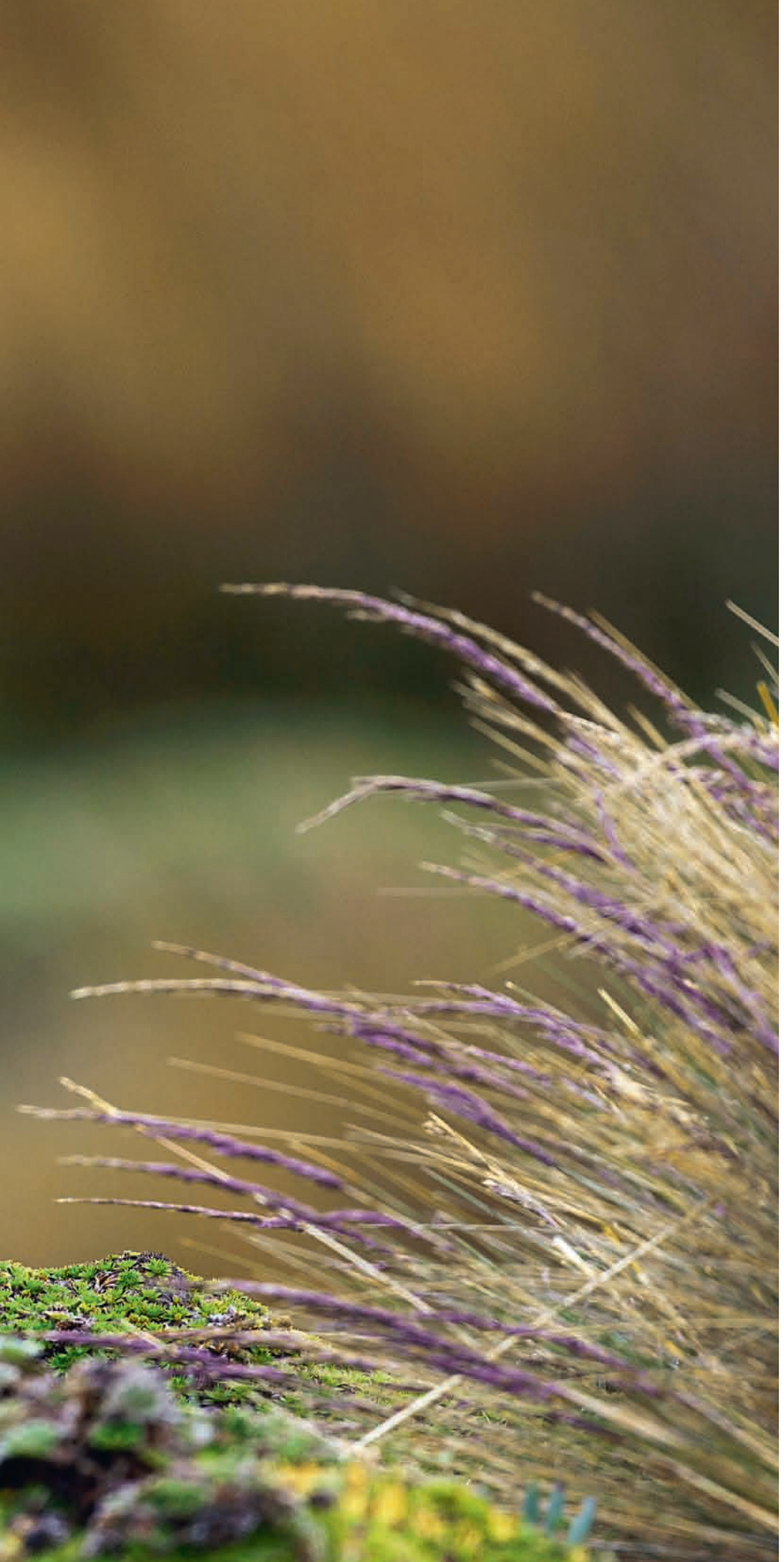
Si Épicure avait depuis longtemps averti les êtres humains des nombreuses circonstances où ils doivent faire face à une situation combinant attraction et péril, il ne savait sans doute pas que sa maxime pourrait aussi s'appliquer aux animaux dans leur environnement. Éphémères attirés par la lumière polarisée des routes sur lesquelles ils pondent, thons se concentrant en mer sous des objets flottants qui modifient leurs migrations et habitudes alimentaires, busards cendrés élevant leurs jeunes dans des champs de blé destinés à être fauchés ou encore ours grizzlis attirés par les habitats agricoles où ils trouvent des proies (bétail) mais rentrent en conflit avec les humains, les « espèces piégées » sont diverses et leur liste s'allonge continuellement. La notion de *piège écologique* désigne des situations dans lesquelles une modification anthropique de l'environnement conduit certains organismes à être attirés et à s'installer dans des habitats qui affectent négativement leur taux de survie et/ou de fécondité. L'organisme en vient à adopter une préférence *contrainte* pour un habitat inadéquat, rendu faussement et artificiellement attrayant, et cela y compris pour des modifications anthropiques limitées. Au-delà des exemples frappants cités ci-dessus, les pièges écologiques sont souvent discrets et difficiles à mettre en évidence. Une étude récente a par exemple montré que les faucons crécerelles vivant près de routes à fort trafic présentaient des taux élevés d'hormones de stress qui favorisent l'abandon des nids. La présence d'espèces dans des habitats dominés par les humains ne signifie donc pas nécessairement que celles-ci sont tolérantes aux stress rencontrés dans leur environnement. Dans un monde chaque jour plus anthropisé, l'identification et le « désamorçage » des pièges écologiques devient une préoccupation croissante pour la conservation des espèces. D'autant plus que le concept de piège écologique peut également s'appliquer à des paysages naturels entiers, comme les forêts tropicales ou les grandes prairies à graminées, qui peuvent dériver vers des états dégradés du fait de perturbations humaines.

25. ALTÉRATION DES INTERACTIONS ÉCOLOGIQUES

« Mieux vaut tenir un lapin que poursuivre un lièvre. »

Proverbe occitan





Toutes les espèces vivent en interaction avec d'autres espèces, que ce soit les prédateurs avec leurs proies, les parasites avec leurs hôtes ou les pollinisateurs avec leurs plantes. Dans le cas des interactions trophiques, les écologues savent depuis longtemps que la modification de l'abondance et de la répartition des consommateurs clés des chaînes alimentaires peut avoir d'importantes répercussions en cascade sur l'ensemble des espèces qui composent ces chaînes. Par exemple, l'exploitation par les humains des prédateurs en bout de chaîne alimentaire a généralement des effets indirects importants sur l'ensemble des autres espèces constituant le réseau trophique. Les traitements au DDT dans les années 1950 ont décimé les populations de coléoptères, engendrant des modifications du régime alimentaire des oiseaux insectivores. De façon plus générale, les espèces présentes au sein d'un réseau d'interactions peuvent réagir différemment au changement de leur environnement, ce qui conduit à une altération plus au moins profonde des réseaux d'interactions écologiques. Dans le contexte du réchauffement climatique, l'élévation des températures peut affecter la durée des cycles de vie des espèces et générer des désynchronisations dans les chaînes alimentaires. Un exemple parmi les plus classiques est celui des décalages phénologiques entre proies et prédateurs, comme celui entre le pic d'abondance des chenilles et le pic des besoins en nourriture des jeunes mésanges. Les effets des changements globaux sur les interactions écologiques ont également été documentés dans le contexte de la compétition entre plantes, du mutualisme entre les pollinisateurs et leurs plantes, ou encore des interactions plantes-herbivores avec des effets potentiels sur les futures aires de distribution des espèces et le fonctionnement des écosystèmes. Les conséquences de ces désynchronisations sont toutefois complexes. Si l'on reprend l'exemple des jeunes mésanges charbonnières, les effets négatifs de la désynchronisation entre une date avancée de nidification et le pic d'abondance des chenilles sont compensés par une compétition moins grande entre les mésanges. Ils n'engendrent donc pas de déclin des populations.

Le réchauffement climatique peut générer des décalages phénologiques entre proies et prédateurs.

Buse tricolore ayant capturé un lapin tapiti – Équateur.



26. BIOAMPLIFICATION

« Il est paradoxal de constater que l'homme pourrait décider de son propre avenir par quelque chose en apparence aussi anodin que le choix d'utiliser ou non un répulsif à insectes. »

Rachel Carlson, *Printemps silencieux*, 1962



En 1962, la biologiste américaine Rachel Carlson fut probablement la première scientifique à porter l'attention du grand public sur le processus de bioamplification, en décrivant la façon dont le DDT et d'autres pesticides à base de chlore se concentrent au fur et à mesure qu'ils progressent le long de la chaîne alimentaire. Elle établissait ainsi de façon claire le lien entre la présence de contaminants dans l'environnement, même en quantités infimes, et les effets sur la santé des espèces en amont dans la chaîne alimentaire, y compris les humains. Le facteur de bioamplification d'un polluant est défini comme le rapport entre la concentration du polluant dans un organisme et celle de ses proies. Ce coefficient est très variable selon les polluants et les espèces, il est généralement compris entre 2 et 6,5 chez les espèces aquatiques. De nombreuses substances figurent parmi les candidats potentiels à la bioamplification, et en particulier les polluants organiques qui s'accumulent dans les graisses tels que les composés chlorés (PCB, DDT), les éléments traces métalliques (mercure, cadmium), voire certains hydrocarbures, détergents ou produits pharmaceutiques. Nombre de ces composés sont hautement toxiques, parfois cancérigènes, avec des conséquences néfastes sur plusieurs fonctions physiologiques clés des espèces : perturbation de la reproduction des rapaces par les PCB, impact des métaux lourds sur la respiration des poissons, augmentation des taux d'hormones de stress chez les baleines bleues soumises à des polluants métalliques et organiques tout au long de leur vie. Dans les régions arctiques, éloignées de toute source de contamination, des prédateurs comme les ours polaires sont parmi les espèces les plus contaminées de la planète. Dans le nord du Québec, les femmes Inuit ont dans leur lait des taux de PCB jusqu'à 10 fois supérieurs à ceux mesurés chez des femmes vivant plus au sud. Cela s'explique par un régime alimentaire largement basé sur la consommation de produits animaux riches en lipides comme la viande de phoque. Par ailleurs, la dynamique de ces polluants peut interagir avec d'autres processus liés aux changements globaux. Ainsi, le méthylmercure, neurotoxine naturellement produite dans les océans, en particulier dans l'océan Arctique, voit son cycle de production et de dégradation influencé par la fonte de la banquise.

Bruant des roseaux – France.

Les oiseaux insectivores peuvent s'intoxiquer en consommant des insectes qui se sont alimentés sur des plantes traitées par des produits chimiques.

27. DÉPLACEMENT DES AIRES DE DISTRIBUTION

« Des moustiques porteurs de maladies tropicales viendront piquer les banquiers à Wall Street. »

Jean-Pascal van Ypersele, 2002, *Le Soir*

Conséquence des transports volontaires ou non d'espèces et du changement climatique, la modification des aires de distribution revêt une importance particulière pour les humains, notamment dans le cas des insectes vecteurs de maladies et des ravageurs de cultures. Si de nombreux vecteurs possèdent une aire de répartition limitée aux climats tropicaux, les terres soumises à un climat tropical se sont depuis 1980 étendues de plus de 2° de latitude, vers le nord et le sud, représentant 22 millions de km^2 supplémentaires. En conséquence, près de la moitié de la population mondiale habite actuellement dans des zones présentant des risques de maladies transmises par les moustiques, comme la dengue ou le paludisme. Si les tendances du réchauffement climatique se poursuivent au rythme actuel, certains moustiques porteurs de maladies tropicales et subtropicales pourraient coloniser le nord de l'Europe d'ici 2030. En ce qui concerne les ravageurs et pathogènes de cultures, leurs aires de distribution se déplacent vers les pôles depuis 1960 à une vitesse moyenne de 2,7 km par an, certains groupes comme les champignons se déplaçant à près de 7 km par an. En dehors des moustiques et autres insectes comme les doryphores, le déplacement des aires de répartition vers des latitudes, des altitudes et des profondeurs plus élevées est aujourd'hui documenté pour un grand nombre d'espèces terrestres et marines. En moyenne, les espèces marines se déplacent à la vitesse de 72 km par décennie vers les pôles (470 km pour le phytoplancton et 277 km pour les poissons osseux) tandis que la moyenne du déplacement latitudinal des espèces terrestres est d'environ 6 km. Ces différences pourraient s'expliquer par les effets amplificateurs de la baisse des teneurs en oxygène et l'acidification des océans. Le modèle de migration « vers les pôles, les hautes altitudes et les profondeurs » n'est toutefois pas général car de nombreux facteurs autres que l'augmentation des températures, notamment ceux intrinsèques aux espèces (capacité de colonisation et d'adaptation) ou à l'environnement local (interaction avec d'autres espèces, climats locaux, précipitations) affectent également la vitesse, la direction et le succès de la migration des espèces.

Moustique commun – France.

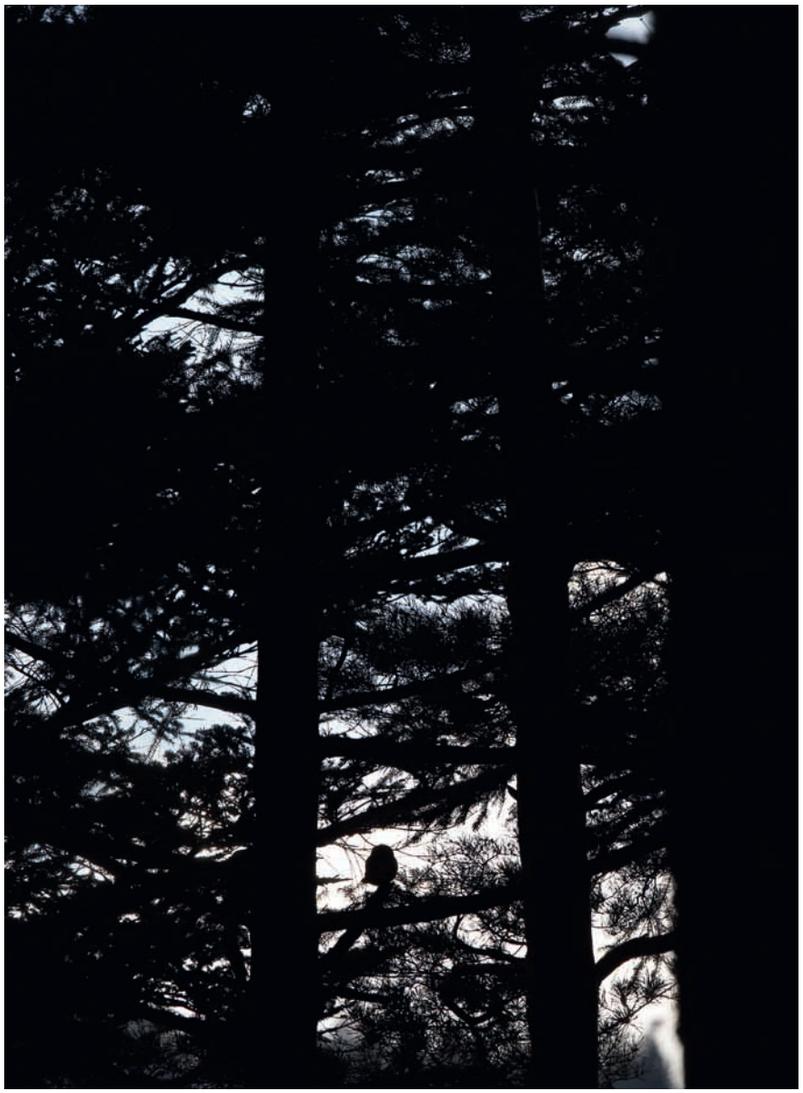


Près de la moitié de la population mondiale habite actuellement dans des zones présentant des risques de maladies transmises par les moustiques.



Déplacements altitudinaux

Parmi les déplacements d'aires de distribution, les déplacements altitudinaux en réponse au réchauffement global ont été documentés chez des groupes aussi divers que les plantes en Europe, les petits mammifères en Californie ou les papillons de nuit à Bornéo avec des vitesses de déplacement atteignant plus de 50 m par décennie. Ce type de déplacement engendre pour les espèces des contraintes différentes, souvent plus rudes que celles rencontrées par les espèces qui se déplacent vers les pôles. En effet, les espèces qui se déplacent en altitude se retrouvent « coincées » dans une bande plus ou moins étroite bornée en amont comme en aval. À l'amont, les facteurs liés à la haute altitude, comme les fortes radiations UV, le manque d'oxygène ou tout simplement la réduction de l'habitat du fait de la forme conique des montagnes, limitent la survie des espèces. À l'aval, la compétition avec les autres espèces généralistes qui colonisent des niches thermiques plus favorables pousse les espèces à continuer à monter. Isolées dans des aires réduites, les populations d'espèces montagnardes sont alors particulièrement sensibles aux processus d'extinction.



Chevêchette d'Europe – France.

En France, cette chouette montagnarde d'à peine 20 cm niche dans les Alpes, le Jura et les Vosges, généralement au-dessus de 1 000 m d'altitude.

À gauche :
Chamois des Abruzzes – Italie.

28. ADAPTATION

« Les espèces qui survivent ne sont pas les espèces les plus fortes ni les plus intelligentes, mais celles qui s'adaptent le mieux aux changements. »

Charles Darwin



Moineau domestique – France.



Renards roux – France.

Le devenir de nombreuses espèces dépendra de leur capacité à survivre dans des habitats modifiés par les êtres humains. Face aux changements environnementaux, deux principaux types d'adaptation, souvent complémentaires, sont possibles : l'adaptation génétique et la plasticité. L'adaptation génétique correspond à une modification de la composition génétique d'une population, les gènes les plus performants dans un milieu donné étant retenus par sélection naturelle. La plasticité mesure quant à elle la « capacité » d'un individu à produire différents caractères observables (forme du corps, comportement) en fonction de l'environnement. Par exemple, dans le cas de la précocité printanière, la sélection naturelle produira des populations programmées génétiquement à se reproduire tôt, alors que la plasticité individuelle permettra à chaque individu d'utiliser divers indices pour ajuster le début de sa reproduction aux conditions climatiques. Dans des situations de changements rapides, cette plasticité peut ne pas être optimale, et s'avérer délétère (mal-adaptation). S'il est souvent difficile pour les scientifiques de distinguer les deux types d'adaptation dans la réponse des organismes aux changements globaux, il semble que la plasticité prédomine le plus souvent, comme dans le cas de l'avancement des dates de nidification chez les oiseaux, de l'augmentation de la taille des marmottes qui sortent plus précocement de leur terrier au printemps ou de la plasticité comportementale des espèces vivant dans les environnements urbains. Toutefois, des expérimentations sur des plantes exposées à différentes conditions environnementales suggèrent que l'adaptation génétique peut aussi être un mécanisme majeur de réponse aux changements globaux. Si la plasticité est par nature une réponse rapide, l'adaptation génétique peut également l'être chez un grand nombre d'espèces, indiquant que ces mécanismes pourraient jouer un rôle important, non seulement pour contrer les effets des changements globaux accélérés mais également pour profiter d'opportunités écologiques induites par ces changements, telles que des températures favorables ou de nouveaux habitats. Signalons enfin que l'hérédité dite *épigénétique*, c'est-à-dire les caractères que des parents transmettent à leurs descendants au-delà de leurs gènes, pourrait également jouer un rôle dans l'adaptation des espèces. Par exemple, les juvéniles de certains poissons résistent mieux à une augmentation de température et d'acidité de l'eau si leurs parents ont eux-mêmes fait face à des variations similaires.



Grues cendrées – France.

29. MIGRATION

« Quel que soit le moment
auquel vous lisez ces mots,
dans la nuit ou dans la journée,
il y a, haut dans le ciel,
des oiseaux qui migrent. »

Scott Weidensaul, *Living on the Wind*, 2000

Chaque population d'une espèce donnée peut tolérer une gamme limitée de conditions climatiques, ce que l'on nomme *l'enveloppe climatique*. Les variations naturelles des conditions climatiques lors des cycles saisonniers (hiver *vs* été ou saison sèche *vs* saison humide) et leurs conséquences en termes de disponibilité des ressources alimentaires poussent de nombreuses espèces animales, notamment les oiseaux, à effectuer des migrations sur des distances plus ou moins longues afin de rester à l'intérieur de leur enveloppe climatique. Plus récemment, le terme de migration a trouvé une acception particulière dans le contexte de la réponse des espèces au changement climatique, qui déplace les enveloppes climatiques des espèces à la surface du globe. Pour



Grues cendrées – France.

survivre, de nombreuses espèces sont/seront donc obligées de migrer, ce qui implique une modification de leur aire de répartition. Si la migration des espèces semble s'être accélérée lors de la dernière décennie, leur capacité à suivre le déplacement rapide des enveloppes climatiques n'est pas assurée. En particulier, la migration de certaines espèces de plantes risque d'être en retard par rapport à la vitesse actuelle et future du déplacement des enveloppes climatiques. Même des groupes d'animaux mobiles comme les papillons et les oiseaux semblent avoir du mal à suivre le rythme de déplacement vers le nord des enveloppes climatiques. En Europe par exemple, entre 1990 et 2008, les communautés d'oiseaux et de papillons se sont déplacées en moyenne de 37 km et 114 km vers le nord, alors que sur la même période leur enveloppe climatique s'est déplacée de 249 km. Ces espèces réagissent certes au changement climatique, mais pas assez rapidement pour s'accommoder au climat plus chaud ou plus sec. Elles cumulent ainsi une *dette climatique* dont les effets écologiques sont inconnus à long terme. La capacité des espèces à migrer est une information clé en termes de conservation, car seulement 8 % des aires protégées de la surface du globe pourraient avoir une enveloppe climatique stable pendant les 100 prochaines années. Si ces conditions environnementales deviennent trop stressantes pour les espèces vivant dans ces zones, celles-ci devront migrer vers de nouveaux refuges.



Refuges

Les refuges sont des habitats qui maintiennent sur le long terme des conditions environnementales favorables à certaines espèces n'ayant plus la possibilité de vivre dans les zones environnantes. Selon les scénarios, les refuges sont donc des habitats vers lesquels les espèces peuvent migrer, dans lesquels elles peuvent subsister, ou à partir desquels elles peuvent étendre leur aire de distribution. Il existe un intérêt croissant dans l'identification de futurs refuges climatiques vers lesquels les espèces pourront migrer afin de s'y établir. La cartographie mondiale de ces refuges est actuellement en cours dans des milieux aussi variés que les récifs coralliens, les rivières, l'Arctique ou les forêts de montagne.



Forêt de montagne – Équateur.

À gauche :
Forêt de nuages – Équateur.

Dans les régions tropicales,
les environnements frais d'altitude
devraient servir de refuges importants
pour les espèces animales
et végétales dans un contexte
de changement climatique.

30. EXTINCTION

« Chaque espèce vivante représente une unique voie vers la réussite, construite pendant des millions d'années. Ce que nous perdons lorsqu'une espèce s'éteint ne pourra jamais être remplacé. »

Georgina Mace, Rapport UICN, 2012

Si les espèces ne parviennent ni à s'adapter à un nouvel environnement dégradé, ni à migrer vers de nouveaux habitats favorables, elles sont vouées à l'extinction. La majorité des extinctions reportées à ce jour résulte de la surexploitation des populations, comme c'est le cas de deux espèces de corégones, poissons des profondeurs endémiques du lac Léman, éteintes entre les années 1920 et 1950. Les espèces éteintes et en danger d'extinction sont relativement bien connues pour les mammifères et les oiseaux, mais restent peu documentées pour le reste de la diversité du monde vivant, soit 99,9 % des espèces. En effet, pour la majorité des espèces vivantes, il n'existe aucune donnée sur leur statut démographique actuel et les tendances futures, notamment pour les invertébrés et les espèces marines. Actuellement, des quelque 1,5 million d'espèces connues, environ 70 000 ont été examinées par l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN), qui classe les espèces en fonction de leur statut de conservation. Autre limite aux estimations d'extinction avérées et potentielles, une large proportion des espèces sur Terre, notamment d'invertébrés, et plus particulièrement les espèces de petite taille, n'ont pas encore été décrites. Ces espèces ayant des aires de distribution réduites, elles sont particulièrement sensibles à l'extinction. En conséquence, certaines espèces s'éteignent – en raison notamment de la destruction de leur habitat – avant même d'être décrites. Une autre limite dans l'estimation des espèces menacées est liée aux co-extinctions d'espèces : l'extinction d'une première espèce (par exemple une plante à fleur) entraîne celle d'une autre espèce (par exemple son pollinisateur) par une chaîne d'extinctions. Les espèces écologiquement spécialisées ou mutualistes, engagées dans une relation à bénéfices réciproques avec une autre espèce, sont les plus sensibles à ce type d'extinction qui pourrait augmenter de 40 % la liste des espèces menacées. Du fait de l'ampleur des impacts anthropiques sur la nature, non seulement certaines espèces mais aussi des écosystèmes entiers seraient amenés à disparaître, justifiant la constitution d'une liste rouge des écosystèmes menacés.



Grèbe castagneux – France.



Papillon-feuille saturniidé – Équateur.

Extinctions occultes

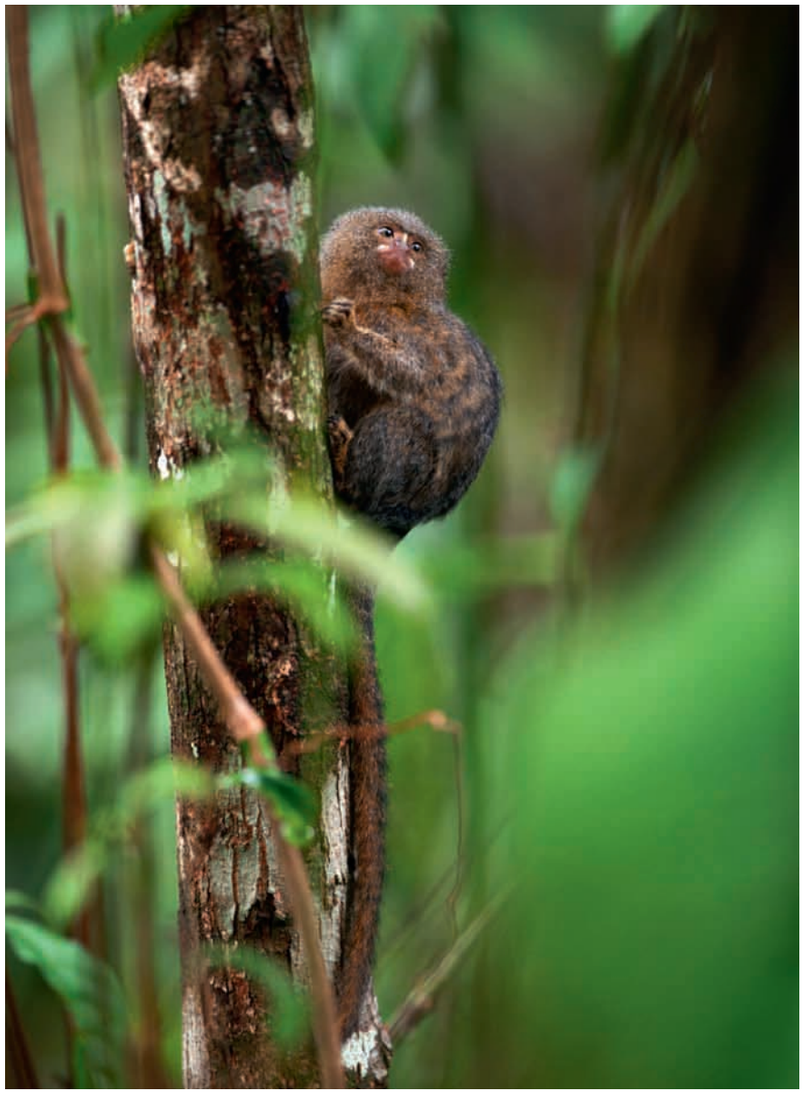
Le concept d'extinction recouvre plusieurs nuances et sa signification peut changer selon le contexte. D'après la définition de l'UICN, une espèce est considérée comme éteinte lorsqu'il est certain que le dernier individu est mort. Toutefois, un premier degré d'extinction est l'extinction locale d'une espèce, lorsque l'ensemble des individus d'une population locale cesse de vivre. Lorsque certaines populations d'une espèce s'éteignent, la diversité génétique totale de l'espèce diminue. Cette perte de potentiel évolutif et adaptatif de l'espèce est appelée extinction occulte *(cryptic extinction)*.



Crapaud perlé – Équateur.



Longicorne arlequin – Équateur.



Ouistiti pygmé – Équateur.

Dette d'extinction

Le concept de « dette d'extinction » prédit les extinctions futures d'espèces causées par des activités humaines présentes ou passées. Ces prédictions anticipent le fait que de nombreuses espèces et populations répondent avec une certaine inertie aux perturbations de l'environnement comme la fragmentation de l'habitat, le changement climatique et l'introduction d'espèces invasives. Il existe un délai entre le moment de la perturbation environnementale et celui de l'extinction. En Europe par exemple, la proportion d'espèces présentant un risque moyen à élevé d'extinction est mieux corrélée aux indicateurs d'impact anthropique du début et de la moitié du XX^{e} siècle qu'à ceux de sa fin. En Amazonie, bien que le nombre d'extinctions locales d'espèces de vertébrés forestiers ait été jusqu'à présent relativement faible (environ 1 %), la dette d'extinction pourrait concerner 80 % d'espèces supplémentaires au regard des destructions d'habitat qui ont déjà eu lieu. Dans certaines circonstances, cette dette pourrait être équilibrée par un crédit d'extinction, comme dans le cas d'espèces migrant vers de nouveaux habitats restaurés.

« Il fallait civiliser l'homme du côté de l'homme. La tâche est avancée déjà et fait des progrès chaque jour. Mais il faut aussi civiliser l'homme du côté de la nature. Là, tout est à faire. »

Victor Hugo (1802-1885)





3

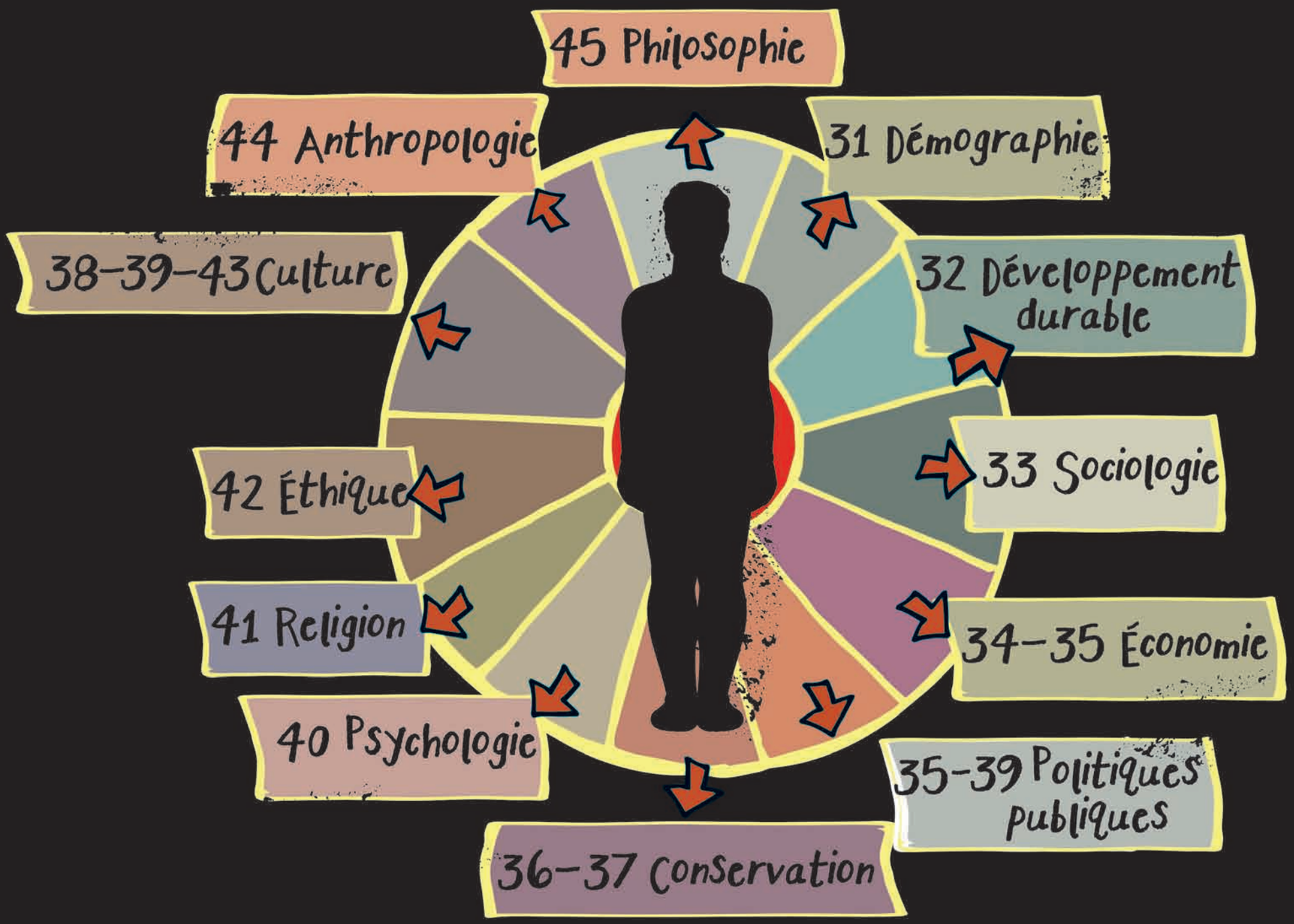
LA NATURE ET LES HUMAINS



Interactions nature - sociétés

Disposant d'un cerveau dont la taille relative par rapport au corps est la plus grande du règne animal, les êtres humains se différencient des autres êtres vivants par leur faculté de conscience et de structuration d'un langage à syntaxe complexe. Ces caractéristiques leur ont permis de développer des cultures vastes et complexes à l'origine de réalisations singulières telles que la résolution de problèmes mathématiques abstraits, l'organisation de hiérarchies sociales et politiques ou encore la construction de navettes spatiales... La façon dont les humains se comportent vis-à-vis de la planète (*interactions nature-sociétés*), celle dont ils mènent leurs vies, produisent et consomment dépend donc étroitement de valeurs éthiques et culturelles façonnées par leurs cerveaux. Philosophie, anthropologie, politique, éthique, religion, psychologie, etc. sont autant de disciplines essayant de comprendre ces interactions complexes. Les humains sont organisés en sociétés dont les profondes transformations démographiques, sociales et économiques des trente dernières années sont pour beaucoup à l'origine de la crise environnementale. En particulier, la difficulté des sociétés à réaliser leur *transition démographique* (31), à sortir du *piège de la pauvreté* (32), à gérer leurs *communs* (l'ensemble de leurs ressources) (33) ou encore à développer une *économie verte* (34) représente des défis majeurs pour le développement durable des activités humaines. Face à la crise environnementale, les humains tentent de développer des actions en faveur de la conservation de la nature, que ce soit à travers la valorisation de *services écosystémiques* (35), la *protection des espaces et des espèces* (36), la *restauration écologique* (37), l'*alphabétisation environnementale* (38) ou par une multitude d'autres *idées* plus ou moins *lumineuses* (39). Toutefois, l'être humain échoue encore dans ses tentatives de « mieux faire », pour des raisons non seulement économiques et politiques mais également psychologiques et éthiques. *L'allégorie de la grenouille* (40), l'héritage des *religions* (41), les *valeurs* (42) attribuées à la nature ou encore un système *médiatique* (43) perverti sont autant de freins à la sortie de la crise environnementale. Une réflexion sur les notions de *famille* (44) et de *nature humaine* (45) pourrait aider à changer les comportements, et ainsi à changer de cap...

Des défis multidimensionnels et pluridisciplinaires



31. TRANSITION DÉMOGRAPHIQUE

« Notre tâche est d'entreprendre une transition démographique mondiale afin d'aplatir la courbe exponentielle [de la population] – en éliminant l'extrême pauvreté, en facilitant l'utilisation de méthodes contraceptives sûres et efficaces et en étendant le pouvoir politique [...] des femmes. Si nous échouons, d'autres mécanismes, dans des conditions moins contrôlées, le feront pour nous. »

Carl Sagan, *Billions & Billions*, 1998



Enfants – Cameroun.



Enfant – Cameroun.

La population humaine, de par sa densité, sa croissance et l'inégalité de sa répartition, est souvent présentée comme l'une des causes majeures, voire exclusive, des problèmes environnementaux, même si cette position fait l'objet de débats. Le XXIe siècle représente une période critique pour la planète car la population mondiale y atteint déjà 7 milliards d'individus avec des prévisions de l'ordre de 11 milliards d'habitants d'ici à 2100. Un défi urgent engendré par cette évolution démographique consiste à éliminer l'extrême pauvreté, ce qui requiert notamment la réduction de la taille des familles dans les pays pauvres dont les taux de fécondité sont élevés. En d'autres termes, il s'agit de favoriser la transition démographique de ces pays, c'est-à-dire le passage, au bout d'un certain délai, du régime traditionnel d'équilibre démographique avec une mortalité et une fécondité élevées à un régime moderne d'équilibre à faible mortalité et fécondité. Pendant cette transition, la diminution de la mortalité précède généralement celle de la natalité. Cela engendre une croissance démographique provisoire – qui explique la croissance de la population mondiale actuelle – suivie d'une phase de décroissance. Toutefois, il existe des variations puisque l'on observe, dans certains pays en voie de développement, et notamment en Afrique subsaharienne, que la croissance démographique se poursuit plus longtemps en raison d'une baisse plus lente de la natalité. Cela renforce l'idée que l'évolution de la population mondiale résulte de la somme de dynamiques démographiques locales, singulières et souvent complexes. Par ailleurs, il ne faut pas considérer la démographie et l'environnement comme deux problématiques séparées : c'est parce qu'elle est couplée à des niveaux de consommation sans précédent que l'évolution rapide et généralisée de la population mondiale représente un défi majeur pour le bien-être des humains ainsi que pour l'environnement naturel. Ainsi, pour qu'une transition démographique mondiale ait un effet bénéfique pour l'environnement, les sociétés présentant des régimes modernes d'équilibre démographique doivent nécessairement se stabiliser puis réduire leurs niveaux de consommation de ressources. Dans le cas contraire, l'élévation de la consommation des ressources par habitant pourrait (sur)compenser l'effet population en termes de conséquences environnementales.

32. PIÈGE DE LA PAUVRETÉ

« Nous ne savons pas exactement qui abat nos forêts et qui inonde nos terres mais nous savons qu'ils vivent dans les villes, où les riches deviennent encore plus riches et où nous les pauvres perdons le peu que nous avons. »

Déclaration du peuple Iban,
Stratégie mondiale de la Biodiversité, 1994

Définis par la Banque mondiale comme des personnes dont le revenu est inférieur à 1,25 dollar par jour, les pauvres sont environ 1,2 milliard sur la planète – chiffre qui atteint 3 milliards si l'on considère un seuil de 2,50 dollars par jour. Le concept de la pauvreté ne repose cependant pas sur le fait d'*être* pauvre, mais sur celui de *rester* pauvre, ce qui implique un mécanisme sous-jacent de rétro-activation au cœur duquel se produisent des interactions entre population, développement et environnement. Un environnement naturel pauvre ou dégradé associé à un faible capital et à un bas niveau d'éducation génère la pauvreté, qui se traduit en retour par une faible capacité d'épargne et d'investissement, des infrastructures sanitaires et éducatives déficientes, et vice versa. Dans certains pays comme l'Inde, ce cycle est renforcé par des inégalités de genre ou de coûts d'accès à un statut social, conduisant à une « accommodation à la pauvreté » qui stérilise toute tentative volontaire d'échapper à ce piège. Les faibles capitaux financiers, humains, environnementaux, institutionnels et éducatifs *piègent* les pauvres de génération en génération car leur population augmente généralement plus rapidement que l'accumulation de nouveaux capitaux. Sortir les pauvres de ce piège nécessite donc de « transformer ce cercle vicieux en cercle vertueux ». Cela peut se faire par injection de capitaux extérieurs, notamment *via* une aide durable et multiforme des pays riches, même si cette aide internationale est confrontée à plusieurs problèmes tels que la corruption ou la mauvaise gestion de fonds qui augmentent souvent les inégalités. Il est important de souligner que les effets du piège de la pauvreté ont avant tout de tragiques conséquences humaines, sociales et éthiques et, dans une bien moindre mesure, environnementales. Sur la période 1961-2000, les pays les plus riches ont généré à l'échelle de la planète 42 % des dégradations des ressources tout en assumant seulement 3 % des coûts qui en résultent. Ce sont donc bien les riches qui dégradent le plus l'environnement et les plus pauvres, dépendants de ressources à leur portée, qui sont les premières victimes de la dégradation des écosystèmes et de la biodiversité.

Enfant – Équateur.



33. LE DILEMME DES COMMUNS

« Dans notre monde contemporain régi par une extrême interdépendance, les individus et les nations ne peuvent plus résoudre seuls la plupart de leurs problèmes. Nous avons besoin les uns des autres. Il nous faut, par conséquent, acquérir un sens universel de notre responsabilité… C'est notre responsabilité, collective autant qu'individuelle, de protéger et de nourrir la famille planétaire, de soutenir ses membres les plus faibles et de protéger et prendre soin de l'environnement dans lequel nous vivons tous. »

Tenzin Gyatso, XIV[e] dalaï-lama

Dans un article fondateur publié dans la revue *Science* en 1968, l'écologue américain Garrett Hardin proposa l'idée que, lorsqu'une ressource est en propriété commune – par exemple un pré partagé par des éleveurs –, les utilisateurs sont inévitablement entraînés dans un processus de surexploitation de la ressource dont ils dépendent. Dans le cas de figure où la ressource est à tout le monde et en libre accès, la stratégie égoïste l'emporte sur celle de coopération et les exploitants prélèvent le maximum de ressources en un minimum de temps. Toutefois, comme l'explique très bien l'économiste et anthropologue Jacques Weber, « si la thèse de Hardin est vérifiée dans les situations d'accès libre de la ressource non renouvelable, là où la propriété commune a survécu, les ressources ont le plus souvent été maintenues à des niveaux d'abondance acceptables ». Il existe effectivement dans le monde de nombreux exemples d'utilisation durable des ressources communes. Mais, lorsque la ressource est commune à l'échelle mondiale, comme les ressources halieutiques des océans, sa gestion durable se confronte au dilemme des biens communs et dépend nécessairement d'accords de coopération internationaux. Globalement, qu'il s'agisse de climat, d'écologie, d'agriculture, d'eau ou d'énergie, de nombreuses institutions soutiennent donc l'idée que la gestion durable de ces ressources passera obligatoirement par l'idée que *la planète est un bien commun*. Cependant, les efforts de coopération à grande échelle pourraient s'avérer contre-productifs car, en plus des disparités culturelles, religieuses et politiques qui caractérisent les sociétés humaines, ces efforts se heurtent au fait que chaque partie impliquée ne possède qu'une fraction de la ressource globale. Une voie pour résoudre le dilemme des communs est de mener des programmes de coopération aux échelles le plus locales possible, avec des groupes d'individus en interaction plus petits que l'ensemble de la population concernée par la gestion du bien. La taille maximale de cette unité de gestion serait idéalement celle au-delà de laquelle les usagers ne se connaissent pas tous.

Agriculteurs au milieu de champs de quinoa – Équateur.

Pseudo-céréale très nutritive cultivée sur les hauts plateaux andins, le quinoa est devenu un produit biologique et diététique phare auprès des consommateurs des pays du Nord. Si cette opportunité de marché a permis d'augmenter les revenus de nombreux agriculteurs andins, le système traditionnel de gestion collective des terres dans les communautés doit cependant s'adapter afin d'intégrer de nouvelles normes de production durable.

34. ÉCONOMIE VERTE

« Les primevères et les paysages ont un défaut grave : ils sont gratuits. »

Aldous Huxley, *Brave new World*, 1931

Le modèle économique productiviste adopté par la plupart des nations depuis l'avènement du capitalisme manifeste depuis plusieurs années ses limites du fait de la récurrence de crises économiques, alimentaires et écologiques. En 1972, le rapport Meadows prônait déjà la recherche d'un état économique stable et durable plutôt qu'un modèle de croissance continue qui, dans un contexte de ressources limitées, ne ferait qu'engendrer des cycles de crise expansion-récession et ne saurait assurer indéfiniment la prospérité pour tous. Proposer l'essor d'une économie verte requiert une réflexion globale sur les liens entre la société, la biosphère et un système économique qui s'est jusqu'à présent construit comme une sphère autonome, notamment vis-à-vis de l'environnement. En effet, l'économie a du mal à intégrer les bénéfices et les pertes non marchandes de la nature, considérés comme des « externalités », un ensemble de biens et services « non appropriés » et sans prix. Elle ne récompense pas non plus financièrement une performance environnementale accrue, empêchant les entreprises de considérer les contraintes écologiques dans leur modèle économique. De façon schématique, deux grandes approches ont été proposées afin de réconcilier économie et environnement : d'un côté, internaliser à la sphère marchande les externalités environnementales en récompensant par exemple la préservation du flux des biens publics et en pénalisant leur destruction ; de l'autre, définir des limites à la croissance, qui doit être mise au service du progrès social et de la gestion raisonnable des ressources et des milieux naturels. Étant donné que le modèle économique mondial repose avant tout sur une conception consumériste du bien-être, l'approche engagée est davantage celle d'une production et consommation « vertes » plutôt que celle d'une sortie de la société de consommation. Si cette économie verte peut s'avérer durable au niveau régional, l'harmonisation du développement économique mondial et des grands équilibres planétaires est quant à elle bien davantage compromise. À titre d'exemple, même si l'on estime que la fonte de l'Arctique coûterait un an de PIB mondial, on est encore loin d'inclure ces considérations dans les discussions économiques au niveau mondial.



Tourbière du Lispach – France.





L'équation IPAT

Plusieurs approches mathématiques ont été développées afin de quantifier la relation entre population et environnement. L'une d'elles, appelée équation $I = P \times A \times T$, stipule que l'impact environnemental I de la population humaine peut être décrit comme le produit de trois facteurs : le facteur P de la taille de la population ; le facteur A de l'« aisance » de la population, c'est-à-dire la consommation par habitant ; et le facteur technologique T, impact environnemental par unité de consommation. Cette équation montre clairement que la réduction de notre impact environnemental à l'échelle mondiale passe par une diminution de notre population ou de notre consommation par habitant, ou par un développement des technologies propres permettant de diminuer le facteur T.



Vendeuse de noix de coco sur un marché de Calcutta – Inde.

À gauche :
Indien Waorani et palmier patona – Équateur.

Les trois éléments PAT définissant l'impact environnemental : l'humain, la ressource consommée et la technologie.

Agriculture et marchés locaux

Alimenter la population humaine est certainement l'un des plus grands défis de ce siècle. Si plusieurs stratégies telles que l'amélioration génétique des cultures, de meilleures pratiques culturales ou la réhabilitation des terres dégradées peuvent augmenter les rendements dans les pays aux revenus par habitant les plus faibles, il est par ailleurs nécessaire de favoriser l'auto-organisation paysanne et les initiatives collectives décentralisées afin de créer des espaces de prospérité partagés. Alors que les fréquentes envolées des prix alimentaires ramènent des dizaines de millions de personnes sous le seuil de pauvreté, créant des déficits alimentaires locaux, il est indispensable de favoriser le développement économique des petits agriculteurs et de protéger les marchés locaux afin d'assurer la sécurité alimentaire des pays en développement.





Le paradoxe d'Easterlin

En 1974, l'économiste américain Richard Easterlin publia un article fondateur visant à expliquer pourquoi l'augmentation des revenus par habitant dans les sociétés occidentales n'était pas accompagnée d'une tendance similaire en termes de bonheur éprouvé par les citoyens (mesuré par exemple par l'indice de développement humain). Son explication était que, toutes choses égales par ailleurs, la croissance économique avait bien un effet positif sur le bonheur, mais que cette croissance générait également de nouvelles aspirations, en particulier en termes de salaire et de niveau de vie, qui avaient un effet négatif. Comme l'affirmait déjà l'économiste Jean-Louis Graslin au milieu du XVIII[e] siècle : « On ne peut pas avoir besoin d'un bien dont on ignore complètement l'existence. » Le paradoxe d'Easterlin fut repris par de nombreux travaux, comme ceux du célèbre économiste anglais Fred Hirsch, et reste toujours d'actualité. En Chine par exemple, en dépit du boom économique sans précédent survenu ces deux dernières décennies, la satisfaction globale de la vie des habitants n'a en moyenne pas augmenté et les inégalités de bien-être entre les plus riches et les plus pauvres se sont creusées. Ces résultats font ainsi écho au discours du 18 mars 1968 du candidat à la présidence des États-Unis Robert Kennedy, dans lequel il déclarait : « Le PIB mesure tout, sauf ce qui fait que la vie vaut la peine d'être vécue. »

Enfants jouant sur une plage de Salango – Équateur.

35. PAIEMENT DES SERVICES RENDUS PAR LES ÉCOSYSTÈMES





« Tant que notre civilisation matérialiste donnera au milieu naturel une grande valeur lorsqu'il est détruit et une valeur faible ou nulle lorsqu'il est sauvegardé, comment s'étonner qu'il disparaisse ? »

Philippe Saint Marc, *Socialisation de la Nature*, 1971

Depuis cinquante ans, 60 % des services rendus par les écosystèmes ont décliné du fait des perturbations engendrées par les activités humaines. Afin d'enrayer cette tendance, le concept de paiement pour les services rendus par les écosystèmes (PSE), dont les origines remontent à la fin des années 1940 mais qui n'a été popularisé qu'à la fin des années 1990, propose des systèmes contractuels dans lesquels des « paiements sont versés pour un service rendu ou l'utilisation des sols susceptible de garantir ce service ». Par exemple, un propriétaire foncier choisit bénévolement de conserver une forêt, protégeant ainsi le bassin-versant et la qualité de l'eau qui y coule, en échange de quoi il reçoit une rémunération octroyée par les bénéficiaires directs. Ces PSE se sont aujourd'hui largement développés au niveau local et global. Localement, il peut s'agir de rémunérer des paysans ayant des pratiques agricoles compatibles avec une eau potable ou la prévention des feux de forêt. Plusieurs pays ont des programmes nationaux de PSE, comme aux États-Unis pour la conservation des terres agricoles sensibles, ou en Chine pour la protection des forêts de pente. Au Costa Rica, les PSE sont au cœur d'une véritable stratégie nationale pour la conservation de la nature et pour le développement durable. La loi y propose des indemnisations pour quatre services environnementaux : la réduction des émissions de gaz à effet de serre, les services liés à l'eau, la valeur paysagère et la biodiversité. Au niveau international, le mécanisme REDD est un programme de réduction des émissions liées à la déforestation et à la dégradation des forêts. Cette stratégie d'atténuation des effets du changement climatique permet en même temps de protéger la biodiversité et les services rendus par les écosystèmes forestiers. Si l'adoption massive des PSE montre que cette stratégie est prometteuse pour la protection de la nature, elle peut potentiellement engendrer des dérives marchandes ou comptables envers le vivant, posant ainsi des questions d'ordre philosophique et éthique. Comme le résume admirablement le chef indien Seattle : « Si la fraîcheur de l'air et le murmure de l'eau ne nous appartiennent pas, comment peut-on les vendre ? »

Famille utilisant l'eau d'une rivière pour divers usages domestiques – Cameroun.

36. PROTECTION DES ESPACES ET DES ESPÈCES

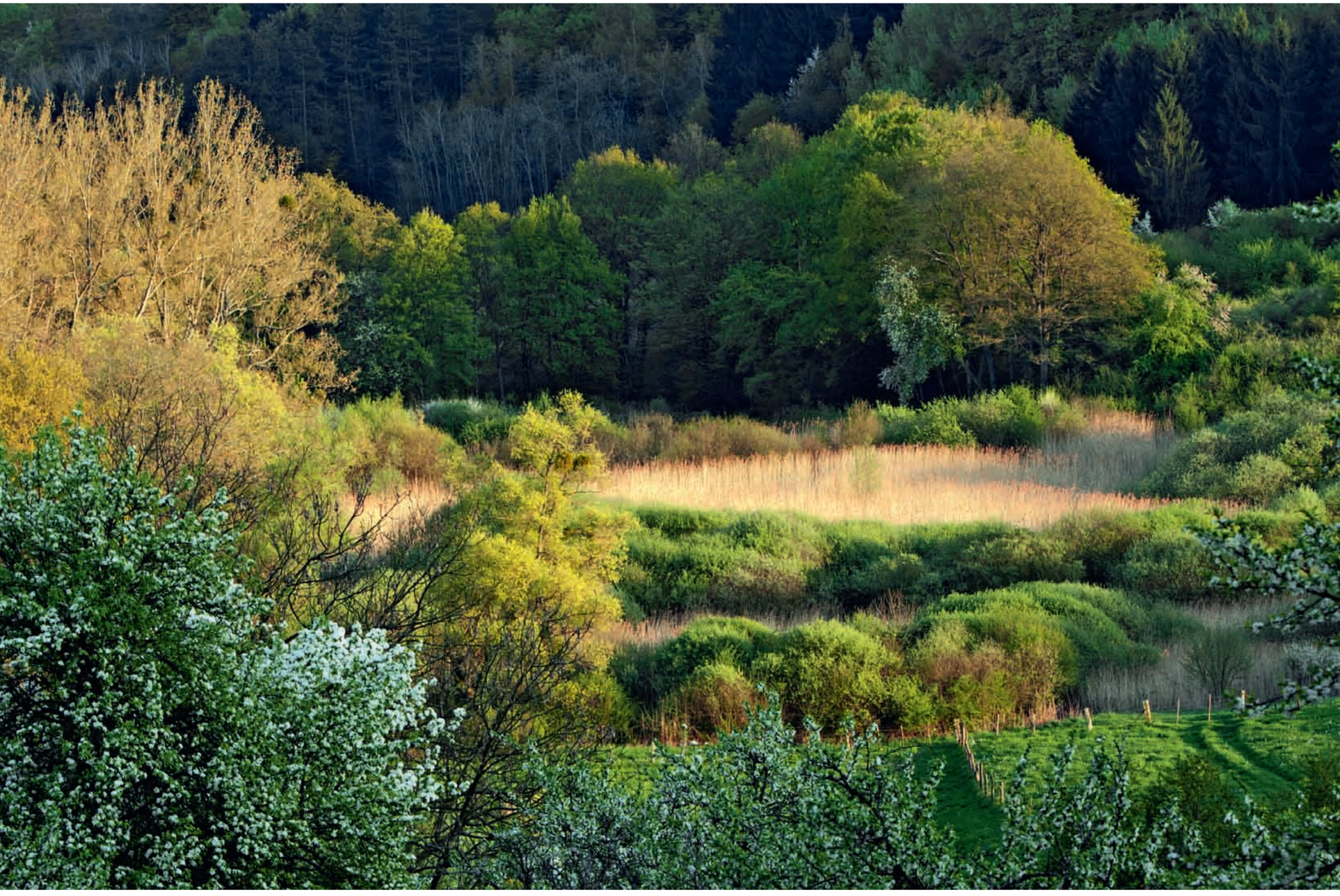
« Partager sa chambre à coucher
avec un ours n'est pas facile,
mais partager avec lui
un espace sauvage l'est.
Nous devons donc restreindre
les activités humaines dans les lieux
où vivent les espèces menacées.
Nous devons rester en dehors
de leur chambre à coucher
et sauvegarder des espaces sauvages,
tant qu'ils existent.. »

Robert McMeans, 2010

Trouvant ses origines dans la création de sites sacrés par les premiers indigènes – des forêts sacrées d'Afrique aux *tapus* d'Océanie –, la protection des espaces et des espèces est depuis toujours étroitement liée au développement culturel de l'humanité. De nos jours, la création d'espaces protégés représente, au niveau global comme local, une stratégie clé dans la protection de la nature face aux changements globaux, dans la gestion durable des ressources naturelles et dans la réduction de la pauvreté. Souvent contraintes par la répartition des populations humaines, les modalités de création des espaces protégés doivent être établies à partir d'arguments scientifiques développés par les chercheurs et d'arguments pratiques présentés par les gestionnaires. S'il n'existe pas de règles universelles pour la définition de ces espaces, on s'appuie en général sur le principe des « quatre R » : *représentativité* (les espaces doivent contenir un maximum de représentants de la biodiversité), *résilience* (les espaces doivent pouvoir affronter les changements environnementaux actuels et futurs), *redondance* (les espaces doivent comporter suffisamment de représentants de la biodiversité pour être viables) et *réalisme* (les espaces doivent être soutenus par des moyens financiers, une volonté citoyenne et politique). Objet de critiques et de débats intenses, l'efficacité des réserves naturelles pour la protection effective des milieux et des espèces dépend d'un grand nombre de facteurs tels que la localisation, la taille, la connectivité ou la gouvernance (accès du public, niveau de protection, financement) de ces espaces. Globalement, une grande proportion des espaces terrestres protégés se trouve actuellement dans des régions aux sols improductifs et aux climats rigoureux, notamment dans les hautes altitudes et latitudes. Quant aux aires marines protégées, elles représentent moins de 2 % des océans. Ces réserves ne protègent donc que très partiellement la diversité biologique de la planète et de nombreux efforts restent à faire afin que, comme l'indiquait le naturaliste Robert Hainard, la création de réserves naturelles ne soit pas « un moyen de s'acheter une bonne conscience envers la nature et de se déchaîner sur le reste de la Terre ».



Ours brun – Italie.



Roselière dans un paysage agricole – France.

Sauvegarde ou partage des terres

Nourrir une population mondiale croissante tout en protégeant la biodiversité demande d'élaborer des stratégies de gestion et conservation spécifiques aux agro-écosystèmes. Parmi ces stratégies, qui sont fonction d'une multitude de facteurs géographiques, écologiques, économiques, sociaux et politiques en relation les uns avec les autres, deux sont particulièrement débattues de nos jours : la première consiste à diviser le paysage, avec d'un côté des terres en cultures intensives et de l'autre des habitats strictement préservés (sauvegarde des terres, *land sparing*) ; la seconde réside dans l'adoption d'une agriculture peu intensive respectueuse de la biodiversité, mais répartie sur l'ensemble du paysage (partage des terres, *land sharing*). Chacune des deux approches possède ses avantages et ses inconvénients : alors que la stratégie de sauvegarde permet une répartition des terres optimisant les deux objectifs de production et de conservation, celle du partage favorise l'hétérogénéité, la résilience et les interactions écologiques au niveau du paysage. Le choix entre les deux stratégies dépend des caractéristiques environnementales et sociales des paysages agricoles. Si les habitats cultivés et naturels ont des propriétés contrastées, la stratégie du partage est préférable, dans le cas contraire, comme pour les plantations traditionnelles de café ou de cacao, il est souvent possible de combiner des objectifs de hauts rendements agricoles et de préservation de la biodiversité. Le dilemme « sauvegarde *vs* partage » existe également dans d'autres problématiques de conservation, comme celle des grands carnivores ; dans ce contexte, la stratégie de sauvegarde semble le plus souvent souhaitable.

La stratégie du partage des terres favorise l'hétérogénéité, la résilience et les interactions écologiques au niveau du paysage.



Hyménoptère – France.



Tarier pâtre – France.

La métaphore de l'arche de Noé pose une question centrale pour la conservation des espèces : quelles espèces menacées doit-on sauver en priorité ?

Le Problème de Noé

Selon l'Ancien Testament, Dieu demanda à Noé de sauver sur son arche un couple représentatif de chaque espèce. Le nombre d'espèces sur Terre étant estimé à plusieurs millions, il est peu probable qu'il existât une arche assez grande pour cela. Se posa donc à Noé le problème de choisir quelles espèces il emmènerait sur son arche. De nos jours, la métaphore de l'arche de Noé pose une question centrale pour la conservation des espèces : dans la limite budgétaire, quelles espèces menacées doit-on sauver en priorité ? En 1998, Martin Weitzman, économiste de l'université d'Harvard, formalisa mathématiquement le problème de Noé, marquant ainsi une étape importante dans les efforts pour conceptualiser l'analyse coûts-bénéfices en matière de conservation des espèces. Weitzman propose une méthode qui permettrait à Noé de choisir des espèces en optimisant leur valeur en termes de diversité (incluant la singularité évolutive ou fonctionnelle) et en fonction de leur probabilité de survie sur le long terme, par unité de coût monétaire. Une faiblesse de cette approche conceptuelle reste toutefois de savoir concrètement sur quels critères définir la valeur des espèces : les plus utiles, rares, charismatiques, originales ? Loin d'avoir résolu son problème, le Noé des temps modernes semble devoir changer de paradigme : au lieu de consacrer les financements à la protection de quelques espèces en danger, il serait préférable d'établir des programmes de conservation préventifs, avec des financements sur le long terme. Il sera peut-être également nécessaire d'effectuer un tri des espèces, en concentrant les efforts sur celles que l'on pense pouvoir sauver.



Couleuvre à collier – France.



Grenouille rousse dans un crapauduc – France.

Un crapauduc est un aménagement destiné à connecter deux zones séparées par une infrastructure (route ou voie ferrée) afin d'assurer le déplacement des amphibiens, notamment en période de reproduction.

37. LA RESTAURATION ÉCOLOGIQUE

« Il suffit de relier ! … Ne plus vivre fragmentairement. »

Edward M. Forster, *Howards End*, 1910

L'augmentation de la connectivité des paysages fragmentés est une stratégie majeure de la restauration écologique.

Si la protection des espaces et des espèces demeure la meilleure stratégie à long terme pour éviter l'érosion de la biodiversité et les conséquences préjudiciables pour le fonctionnement des écosystèmes, des mesures de restauration sont parfois nécessaires dans le cas d'écosystèmes particulièrement dégradés par les activités humaines tels que les zones humides drainées, les forêts déboisées ou les cours d'eau canalisés. La restauration écologique *sensu stricto* est ainsi une pratique qui consiste à restaurer les écosystèmes et les espèces qui occupaient un site ou une région donnée à une certaine époque du passé, avec pour objectif à long terme « de préserver la diversité de la vie sur Terre et de rétablir une relation écologiquement saine entre la nature et la culture ». Ce concept est proche de celui de « renaturation » (de l'anglais *rewilding*), qui consiste à restaurer et protéger les espaces sauvages en augmentant leur connectivité et en protégeant ou réintroduisant les grands prédateurs et autres espèces clés. L'augmentation de la connectivité des paysages fragmentés est ainsi une stratégie majeure de la restauration écologique et de la « renaturation », depuis l'établissement de corridors biologiques reliant des aires protégées distantes de plusieurs centaines de kilomètres jusqu'à la construction de passages qui permettent à la faune de traverser les infrastructures routières. Lorsqu'elles impliquent des reconstructions d'habitat (forêt, marécage, prairies), l'efficacité des actions de restauration dépend en partie de la dynamique de colonisation des communautés végétales et animales (processus appelé « succession écologique »). De plus, lorsque la configuration spatiale d'un fragment d'habitat est améliorée, un délai dans la colonisation du milieu peut être observé, créant ainsi un « crédit d'immigration » (symétrique du concept de « dette d'extinction »), défini comme le nombre d'espèces qui pourraient donner lieu à une colonisation future. Un des débats centraux de la restauration écologique est de savoir jusqu'où on doit aller dans de tels aménagements artificiels. Par exemple, la colonisation de nouveaux milieux assistée par les humains, notamment *via* la translocation d'espèces, est jugée par certains nécessaire pour la survie de certaines populations, mais elle est considérée par d'autres comme une barrière aux processus d'adaptation, eux-mêmes étant déjà sous la forte dépendance de pratiques anthropiques depuis des millénaires.

38. ALPHABÉTISATION ENVIRONNEMENTALE



Mulot – France.

« J'ai refermé tous les livres.
Il en est un seul ouvert à tous les yeux,
c'est celui de la Nature. [...]
Nul n'est excusable de n'y pas lire,
parce qu'il parle à tous les hommes
une langue intelligible
à tous les esprits. »

Jean-Jacques Rousseau, *Émile ou De l'éducation*, 1762

L'éducation présentée par Rousseau dans son œuvre *Émile* n'a pas pour finalité de préparer l'enfant à une fonction ou un rang social définis, mais *au métier d'homme*, de citoyen de l'avenir, attaché moralement aux autres humains. L'œuvre de Rousseau donna naissance au romantisme, philosophie de la nature qui irrigua la culture et les questionnements de nombreux pays européens à partir de la fin du XVIII[e] siècle. La nature y est considérée comme un état d'avant-culture par lequel tous les êtres humains doivent passer. Plus de deux siècles plus tard, plusieurs mouvements à l'interface entre l'éducation, la philosophie et l'écologie soutiennent que le désordre environnemental actuel est le reflet d'un désordre préalable de l'esprit, et proposent le développement des concepts d'alphabétisation écologique et environnementale pour lutter contre ce problème. L'alphabétisation environnementale est ainsi définie comme l'aptitude à reconnaître que les choix individuels ont des impacts sur l'environnement et à identifier et mettre en œuvre des solutions durables pour diminuer ces impacts. Elle nécessite donc l'apprentissage des principes écologiques, de la pensée systémique et la pratique de valeurs écologiques, principes qui permettront de passer d'une mentalité dominatrice à une relation de coopération et de non-violence à l'égard de la nature et des êtres humains. Les problématiques environnementales étant complexes, l'alphabétisation environnementale privilégie les expériences directes avec le monde naturel, permettant aux citoyens de développer une compréhension profonde et intime du fonctionnement des systèmes écologiques. Concept repris dans l'Agenda 21 de la conférence de Rio en 1992, l'alphabétisation environnementale est devenue une stratégie majeure de renforcement de la responsabilité collective face aux défis environnementaux actuels. Pratiquement, l'alphabétisation environnementale propose la démocratisation des décisions dans les communautés d'apprentissage et encourage la réflexion, la pensée critique, l'imagination et la créativité. Si l'on peut avoir des doutes sur le fait que la pédagogie puisse ou non suffire à décider de l'orientation économique et politique d'une société, l'enjeu de ce nouveau paradigme intégrant écologie et éducation semble crucial, car, comme le rappelle le naturaliste Luc Strenna : « La question n'est pas seulement : quelle planète laisserons-nous à nos enfants ? Mais aussi, quels enfants laisserons-nous à notre planète ? »



39. IDÉES LUMINEUSES

« La France n'a pas de pétrole mais elle a des idées »

Spot publicitaire du gouvernement français (1973)

En 1973, confrontés à une brusque pénurie d'hydrocarbures, les États occidentaux proposent des idées pour affronter ce défi, au centre desquelles les économies d'énergie : incitation à l'extinction les lumières des magasins après 22 heures en France, adoption d'une loi interdisant l'usage des voitures le dimanche et limitant à 100 km/h la vitesse sur les autoroutes en Allemagne. Quelques années plus tard, le président des États-Unis Jimmy Carter faisait poser symboliquement des panneaux solaires sur le toit de la Maison-Blanche. Sous la pression économique, ces mesures sont cependant vite oubliées : la France se lance dans le nucléaire, quant à la Grande-Bretagne, elle prospecte de nouvelles sources d'hydrocarbures en mer du Nord, exploitations devenues rentables avec la hausse du prix du pétrole. Trente ans plus tard, la recherche d'idées lumineuses pour sauver la planète est en plein essor, notamment dans le domaine technologique. Une illustration en est le développement de la géo-ingénierie, discipline qui propose de manipuler délibérément le climat pour contrecarrer les effets du réchauffement climatique – par exemple en vaporisant du soufre dans l'atmosphère afin qu'elle renvoie une partie des rayons solaires. Si ces « techno-idées » sont attrayantes, et la créativité certainement nécessaire pour l'adaptation des sociétés aux changements, les économies d'énergie restent néanmoins probablement la voie la plus prometteuse pour résoudre la crise écologique. D'une part, parce que chaque individu peut y participer, d'autre part, parce que le gaspillage énergétique sur la Terre est énorme. Les États-Unis par exemple pourraient économiser la moitié de leur pétrole et de leur gaz et les trois quarts de leur électricité en développant des technologies économes en énergie. Les mesures d'économie devraient d'ailleurs être appliquées à d'autres domaines, par exemple celui de l'alimentation, pour laquelle les gaspillages engendreraient l'équivalent de 3 300 milliards de tonnes de CO_2, 250 km^3 de ressources en eau et 1,4 milliard d'hectares de terres.

Favoriser la créativité des humains est nécessaire pour l'adaptation des sociétés aux changements.

Fulgore porte-lanterne – Équateur.

Esclaves énergétiques

Globalement, les activités humaines dépendent à plus de 80 % du pétrole. De fait, les humains peuvent être décrits comme des esclaves de leurs besoins énergétiques. Mais le concept d'esclaves énergétiques a récemment trouvé un autre sens, inspiré de celui d'empreinte écologique. Ce concept représente ainsi une unité de mesure de l'énergie qui permet de mieux évaluer les conséquences des choix de vie des humains. Un esclave énergétique travaille pour produire de l'énergie 24 h sur 24 et dégage une puissance moyenne de 100 Watts. Ainsi, comme le rapporte l'historien Jean-Francois Mouhot, « à travers sa consommation d'énergie, chaque Européen dispose désormais de 100 domestiques en permanence, qui s'appellent machines d'usine, trains et voitures, bateaux et avions, tracteurs, chauffage central, électroménager, tondeuse à gazon et téléskis ». Économiser de l'énergie en adaptant les comportements permettra donc de « libérer » des esclaves énergétiques.



Écaille chinée – France.





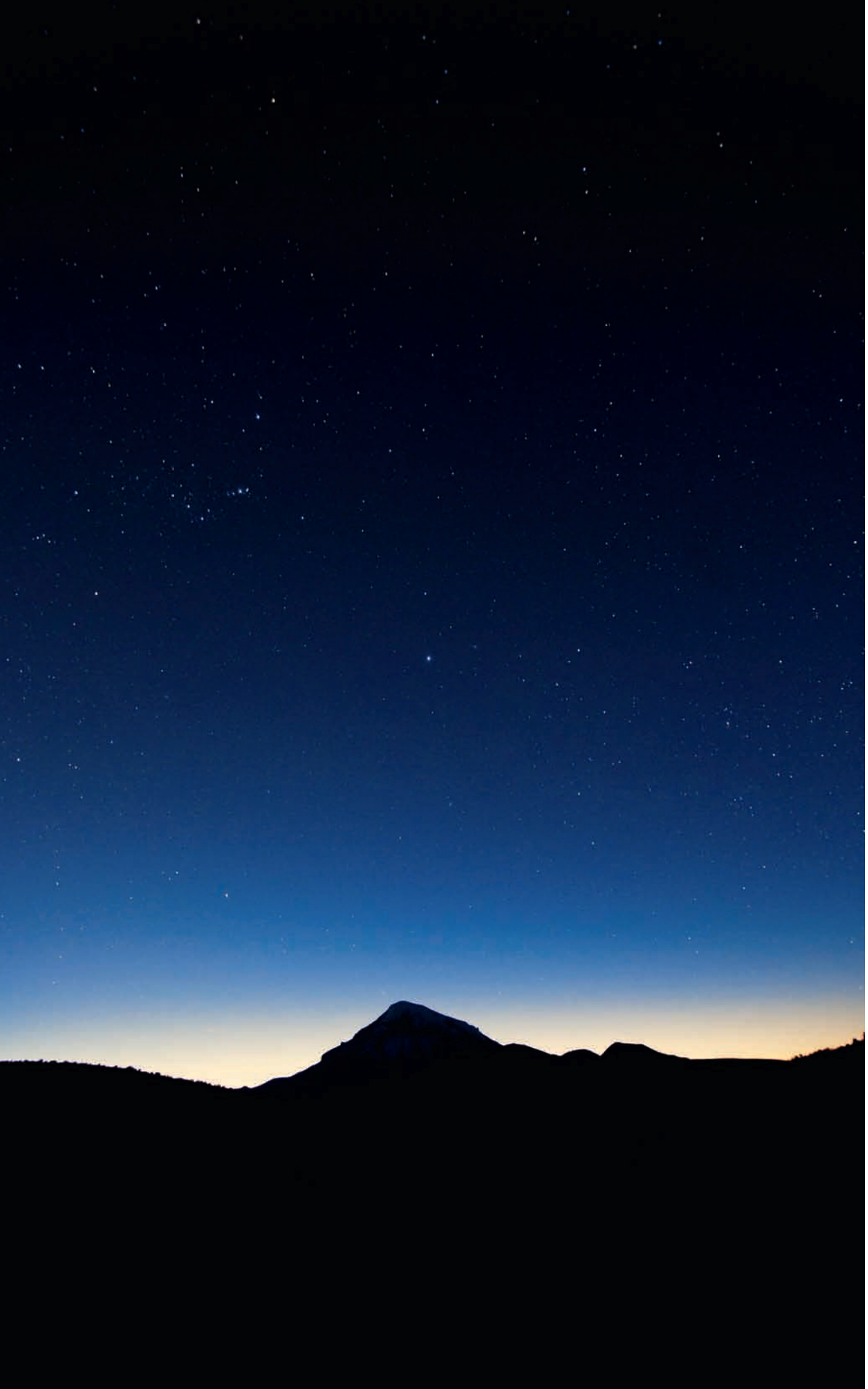
Taux de retour énergétique

L'extraction d'une source d'énergie nécessite d'utiliser de l'énergie provenant de cette même source ou d'une source différente. Ainsi, pour que l'extraction d'une énergie soit rentable, il faut que le taux entre l'énergie utilisable et la quantité d'énergie dépensée pour obtenir cette énergie, appelé taux de retour énergétique (TRE), soit supérieur à 1. Jusqu'à présent, les sociétés ont privilégié les sources d'énergie bénéficiant du plus haut TRE possible (le charbon, le pétrole), car elles fournissent un maximum d'énergie pour un minimum d'efforts. De manière inattendue, les progrès techniques réalisés au XX^{e} siècle n'ont pas amélioré l'efficacité de la production d'énergie, car les premiers gisements d'énergie exploités étaient aussi les plus faciles d'accès. Les valeurs de TRE n'ont donc cessé de diminuer. Dans le cas du pétrole, cette valeur était d'environ 100 dans les années 1930 – pour produire 100 barils il suffisait d'en investir un seul –, de 40 dans les années 1970, et elle est comprise entre 15 et 30 de nos jours (entre 3 et 5 pour les sables bitumineux). Ces valeurs sont désormais proches, voire inférieures, des TRE mesurés pour certaines énergies renouvelables comme l'énergie éolienne (TRE d'environ 20). Toutefois, les inerties politiques, structurelles et comportementales qui caractérisent le modèle énergétique actuel représentent des freins majeurs à une transition vers le développement de ces énergies.

Pigeons ramiers et éolienne – France.

Autrefois utilisée par la marine à voile et les moulins à vent, l'énergie éolienne sert aujourd'hui à produire du courant alternatif pour les réseaux électriques. L'Europe en tête, la capacité éolienne mondiale cumulée suit une augmentation exponentielle depuis le milieu des années 1990.





Aller dans l'espace

Le 26 novembre 1991, dans le désert de l'Arizona, huit scientifiques s'enferment à l'intérieur de *Biosphere I*, une serre d'une superficie d'un peu plus d'un hectare. Cette structure expérimentale totalement étanche avait pour but de recréer un écosystème viable et d'évaluer ainsi les possibilités d'utiliser des biosphères identiques lors de la colonisation spatiale. Le projet échoua, du fait notamment d'un problème de recyclage de l'air et de conflits entre les scientifiques, démontrant qu'il fallait avant tout prendre soin de la Terre avant de penser à aller vivre ailleurs. Aujourd'hui, des entreprises continuent cependant à proposer des voyages dans l'espace, au cas où la vie sur Terre deviendrait impossible. Nombre d'entre nous risqueraient pourtant d'être déçus par l'espace car, aux dires de Frank Borman, commandant de la mission *Apollo 8*, le plus beau spectacle à contempler depuis l'espace est justement la Terre : « C'était la seule chose qui avait de la couleur. Tout le reste était complètement noir ou blanc. Mais pas la Terre. »

Volcan Sajama, 7 250 m – Bolivie.

À gauche:
Polylepis *et voie lactée – Bolivie.*

40. L'ALLÉGORIE DE LA GRENOUILLE

Considéré comme l'une des personnalités les plus influentes de la recherche en gestion d'entreprises, l'Américain Peter Senge identifie dans son best-seller *The Fifth Discipline* sept mauvaises habitudes de l'entrepreneur qui entravent ses capacités d'apprentissage. Parmi elles, l'allégorie de la grenouille traduit la difficulté des entrepreneurs à percevoir autour d'eux des indicateurs de changements qui leur seraient utiles afin d'éviter des crises au sein de leur entreprise. Cette allégorie de la grenouille trouve sans doute ses origines dans les travaux de neuro-éthologie menés dès la fin du XIXe siècle afin de tester le temps de réaction du système nerveux des vertébrés. Bien que les conclusions de ces expériences aient été réfutées par des études récentes concluant que la grenouille s'échapperait très certainement de l'eau avant ébullition, l'allégorie de la grenouille a pris sa place dans la littérature contemporaine, depuis la compréhension de mécanismes amenant aux faillites jusqu'à la communication interculturelle et aux méthodes de développement personnel. Plus récemment, cette allégorie fut largement mise à profit pour illustrer la passivité des humains face aux changements globaux. Lorsque des changements environnementaux se produisent suffisamment lentement, ils échappent à la conscience et ne suscitent aucune réaction. Dans son livre *Effondrements*, le scientifique américain Jared Diamond illustre cette allégorie de la façon suivante : « Si l'économie, les établissements scolaires, les embouteillages ou quoi que ce soit d'autre se dégradent de façon lente, il est difficile de percevoir que chaque année qui passe est en moyenne légèrement pire que la précédente. [...] Cela peut prendre plusieurs décennies d'une longue série de petites variations annuelles avant que les gens ne réalisent, en sursautant, que les conditions étaient meilleures plusieurs décennies auparavant. [...] C'est une des raisons principales pour lesquelles les gens ne parviennent pas à remarquer un problème grandissant, jusqu'à ce qu'il soit trop tard. » Toutefois, la passivité et l'amnésie des humains face à certains risques environnementaux, comme les inondations, peuvent s'installer relativement vite (en quelques années), sans doute plus du fait de mécanismes de soumission, notamment à l'ordre établi, que d'« habituation » graduelle.

Grenouille Hylidae – Équateur.

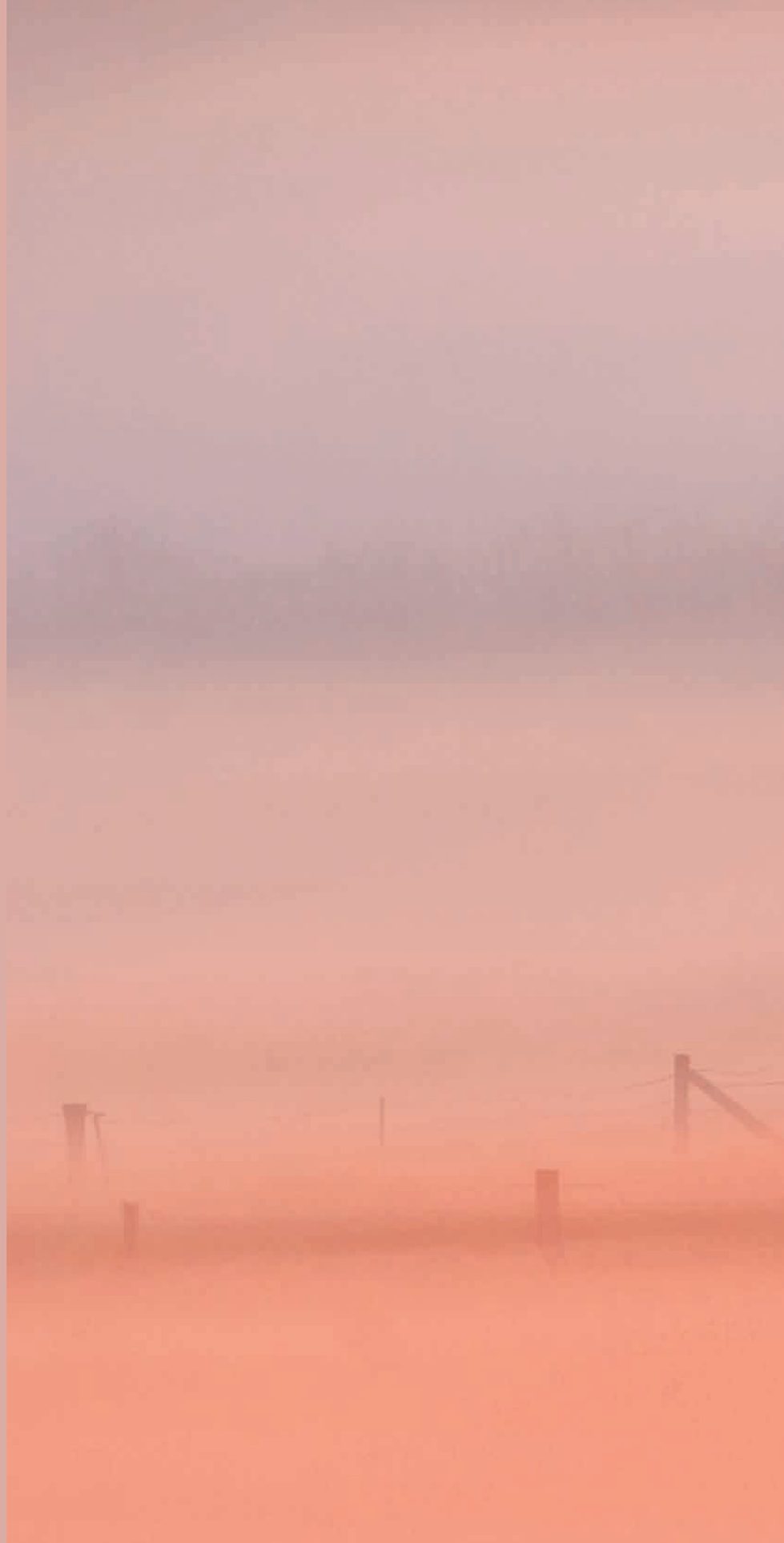
« Si vous placez une grenouille
dans une casserole d'eau bouillante,
elle essaiera immédiatement de s'en sortir.
Mais si vous placez la grenouille
dans une eau à température ambiante [...]
et que vous augmentez graduellement
la température [...] la grenouille deviendra
de plus en plus léthargique jusqu'à ce qu'elle
soit incapable de s'échapper de la casserole.
[...] La grenouille restera là et bouillira. »

Peter Senge, *The Fifth Discipline*, 1990



Amnésie du paysage

Proche du concept de l'allégorie de la grenouille, le concept d'amnésie du paysage décrit le fait que les sociétés ne parviennent pas à percevoir les changements de leur environnement lorsque ceux-ci sont progressifs. En particulier, la plupart des gens oublient à quel point le paysage qui les entoure est différent de celui qui existait cinquante ans auparavant, du fait que les changements d'une année sur l'autre ont été graduels. Cette amnésie est principalement causée par une mauvaise perception des tendances et par une dérive, puis une défaillance, des points de référence (*shifting baseline* en anglais), syndrome qui traduit la perte progressive des repères environnementaux d'une génération à l'autre. Ce phénomène est exacerbé dans certains écosystèmes comme les océans, où l'oubli des données historiques empêche de mesurer la véritable ampleur de la diminution des stocks de poissons ou des populations de cétacés. L'amnésie du paysage se généralise alors à une amnésie écologique.



Paysage de brume – France.



Préférence pour le présent

Les humains accordent davantage d'importance aux biens et aux actes présents que futurs, ce que les économistes appellent la « préférence pour le présent ». Ce concept explique à la fois la frénésie consommatrice – satisfaction immédiate des besoins – des sociétés occidentales et l'impossibilité des pauvres à penser à une gestion sur le long terme de leurs ressources. Sur le plan biologique, la préférence de notre cerveau pour des récompenses à court terme fait partie de notre héritage évolutif animal. Nos ancêtres consommaient autant que possible une ressource sur une courte période, car ils ne pouvaient pas prévoir quand ils auraient à nouveau accès à des sources de nourriture. La pensée à court terme et la dénégation des intérêts du futur sont des freins majeurs dans le changement des mentalités face aux défis environnementaux et à la gestion raisonnée des ressources naturelles.



Renard roux la gueule remplie de rongeurs et d'une tête de lièvre fauché lors de la fenaison – France.

Lorsque les proies abondent, certains prédateurs tuent plus de proies qu'ils n'en peuvent consommer (comportement de surplus killing*) afin de les cacher pour des périodes de disette. Une forme de préférence pour le présent face à l'incertitude de la disponibilité future en nourriture.*





41. NATURE ET RELIGIONS

« Ce que nous faisons de notre écologie dépend de nos idées sur la relation homme-nature ; plus de science et de technologie ne nous tireront pas de la crise écologique actuelle, sauf à trouver une nouvelle religion ou à repenser l'ancienne. »

Lynn White Jr, *Science*, 1990

Éminent professeur américain d'histoire médiévale, Lynn White publia en 1967 un article intitulé « Les racines historiques de notre crise écologique », qui allait marquer le début d'un riche et long débat sur l'influence des religions dans le rapport des êtres humains à la nature. White y explique que les valeurs environnementales exprimées dans la Genèse, dans laquelle seuls les humains furent créés à l'image de Dieu, ont encouragé au sein de la chrétienté l'assujettissement de la nature aux besoins des humains. En réponse à cette interprétation « despotique » du message environnemental de la Genèse, de nombreux autres spécialistes, tout aussi érudits, proposèrent une interprétation dite « de l'intendance », qui soutient que le statut singulier des êtres humains leur confère, au contraire, la responsabilité de prendre soin du reste de la création de Dieu. Malgré leurs différences, ces deux interprétations relèvent d'une ontologie « naturaliste », car elles mettent toutes deux en avant une conception dualiste du monde, les humains étant séparés de la nature : créateur contre créatures, culture contre nature, humains contre non-humains. De nos jours, ce dualisme, héritage des Lumières et de la culture judéo-chrétienne, a imprégné la plupart des autres systèmes de croyances et de nombreux auteurs identifient ce concept comme responsable des mauvais traitements que les humains font subir à la nature. Comme le rappelle l'anthropologue Philippe Descola, « dans la conception moderne du monde, la nature est considérée comme séparée des activités humaines, alors que dans bien des sociétés ce n'est pas le cas. [...] il faut dépasser cette séparation entre les sciences de la nature et celles de la culture pour progresser dans notre compréhension du monde ». Dépouillées de leur dimension dualiste et de leurs conflits interethniques, les religions et autres cosmologies constituent ainsi, théoriquement, un moyen idéal pour combattre la pensée à court terme et proposer des solutions durables permettant de changer radicalement les comportements. Mais la mise en pratique n'est pas si simple, car cultures et religions reposent souvent sur un ensemble hétérogène et contradictoire de convictions, d'idées et de pratiques qui mélangent attention et cruauté face à la nature. Par exemple, en dépit du fait que le bouddhisme traditionnel prône que tous les comportements humains doivent être en harmonie avec la nature, il existe peu de preuves que l'influence de cette inspiration morale ait permis de limiter les atteintes à l'environnement dans les régions où elle est pratiquée.

Chevêche d'Athéna – France.

42. DES VALEURS POUR LA NATURE

« Aujourd'hui nous connaissons le prix de tout sans savoir la valeur de rien. »

Oscar Wilde (1854-1900)

En septembre 2012, la Société zoologique de Londres et l'Union internationale pour la conservation de la nature publiaient un rapport intitulé « Sans prix ou sans valeur ? » – la valeur désignant dans ce sens une représentation du réel par les humains. Ce document, dont la rédaction rassembla l'expertise de plus de 8 000 scientifiques, avait pour objectif d'identifier les 100 espèces les plus menacées au monde. Le rapport tentait de mobiliser le public et les décideurs autour de la protection de ces espèces qui n'ont pas de valeur commerciale – à quoi peuvent bien servir le paresseux pygmée, la salamandre d'Iran ou la musaraigne de Nelson ? –, mais que les humains auraient intérêt à sauver de l'extinction pour le seul intérêt de leur survie. La vision



selon laquelle les espèces et écosystèmes sont appréciés et hiérarchisés en fonction des services qu'ils rendent aux humains est fortement ancrée dans nos sociétés. Elle trouve ses racines dans l'anthropocentrisme utilitariste à la base de la théorie économique classique : les humains sont les uniques êtres vivants à posséder une valeur intrinsèque en tant que sujets moraux, les autres espèces ne possédant qu'une valeur instrumentale définie par leur contribution au bien-être de l'humanité. Les humains n'auraient donc aucune obligation à sauver des espèces en voie d'extinction. Trouvant leurs racines dans les concepts *d'éthique de la Terre* d'Aldo Leopold et d'*écologie profonde* de Arne Naess, plusieurs courants philosophiques (tels que le biocentrisme et l'écocentrisme) et scientifiques (tels que l'éthique environnementale) défendent cependant l'idée d'une éthique propre à la nature. Ces courants postulent que tous les êtres vivants doivent être considérés comme des fins en soi, c'est-à-dire comme possédant une valeur intrinsèque qui leur donne droit au respect et à la vie. Si l'attribution d'une valeur intrinsèque à la nature semble éthiquement incontestable, elle a cependant du mal à s'imposer aux politiques et aux bailleurs de fonds, voire aux scientifiques. De nos jours, la plupart des humains continuent à se sentir plus concernés par le futur des humains que par celui de la nature.

Macaque et alcool de lézards et serpents au marché d'Hanoi – Vietnam.

De nos jours, une application importante du concept de « valeurs pour la nature » concerne la compréhension des facteurs psychologiques, culturels et éthiques liés à l'industrie grandissante du trafic d'espèces, cause majeure de l'érosion de la biodiversité. La valeur attribuée aux plantes et animaux qui font l'objet de commerce illégal (notamment pour la pharmacopée asiatique) réside dans les croyances fondamentales sur ces espèces et leurs interactions avec les humains, qui sont généralement amplement partagées au sein d'une même culture et sont très difficiles à changer.



43. LA NATURE DANS LES MÉDIAS

JAKE : « Si je suis tellement ignorant, peut-être que tu devrais m'apprendre.
NEYTIRI : Ceux qui viennent du ciel ne peuvent pas apprendre. Vous ne voyez pas.
JAKE : Alors apprends-moi à "voir".
NEYTIRI : Personne ne peut t'apprendre à voir. »

James Cameron, *Avatar*, 2009

Au début du XXIe siècle, les médias dédiés à la nature se targuent de statistiques impressionnantes : la chaîne Animal Planet atteint les 250 millions de souscripteurs ; *Planète Terre*, réalisée par la BBC, est l'émission télévisée la plus regardée aux États-Unis, avec 65 millions de téléspectateurs ; le film *Avatar*, avec près de 2,7 milliards de recettes, connaît le plus grand succès cinématographique de l'histoire. Face à cet engouement massif des sociétés pour la nature, comment expliquer que, loin des salles de cinéma et des petits écrans, la véritable Pandora se réduise un peu plus chaque jour, et qu'un grand nombre d'« acteurs » de la planète Terre s'approchent inexorablement de l'extinction ? Une réponse à ces questions est que la *consommation* de la nature à travers les médias de masse, en majorité la télévision, accroît relativement peu le savoir (la conscience) écologique des citoyens et remet peu en cause leur responsabilité vis-à-vis de l'état actuel de la planète. La nature n'est généralement pas présentée comme un milieu de vie, mais comme un produit visuel. De plus, du fait de la difficulté à appréhender la complexité du système Terre, les médias jouent généralement sur la corde sensible de l'opinion publique plutôt que d'avancer des arguments scientifiques et éducatifs, découplant le message environnemental de la réalité. Un autre exemple de ce filtre médiatique est la couverture des catastrophes naturelles. Du tsunami dévastateur en Asie du Sud-Est en 2004 à l'éruption du volcan islandais Eyjafjallajokull qui paralysa les transports aériens en 2010, les médias se complaisent souvent à rappeler le pouvoir considérable de la nature sur les humains. Il est beaucoup plus rare de lire des articles ou des titres de journaux qui reconnaissent l'emprise des humains sur la nature. La naissance d'un nouveau paysage médiatique à travers Internet est une chance pour donner à la nature une nouvelle place dans les médias. Il faudra cependant veiller aux biais induits par les moteurs de recherche, qui présentent les pages les plus visitées par les internautes, mais pas nécessairement les plus fiables scientifiquement.

Corneille noire – France.



44. FAMILLE ET RÉSEAUX SOCIAUX

« La Terre est ma patrie et l'humanité ma famille. »

Khalil Gibran (1883-1931)

Les humains acquièrent leur savoir scientifique et façonnent leur opinion sur les grandes questions contemporaines telles que la réalité et l'impact des changements planétaires en consultant des personnes qui partagent les mêmes valeurs qu'eux, auxquelles ils font confiance et qu'ils comprennent. Ainsi, une personne préférera adhérer à l'avis de son groupe social et culturel (sa famille, son clan, ses amis sur Facebook) qu'à un consensus scientifique, par exemple sur le changement climatique. Du fait de la propension des humains à copier ou imiter les comportements, les choix et les opinions des autres, les *effets de réseaux* ont ainsi grandement influencé de nombreuses transformations économiques, sociales et culturelles au cours de l'histoire, depuis les révolutions populaires jusqu'aux effets de mode, en passant par les effets « Coupe du monde » ou « Jeux olympiques ». Toutefois, pour la première fois dans l'histoire de l'humanité, ces effets de réseaux ont acquis une dimension planétaire grâce à la révolution Internet – plus de 500 millions de personnes interagissent chaque jour sur Facebook – et du fait que plus de la moitié de la population mondiale vit actuellement dans les villes. Cette profonde transformation de la communication entre les humains favorise l'émergence d'un concept nouveau de « soi collectif » (*self group*) et d'une coopération, voire d'une empathie, envers des personnes étrangères afin de contrecarrer le penchant humain à créer des distinctions entre peuples. Le renforcement des liens sociaux pourrait dans le futur remédier en partie aux difficultés rencontrées par l'être humain à adapter localement et individuellement ses comportements de consommation pour répondre à des problèmes écologiques globaux, de plus en plus urgents et avérés. L'émergence d'un soi collectif informé et éduqué permettrait ainsi de contrer la tendance des sociétés à placer les problèmes globaux dans les mains des institutions intergouvernementales, qui jusqu'à présent ont complètement échoué.

Blaireaux d'Europe – France.

En France et dans de nombreux pays européens, les groupes de blaireaux sont constitués en moyenne de 2 à 4 adultes avec 1 à 3 jeunes. La taille du groupe est cependant variable en fonction de la qualité et de l'abondance des ressources alimentaires.



45. NATURES HUMAINES

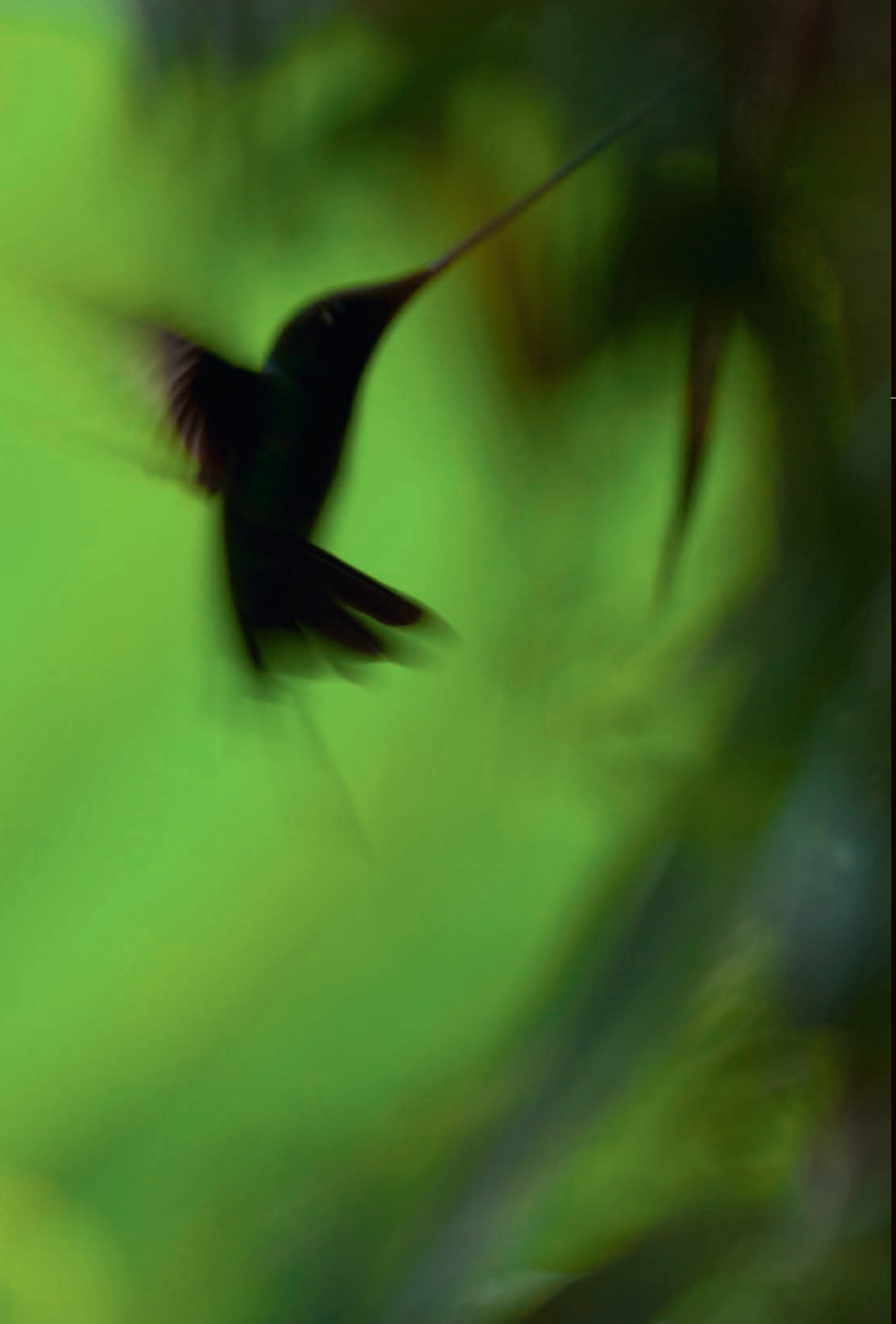




« En ce siècle où l'homme s'acharne à détruire d'innombrables formes vivantes [...] jamais sans doute, il n'a été plus nécessaire de dire, comme le font les mythes, qu'un humanisme bien ordonné ne commence pas par soi-même, mais place le monde avant la vie, la vie avant l'homme, le respect des autres avant l'amour-propre, et que même un séjour d'un ou deux millions d'années sur cette terre [...] ne saurait servir d'excuse à une espèce quelconque, fût-ce la nôtre, pour se l'approprier comme une chose et s'y conduire sans pudeur ni discrétion. »

Claude Lévi-Strauss, *Mythologiques 3. L'Origine des manières de table*, 1968.

La crise écologique n'est pas seulement liée à un problème de relation entre les humains et la nature, mais plus profondément à un problème de relation entre les êtres humains. Le comportement social humain a évolué pendant des millions d'années pour acquérir des caractéristiques telles que la préférence pour la vie en petits groupes, la priorité à la survie et à la reproduction personnelles et de ses descendants, la focalisation sur les problèmes immédiats ou encore l'agressivité permettant de conserver ses biens, son espace vital. Même si la culture participe, dans la vie de tous les jours, à gommer ces caractéristiques innées, les humains semblent desservis par leur nature profonde pour faire face aux défis de l'Anthropocène : il reste ainsi difficile pour eux de s'organiser en grands groupes pour répondre à des problèmes globaux, de donner priorité à la survie ou au bien-être d'humains généalogiquement trop éloignés – même s'ils partagent avec eux une même Terre – ou de préférer aux *kill them all* des jeux vidéos de coopération, comportement pourtant vital pour échapper à l'épuisement des ressources de leur planète. Certaines caractéristiques de la nature humaine peuvent cependant apporter un espoir pour améliorer les relations entre les humains et avec la nature. Ainsi, le développement du cerveau humain, plus que n'importe quel autre organe, a principalement lieu après la naissance, en interaction avec le monde extérieur. Par exemple, l'anthropocentrisme, qui caractérise nombre de comportements délétères envers la nature, n'est pas une étape initiale du développement cognitif humain, mais une perspective qui émerge chez l'enfant entre 3 et 5 ans. De même, les humains naissent avec une curiosité, un émerveillement et un amour inné de la diversité du monde, émotions qu'il est donc crucial de maintenir au-delà de la petite enfance, par exemple à travers des contacts quotidiens avec la nature. L'amour, envers des humains ou des lieux de la planète, est sans doute le sentiment inné qui se conserve le mieux chez l'adolescent et l'adulte. Il est probable que ce sentiment universel soit au final notre meilleur espoir pour préserver la planète Terre.



« Un jour, dit la légende, il y eut un immense incendie de forêt. Tous les animaux terrifiés, atterrés, observaient impuissants le désastre. Seul le petit colibri s'activait, allant chercher quelques gouttes d'eau avec son bec pour les jeter sur le feu. Après un moment, le tatou, agacé par cette agitation dérisoire, lui dit : "Colibri ! Tu n'es pas fou ? Ce n'est pas avec ces gouttes d'eau que tu vas éteindre le feu !" Et le colibri lui répondit : "Je le sais, mais je fais ma part." »

Pierre Rabhi

Colibri porte-épée – Équateur.

ÉPILOGUE : L'ESPOIR COMME IMPÉRATIF

Reprenant le titre d'un livre de l'environnementaliste américain David Orr, *Hope is an imperative*, cet épilogue choisit de rejoindre le camp des optimistes (prudemment optimistes, mais optimistes quand même !) quant au devenir de la planète. Comme le montre le succès du livre de Bjorn Lomborg *L'écologiste sceptique*, les « prophètes de malheur » finissent par lasser l'opinion publique, si bien qu'il semble aujourd'hui urgent d'agrémenter les messages d'alerte sur la crise environnementale de *success stories* de conservation de la nature : agriculteurs équatoriens protégeant leur forêt, gouvernement hollandais finançant la restauration d'écosystèmes à grande échelle, consommateurs et pêcheurs du Pacifique alliés pour sauver les populations de thon. Les plus sceptiques sur la capacité de l'espèce humaine à « sauver la planète » peuvent se référer aux paroles du dalaï-lama : « Si vous avez l'impression de ne pas pouvoir y faire grand-chose, tentez l'expérience de dormir avec un moustique… et vous verrez lequel des deux empêche l'autre de dormir. » Car si l'être humain est à l'origine de ses problèmes environnementaux, il peut théoriquement se décider à cesser de les causer et commencer à les résoudre. À l'échelle internationale – *a priori* la plus appropriée pour résoudre des problèmes globaux –, résoudre la crise environnementale se confronte à un manque évident de *leadership* politique. Les congrès mondiaux sur le climat ou la biodiversité se suivent et se ressemblent : les dirigeants ne parviennent pas à remettre en cause les normes technologiques qui prévalent dans les sociétés modernes et à freiner le pillage des ressources. Souvent, il manque seulement des décisions politiques pour appliquer des solutions qui existent déjà. De nombreux substituts du carbone existent, mais il n'y a pas de substituts de décisions politiques. Le citoyen est lui-même pris au piège pour influencer cet immobilisme politique. Même s'il souffre de la pollution de l'air, de la circulation automobile ou du manque d'espaces verts, l'électeur place souvent l'environnement bien après la crainte du chômage ou de l'insécurité quand vient le moment de voter. Une grande partie de la solution à la crise environnementale semble donc à rechercher à une échelle locale, plus idoine à la transformation des modes de pensée et des comportements humains. Dans son article « Éloge de la métamorphose », le sociologue et philosophe Edgar Morin écrit : « Il existe déjà, sur tous les continents, un bouillonnement créatif, une multitude d'initiatives locales, dans le sens de la régénération économique, ou sociale, ou politique ou cognitive, ou éducationnelle ou éthique ou de la réforme de vie… » En tant qu'individu, les gestes simples au quotidien pour participer à cette métamorphose sont innombrables : limiter notre consommation d'eau et de protéines animales ou notre production de déchets, diminuer le nombre d'esclaves énergétiques à notre service, ou encore passer plus de temps dans la nature pour tenter de renouer des relations émotionnelles avec elle et éviter l'amnésie paysagère… Le problème est qu'il faut réagir désormais relativement vite. Non pas que la fin de la Terre soit pour demain, mais parce qu'un retard de quelques années dans la prise de décision pour limiter les activités néfastes pour l'environnement diminue fortement la probabilité de contenir le réchauffement climatique et autres dérèglements globaux à long terme. La civilisation humaine fait face à de sérieux problèmes, mais elle doit conserver un espoir de les résoudre. Cet espoir, c'est au final le moteur qui nous a poussés à écrire ce livre. Ce sera, au final, le moteur qui nous poussera tous à *faire notre part* pour la planète.

Bibliographie

AVANT-PROPOS

Cicéron, 44 av. J.-C. – *De la Nature des dieux*, version de Pierre Du-Ryer, publiée par Antoine de Sommaville en 1657. Bibliothèque publique de Lyon, 508 p.

Chansigaud V., 2013 – *L'homme et la nature : Une histoire mouvementée*. Delachaux et Niestlé, 271 p.

de Vries B. J. M., 2013 – *Sustainability science*. Cambridge, 590 p.

Kineman J. J., Poli R., 2014 – Ecological literacy leadership: Into the mind of nature. *Bull. Ecol. Soc. Am.*, 95 : 30-58.

Pia J., 2012 – De *La nature des dieux* de Cicéron à l'*Abrégé* de Cornutus : une nouvelle représentation des élites dans la réflexion théologique ? *Camenae*, 10, http://www.paris-sorbonne.fr/IMG/pdf/ Varia_Jordi_Pia_derniere.pdf

Curtis D. J. et al, 2012 – Communicating ecology through art: what scientists think. *Ecology & Society*, 17 : 3.

http://www.lespetitsdebrouillards.org/

http://www.ecoliteracy.org/

PARTIE 1 – LES LIMITES DE LA TERRE

Galaz V. *et al.*, 2012 – Global environmental governance and planetary boundaries: An introduction. *Ecol. Econ.*, 81 : 1-3.

Goldin A., 2014 – *Is the planet full?* Oxford University Press, Oxford, 272 p.

Lynas M., 2011 – *The god species. Saving the planet in the age of humans*. National Geographic, 280 p.

Rockström J. *et al.*, 2009 – A safe operating space for humanity. *Nature,* 461 : 472-475.

Santos F. D., 2012 – *Humans on earth: from origins to possible futures*. Springer.

Wijkman A, Rockström J., 2012 – *Bankrupting nature: denying our planetary boundaries*. Routledge.

ANTHROPOCÈNE

Arrhenius S., 1896 – On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *Lond. Edinb. Dublin Phil. Mag. J. Sci.*, 41 : 237-275.

Balter M., 2013 – Archaeologists Say the 'Anthropocene' Is Here – But It Began Long Ago. *Science*, 340 : 261-262.

Costanza R. *et al.*, eds., 2007 – *Sustainability or Collapse? An Integrated History and Future of People on Earth*. MIT Press, Cambridge, MA.

Crutzen P. J., 2002 – Geology of mankind. *Nature*, 415 : 23.

Lorius C., Carpentier L., 2010 – *Voyage dans l'Anthropocène*. Actes Sud, 200 p.

Marsh G. P., 1864 – *Man and nature: or, physical geography as modified by human action*. Sampson Low, Son and Marston.

Pic P., 2013 – *De Darwin à Lévi-Strauss : L'homme et la diversité en danger*. Paris, Odile Jacob, 288 p.

Schwägerl C., 2012 – *L'âge de l'homme. Construire le monde de demain à l'ère de l'Anthropocène*. Manifestô, 320 p.

Seielstad G., 2012 – *Dawn of the Anthropocene – Humanity's Defining Moment*. American Geoscience Institute, Alexandria, 230 p.

Zalasiewicz J. *et al.*, 2011 – The Anthropocene: a new epoch of geological time? *Phil. Trans. R. Soc., A*, 369 : 835-841

http://www.journals.elsevier.com/anthropocene/

http://www.seuil.com/page-collection-anthropocene.htm

EMPREINTE HUMAINE

Beilin J., Imbert N., 2012 – Il faut de toute urgence sauver l'Arctique ! Pour une nouvelle gouvernance des hautes mers. *Le Monde*, 27/12/2002, p. 16.

Gaia V., 2011 – A Global Perspective on the Anthropocene. *Science*, 334 : 34-35.

Kareiva P. *et al.*, 2007 – Domesticated nature: Shaping landscapes and ecosystems for human welfare. *Science*, 316 : 1866-1869.

Penna A. N., 2010 – *The Human Footprint: A Global Environmental History*. Wiley-Blackwell.

Qiu J., 2013 – Pollutants Capture the High Ground in the Himalayas. *Science*, 339 : 1030-1031.

Rosa E. A. *et al.*, 2009 – *Human Footprints on the Global Environment: Threats to Sustainability*. MIT Press.

Sanderson E. W. *et al.*, 2002 – The human footprint and the last of the wild. *Bioscience*, 52 : 891-904.

Venzac H. *et al.*, 2008 – High frequency new particle formation in the Himalayas. *PNAS*, 105 : 15666-15671.

LA PARABOLE DU NÉNUPHAR

Meadows D.H. *et al.*, 1972 – *The Limits to Growth: A Report to The Club of Rome*. New York, Universe Books.

Quintero I., Wiens J. J., 2013 – Rates of projected climate change dramatically exceed past rates of climatic niche evolution among vertebrate species. *Ecology Letters*, 16 : 1095-1103.

Reid W.V. *et al.*, 2010 – Earth system science for global sustainability: grand challenges. *Science*, 330 : 916-917.

Santos F. D., 2012 – *Humans on earth: from origins to possible futures*. Springer, 409 p

Steffen W. *et al.*, 2007 – The Anthropocene: are humans now overwhelming the great forces of nature?. *Ambio: A Journal of the Human Environment*, 36 : 614-621.

Warren R. *et al.*, 2013 – Quantifying the benefit of early climate change mitigation in avoiding biodiversity loss. *Nature Clim. Change*, 3 : 678-682.

http://www.samuelhuet.com/kairos/35–aletheia/127–sur–le–rapport–meadows–le–nenuphar–qui–tue.html

CHANGEMENT CLIMATIQUE

Abram N. J. *et al.*, 2013 – Acceleration of snow melt in an Antarctic Peninsula ice core during the twentieth century. *Nature Geoscience*, 6 : 404-411.

Altizer S. *et al.*, 2013 – Climate change and infectious diseases: from evidence to a predictive framework. *Science*, 341 : 514–519.

Balmaseda M. A. *et al.*, 2013 – Distinctive climate signals in reanalysis of global ocean heat content. *Geophysical Research Letters*, 40 : 1-6.

Bard E. dir., 2006 – *L'Homme face au climat*. Symposium annuel, Collège de France, Paris, Odile Jacob.

Bouissou J., 2013 – Au Bangladesh, survivre avec le changement climatique. *Le Monde*, 12 février 2013.

Cai W. *et al.*, 2014 – Increasing frequency of extreme El Nino events due to greenhouse warming. *Nature Clim. Change*, 4 : 111-116.

Cazenave A. *et al.*, 2014 – The rate of sea-level rise. *Nature Clim. Change*, 4 : 358-361.

Coumou D., Rahmstorf S., 2012 – A decade of weather extremes. *Nature Clim. Change*, 2 : 491-496.

Courchamp F. *et al.*, 2014 – Climate change, sea-level rise, and conservation: keeping island biodiversity afloat. *TREE,* 29 : 127-130.

Craft C. *et al.*, 2009 – Forecasting the effects of accelerated sea-level rise on tidal marsh ecosystem services. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7 : 73-78.

Florian T. W. *et al.*, 2013 – Vulnerability of terrestrial island vertebrates to projected sea-level rise. *Global Change Biology,* 19 : 2058-2070.

Francou B., Vincent C., 2007 – *Les glaciers à l'épreuve du climat*. Paris, IRD Éditions/Belin.

Gardner A. S. *et al.*, 2013 – Reconciled estimate of glacier contributions to sea level rise: 2003 to 2009. *Science*, 340 : 852–857.

Hanigan I. C. *et al.*, 2012 – Suicide and drought in New South Wales, Australia, 1970-2007. *PNAS*, 109 :13950-13955.

Hansen B. B. *et al.*, 2013 – Climate Events Synchronize the Dynamics of a Resident Vertebrate Community in the High Arctic. *Science*, 339 : 313-315.

Houghton J., 2004 – *Global warming: the complete briefing*. Cambridge University Press, 351 p.

Hsiang S. M. *et al.*, 2011 – Civil conflicts are associated with the global climate. *Nature*, 476 : 438-441.

IPCC, 2013 – *Climate change 2013: the physical basis*. WHO, UNEP.

Kerr R. A., 2011 – Humans are driving extreme weather; time to prepare. *Science*, 334 : 1040.

Kerr R. A., 2012 – Ice–free arctic sea may be years, not decades, away. *Science*, 337 : 1791.

Levermann A. *et al.*, 2013 – The multimillennial sea-level commitment of global warming. *PNAS*, 110 : 13745-13750.

Li J. *et al.*, 2013 – El Nino modulations over the past seven centuries. *Nature Clim. Change*, 3 : 822-826.

Loarie S. R. *et al.*, 2009 – The velocity of climate change. *Nature*, 462 : 1052-1057.

Marcott S. A. *et al.*, 2013 – Reconstruction of regional and global temperature for the past 11,300 years. *Science*, 339 : 1198-1201.

Miller A. W, Ruiz G. M., 2014 – Arctic shipping and marine invaders. *Nature Clim. Change*, 4 : 413-416.

Newton P. C. D. *et al.*, 2007 – *Agroecosystems in a changing climate*. Taylor & Francis.

Nicholls R. J., Cazenave A., 2010 – Sea-level rise and its impact on coastal zones. *Science*, 328 : 1517-1520.

Nick F. M. *et al.*, 2013 – Future sea-level rise from Greenland's main outlet glaciers in a warming climate. *Nature*, 497 : 235-238.
Parenti C., 2011 – *Tropics of chaos. Climate change and the new geography of violence*. Nation Books.
Peters G. P. *et al.*, 2012 – Rapid growth in CO_2 emissions after the 2008-2009 global financial crisis. *Nature Clim. Change*, 2 : 2-4.
Peterson T. *et al.* eds, 2013 – Explaining extreme events of 2012 from a climate perspective. Special issue of the *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 94 (9).
Rabatel A. *et al.*, 2013 – Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere*, 7 : 81-102.
Roe G. H., Baker M. B., 2007 – Why is climate sensitivity so unpredictable? *Science*, 318 : 629-632.
Rodriguez A. B. *et al.*, 2014 – Oyster reefs can outpace sea-level rise. *Nature Clim. Change, doi* : 10.1038/nclimate2216
Ruddiman W. F., 2005 – *Plows, plagues and petroleum. How humans took control of climate*. Princeton University Press.
Shakun J. D. *et al.*, 2012 – Global warming preceded by increasing carbon dioxide concentrations during the last deglaciation. *Nature*, 484 : 49-54.
Spada G. *et al.*, 2012 – The gravitationally consistent sea-level fingerprint of future terrestrial ice loss. *Geophys. Res. Lett.*, 40 : 482-486.
Wigley T. M. L., Raper S. C. B., 1987 – Thermal expansion of sea water associated with global warming. *Nature*, 330 : 127-131.
Zemp M. *et al.*, 2009 – Six decades of glacier mass-balance observations : a review of the worldwide monitoring network. *Annals of Glaciology*, 50 : 101-111.
Zhang D. D. *et al.*, 2011 – The causality analysis of climate change and large-scale human crisis. *PNAS*, 108 : 17296-17301.
http://trillionthtonne.org/ pour visualiser le taux de CO2 émis dans l'atmosphère

CONTAMINANTS ATMOSPHÉRIQUES

Boissou J., 2014 – L'Inde détient le record mondial de décès liés aux maladies respiratoires. *Le Monde*, 29 janvier.
Bond T.C. *et al.*, 2013 – Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *J. Geophys. Res. Atmospheres*, 118 : 5380-5552.
Chameides W. L., Bergin M., 2002 – Soot takes center stage. *Science*, 297 : 2214-2215.
Corbett J. J. *et al.*, 2007 – Mortality from ship emissions: a global assessment. *Environmental Science & Technology,* 41 : 8512-8518.
Foucard S., 2014 – La pollution de l'air tue plus que le tabac. *Le Monde*, 27 mars.
Gurjar B. R. *et al.*, 2010 – Human health risks in megacities due to air pollution. *Atmospheric Environment*, 44 : 4606-4613.
Lynas M., 2011 – *The god species. Saving the planet in the age of humans*. National Geographic, 280 p.
McKibben B., 2010) – eaarth. *Making a life on a tough new planet*. St Martin's Griffin, 261 p.
Ramanathan V., Carmichael G., 2008 – Global and regional climate changes due to black carbon. *Nature geoscience,* 1 : 221-227.
Ramanathan V. *et al.*, 2005 – Atmospheric brown clouds: Impacts on South Asian climate and hydrological cycle. *PNAS*, 102 : 5326-5333.
Wang K. *et al.*, 2009 – Clear sky visibility has decreased over land globally from 1973 to 2007. *Science*, 323 : 1468-1470.
Xu B. *et al.*, 2009 – Black soot and the survival of Tibetan glaciers. *PNAS*, 106 : 22114-22118.
http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-quality/en

ACIDIFICATION DES OCÉANS

Baumann H. *et al.*, 2012 – Reduced early life growth and survival in a fish as a direct response to elevated CO_2 levels. *Nature Clim. Change*, 2 : 38-41.
De'ath G. *et al.*, 2009 – Declining coral calcification on the Great Barrier Reef. *Science*, 323 : 116-119.
Fabricius K. E. *et al.*, 2011 – Losers and winners in coral reefs acclimatized to elevated carbon dioxide concentrations. *Nature Clim. Change*, 1 : 165-169.
Feely R. A. *et al.*, 2009 – Ocean acidification: Present conditions and future changes in a high-CO_2 world. *Oceanography*, 22 :36-47.
Frommel A. Y. *et al.*, 2012 – Severe tissue damage in Atlantic cod larvae under increasing ocean acidification. *Nature Clim. Change*, 2 : 42-46.
Hönisch B. *et al.*, 2012 – The geological record of ocean acidification. *Science*, 335 : 1058-1063.
Malakoff D., 2012 – Researchers struggle to assess responses to ocean acidification. *Science*, 338 : 27-28.
Ogden L. E., 2013 – Marine life on acid. *BioScience*, 63 : 322-328.
Riebesell U. *et al.*, 2009 – Sensitivities of marine carbon fluxes to ocean change. *PNAS*, 106 : 20602-20609.
Sunday J. M. *et al.*, 2014 – Evolution in an acidifying ocean. *TREE*, 29 : 117-125.

DÉCHETS ET POLLUTIONS CHIMIQUES

Environmental Working group, 2009 – *Pollution in people – Cord blood contaminants in minority newborns*. Washington DC.
Guillette Jr L. J., Iguchi T., 2012 – Life in a Contaminated World. *Science*, 335 : 1614-1615.
Henry M. *et al.*, 2012 – A Common pesticide decreases foraging success and survival in honey bees. *Science*, 336 : 348-350.
Laist D., 1997 – « Impacts of marine debris: entanglement of marine life in marine debris including a comprehensive list of species with entanglement and ingestion records ». *In* Coe J. M, Rogers D. B., eds : *Marine debris: sources, impacts and solutions*. New York, Springer : 99-139.
Law K. L. *et al.*, 2010 – Plastic accumulation in the North Atlantic subtropical gyre. Science, 329 : 1185–1188.
Moore C.J. *et al.*, 2001 – A comparison of plastic and plankton in the North Pacific central gyre. *Mar. Pollut. Bull.*, 42 : 1297-1300.
Pacteau C., 2010 – Un pacte toxique. Éditions Amalthée.
Pham C. K. et al, 2014 – Marine litter distribution and density in European seas, from the shelves to deep basins. *PLoS ONE, 9* (4) : e95839.
Schuyler Q. *et al.*, 2014 – Global analysis of anthropogenic debris ingestion by sea turtles. *Conservation Biology*, 28 : 129-139.
Schwägerl C., 2012 – *L'âge de l'homme. Construire le monde de demain à l'ère de l'Anthropocène*. Manifestô.
Schwarzenbach R. P. *et al.*, 2006 – The challenge of micropollutants in aquatic systems. *Science*, 313 : 1072-1077.
Thompson R. C. *et al.*, 2009 – Our plastic age. *Phil. Trans. R. Soc. B*, 364 : 1973-1976.

ALTÉRATION DU CYCLE DE L'AZOTE ET D'AUTRES ÉLÉMENTS

Diaz R. J., Rosenberg R., 2008 – Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science*, 321 : 926-929.
Dyba C. L., 2005 – Dead zones spreading in world oceans. *BioScience*, 55 : 552-557.
Foucart S., 2012 – Le pergélisol, bombe à retardement pour le climat. *Le Monde*, 17 février, p. 7.
Fowler D. *et al.*, 2013 – The global nitrogen cycle in the twenty-first century. *Phil. Trans. R. Soc.* B, 368 : 20130164.
Galloway J. N. *et al.*, 2003 – The nitrogen cascade. *BioScience,* 53 : 341-356.
Galloway J. N. *et al.*, 2008 – Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions. *Science*, 320 : 889-892.
Hannah L., 2011 – *Climate change biology*. Academic Press, 402 p.
Jones D. L. *et al.*, 2013 – Nutrient stripping: the global disparity between food security and soil nutrient stocks. *Journal of Applied Ecology*, 50 : 851-862.
Koven C. D. *et al.*, 2011 – Permafrost carbon-climate feedbacks accelerate global warming. *PNAS*, 108 : 14769-14774.
Leach A., 2012 – Why we should care about our nitrogen footprint. *New Scientist*, 2866 : 27.
Nisbet E. G. *et al.*, 2014 – Methane on the Rise – Again. *Science*, 343 : 493-495.
Perga M. E. *et al.*, 2013 – Are cyanobacterial blooms trophic dead ends? *Oecologia*, 172 : 551-562.
Sebilo M. *et al.*, 2013 – Long-term fate of nitrate fertilizer in agricultural soils. PNAS, 110 : 18185-18189.
Smil V., 2001 – *Enriching the Earth: Fritz Haber, Carl Bosch and the Transformation of World Food Production.* Cambridge, MA, The MIT Press, 338 p.

Sutton M. A. *et al.*, 2013 – *Our Nutrient World: The challenge to produce more food and energy with less pollution.* Centre for Ecology & Hydrology, 120 p.
Tan Z. X. *et al.*, 2005 – Global soil nutrient depletion and yield reduction. *J. Sust. Agri.*, 26 : 123-146.
UNEP, WHRC, 2007 – *Reactive nitrogen in the environment: too much or too little of a good thing*. United Nations Environment Programme, Paris.
Whiteman G. *et al.*, 2013 – Climate science: Vast costs of Arctic change. *Nature*, 499 : 401-403.
Woodward G. *et al.*, 2012 – Continental–scale effects of nutrient pollution on stream ecosystem functioning. *Science*, 336 : 438-440.
http://en.wikipedia.org/wiki/Eutrophication

ÉROSION DE LA BIODIVERSITÉ

Barnosky A. D. *et al.*, 2011 – Has the Earth's sixth mass extinction already arrived? *Nature*, 471 : 51-57.
Boyles J. G. *et al.*, 2011 – Economic importance of bats in agriculture. *Science*, 332 : 41-42.
Butchart S. H. M. *et al.*, 2010 – Global biodiversity: indicators of recent declines. *Science*, 328 : 1164-1168.
Cardinale B., 2012 – Impacts of biodiversity loss. *Science*, 336 : 552-553.
Court M., 2012 – La pêche des petits poissons sur la sellette. *Le Figaro*, 10 avril, p. 11.
Cury P. M. *et al.*, 2011 – Global seabird response to forage fish depletion – one–third for the birds. *Science*, 334 : 1703-1706.
Delbecq D., 2013 – Entretien avec Philippe Cury. *La Recherche*, juillet–août 2013 : 94-97.
Delord J., 2010 – *L'extinction d'espèces – Histoire d'un concept et enjeux éthiques*. Paris, Publications scientifiques du Muséum.
Gibson L. *et al.*, 2013 – Near-complete extinction of native small mammal fauna 25 years after forest fragmentation. *Science*, 341 : 1508-1510.
Hooper D. U. *et al.*, 2012 – A global synthesis reveals biodiversity loss as a major driver of ecosystem change. *Nature*, 486 : 105-108.
Kolbert E, 2014 – *The Sixth Extinction – An Unnatural History*. Henry Holt and Co, 336 p
Lotze H. K.,Worm B., 2009 – Historical baselines for large marine animals. *TREE*, 24 : 254-262.
McKinney M. L., Lockwood J. L., 1999 – Biotic homogenization: a few winners replacing many losers in the next mass extinction. *TREE*, 14 : 450-453.
Mouillot D. *et al.*, 2013 – Rare species support vulnerable functions in high–diversity ecosystems. *PLoS Biol.*, 11 : e1001569.
Naeem S. *et al.*, 2012 – The functions of biological diversity in an age of extinction. Science, 336 : 1401-1406.
Pauly D. *et al.*, 1998 – Fishing down marine food webs. *Science*, 279 :860-863.
Perrings C. *et al.*, 2010 – Ecosystem services for 2020. *Science*, 330 : 323-324.
Perrings C., 2014 – *Our Uncommon Heritage: Biodiversity Change, Ecosystem Services, and Human Wellbeing*. Cambridge University Press, 557 p.
Raup D. M., 1986 – Biological extinction in earth history. *Science*, 231 : 1528-1533.
Rockström J., 2009 – A safe operating space for humanity. *Nature*, 461 : 472-475.
Sax D. F., Gaines S. D., 2008 – Species invasions and extinction: the future of native biodiversity on islands. *PNAS*, 105 : 11490-11497.
Sekercioglu C. H., 2011 – Functional extinctions of bird pollinators cause plant declines. *Science*, 331 : 1019-1020.
Vanbergen A. J., Initiative, T. I. P. 2013 – Threats to an ecosystem service: pressures on pollinators. *Front. Ecol. Environ.*, 11 : 251-259.
Vilcinskas A. *et al.*, 2013 – Invasive harlequin ladybird carries biological weapons against native competitors. *Science*, 340 : 862-863.
Wardle D. A. *et al.*, 2011 – Terrestrial ecosystem responses to species gains and losses. *Science*, 332 : 1273-1277.
www.europe–aliens.org

CHANGEMENT D'USAGE DES TERRES

Bonhommeau S. *et al.*, 2013 – Eating up the world's food web and the human trophic level. *PNAS*, 110 : 20617-20620.
Broswimmer F., 2002 – *Ecocide: A Short History of Mass Extinction of Species*. Pluto Press, 204 p.
Cornet A., 2002 – *La désertification à la croisée de l'environnement et du développement. Un problème qui nous concerne.* Johannesburg, Sommet mondial du Développement durable – Rapport du ministère des Affaires étrangères, Paris.
Diamond J., 2005 – *Collapse*. Viking Penguin.
FAO, 2010 – *Évaluation des ressources forestières mondiales 2010 – Rapport principal*, 348 p.
FAO, 2012 – *La situation des forêts dans le Monde*. Rome, 53 p.
Foley J. A. *et al.*, 2005 – Global consequences of land use. *Science*, 309 : 570-574.
Gibson L. *et al.*, 2011 – Primary forests are irreplaceable for sustaining tropical biodiversity. *Nature*, 478 : 378-381.
Gliessman S. R., 2007 – *Agroecology. The ecology of sustainable systems*. CRC Press, 384 p.
Grimm N. B. *et al.*, 2008 – Global change and the ecology of cities. *Science*, 319 : 756-760.
Hansen M. C., 2013 – High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 342 : 850-843.
Kastner T. *et al.*, 2012 – Global changes in diets and the consequences for land requirements for food. PNAS, 109 : 6868-6872.
Laurance W.F. *et al.*, 2014 - A global strategy for road building. Nature, doi:10.1038/nature13717
Mantyka-Pringle C. S. *et al.*, 2012 – Interactions between climate and habitat loss effects on biodiversity : a systematic review and meta-analysis. *Glob. Change Biol.*, 18 : 1239-1252.
McKinney M. L., 2006 – Urbanization as a major cause of species homogenization. *Biol. Cons.*, 127 : 247-260.
Paquette A., Messier C., 2009 – The role of plantations in managing the world's forests in the Anthropocene. *Front. Ecol. Environ.*, 8 : 27-34.
Pereira H. M. *et al.*, 2012 – Global biodiversity change : the bad, the good, and the unknown. *Annu. Rev. Environ. Resour.*, 37 : 25-50.
Pitman M. G., Läuchli A., 2002 – « Global impact of salinity and agricultural ecosystems ». *In* Läuchli A., Lüttge U., eds : *Salinity: Environment-plants-molecules*, Dordrecht, the Netherlands, Kluwer Academic Publishers.
Sachs J. D., 2008 – *Common Wealth: Economics for a crowded planet*. Penguin Press.
Safriel U. *et al.*, 2005 – « Dryland systems ». *In* Hassan R. M., Scholes R., Ash N., eds : *Millennium Ecosystem Assessment: ecosystems and human well-being: current state and trends*, Washington DC, Island Press.
Smedema L. K., Shiati K., 2002 – Irrigation and salinity: a perspective review of the salinity hazards of irrigation development in the arid zone. *Irrigat. Drain. Syst.*, 16 : 161-174.
Spracklen D. V. *et al.*, 2012 – Observations of increased tropical rainfall preceded by air passage over forests. *Nature*, 489 : 282-285.
Stringer L., 2008 – Can the UN Convention to Combat Desertification guide sustainable use of the world's soils? *Front. Ecol. Environ.*, 6 : 138-144.
Swinburn B. A. *et al.*, 2011 – The global obesity pandemic: shaped by global drivers and local environments. *The Lancet*, 378 : 804-814.
UNCCD (United Nations Convention to Combat Desertification), 1994 – *The United Nations Convention to Combat Desertification in those countries experiencing serious drought and/or desertification, particularly in Africa*. Bonn, Germany Secretariat of the United Nations Convention to Combat Desertification.
United Nations Population Fund, 2007 – *State of the World Population: Unleashing the Potential of Urban Growth*. United Nations Population Fund, New York.
Verstraete M. M. *et al.*, 2009 – Climate and desertification: looking at an old problem through new lenses. *Front. Ecol. Environ.*, 7 : 421-428.
Williams M., 2002 – *Deforesting the earth: from prehistory to global crisis*. University of Chicago Press.
Zhang G. J. *et al.*, 2013 – Energy consumption and the unexplained winter warming over northern Asia and North America. *Nature Clim. Change*, 3 : 466-470.
http://faostat.fao.org/
http://www.100people.org/
http://www.romandie.com/news/n/_Trame_verte_et_bleue_ne_pas_reduire_le_projet_a_des_crapauducs_181020111710.asp

RESSOURCES EN EAU DOUCE

Allan J. A., 1998 – Virtual water: A strategic resource global solutions to regional deficits. *Ground Wat.*, 36 : 545-546.

Allen M. R., Ingram W. J., 2002 – Constraints on the future changes in the hydrological cycle. *Nature*, 419 : 224-232.

Bakker K., 2012 – Water security: research challenges and opportunities. *Science*, 337 : 914-915.

Barnett T. P. *et al.*, 2005 – Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438 : 303-309.

Boniface P., 2012 – L'eau est un enjeu stratégique, pas un facteur de guerre. *La Croix*, 5 avril, p. 27.

Gilbert N., 2012 – Water under pressure. *Nature*, 483 : 256-257.

Grey D. *et al.*, 2013 – Water security in one blue planet: twenty-first century policy challenges for science. *Phil. Trans. R. soc. A*, 371 : 20120406.

Hervieu S., 2013 – 2,4 milliards d'habitants privés d'eau potable. *Le Monde*, 15 mai.

Hoekstra A. Y., Mekonnen M. M., 2012 – The water footprint of humanity. *PNAS*, 109 : 3232-3237.

Kundzewicz Z. W., Kowalczak P., 2009 – The potential for water conflict is on the increase. *Nature*, 459 : 31.

Lynas M., 2011 – *The god species. Saving the planet in the age of humans*. National Geographic, 280 p.

Payen G., 2013 – *De l'eau pour tous*. Paris, Armand Colin, 216 p.

Sedlack D., 2014 – *Water 4.0: The Past, Present, and Future of the World's Most Vital Resource*. Yale University Press, 353 p.

Vörösmarty C. J. *et al.*, 2010 – Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 467 : 555-561.

World Water Council, 2004 – *E–Conference Synthesis: Virtual Water Trade* – Conscious Choices, March 2004.

Wu P. *et al.*, 2013 – Anthropogenic impact on Earth's hydrological cycle. *Nature Clim. Change*, 3 : 807-810.

http://www.empreinte–de–l–eau.org

http://www.icold–cigb.org/GB/World_register/general_synthesis.asp

VULNÉRABILITÉ

Adger W. N., 2006 –Vulnerability. *Glob. Environ. Change*, 16 : 268-281.

Becerra S., Peltier A. D., 2009 – *Risques et environnement : recherches interdisciplinaires sur la vulnérabilité des sociétés*. Paris, L'Harmattan, Sociologies et environnement.

Beck U., 1986 – *Risikogesellschaft. Auf dem Weg in eine andere Moderne*. Frankfurt am Main, Suhrkamp (Trad. française : *La société du risque. Sur la voie d'une autre modernité*. Paris, Aubier, 2001).

Bourg D. *et al.*, 2013 – *Du risque à la menace. Penser la catastrophe*. PUF.

Carpenter S. R., Gunderson L. H., 2001 – Coping with collapse: ecological and social dynamics in ecosystem management. *BioScience*, 51 : 451-457.

Chapin F. S. *et al.*, 2009 – *Principles of ecosystem stewardship*. Springer, 401 p.

May R. M. *et al.*, 2008 – Complex systems: Ecology for bankers. *Nature*, 451 : 893-895.

Sidle R. C. *et al.*, 2013 – Broader perspective on ecosystem sustainability: Consequences for decision making. *PNAS*, 110 : 9201-9208.

Thomas H., 2008 – *Vulnérabilité, fragilité, précarité, résilience*. Recueil Alexandries, Collections Esquisses.

Turner B. L. *et al.*, 2003 – Illustrating the coupled human environment system for vulnerability analysis: Three case studies. *PNAS*, 100 : 8080-8085.

Turner B. L. *et al.*, 2003 – A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *PNAS*, 100 : 8074-8079.

Vandenberghe F., 2001 – Introduction à la sociologie (cosmo) politique du risque d'Ulrich. *Revue du MAUSS*, 1 : 25-39.

Walker B., Salt D., 2006 – *Resilience thinking: sustaining ecosystems and people in a changing world*. Island Press.

http://www.reseau–terra.eu/article697.html

POINT DE BASCULEMENT

Barnosky A. D. *et al.*, 2012 – Approaching a state shift in Earth's biosphere. *Nature*, 486 : 52-58.

Brook B. W. *et al.*, 2013 – Does the terrestrial biosphere have planetary tipping points? *TREE*, 28 : 380-382.

Carpenter S. R. *et al.*, 1999 – Management of eutrophication for lakes subject to potentially irreversible change. *Ecol. Appl.*, 9 : 751-771.

Davis R. M., 2000 – Moving tobacco control beyond "the tipping point" – Ample funding, strong policies, and "unsticky" cigarettes are key. *Brit. Med. J.*, 321 : 309-310.

Gladwell M., 2002 – *The tipping point: How little things can make a big difference*. Back Bay Books, 301 p.

Grodzins M., 1957 – Metropolitan Segregation. *Scientific American*, 197 : 33-41.

Helbing D., 2013 – Globally networked risks and how to respond. *Nature*, 497 : 51-59.

Hughes T. P. *et al.*, 2013 – Multiscale regime shifts and planetary boundaries. *TREE*, 28 : 389-395.

Kéfi S., 2012 – *Des écosystèmes sur le fil : Comment certains écosystèmes basculent d'un état à un autre, regards et débats sur la biodiversité*. R37, http://www.sfecologie.org/regards/2012/10/19/r37–hysteresis–sonia–kefi/

Kéfi S. *et al.*, 2013 – Early warning signals also precede non–catastrophic transitions. *Oikos*, 122 : 641-648.

Lenton T. M. *et al.*, 2008 – Tipping elements in the Earth's climate system. *PNAS*, 105 : 1786-1793.

Scheffer M., 2009 – *Critical transitions in nature and society*. Princeton, 384 p.

Scheffer M. *et al.*, 2001 – Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, 413 : 591-596.

Scheffer M. *et al.*, 2012 – Thresholds for boreal biome transitions. *PNAS*, 109 : 21384-21389.

Schwab W. A., Marsh E., 1980 – The tipping-point model – Prediction of change in the racial composition of Cleveland, Ohio, neighborhoods, 1940-1970. *Environ. Planning A*, 12 : 385-398.

Walker G., 2006 – The tipping point of the iceberg. *Nature*, 441 : 802-805.

BOUCLE DE RÉTROACTION

Chapin F. S. *et al.*, 2009 – *Principles of ecosystem stewardship*. Springer, 401 p.

Davidson E. A., Janssens I. A., 2006 – Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 440 : 165-173.

Hunter M. D., Price P. W., 1992 – Playing chutes and ladders: heterogeneity and the relative roles of bottom-up and top-down forces in natural communities. *Ecology*, 73 : 723-732.

Kurz W. A. *et al.*, 2008 – Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change. Nature, 452 : 987-990.

Melillo J. M. *et al.*, 1996 – T*errestrial biotic responses to environmental change and feedbacks to climate*. Cambridge University Press.

Patten B. C., Odum E. P., 1981 – The cybernetic nature of ecosystems. *Am. Nat.*, 118 : 886-895.

Rosenfeld D. *et al.*, 2001 – Desert dust suppressing precipitation: A possible desertification feedback loop. *PNAS*, 98 : 5975-5980.

Shugart H. H., Woodward F. I., 2011 – *Global change and the terrestrial biosphere. Achievements and challenges*. Wiley-Blackwell, 242 p.

http://fr.wikipedia.org/wiki/Ouroboros

http://www.christian–faure.net/2007/07/12/la–cybernetique–et–lheritage–de–norbert–wiener/

RÉSILIENCE

Bellwood D. R. *et al.*, 2003 – Limited functional redundancy in high diversity systems: resilience and ecosystem function on coral reefs. *Ecol. Lett.*, 6 : 281-285.

Biggs R. *et al.*, 2012 – Toward principles for enhancing the resilience of ecosystem services. *Ann. Rev. Environ. Res.*, 37 : 421-448.

Bolis A., 2013 – Très vulnérable, le Vanuatu apprend à lutter contre la montée des eaux. *Le Monde week-end*, 28 septembre, p. 5.

Campos G. E. P. *et al.*, 2013 – Ecosystem resilience despite large-scale altered hydroclimatic conditions. *Nature*, 494 : 349-353.

Dauphiné A., Provitolo D., 2007 – La résilience : un concept pour la gestion des risques. *Annales de géographie*, 654 : 115-125.

Holling C. S. 1973 – Resilience and stability of ecological systems. *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, 4 : 1-23.

Mathieu J. P., 1991 – *Dictionnaire de physique*. Paris, Masson, 567 p.

McCulloch M. *et al.*, 2012 – Coral resilience to ocean acidification and global warming through pH up–regulation. *Nature Clim. Change*, 2 : 1-5.

McMichael A. J., 2012 – Insights from past millennia into climatic impacts on human health and survival. *PNAS*, 109 : 4730-4737.

Neubauer P. *et al.*, 2013 – Resilience and recovery of overexploited marine populations. *Science*, 340 : 347-349.
Rode S., 2012 – Le chêne ou le roseau : quelles stratégies de gestion du risque d'inondation en France? *Cybergeo : Europ. J. Geogr.*, DOI : 10.4000/cybergeo.2529

PARTIE 2 – LES LIMITES DE LA TERRE

Bellard C. *et al.*, 2012 – Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecol. Lett.*, 15 : 365-377.
Craig M., Agudo R., 2013 – The future of species under climate change: resilience or decline? *Science*, 341 : 504-508.
Dawson T. P. *et al.*, 2011 – Beyond predictions: biodiversity conservation in a changing climate. *Science*, 332 : 53-58.
O'Connor M. I. *et al.*, 2012 – Toward a conceptual synthesis for climate change responses. *Global Ecology and Biogeography*, 21 : 693-703.
Peñuelas J. *et al.*, 2013 – Evidence of current impact of climate change on life: a walk from genes to the biosphere. *Glob. Change Biol.*, 19 : 2303-2338.
Williams S. E. *et al.*, 2008 – Towards an integrated framework for assessing the vulnerability of species to climate change. *PLoS biol.*, 6 : e325.
Garcia R. A., 2014 – Multiple dimensions of climate change and their implications for biodiversity. *Science*, 344 : 1247579.

MICROCLIMAT

Angilletta M. J. Jr, 2009 – *Thermal Adaptation: A Theoretical and Empirical Synthesis*. Oxford, Oxford University Press.
Araújo M. B. *et al.*, 2013 – Heat freezes niche evolution. *Ecol. Lett.*, 16 : 1206-1219.
Becquerel A. C. M., 1860 – *Recherches sur la température des végétaux et de l'air et sur celle du sol à diverses profondeurs*. Firmin Didot frères, fils et Cie, 271 p.
Belyakov A. A., 1991 – Hydraulic engineering and the environment in antiquity. *Hydrotechn.Construct.*, 25 : 516-523.
Brassens G., 1966 – *Supplique pour être enterré sur la plage de Sète*. CD audio.
Gestich C. C. *et al.*, 2014 – Behavioural Thermoregulation in a Small Neotropical Primate. *Ethology*, doi: 10.1111/eth.12203.
Helmuth B. *et al.*, 2002 – Climate change and latitudinal patterns of intertidal thermal stress. *Science*, 298 : 1015-1017.
Kearney M. *et al.*, 2009 – The potential for behavioral thermoregulation to buffer "cold-blooded" animals against climate warming. *PNAS*, 106 : 3835-3840.
Pennisi E., 2012 – Virtual Hot Spots. *Science*, 336 : 172-174.
Pincebourde S., Casas J., 2006 – Multitrophic biophysical budgets: thermal ecology of an intimate herbivore insect-plant interaction. *Ecol. Monogr.*, 76 : 175-194.
Potter K. A. *et al.*, 2013 – Microclimatic challenges in global change biology. *Glob. Change Biol.*, 19 : 2932-2939.
Scheffers B. R., *et al.*, 2014 – Microhabitats reduce animal's exposure to climate extremes. *Glob. Change Biol.*, 20 : 495-503.
Scherrer D., Körner C., 2010 – Infra-red thermometry of alpine landscapes challenges climatic warming projections. *Glob. Change Biol.*, 16 : 2602-2613.
Warren R. *et al.*, 2013 – Quantifying the benefit of early climate change mitigation in avoiding biodiversity loss. *Nature Clim. Change*, 3 : 678-682.
Wilken G. C., 1972 – Microclimate management by traditional farmers. *Geograph. Revi.*, 12 : 544-560.
http://www.saidwhat.co.uk/quotes/sport/jose_mourinho/during_the_afternoon_it_rained_only_16897

TRAITS DE VIE DES ESPÈCES

Botts E. A. *et al.*, 2013 – Small range size and narrow niche breadth predict range contractions in South African frogs. *Glob. Ecol. Biogeogr.*, 22 : 567-576.
Brown J., 2005 – *The Comedy Thesaurus: 3,241 Quips, Quotes, and Smartass Remarks*. Quirk Books.
Clavel J. *et al.*, 2010 – Worldwide decline of specialist species: toward a global functional homogenization? *Front. Ecol. Environ.*, 9 : 222-228.
Davey C. M. *et al.*, 2012 – Rise of the generalists: evidence for climate driven homogenization in avian communities. *Glob. Ecol. Biogeogr.*, 21 : 568-578.
Diamond S. E. *et al.*, 2011 – Species' traits predict phenological responses to climate change in butterflies. *Ecology*, 92 : 1005-1012.
Fisher L., 2011 – *Crashes, crises and calamities*. Basic Books.
Gardner J. L. *et al.*, 2011 – Declining body size: a third universal response to warming? *TREE*, 26 : 285-291.
IUCN (International Union for the Conservation of Nature), 2009 – *IUCN Red List of threatened species*. Version 2009.2. http://www.iucnredlist.orgi
Jung K., Kalko E. K., 2011 – Adaptability and vulnerability of high flying Neotropical aerial insectivorous bats to urbanization. *Div. Distr.*, 17 : 262-274.
Koch P. L., Barnosky A. D., 2006 – Late Quaternary extinctions: state of the debate. *Ann. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, 37 : 215-250.
May R. M., 1976 – The ecology of dragons. *Nature*, 264 : 16-17.
Mayer G. C., Poe S., 2011 – « Anolis proboscis ». *In* : IUCN 2013. IUCN Red List of Threatened Species. Version 2013.2. <www.iucnredlist.org>.
McNees J., 2014 – Life history and spatial traits predict extinction risk due to climate change. *Nature Clim. Change*, 4 : 217-221.
Meyer S. *et al.*, 2013 – Dramatic losses of specialist arable plants in Central Germany since the 1950s/60s – a cross–regional analysis. *Div. Distr.*, 19 : 1175-1187.
Öckinger E. *et al.*, 2010 – Life-history traits predict species responses to habitat area and isolation: a cross-continental synthesis. *Ecol. Lett.*, 13 : 969-979.
Olden J. D. *et al.*, 2007 – Small fish, big fish, red fish, blue fish: size-biased extinction risk of the world's freshwater and marine fishes. *Glob. Ecol. Biogeogr.*, 16 : 694-701.
Radtke M. G. *et al.*, 2008 – Forest fragment size effects on dung beetle communities. *Biol. Cons.*, 141 : 613-614.
Rode K. D. *et al.*, 2010 – Reduced body size and cub recruitment in polar bears associated with sea ice decline. *Ecol. Appl.*, 20 : 768-782
Rule S. *et al.*, 2012 – The aftermath of megafaunal extinction: ecosystem transformation in Pleistocene Australia. *Science*, 335 : 1483-1486.
Sheridan J. A., Bickford D., 2011 – Shrinking body size as an ecological response to climate change. *Nature Clim. Change*, 1 : 401-406.
Stearns S. C., 1992 – *The Evolution of Life Histories*. Oxford University Press.
Urban M. C. *et al.*, 2012 – On a collision course: competition and dispersal differences create no-analogue communities and cause extinctions during climate change. *Proc. R. Soc. L. B*, 279 : 2072-2080.

ESPÈCES SENTINELLES

Bickford D. P. *et al.*, 2011 – Climate change responses: forgetting frogs, ferns and flies? *TREE*, 26 : 553-554.
Deutsch C. A. *et al.*, 2008 – Impacts of climate warming on terrestrial ectotherms across latitude. *PNAS*, 105 : 6668-6672.
Diffenbaugh N. S., Field C. B., 2013 – Changes in ecologically critical terrestrial climate conditions. *Science*, 341 : 486-492.
Halliday T., 2000 – Do frogs make good canaries? *Biologist* (London), 47 :143-146.
Hof C. *et al.*, 2011 – Additive threats from pathogens, climate and land-use change for global amphibian diversity. *Nature*, 480 : 516–519.
Kerby J. L. *et al.*, 2010 – An examination of amphibian sensitivity to environmental contaminants: are amphibians poor canaries? *Ecol. Lett.*, 13 : 60-67.
McCain C. M., Colwell R. K., 2011 – Assessing the threat to montane biodiversity from discordant shifts in temperature and precipitation in a changing climate. *Ecol. Lett.*, 14 : 1236-1245.
Paaijmans K. P. *et al.*, 2013 – Temperature variation makes ectotherms more sensitive to climate change. *Glob. Change Biol.*, 19 : 2373-2380.
Primack R. B. *et al.*, 2012 – *Biologie de la conservation*. Dunod
Ricketts T. H. *et al.*, 2005 – Pinpointing and preventing imminent extinctions. *PNAS*, 102 : 18497-18501.
Rivière J. L., 1993 – Les animaux sentinelles. *Courrier de l'Environnement de l'INRA*, 20 : 59-67.
Roelants K. *et al.*, 2007 – Global patterns of diversification in the history of modern amphibians. *PNAS*, 104 : 887-892.
Rohr J. R., Palmer B. D., 2013 – Climate change, multiple stressors, and the decline of ectotherms. *Cons. Biol.*, 27 : 741-751.
Wake D. B., 2012 – Facing extinction in real time. *Science*, 335 : 1052-1053.
Walters R. J. *et al.*, 2012 – Forecasting extinction risk of ectotherms under climate warming: an evolutionary perspective. *Func. Ecol.*, 26 : 1324-1338.
Williams J. W. *et al.*, 2007 – Projected distributions of novel and disappearing climates by 2100 AD. *PNAS*, 104 : 5738-5742.

FLUX GÉNÉTIQUE

Kareiva P., Marvier M., 2011 – *Conservation science. Balancing the needs of people and nature*. Roberts & Company Publishers, 543 p.

Primack R. B. *et al.*, 2012 – *Biologie de la conservation*. Dunod.
Sexton J. P. *et al.*, 2011 – Gene flow increases fitness at the warm edge of a species' range. *PNAS*, 108 : 11704-11709.
Delord J., 2010 – *L'extinction d'espèces – Histoire d'un concept et enjeux éthiques*. Paris, Publications scientifiques du Muséum.
Eastham K., Sweet J., 2002 – Genetically Modified Organisms (GMOs): The significance of gene flow through pollen transfer. *Environmental Issue Report 28*, European Environmental Agency, Copenhagen, Denmark.
Mackinnon M. J., Marsh K., 2010 – The selection landscape of malaria parasites. *Science*, 328 : 866-871.
Say L. *et al.*, 2012 – Distribution and spatial genetic structure of European wildcat in France. *Anim. Cons.*, 15 : 18-27.
Frankham R. *et al.*, 2010 – *Introduction to Conservation Genetics*. Cambridge University Press, 644 p.

POLLUTION SENSORIELLE

Bignami S. *et al.*, 2013 – Ocean acidification alters the otoliths of a pantropical fish species with implications for sensory function. *PNAS*, 110 : 7366-7370.
Blaxter J. H. S., Ten Hallers-Tjabbes C. C., 1992 – The effect of pollutants on sensory systems and behaviour of aquatic animals. *Neth. J. Aquat. Ecol.*, 26 : 43-58.
Dangles O. *et al.*, 2009 – Variability in sensory ecology: expanding the bridge between physiology and evolutionary biology. *Quart. Rev. Biol.*, 84 : 51-74.
Davies T. W .*et al.*, 2013 – Artificial light pollution: are shifting spectral signatures changing the balance of species interactions? *Glob. Change Biol.*, 19 : 1417-1423.
Dominoni D. *et al.*, 2013 – Artificial light at night advances avian reproductive physiology. *Proc. R. Soc. L. B*, 280 : 20123017.
Dwyer R. G. *et al.*, 2013 – Shedding light on light: benefits of anthropogenic illumination to a nocturnally foraging shorebird. *J. Anim. Ecol.*, 82 : 478-485.
Endler J. A., 1997 – « Light, behavior and conservation of forest–dwelling organisms ». *In* Clemmons J. R., Buchholz R. : *Behavioral Approaches to Conservation in the Wild*, Cambridge University Press : 330-356.
Francis C. D. *et al.*, 2012 – Noise pollution alters ecological services: enhanced pollination and disrupted seed dispersal. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 279 : 2727-2835.
Gaston K. J. *et al.*, 2013 – The ecological impacts of nighttime light pollution: a mechanistic appraisal. *Biol Rev.*, 88 : 912-927.
Longcore T., Rich C., 2006 – *Ecological consequences of artificial night lighting*. Washington DC, Island Press.
Munday P. L. *et al.*, 2009 – Ocean acidification impairs olfactory discrimination and homing ability of a marine fish. *PNAS*, 106 : 1848-1852.
Nemeth E. *et al.*, 2013 – Bird song and anthropogenic noise: vocal constraints may explain why birds sing higher-frequency songs in cities. *Proc. R. Soc. L. B*, 280 : 20122798.
Seehausen O. *et al.*, 1997 – Cichlid fish diversity threatened by eutrophication that curbs sexual selection. *Science*, 277 : 1808-1811.
Seehausen O. *et al.*, 2008 – Speciation through sensory drive in cichlid fish. *Nature*, 455 : 620-626.

ANOMALIES PHÉNOLOGIQUES

Cleland E. E. *et al.*, 2007 – Shifting plant phenology in response to global change. *TREE*, 22 : 357-365.
Diamond S. E. *et al.*, 2011 – Species' traits predict phenological responses to climate change in butterflies. *Ecology*, 92 : 1005-1012.
Hannah L., 2012 – *Climate Change Biology*. Academic Press.
Kauserud H. *et al.*, 2012 – Warming-induced shift in European mushroom fruiting phenology. *PNAS*, 109 : 14488-14493.
Lane J. E. *et al.*, 2012 – Delayed phenology and reduced fitness associated with climate change in a wild hibernator. *Nature*, 489 : 554-558.
Menzel A., Dose V., 2005 – Analysis of long-term time-series of beginning of flowering by Bayesian function estimation. *Meteorol. Z.*, 14 : 429-34.
Parmesan C., 2006 – Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, 37 : 637-69.
Peñuelas J., Filella I., 2001 – Responses to a warming world. *Science*, 294 : 793.
Peñuelas J. *et al.*, 2009 – Phenology Feedbacks on Climate Change. *Science*, 324 : 887-888.
Peñuelas J *et al.*, 2013 – Evidence of current impact of climate change on life: a walk from genes to the biosphere. *Glob. Change Biol.*, 19 : 2303-2338.
Tøttrup A. P. *et al.*, 2012 – Drought in Africa caused delayed arrival of European songbirds. *Science*, 338 : 1307-1307.
Visser M. E., Both C., 2005 – Shifts in phenology due to global climate change: the need for a yardstick. *Proc. R. Soc. L. B*, 272 : 2561-2569.
Walther G. R. *et al.*, 2002 – Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416 : 389-395.

PETITES POPULATIONS

Courchamp F., Macdonald D., 2001 – Crucial importance of pack size in African wild dogs *Lycaon pictus*. *Anim. Cons.*, 4 : 169-174.
Courchamp F. *et al.*, 2009 – *Allee Effects in Ecology and Conservation*. Oxford University Press, 272 p.
Courchamp F. E. *et al.*, 2006 – Value of rarity and species extinction: the anthropogenic Allee effect. *PLoS Biol.*, 4 : e415.
Frankham R. *et al.*, 2010 – *Introduction to Conservation Genetics*. Cambridge University Press.
Gascoigne J. *et al.*, 2009 – Dangerously few liaisons: a review of mate-finding Allee effects. *Pop. Ecol.*, 51 : 355-372
Lande R., 1999 – « Extinction risks from anthropogenic, ecological, and genetic factors ». *In* Landweber L., Dobson A., eds : *Genetics and the extinction of species*, Princeton University Press, 192 p.
Smith J. N., Ed., 2006 – *Conservation and biology of small populations*. Oxford University Press.
Stephens P. A., Sutherland W. J., 1999 – Consequences of the Allee effect for behaviour, ecology and conservation. *TREE*, 14 : 401-405.
Wilcock C., Neiland R., 2002 – Pollination failure in plants: why it happens and when it matters. *Trends Plant Sci.*, 7 : 270-277.

EFFETS DE LISIÈRE

Broadbent E. N. *et al.*, 2008 – Forest fragmentation from deforestation and selective logging in the Brazilian Amazon. *Conserv. Biol.*, 141 : 1745-1757.
Gibson L. *et al.*, 2013 – Near-complete extinction of native small mammal fauna 25 years after forest fragmentation. *Science*, 341 : 1508-1510.
Hanski I., 2011 – Habitat loss, the dynamics of biodiversity, and a perspective on conservation. *Ambio*, 40 : 248-255.
Laurance W. F. *et al.*, 2002 – Ecosystem decay of Amazonian forest fragments: a 22-year investigation. *Conserv. Biol.*, 16 : 605-618.
Laurance W. F. *et al.*, 2009 – Impacts of roads and linear clearings on tropical forests. *TREE*, 24 : 659-669.
Laurance W. F. *et al.*, 2011 – The fate of Amazonian forest fragments: a 32-year investigation. *Biol. Cons.*, 144 : 56-67.
Murcia C., 1995 – Edge effects in fragmented forests:implications for conservation. *TREE*, 10 : 58-62.
Suárez-Esteban A. *et al.*, 2013 – Barriers or corridors? The overlooked role of unpaved roads in endozoochorous seed dispersal. *J. Appl. Ecol.*, 50 : 767-774.

PIÈGE ÉCOLOGIQUE

Battin J., 2004 – When good animals love bad habitats: ecological traps and the conservation of animal populations. *Cons. Biol.*, 18 : 1482-1491.
Hallier J. P., Gaertner D., 2008 – Drifting fish aggregation devices could act as an ecological trap for tropical tuna species. *Mar. Ecol. Progr. Series*, 353 : 255-264.
Hawlena D. *et al.*, 2010 – Ecological trap for desert lizards caused by anthropogenic changes in habitat structure that favor predator activity. *Cons. Biol.*, 24 : 803-809.
Kriska G. Y. *et al.*, 1998 – Why do mayflies lay their eggs en masse on dry asphalt roads? Water-imitating polarized light reflected from asphalt attracts Ephemeroptera. *J. Exp. Biol.*, 201 : 2273-2286.
Lindenmayer D. B. *et al.*, 2011 – Newly discovered landscape traps produce regime shifts in wet forests. *PNAS*, 108 : 15887-15891.
Millon A. *et al.*, 2002 – Comparative breeding biology of Hen Harrier and Montagu's Harrier: an 8-year[s?] study in north-eastern France. *Ibis*, 144 : 94-105.
Northrup J. M. *et al.*, 2012 – Agricultural lands as ecological traps for grizzly bears. *Anim. Cons.*, 15 : 369-377.
Robertson B. A., Hutto R. L., 2006 – A framework for understanding ecological traps and an evaluation of existing evidence. *Ecology*, 87 : 1075-1085.

Robertson B. A. *et al.*, 2013 – Ecological novelty and the emergence of evolutionary traps. *TREE*, 28 : 552-560.
Schlaepfer M. A. *et al.*, 2002 – Ecological and evolutionary traps. *TREE*, 17 : 474-480.
Strasser E. H., Heath J. A., 2013 – Reproductive failure of a human-tolerant species, the American kestrel, is associated with stress and human disturbance. *J. Appl. Ecol.*, 50 : 912-919.

ALTÉRATION DES INTERACTIONS ÉCOLOGIQUES

Angert A. *et al.*, 2013 – Climate change and species interactions: ways forward. *Ann. New York Acad. Sci.*, 1297 : 1-7.
Bartomeus I. *et al.*, 2013 – Biodiversity ensures plant-pollinator phenological synchrony against climate change. *Ecol. Lett.*, 16 : 1331-1338.
Bretagnolle V., Gillis H., 2010 – *Predator-prey interactions and climate change*. Oxford University Press.
Elton C. S., 1927 – *Animal Ecology*. London, UK, Sidgwick and Jackson.
Estes J. A. *et al.*, 2011 – Trophic downgrading of planet earth. *Science*, 333 : 301-306.
Hairston N. G. *et al.*, 1960 – Community structure, population control, and competition. *Am. Nat.* : 421-425.
Lavergne S. *et al.*, 2010 – Biodiversity and climate change: integrating evolutionary and ecological responses of species and communities. *Ann. Rev. Evol. Syst.*, 41 : 321-350.
Memmott J. *et al.*, 2007 – Global warming and the disruption of plant-pollinator interactions. *Ecol. Lett.*, 10 : 710-717.
Nocera J. J. *et al.*, 2012 – Historical pesticide applications coincided with an altered diet of aerially foraging insectivorous chimney swifts. *Proc. R. Soc. L. B.*, 279 : 3114-3120.
Ovaskainen O. *et al.*, 2013 – Community-level phenological response to climate change. *PNAS*, 110 : 13434-13439.
Petchey O. L. *et al.*, 1999 – Environment warming alters food-web structure and ecosystem function. *Nature*, 402 : 69-72.
Reed S. C. *et al.*, 2012 – Changes to dryland rainfall result in rapid moss mortality and altered soil fertility. *Nature Clim. Change*, 2 : 752-755.
Reed T. E. *et al.*, 2013 – Population growth in a wild bird is buffered against phenological mismatch. *Science*, 340 : 488-491.
Visser M. E. *et al.*, 1998 – Warmer springs lead to mistimed reproduction in great tits *(Parus major). Proc. R. Soc. L. B*, 265 : 1867-1870.
Visser M. E., Both C., 2005 – Shifts in phenology due to global climate change: the need for a yardstick. *Proc. R. Soc. L. B*, 272 : 2561-69.

BIOAMPLIFICATION

Arnot J. A., Gobas F. A., 2006 – A review of bioconcentration factor (BCF) and bioaccumulation factor (BAF) assessments for organic chemicals in aquatic organisms. *Environ. Rev.*, 14 : 257-297.
Beard J. 2006 – DDT and human health. *Sci. tot. Environ.*, 355 : 78-89.
Carson R., 1962 – *Silent Spring*. Boston MA, Mariner.
Dewailly E. *et al.*, 1993 – Inuit exposure to organochlorines through the aquatic food chain in arctic Quebec. *Env. Health Persp.*, 101 : 618-620.
Dybas C. N., 2012 – Polar Bears Are in Trouble – and Ice Melt's Not the Half of It. *BioScience, 62* : 1014-1018.
Fernie K. J. *et al.*, 2001 – Reproduction success of American kestrels exposed to dietary polychlorinated biphenyls. *Env. Toxicol. Chem.*, 20 : 776-781.
Grandjean P., 2013 – *Only one change: how environmental pollution impairs brain development.* Oxford University Press, 212 p.
Lehnherr I. *et al.*, 2011 – Methylation of inorganic mercury in polar marine waters. *Nature Geoscience*, 4 : 298-302.
Mackay D., Fraser A., 2000 – Bioaccumulation of persistent organic chemicals: mechanisms and models. *Environ. Poll.*, 110 : 375-391.
Point D. *et al.*, 2011 – Methylmercury photodegradation influenced by sea-ice cover in Arctic marine ecosystems. *Nature Geoscience*, 4 : 188-194.
Trumble S. J. *et al.*, 2013 – Blue whale earplug reveals lifetime contaminant exposure and hormone profiles. *PNAS*, 110 : 16922-16926.
Van der Oost R. *et al.*, 2003 – Fish bioaccumulation and biomarkers in environmental risk assessment: a review. *Environ. Toxicol. Pharmacol.*, 13 : 57-149.

DÉPLACEMENT DES AIRES DE DISTRIBUTION

Allan B. F. *et al.*, 2003 – Effect of Forest Fragmentation on Lyme Disease Risk. *Cons. Biol.*, 17 : 267-272.
Bebber D. P. *et al.*, 2013 – Crop pests and pathogens move polewards in a warming world. *Nature Clim. Change*, 3 : 985-988.
Butler D., 2012 – Europe on alert for flying invaders. *Nature,* 489 : 187-188.
Caminade C. *et al.*, 2014 – Impact of climate change on global malaria distribution. *PNAS* 111: 3286-3291.
Chen I. C. *et al.*, 2009 – Elevation increases in moth assemblages over 42 years on a tropical mountain. *PNAS*, 106 : 1479-1483.
Chen I. C. *et al.*, 2011 – Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. *Science*, 333 : 1024-1026.
Colwell R. K. *et al.*, 2008 – Global warming, elevational range shifts, and lowland biotic attrition in the wet tropics. *Science*, 322 : 258-261.
Gottfried M. *et al.*, 2012 – Continent-wide response of mountain vegetation to climate change. *Nature Clim. Change*, 2 : 111-115.
Hickling R. *et al.*, 2006 – The distributions of a wide range of taxonomic groups are expanding polewards. *Glob. Change Biol.*, 12 : 450-455.
Körner C., 2003 – *Alpine plant life: Functional plant ecology of high mountain ecosystems*. 2nd ed., Springer-Verlag.
Lenoir J. *et al.*, 2008 – A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *Science*, 320 : 1768-1771.
Lenoir J., Svenning J. C., 2014 – Climate-related range shifts – a global multidimensional synthesis and new research directions. *Ecography* : doi: 10.1111/ecog.00967.
Lesne C., 2013 – Aux États-Unis, la guerre contre les tiques et la maladie de Lyme. *Le Monde*, 27 juin, p 5.
McKibben B., 2010 – *eaarth. Making a life on a tough new planet*. St Martin's Griffin, 261 p.
Moritz C. *et al.*, 2008 – Impact of a century of climate change on small-mammal communities in Yosemite National Park, USA. *Science*, 322 : 261-264.
Parmesan C., 1996 – Climate and species' range. *Nature*, 382 : 765-766.
Pinsky M. L. *et al.*, 2013 – Marine taxa track local climate velocities. *Science*, 341 : 1239-1242.
Poloczanska E. S. *et al.*, 2013 – Global imprint of climate change on marine life. *Nature Clim. Change*, 3 : 919-925.
Seidel D. J. *et al.*, 2008 – Widening of the tropical belt in a changing climate. *Nature Geoscience*, 1 : 21-24.
Thomas C. D. *et al.*, 2006 – Range retractions and extinction in the face of climate warming. *TREE*, 21 : 415-416.
VanDerWal J. *et al.*, 2013 – Focus on poleward shifts in species' distribution underestimates the fingerprint of climate change. *Nature Clim. Change*, 3 : 239-243.
Zarnetske P. L., 2012 – Biotic multipliers of climate change. *Science*, 336 : 1516-1518.
http://www.tickencounter.org/faq/deer_and_rodents

ADAPTATION

Williams S. E. *et al.*, 2008 – Towards an integrated framework for assessing the vulnerability of species to climate change. *PLoS Biol.*, 6 : 2621-2626.
Julliard R., Jiguet F., 2011 – La biodiversité face au réchauffement climatique : ce que nous indiquent les oiseaux. *Regard* n° 22 de la SFE, http://www.sfecologie.org/regards/2011/10/11/r22–biodiversite–rechauffement–climatique
Gienapp P. *et al.*, 2008 – Climate change and evolution: disentangling environmental and genetic responses. *Mol. Ecol.*, 17 : 167-178.
Ozgul A *et al.*, 2010 – Coupled dynamics of bodymass and population growth in response to environmental change. *Nature*, 466 : 482-485.
Lowry H. *et al.*, 2013 – Behavioural responses of wildlife to urban environments. *Biological Reviews*, 88 : 537-549.
Linhart Y. B., Grant M. C., 1996 – Evolutionary significance of local genetic differentiation in plants. *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 27 : 237-277.
Chevin L. M. *et al.*, 2010 – Adaptation, plasticity, and extinction in a changing environment: towards a predictive theory. *PLoS Biol.*, 8 : e1000357.
Hoffmann A. A., Sgrò C. M., 2011 – Climate change and evolutionary adaptation. *Nature*, 470 : 479-485.
Miller G. M. *et al.*, 2012 – Parental environment mediates impacts of increased carbon dioxide on a coral reef fish. *Nature Clim. Change*, 2 : 858-861.

MIGRATION

Ashcroft M. B., 2010 – Identifying refugia from climate change. *J. Biogeogr.*, 37 : 1407-1413.

Baker R. R., 1978 – T*he evolutionary ecology of animal migration*. London, Hodder and Stoughton.

Corlett R. T., Westcott D. A., 2013 – Will plant movements keep up with climate change? *TREE*, 28 : 482-488.

Devictor V. *et al.*, 2012 – Differences in the climatic debts of birds and butterflies at a continental scale. *Nature Clim. Change*, 2 : 121-124.

Hannah L., 2011 – *Climate change biology*. Academic Press, 402 p.

Hermoso V. *et al.*, 2013 – Prioritizing refugia for freshwater biodiversity conservation in highly seasonal ecosystems. *Div. Distr.*, 19 : 1031-1042.

Hof C. *et al.*, 2011 – Rethinking species' ability to cope with rapid climate change. *Glob. change Biol.*, 17 : 2987-2990.

Karnauskas K. B., Cohen A. L., 2012 – Equatorial refuge amid tropical warming. *Nature Clim. Change*, 2 : 530-534.

Keppel G., Wardell-Johnson G. W., 2012 – Refugia: keys to climate change management. *Glob. Change Biol.*, 18 : 2389-2391.

Loarie S. R. *et al.*, 2009 – The velocity of climate change. *Nature*, 462 : 1052-1057.

Ruhland K. M. *et al.*, 2013 – Global warming triggers the loss of a key Arctic refugium. *Proc. R. Soc. L. B*, 280 : 20131887.

Tewksbury J. J. *et al.*, 2011 – Moving farther and faster. *Nature Clim. Change*, 1 : 396-397.

Williams S. E. *et al.*, 2003 – Climate change in Australian tropical rainforests: an impending environmental catastrophe. *Proc. R. Soc. L. B*, 270 : 1887-1892.

www.wallaceinitiative.org/wallace/demo/files/manual.pdf

EXTINCTION

Baillie J. E. M., Butcher E. R., 2012 – *Priceless or Worthless? The world's most threatened species*. Zoological Society of London, United Kingdom.

Bálint M *et al.*, 2011 – Cryptic biodiversity loss linked to global climate change. *Nature Clim. Change*, 1 : 313-318.

Coloma L. A. *et al.*, 2007 – A taxonomic revision of *Atelopus pachydermus*, and description of two new (extinct?) species of *Atelopus* from Ecuador (Anura: Bufonidae). *Zootaxa*, 1557 : 1-32.

Costello M. J. *et al.*, 2013 – Can we name Earth's species before they go extinct? *Science*, 339 : 413-416.

Dullinger S. *et al.*, 2012 – Extinction debt of high-mountain plants under twenty-first-century climate change. *Nature Clim. Change*, 2 : 619-622.

Dullinger S. *et al.*, 2013 – Europe's other debt crisis caused by the long legacy of future extinctions. *PNAS*, 110 : 7342-7347.

Dunn R. R. *et al.*, 2009 – The sixth mass coextinction: are most endangered species parasites and mutualists? *Proc. R. Soc. L. B*, 276 : 3037-3045.

Fonseca C. R., 2009 – The silent mass extinction of insect herbivores in biodiversity hotspots. *Cons. Biol.*, 23 : 1507-1515.

Giam X *et al.*, 2012 – Reservoirs of richness: least disturbed tropical forests are centres of undescribed species diversity. *Proc. R. Soc. L. B*, 279 : 67-76.

Gilbert B., Levine J. M., 2013 – Plant invasions and extinction debts. *PNAS*, 110 : 1744-1749.

Harnik P. G. *et al.*, 2012 – Extinctions in ancient and modern seas. *TREE*, 27 : 608-617.

Hylander K., Ehrlén J., 2013 – The mechanisms causing extinction debts. *TREE*, 28 : 341-346.

Koh L. P. *et al.*, 2004 – Species coextinctions and the biodiversity crisis. *Science*, 305 : 1632-1634.

May R.M., 1988 – How many species are there on Earth? *Science*, 241 : 1441–1449.

Pimm S. *et al.*, 2014 – The biodiversity of species and their rates of extinction, distribution, and protection. *Science*, 344 : 1246752.

Primack R. B. *et al.*, 2012 – *Biologie de la conservation*. Dunod.

Quental T. B., Marshall C. R., 2013 – How the red queen drives terrestrial mammals to extinction. *Science*, 341 : 290-292.

Regnier C. *et al.*, 2009 – Not knowing, not recording, not listing: numerous unnoticed mollusk extinctions. *Cons. Biol.*, 23 : 1214-1221.

Tilman D. *et al.*, 1994 – Habitat destruction and the extinction debt. *Nature*, 371 : 65-66.

Vellend M. *et al.*, 2006 – Extinction debt of forest plants persists for more than a century following habitat fragmentation. *Ecology*, 87 : 542-548.

Vincent C., 2012 – Les scientifiques veulent créer une « Liste rouge » des écosystèmes menacés. *Le Monde*, 20 septembre, p. 8.

Wearn O. R. *et al.*, 2012 – Extinction debt and windows of conservation opportunity in the Brazilian Amazon. *Science*, 337 : 228-232.

http://www.iucnredlist.org/about/red–list–overview.

http://www.redlist.org

PARTIE 3 – LA NATURE ET LES HUMAINS

Barbault R., Weber J., 2010 – *La vie, quelle entreprise* ! Paris, Le Seuil, 195 p.

Cochet Y., 2009 – *Antimanuel d'écologie*. Éditions Bréal, 310 p.

Ehrlich P. R., Ehrlich A., 2008 – *The dominant animal*. Island Press, 464 p.

Kareiva P., Marvier M., 2012 – What is conservation science? *BioScience*, 62 : 962-969.

Scruton R., 2012 – *Green philosophy. How to think seriously about the planet*. Atlantic books, 457 p.

TRANSITION DÉMOGRAPHIQUE

Alcott B., 2012 – Population matters in ecological economics. *Ecol. Econ.*, 80 : 109-120.

Chesnais J. C., 1979 – L'effet multiplicatif de la transition démographique. *Population*, 34 : 1138-1144.

Cohen J. E., 1995 – Human carrying capacity. *Science*, 269 : 341.

Ehrlich P. R. *et al.*, 2012 – Securing natural capital and expanding equity to rescale civilization. *Nature*, 486 : 68-73.

Erhlich P. H., 1968 – *The Population Bomb*. New York, Ballantine.

Keyfitz N., 1993 – Are there ecological limits to population? *PNAS*, 90 : 6895-6899.

Malakoff D., 2011 – Are more people necessarily a problem? *Science*, 333 : 543-546.

Nations unies, 2013 – *Division de la Population*. World Population Prospects : the 2012 Revision.

Pison G., 2011 – Sept milliards d'êtres humains aujourd'hui, combien demain ? *Population et Sociétés*, 482 : 1-4.

Pison G., 2014 – 10,9 milliards d'êtres humains en 2100 ? *La Recherche*, 484 : 80.

Potter R. B. *et al.*, 2004 – *Geographies of development*. 2nd edition, Prentice Hall.

Reher D., 2011 – Economic and social implications of the demographic transition. *Pop. Dev. Rev.*, 37 : 11-33.

Sachs J. D., 2008 – *Common Wealth: Economics for a crowded planet*. Penguin Press, 386 p.

Sen A. K., 1995 – Il n'y a pas de « bombe démographique ». *Esprit*, novembre 1995.

Smith K., 2011 – We are seven billion. *Nature Clim. Change*, 1 : 331-335.

The Royal Society, 2012 – *People and the planet*. The Royal Society Science Policy Center report 01/12, Londres.

UNFPA, 2011 – *The state of world population 2011: People and possibilities in a world of 7 billion*. United Nations Population Fund (UNFPA), New York NY.

Véron J., 2013 – *Démographie et écologie*. Paris, La Découverte.

PIÈGE DE LA PAUVRETÉ

Abhijit V. *et al.*, 2012 – *Repenser la pauvreté*. Paris, Le Seuil, Nouveau Monde.

Azariadis C., Stachurski J., 2005 – « Poverty traps ». *In* Aghion P., Durlauf S., eds : *Handbook of Economic Growth*, Amsterdam, Elsevier.

Barbault R., Weber J., 2010 – *La vie, quelle entreprise* ! Paris, Le Seuil, 195 p.

Barrett C. B. *et al.*, 2011 – On biodiversity conservation and poverty traps. *PNAS*, 108 : 13907-13912.

Bourguignon F., 2012 – Le monde n'en a pas fini avec la pauvreté. *Les Échos*, 28 mars, p. 13.

Entretien avec Daniel Verger, 2012 – Il existe encore dans le monde une pauvreté invisible. *Le Monde*, 3 mars 2012, p. 9.

Galbraith J. K., 1980 – *Théorie de la pauvreté de masse*. Paris, Gallimard.

Sachs J., 2006 – *The end of poverty: economic possibilities for our time*. Penguin.

Srinivasan U. T. *et al.*, 2008 – The debt of nations and the distribution of ecological impacts from human activities. *PNAS*, 105 : 1768-1773.

TEEB, 2010 – *L'Économie des écosystèmes et de la biodiversité : Intégration de l'Économie de la nature*. TEEB publiations, 46 p.

Weber J., 2005 – Environnement : les pauvres ne sont pas coupables. Sauver la planète. Les enjeux sociaux de l'environnement. *Sciences Humaines*, hors-série n° 49, juillet–août 2005.
http://povertydata.worldbank.org/poverty/home.

LE DILEMME DES COMMUNS

Barbault R., Weber J., 2010 – *La vie, quelle entreprise* ! Paris, Le Seuil, 195 p.
Barrett S., 2007 – *Why Cooperate? The Incentive to Supply Global Public Goods*. New York, Oxford University Press.
Cheng L., 2012 – Cultural diversity in a global society. *Science*, 336 : 156-157.
Cox S. J. B., 1985 – No tragedy of the commons. *Environmental Ethics*, 7 : 49-61.
Entretien avec Elinor Ostrom, prix Nobel d'économie (2011). *Le Monde*, 6 septembre, p. 9
Dreber A., Nowak M. A., 2008 – Gambling for global goods. *PNAS*, 105 : 2261-2262.
Hardin G., 1968 – The tragedy of the commons. *Science*, 162 : 1243-1248.
Kollock P., 1998 – Social dilemmas: The anatomy of cooperation. *Annu. Rev. Sociol.*, 24 : 183-214.
Ostrom E., 1990 – *Governing the commons: The evolution of institutions for collective action*. Cambridge University Press.
Santos F. C., Pacheco J. M., 2011 – Risk of collective failure provides an escape from the tragedy of the commons. *PNAS*, 108 : 10421-10425.
Winkel T., 2013 – *Quinoa et quinueros / Quinua y quinueros*. IRD Éditions, 176 p.

ÉCONOMIE VERTE

Burger J. R. *et al.*, 2012 – The macroecology of sustainability. *PLoS Biol* 10 (6) : e1001345.
Caramel L., 2013 – La fonte de l'Arctique « coûterait » un an de PIB mondial. *Le Monde*, 26 juillet.
Chertow M. R., 2000 – The IPAT equation and its variants. *J. Indust. Ecol.*, 4 : 13-19.
Clay J., 2011 – Freeze the footprint of food. *Nature*, 475 : 287-289.
Costanza R. *et al.*, 1997 – *The Development of Ecological Economics*. Elgar Pub. Co.
Easterlin R., 1974 – « Does economic growth improve the human lot? Some empirical evidence ». *In* David P., Reder M., eds : *Nations and Households in Economic Growth. Essays in Honor of Moses Abramovitz*, New York, Academic : 98-125.
Easterlin R. A. *et al.*, 2012 – China's life satisfaction, 1990-2010. *PNAS*, 109 : 9775-9780.
Foley J. A. *et al.*, 2011 – Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478 : 337-342.
Gendron C., 2005 – Comment concilier environnement et industrie. Sauver la planète. Les enjeux sociaux de l'environnement. *Sciences Humaines,* hors-série n° 49, juillet–août 2005.
Godard O., 2012 – Le cynisme a tué le développement durable. *La Recherche*, 460 : 94-98.
Hirsch F., 1977 – *Social Limits to growth*. London, Routledge & Kegan Paul.
Knight J., 2012 – Economic growth and the human lot. *PNAS*, 109 : 9670-9671.
Meadows D. H. *et al.*, 1972 – *The Limits to Growth: A Report to The Club of Rome*. New York, Universe Books.
Sachs I., 1998 – *L'Écodéveloppement. Stratégies pour le XXIe siècle*. Syros.
Servet J. M., 2004 – Lutte contre les inégalités versus lutte contre la pauvreté. *Journal des Anthropologues*, 30 : 98-99, http://jda.revues.org/1645
TEEB, 2008 – *Économie des écosystèmes et de la biodiversité*. Rapport d'étape, PNUE.
Van Kote G., 2012 – La hausse des prix alimentaires aggrave la malnutrition dans les pays pauvres. *Le Monde*, 27 avril, p. 12.
Whiteman G. *et al.*, 2013 – Climate science: Vast costs of Arctic change. *Nature*, 499 : 401-403.
Winter G., 2010 – *À la recherche du développement*. Paris, Karthala.

PAIEMENT DES SERVICES RENDUS PAR LES ÉCOSYSTÈMES

Costanza R. *et al.*, 1997 – The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387 : 253-260.
Daily G. C., Matson P. A., 2008 – Ecosystem services: From theory to implementation. *PNAS*, 105 : 9455-9456.
Farley J., Costanza R., 2010 – Payments for ecosystem services: from local to global. *Ecol. Econ.*, 69 : 2060-2068.
Ferraro P. J., Kiss A., 2002 – Direct payments to conserve biodiversity. *Science*, 298 : 1718-1719.
Kinzig A. P. *et al.*, 2011 – Paying for ecosystem services – promise and peril. *Science*, 334 : 603-604.
McCauley D. J., 2006 – Selling out on nature. *Nature*, 443 : 27.
Millennium Ecosystem Assessment, 2005 – *Ecosystems and Human Well-Being: General Synthesis*. Washington, Island Press.
PNUE/UICN, 2007 – *Developing international payments for ecosystem services: Towards a greener world economy*. www.unep.ch/etb/areas/pdf/IPES_IUCNbrochure.pdf
Redford K. H., Adams W. M., 2009 – Payment for ecosystem services and the challenge of saving nature. *Cons. Biol.*, 23 : 785-787.
Sanchez–Azofeifa G. A. *et al.*, 2007 – Costa Rica's payment for environmental services program: intention, implementation, and impact. *Cons. Biol.*, 21 : 1165-1173.
Schröter M. *et al.*, 2014 – Ecosystem services as a contested concept: a synthesis of critique and counter-arguments. *Conserv. Lett*. doi :10.1111/conl.12091.
Strassburg B. B. *et al.*, 2012 – Impacts of incentives to reduce emissions from deforestation on global species extinctions. *Nature Clim. Change*, 2 : 350-355.
Uriarte M. *et al.*, 2012 – Depopulation of rural landscapes exacerbates fire activity in the western Amazon. *PNAS*, 109 : 21546-21550.
http://www.un–redd.org/

L'ALLÉGORIE DE LA GRENOUILLE

Becerra S. *et al.*, 2013 – Comprendre les comportements face à un risque modéré d'inondation. Étude de cas dans le périurbain toulousain. *Hydrol. Sci. J.*, 58 : 945-965.
Blackbourn R., 2000 – *Le renard roux*. Éveil Nature, 84 p.
Boyatzis R. E., 2006 – An overview of intentional change from a complexity perspective. *J. Manag. Dev.*, 25 : 607-623.
Cury P., Pauly D., 2013 – *Mange tes méduses. Réconcilier les cycles de la vie et la flèche du temps*. Paris, Odile Jacob, 216 p.
Diamond J., 2005 – *Collapse*. Viking Penguin.
Dubois P. J., 2012 – *La grande amnésie écologique*. Delachaux et Niestlé, 121 p.
Foster M., 1873 – On the Effects of a Gradual Rise of Temperature on Reflex Actions in the Frog. *J. Anat. Physiol.*, 8 : 45-53.
Garric A., 2012 – Un moratoire sur les poissons surpêchés en Europe serait rentable. *Le Monde.fr*, 21septembre.
Gore A., 2006 – *An inconvenient truth: The planetary emergency of global warming and what we can do about it*. Rodale.
Pauly D., 1995 – The shifting baseline syndrome in fisheries. *TREE*, 10 : 430.
Plumwood V., 2001 – *Environmental culture: The ecological crisis of reason*. Routledge.
Richardson B. *et al.*, 1994 – Understanding the causes of business failure crises: generic failure types: boiled frogs, drowned frogs, bullfrogs and tadpoles. *Manag. Decision*, 32 : 9-22.
Roman J., Palumbi S. R., 2003 – Whales before whaling in the North Atlantic. *Science*, 301 : 508-510.
Schwägerl C., 2012 – *L'âge de l'homme. Construire le monde de demain à l'ère de l'Anthropocène*. Manifestô, 320 p.
Urban E., Orbe M. P., 2007 – The syndrome of the boiled frog: Exploring international students on US campuses as co-cultural group members. *J. Intercult. Comm. Res.*, 36 : 117-138.
http://en.wikipedia.org/wiki/Peter_Senge
http://fr.wikipedia.org/wiki/All%C3%A9gorie_de_la_grenouille

NATURE ET RELIGIONS

Callicott J. B., 2009 – *Genèse*. Wildproject, Domaine Sauvage.
Descola P., 2005 – *Par-delà nature et culture*. Paris, Gallimard, Bibliothèque des sciences humaines.
Descola P., 2004 – Le monde, par-delà la nature et la culture. Entretien par Marie-Laure Théodule. *La Recherche*, 374 : 63.
Descola P., 2009 – Human natures. *Social Anthropol.*, 17 : 145-157.
Fischer J. *et al.*, 2012 – Human behavior and sustainability. *Front. Ecol. Environ.*, 10 : 153-160.
Gong B. *et al.*, 2012 – Limits to religious conservation efforts. *Science*, 338 : 740.
Hargrove E. C., 1986 – *Religion and environmental crisis*. Athens, University of Georgia Press.
Hitzhusen G. E., Tucker M. E., 2013 – The potential of religion for Earth Stewardship. *Front. Ecol. Environ.*, 11 : 368-376.
Passmore J. A., 1974 – *Man's responsibility for nature: Ecological problems and western traditions*. London, Duckworth.
Preece R., 2011 – *Animals and nature: Cultural myths, cultural realities*. UBC Press.

Strenna L., 2013 – *L'homme et la nature, la nature et l'homme*. Éditions Sang de la Terre.
Tucker M. E., Grim J. A., 1994 – *Worldviews and ecology: religion, philosophy, and the environment*. Maryknoll, NY, Orbis Books.
White Jr L., 1967 – The historical roots of our ecological crisis. *Science*, 155 : 1203-1207.

PROTECTION DES ESPACES ET DES ESPÈCES

Andam K. S. *et al.*, 2010 – Protected areas reduced poverty in Costa Rica and Thailand. *PNAS*, 107 : 9996-10001.
Aulong S. *et al.*, 2006 – Un tour d'horizon des critères d'évaluation de la diversité biologique. *Économie Publique*, 16 : 3-46.
Bérard L. *et al.*, eds, 2005 – *Biodiversité et savoirs naturalistes locaux en France*. Paris, Cirad-Iddri-IFB-INRA, 271 p.
Bommarco R. *et al.*, 2013 – Ecological intensification: harnessing ecosystem services for food security. *TREE*, 28 : 230-238.
Bottrill M. C. *et al.*, 2008 – Is conservation triage just smart decision making? *TREE*, 23 : 649-654.
Brockington D. *et al.*, 2008 – *Nature unbound: conservation, capitalism and the future of protected areas*. Earthscan.
Cabeza M., 2013 – Knowledge gaps in protected area effectiveness. *Anim. Cons.*, 16 : 381-382.
Clough Y. *et al.*, 2011 – Combining high biodiversity with high yields in tropical agroforests. *PNAS*, 108 : 8311-8316.
Cormier-Salem M.-C., Roussel B., 2000 – Patrimoines naturels : la surenchère. *La Recherche*, 333 :106-110.
Court M., 2012 – Les pêcheurs bénéficient des aires marines protégées. *Le Figaro*, 28 juin, p. 13.
Fischer J. *et al.*, 2008 – Should agricultural policies encourage land sparing or wildlife-friendly farming? *Front. Ecol. Environ.*, 6 : 380-385.
Geldmann J. *et al.*, 2013 – Effectiveness of terrestrial protected areas in reducing habitat loss and population declines. *Biol. Cons.*, 161 : 230-238.
Green R. E. *et al.*, 2005 – Farming and the fate of wild nature. *Science*, 307 : 550.
Gutiérrez-Velez V. *et al.*, 2011 – High-yield oil palm expansion spares land at the expense of forests in the Peruvian Amazon. *Environ. Res.* Lett., 6 : 044029.
Hainard R., 1972 – *Expansion et nature, une morale à la mesure de notre puissance*. Paris, Le Courrier du livre.
Harrison H. B. *et al.*, 2012 – Larval export from marine reserves and the recruitment benefit for fish and fisheries. *Curr. Biol.*, 22 : 1023-1028.
Le Saout S., 2013 – Protected areas and effective biodiversity conservation. *Science*, 342 : 803-805.
Leader-Williams N., 1990 – Black rhinos and African elephants: Lessons for conservation funding. *Oryx*, 24 : 23-29.
Mann C., Plummer M., 1995 – *Noah's choice*. New York, A. Knopf.
Nolte C. *et al.*, 2013 – Governance regime and location influence avoided deforestation success of protected areas in the Brazilian Amazon. *PNAS*, 110 : 4956-4961.
Nouyrigat V., 2012 – Le dilemme de Noé. *Science et vie*, 1141 : 102-108.
Packer C. *et al.*, 2013 – Conserving large carnivores: dollars and fence. *Ecol. Lett.*, 16 : 635-641.
Phalan B. *et al.*, 2011 – Reconciling food production and biodiversity conservation: land sharing and land sparing compared. *Science*, 333 : 1289-1291.
Primack R. B. *et al.*, 2012 – *Biologie de la conservation*. Dunod.
Rayn D., Sutherland W. J., 2011 – Impact of nature reserve establishment on deforestation: a test. *Biodiv. Cons.*, 20 : 1625-1633.
Rodrigues A. S. L. *et al.*, 2004 – Effectiveness of the global protected area network in representing species diversity. Nature, 428 : 640-643.
Scott J. M. *et al.*, 2001 – Nature reserves: Do they capture the full range of America's biological diversity? *Ecol. Appl.*, 11 : 999-1007.
Terborgh J., 2004 – *Requiem for nature*. Island Press.
Thomas C. D. *et al.*, 2012 – Protected areas facilitate species' range expansions. *PNAS*, 109 : 14063-14068.
Tscharntke T. *et al.*, 2005 – Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity – ecosystem service management. *Ecol. Lett.*, 8 : 857-874.
Weitzman M. L., 1998 – The Noah's ark problem. *Econometrica*, 66 : 1279-1298.
Wilson H. B., 2011 – When should we save the most endangered species? *Ecol. Lett.*, 14 : 886-890.
Winter M. *et al.*, 2013 – Phylogenetic diversity and nature conservation: where are we? *TREE*, 28 : 199-204.
http://www.bearsmart.com/resources/quotes
http://www.edgeofexistence.org/

LA RESTAURATION ÉCOLOGIQUE

Clewell A. F., Aronson J., 2013 – *Ecological restoration: Principles, values, and structure of an emerging profession*. Island Press, 336 p.
Dutoit T. *et al.*, 2013 – « L'écologie de la restauration a 80 ans ! Espoirs et limites d'une discipline scientifique controversée ». *In* Gauthier-Clerc M. *et al.*, éd. : *Écologie de la conservation*, Paris, De Boeck éditions.
Forman R. T. T. *et al.*, 2003 – *Road ecology: Science and solutions*. Washington, Island Press.
Fraser C., 2009 – *Rewilding the world: Dispatches from the conservation revolution*. Metropolitan Books, 407 p.
Higgs E. S., 2003 – *Nature by design: people, natural process, and ecological restoration*. MIT Press.
Hilty J. A. *et al.*, 2006 – *Corridor ecology: The science and practice of linking landscapes for biodiversity conservation*. Island Press, 344 p.
Jackson S. T., Sax D. F., 2010 – Balancing biodiversity in a changing environment: extinction debt, immigration credit and species turnover. *TREE*, 25 : 153-160.
Loss S. R. *et al.*, 2011 – Assisted colonization: Integrating conservation strategies in the face of climate change. *Biol. Cons.*, 144 : 92-100.
McLachlan J. S. *et al.*, 2007 – A framework for debate of assisted migration in an era of climate change. *Cons. Biol.*, 21 : 297-302.
Palmer M. A. *et al.*, 1997 – Ecological theory and community restoration ecology. *Rest. Ecol.*, 5 : 291-300.
Primack R. B. *et al.*, 2012 – *Biologie de la conservation*. Dunod.
Rosenberg D. K. *et al.*, 1997 – Biological corridors: Form, function, and efficacy. *BioScience*, 47 : 667-687.
Samways M. J. *et al.*, 2010 – Provision of ecosystem services by large scale corridors and ecological networks. *Biodiv. Cons.*, 19 : 2949-2962.
Thomas C. D., 2011 – Translocation of species, climate change, and the end of trying to recreate past ecological communities. *TREE*, 26 : 216-221.
http://www.rewildingeurope.com/
http://www.ser.org/about.asp
http://fr.wikipedia.org/wiki/Crapauduc

IDÉES LUMINEUSES

Allen J. P. *et al.*, 2002 – *The legacy of Biosphere 2 for the study of Biospherics and closed ecological systems*. COSPAR. F4.1-0002-02.
Andersen R., 2012 – Manipuler les humains pour sauver le climat. *Courrier International*, 1117 : 46-48.
Badin E., Zeitoun C., 2012 – Ingénieuse écologie. *Le journal du CNRS*, 266 : 20-27.
Cleveland J. *et al.*, 1984 – Energy and the US economy: A biophysical perspective. *Science*, 231 : 890-897.
D'Almeida F., 2013 – On avait pas de pétrole et pas d'idée. *Marianne*, 5 janvier 2013, http://www.marianne.net/On-avait-pas-de-petrole-et-pas-d-idee_a225366.html
Entretien avec J. M. Chevalier – Aucune énergie n'est parfaite. Sauver la planète. Les enjeux sociaux de l'environnement. *Sciences Humaines*, hors-série n° 49, juillet-août 2005.
http://edition.cnn.com/2008/WORLD/americas/10/10/amory.lovins/
http://www.youtube.com/watch?v=aHoJ130hQ3E
Jones N., 2010 – Ten weeks to save the world. *Nature*, 467 : 266-268.
Le Hir P., 2011 – Un autre gaz à effet de serre dans le protocole de Kyoto. *Le Monde*, 15 décembre, p. 8
Lorius C., Carpentier L., 2010 – *Voyage dans l'Anthropocène*. Actes Sud, 200 p.
Lozano R., 2011 – Creativity and organizational learning as means to foster sustainability. *Sustainable Development*, doi : 10.1002/sd.540
Lynas M., 2011 – *The god species. Saving the planet in the age of humans*. National Geographic, 280 p.
Mouhot J. F., 2011 – *Des esclaves énergétiques. Réflexions sur le changement climatique*. Éditions Champ Vallon, 160 p.
Poole R., 2009 – For the Apollo Astronauts, a small world. *Los Angeles Times*, 19 juillet.
Royal Society, 2009 – *Geoengineering the climate: science, governance and uncertainty*. RS Policy document 10/09. The Royal Society, London, UK.

Sachs J. D., 2008 – *Common Wealth: Economics for a crowded planet*. Penguin Press, 386 p.
Van Kote G., 2013 – L'interdiction des sacs en plastique se mondialise. *Le Monde*, 4 janvier, p. 7
Van Kote G., 2013 – Le gaspillage alimentaire à l'origine d'un gâchis écologique. *Le Monde*, 12 septembre, p. 6.
Weiss R. F. *et al.*, 2008 – Nitrogen trifluoride in the global atmosphere. *Geophys. Res. Lett.*, 35 : L20821.
Zencey E., 2013 – « Energy as master source ». *In* The Worlwatch Institute, *State of the World 2013*, Island Press : 73-83.
http://wwindea.org

DES VALEURS POUR LA NATURE

Baillie J. E. M., Butcher E. R., 2012 – *Priceless or Worthless? The world's most threatened species*. Zoological Society of London, United Kingdom.
Delord J., 2005 – L'éthique environnementale en perspective. Sauver la planète. Les enjeux sociaux de l'environnement. *Sciences Humaines*, hors-série n° 49, juillet-août 2005.
Delord J., 2010 – *L'extinction d'espèces – Histoire d'un concept et enjeux éthiques*. Publications scientifiques du Muséum, 601 p.
Fulton D. *et al.*, 1996 – Wildlife value Orientations: A conceptual and measurement approach. *Hum. Dimensions Wild.*, 1 : 24-47.
Graham-Rowe D., 2011 – Endangered and in demand. *Nature*, 480 : S101-S103.
Larrère C., Larrère R., 1997 – *Du bon usage de la nature. Pour une philosophie de l'environnement*. Aubier.
Lenzen M. *et al.*, 2012 – International trade drives biodiversity threats in developing nations. *Nature*, 486 : 109-112.
Leopold A., 1949 – *A sand county almanac*. New York, Oxford University Press.
Marvier M., 2012 – The value of nature revisited. *Front. Ecol. Environ.*, 10 : 227.
Miller T. R *et al.*, 2011 – The new conservation debate: The view from practical ethics. *Biol. Cons.*, 144 : 948-957.
Næss A., 1973 – The shallow and the deep, long-range ecology movement. *Inquiry*, 16 : 95-100.
Pojman P., Pojman L. P., 2011 – *Environmental Ethics*. 6th edition, Cengage Learning, 784 p.
Pungetti G., Oviedo G., eds, 2012 – *Sacred species and sites: advances in biocultural conservation*. Cambridge University Press.
Rowe S. J., 1994 – Ecocentrism: the chord that harmonizes humans and earth. *The Trumpeter*, 11 : 106-107.
Shen S. X. *et al.*, 2006 – Assessing wildlife value orientations in China: an exploration of the concepts and methodology. *Proc. 2006 Northeastern Recreat. Res. Symp.* : 468-473.
Taylor P. W., 2008 – The ethics of respect for nature. *Environ. Ethics*, 3 : 197-218.
Vincent C., 2012 – Les 100 espèces les plus menacées sont aussi les moins protégées. *Le Monde*, 12 septembre, p. 7.
Wilde O., 1891 – *The Picture of Dorian Gray*. Penguin Classics (1986).

LA NATURE DANS LES MÉDIAS

Brossard D., 2013 – New media landscapes and the science information consumer. *PNAS*, 110 : 14096-14101.
Cooper C. B., 2011 – Media literacy as a key strategy toward improving public acceptance of climate change science. *BioScience*, 61 : 231-237.
Hulme M., 2009 – *Why we disagree about climate change: understanding controversy, inaction and opportunity*. Cambridge University Press, 392 p.
Jepson P. *et al.*, 2011 – Entertainment value: Should the media pay for nature conservation? *Science*, 334 : 1351-1352.
Nisbet M. C., Scheufele D. A., 2009 – What's next for science communication? Promising directions and lingering distractions. *Am. J. Bot.*, 96 : 1767-1778.
Packwood C., Jarvis J. L., 2013 – « Consuming Nature: the cultural politics of animals and the environment in the mass media ». *In* Bekoff M., ed. : *Ignoring nature no more,* The University of Chicago Press : 257-270.
van Mensvoort K., Grievink H. J., 2011 – *Next nature. Nature changes along with us*. Actar, 461 p.
http://fr.wikipedia.org/wiki/Avatar_%28film,_2009%29

FAMILLE ET RESEAUX SOCIAUX

Barrett S., Dannenberg A., 2014 – Sensitivity of collective action to uncertainty about climate tipping points. *Nature Clim. Change.*, 4 : 36-39.
Ehrlich P. R., Ornstein R. E., 2010 – *Humanity on a tightrope: thoughts on empathy, family, and big changes for a viable future*. Lanham, MD, Rowman and Littlefield.
Ellemers N., 2012 – The group self. *Science*, 336 : 848-852.
Gibran K., Moussawy S., 2004 – *Le Calligraphe, le Poète et la Paix*. Bachari.
Guichard G., 2010 – L'effet Coupe du monde dynamise la consommation. http://www.lefigaro.fr/conjoncture/2010/06/24/04016-20100624ARTFIG00424-l-effet-coupe-du-monde-dynamise-la-consommation.php
Kahan D., 2012 – Why we are poles apart on climate change. *Nature*, 488 : 255.
Kross E. *et al.*, 2013 – Facebook use predicts declines in subjective well-being in young adults. *PLoS ONE*, 8 : e69841.
Musso P., 2003 – *Réseaux et sociétés*. Presses Universitaires de France, 352 p.
Ormerod P., 2012 – *Positive linking: How networks can revolutionise the World*. Londres, Faber & Faber.
Ormerod P., 2012 – Social networks can spread the Olympic effect. *Nature*, 489 : 337.
Soron D., 2010 – Sustainability, self-identity and the sociology of consumption. *Sust. Dev.*, 18 : 172-181.
Sukhdev P., 2012 – The corporate climate overhaul. *Nature*, 486 : 27-28.

ALPHABÉTISATION ENVIRONNEMENTALE

Abiolu O., Okere O., 2011 – *L'alphabétisation environnementale et les nouveaux rôles des professionnels de l'information dans les pays en voie de développement*. Proc. 77th IFLA, Puerto Rico, http://conference.ifla.org/past/2011/109–abiolu–fr.pdf
Capra F., 1999 – *Ecoliteracy: the challenge for education in the next century*. Berkeley, CA, Center for Ecoliteracy.
Demulier G., 2009 – *Apprendre à philosopher avec Rousseau*. Ellipses, 220 p.
Lessa-Catalao V., 2009 – *L'eau comme métaphore en éducation : une recherche-action pédagogique en écologie politique au Brésil*. Thèse de doctorat, université Paris VIII, 471 p.
Miller K., 2010 – *Environmental literacy and green volunteer opportunities for your community*. Public Libraries Online. www.publiclibrariesonline.org.
Orr D., 1992 – *Ecological literacy: education and the transition to a postmodern world*. New York, University of New York Press.
Schneider S., 1997 – Defining Environmental Literacy. *TREE*, 12 : 457.
Strenna L., 2013 – *L'homme et la nature, la nature et l'homme*. Éditions Sang de la Terre.
Wals A. E. J. *et al.*, 2014 – Convergence between science and environmental education. *Science*, 344 : 583-584.

NATURES HUMAINES

Cosquer A. *et al.*, 2012 – Observations of everyday biodiversity: a new perspective for conservation? *Ecol. Soc.*, 17 : 2.
Ehrlich P. R., Ehrlich A., 2008 – *The dominant animal*. Island Press, 464 p.
Ehrlich P. R., 2000 – *Human natures*. Penguin books, 531 p.
Ehrlich P. R., Ornstein R. E., 2010 – *Humanity on a tightrope: thoughts on empathy, family, and big changes for a viable future*. Lanham, MD, Rowman and Littlefield.
Fromm E., Xirau R., eds, 1968 – *The nature of man*. Readings. Macmillan.
Guille-Escuret G., 1997 – *Les sociétés et leurs natures*. Paris, Armand Colin.
Herrmann P. *et al.*, 2010 – Anthropocentrism is not the first step in children's reasoning about the natural world. *PNAS*, 107 : 9979-9984.
Kellert S. R., Wilson E. O., eds, 1995 – *The biophilia hypothesis*. Island Press.
Louv R., 2006 – *Last child in the woods: Saving our children from nature-deficit disorder*. Algonquin Books of Chapel Hill.
Ricard M., 2013 – *Plaidoyer pour l'altruisme*. Éditions NIL, 917 p.
Wilson E. O., 1978 – *On human Nature*. Harvard University Press, 260 p.

ÉPILOGUE

Balmford A., 2012 – *Wild hope – On the front lines of conservation success*. The University of Chicago Press.
Bozonnet J. P., 2001 – « Les préoccupations environnementales en Europe. Réaction aux nuisances et construction idéologique. » In Reynié D., Cautrès B., dir. : *L'Opinion européenne 2001*, Presses de Sciences Po.

Entretien avec Laurence Tubiana, 2005 – Les prophètes de malheur finissent par ne plus être écoutés. Sauver la planète. Les enjeux sociaux de l'environnement. *Sciences Humaines*, hors-série n° 49, juillet-août 2005.
Ehrlich P. R., Ehrlich A. H., 2013 – Can a collapse of global civilization be avoided? *Proc. R. Soc. B*, 280 : 20122845.
Foucard S., 2013 – Pesticides : un risque enfin admis pour les abeilles. *Le Monde*, 17 janvier, p. 9.
Garnett S. T., Lindenmayer D. B., 2011 – Conservation science must engender hope to succeed. *TREE*, 26 : 59-60.
Lomborg B., 2004 – *L'Écologiste sceptique. Le véritable état de la planète*. Paris, Le Cherche Midi.
Lynas M., 2011 – T*he god species. Saving the planet in the age of humans*. National Geographic, 280 p.
Monod Th., 1991 – *Sortie de secours*. Paris, Segers.
Morin E., 2010 – Éloge de la métamorphose. *Le Monde*, 11 janvier, p. 18.
Orr D.W., 2010 – *Hope is an imperative: the essential David Orr*. Island Press.
Polasky S. *et al.*, 2011 – Decision-making under great uncertainty: environmental management in an era of global change. *TREE*, 26: 398-404.
Rogelj J. *et a*l., 2013 – Probabilistic cost estimat for climate change mitigation. *Nature*, 493 : 79-83.



Ophrys mouche – France.

AUTEURS

Olivier Dangles est écologue, directeur de recherche à l'Institut de recherche pour le développement (IRD) et actuellement représentant de cet institut en Équateur. Il a été lauréat du 2e prix IRD Recherche-Sud en 2010 pour ses travaux sur la biodiversité et les changements globaux dans les Andes tropicales et il est membre élu du Conseil scientifique de l'IRD depuis 2012. Il a publié près de 120 articles scientifiques et techniques et deux livres de vulgarisation combinant textes scientifiques et photographies en collaboration avec François Nowicki.

François Nowicki est ingénieur des Travaux publics de l'État. Chargé d'études « Biodiversité » au Cerema, il travaille sur les problématiques liées à la prise en compte des milieux naturels dans les projets d'aménagement. Photographe depuis près de trente ans, il revendique son approche naturaliste au service de la conservation. Il est l'auteur de plusieurs expositions et son travail a été reconnu par plusieurs concours internationaux.

Belén Mena est artiste graphiste à Quito, en Équateur, où elle a fondé en 1992 son studio de design spécialisé dans la communication visuelle, l'image corporative et le graphisme éditorial, principalement pour de « beaux livres ». Nombre de ses travaux ont été primés, comme son livre *Pachanga*, qui explore la diversité artistique des motifs d'ailes de papillons (Forum of Design – Gold Award 2008) ou encore le projet de livre *Taitas and De Mamas* pour lequel elle a été nominée aux Latin Grammy Awards 2013.







photo: Murray Cooper

MERCI

Fabien Anthelme, Álvaro Barragán, Eloïse Caffin, Roger Calvez, Jérôme Casas, Thomas et Catherine Changeux, famille Dangles *sensu lato*, Philippe Degaffet, Cristelle Duos, Julien Frizon, Alain Lambert, Corinne Lavagne, David Lasso, Xavier et Viviane Lazzaro, Nathalie Le Cheviller, Thomas Mourier, Mathieu Muller, Giovanni Onore, Catherine Plasse, Álvaro Ponce, Santiago Ron, Florent Rondel, Marine Sabounji, Marie-Lise Sabrié, Julie Sibony, Jean-François Silvain, Italo Tapia, Omar Torres, Guillermo Zaldumbide (Sacha Lodge Ecuador), †R.I.P. Patricia Ortiz.



Achevé d'imprimer sur les presses d'I.M.E. by Estimprim - 25110 Baume-les-Dames
Dépôt légal : Novembre 2014











En un temps très court à l'échelle géologique, notre espèce a créé «une autre Terre », significativement différente de celle qui existait lorsque l'homme est apparu. Les changements qui ont transformé la Terre sont désormais si profonds qu'ils menacent le fonctionnement même de la biosphère, mettant *de facto* en danger le futur de l'humanité.

Ce livre permettra au lecteur de comprendre les mécanismes de ces changements et leurs interrelations avec les espèces, y compris l'espèce humaine. Il est constitué d'un glossaire choisi de 45 concepts et mots clés, tous accompagnés de plusieurs photographies, qui présentent ces changements à l'échelle du système Terre, des espèces sauvages et des humains. Allers-retours entre textes et images d'une beauté saisissante permettent ainsi à chacun de se construire une vision claire et globale des défis qui s'imposent à la vie sur *Une Autre Terre*.

IRD
Institut de recherche pour le développement

44, bd de Dunkerque
13572 Marseille cedex 02
editions@ird.fr
www.editions.ird.fr

ISBN 978-2-7099-1875-6
9 782709 918756
42 €