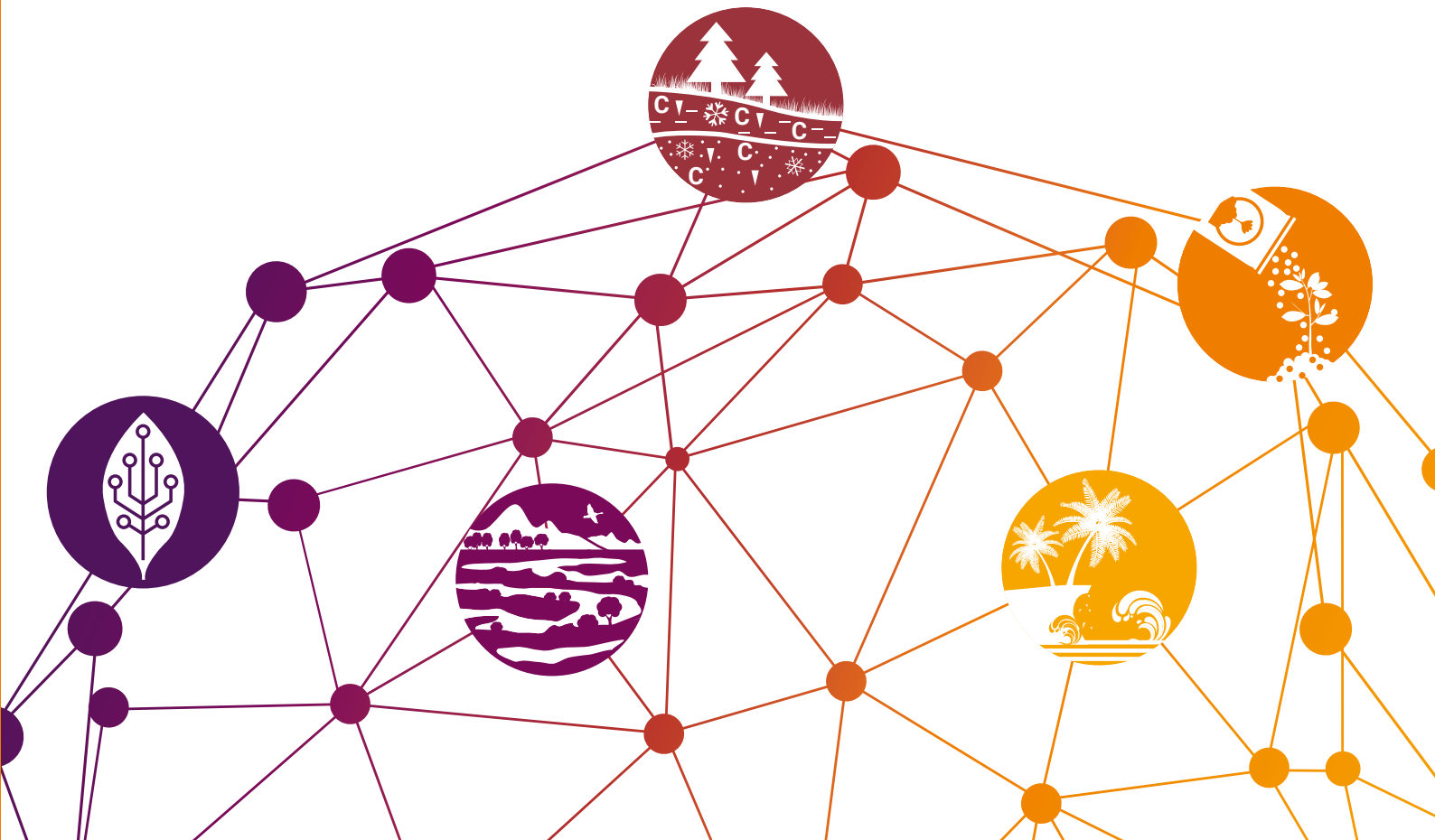


FRONTIÈRES 2018/19

Questions émergentes d'ordre environnemental



© 2019 Programme des Nations Unies pour l'environnement
ISBN: 978-92-807-3738-7
Job no : DEW/2222/NA

Avertissement

Cette publication peut être reproduite en tout ou en partie et sous quelque forme que ce soit à des fins pédagogiques et non lucratives sans autorisation spéciale du détenteur des droits d'auteur, à condition d'en mentionner la source. L'ONU Environnement souhaiterait recevoir un exemplaire de toute publication utilisant ce document comme source.

La présente publication ne peut être ni revendue ni utilisée à quelque fin commerciale que ce soit sans l'autorisation écrite préalable de l'ONU Environnement. Toute demande d'autorisation, mentionnant l'objectif et la portée de la reproduction, doit être adressée au Directeur de la Division de la communication, ONU Environnement, P.O. Box 30552, Nairobi, 00100, Kenya.

Les appellations employées dans le présent document, et la présentation des données qui y figurent n'impliquent aucune prise de position de la part de l'ONU Environnement quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites. Pour plus d'informations concernant l'utilisation des cartes dans les publications, veuillez consulter la page suivante : <http://www.un.org/Depts/Cartographic/french/htmain.htm>.

La mention de toute société commerciale ou de tout produit dans la présente publication ne signifie pas que l'ONU Environnement s'en porte garant. L'utilisation, à des fins de publicité, d'informations issues de la présente publication et concernant des produits brevetés n'est pas autorisée.

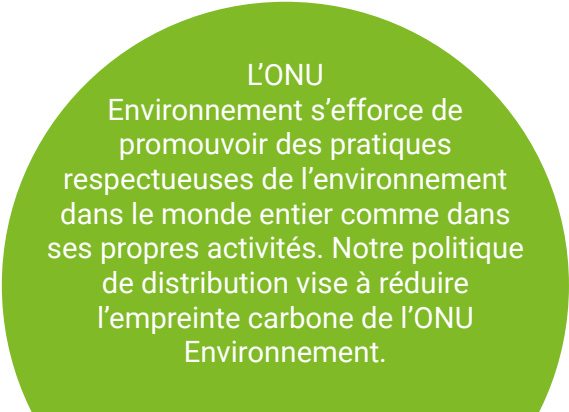
© Cartes, photos et illustrations, comme précisé.

Pour citer ce document

PNUE, 2019. *Frontières 2018/19, Questions émergentes d'ordre environnemental*, Programme des Nations Unies pour l'environnement, Nairobi

Production

Division de la science
ONU Environnement
P.O. Box 30552,
Nairobi, 00100, Kenya
Tél. : (+254) 20 7621234
Courriel : publications@unenvironment.org
Site : www.unenvironment.org



L'ONU
Environnement s'efforce de
promouvoir des pratiques
respectueuses de l'environnement
dans le monde entier comme dans
ses propres activités. Notre politique
de distribution vise à réduire
l'empreinte carbone de l'ONU
Environnement.

FRONTIÈRES 2018/19

Questions émergentes d'ordre environnemental

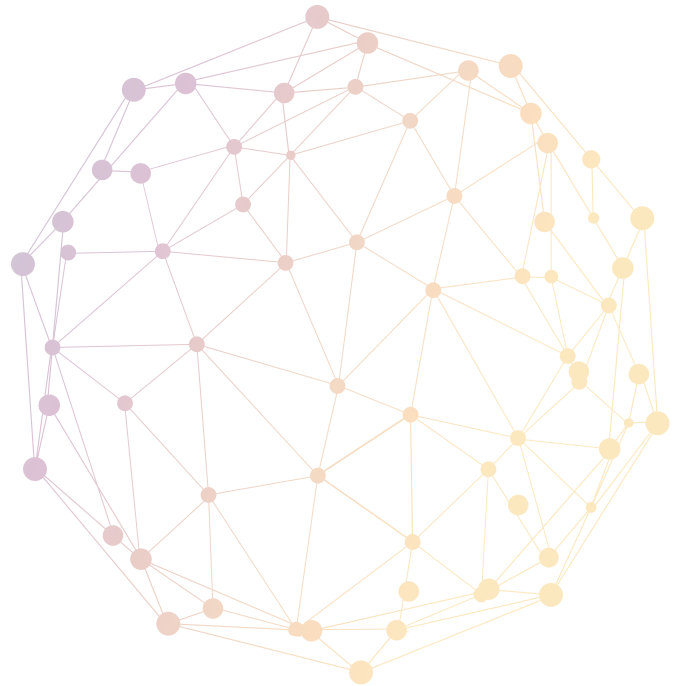









Table des matières

	Avant-propos	7
	Remerciements	8
	Biologie synthétique : reconfigurer l'environnement	10
	Opportunités et défis	10
	Réécrire le code de la vie	12
	Redéfinition des applications : du laboratoire aux écosystèmes	16
	Innover avec sagesse	18
	Bibliographie	20
	Connectivité écologique : une passerelle vers la préservation de la biodiversité	24
	Rétablir le lien entre les écosystèmes fragmentés	24
	Les forces de fragmentation	26
	Promouvoir des solutions de connectivité	30
	Fixer des objectifs de connectivité future	32
	Bibliographie	34
	Les tourbières à pergélisol : perdre du terrain sur une planète qui se réchauffe	38
	L'évolution accélérée de l'Arctique	38
	Fonte du pergélisol, décomposition de la tourbe et interactions complexes	40
	Une meilleure connaissance des tourbières à pergélisol	44
	Priorités en matière de connaissances et expansion du réseau	46
	Bibliographie	48
	La solution de l'azote : de la pollution du cycle de l'azote à l'économie circulaire de l'azote	52
	Le défi mondial de la gestion de l'azote	52
	Les éléments connus et les « inconnues connues » concernant l'azote	54
	Fragmentation des politiques et solutions d'économie circulaire	58
	Vers une approche internationale holistique de l'azote	60
	Bibliographie	62
	Une mauvaise adaptation au changement climatique : éviter les pièges se trouvant sur la voie de l'évolutivité	66
	Définir l'adaptation et la mauvaise adaptation dans un contexte de changement climatique	66
	La mauvaise adaptation à grande échelle	68
	Éviter la mauvaise adaptation dans un avenir limité à une hausse de la température de 1,5 °C	73
	Bibliographie	74



Avant-propos



Au début du XX^e siècle, les chimistes allemands Fritz Haber et Carl Bosch ont mis au point un processus permettant de produire de l'azote synthétique à un coût abordable et en grande quantité. Leur invention, qui a stimulé la production de masse d'engrais azotés, a transformé les pratiques agricoles du monde entier. Elle a aussi marqué le début de notre interférence à long terme avec le bilan azoté de la Terre. Chaque année, l'équivalent de 200 milliards de dollars US d'azote réactif est rejeté dans l'environnement. Ce phénomène contribue à la dégradation de nos sols, à la pollution de notre air, à l'extension des « zones mortes » ainsi qu'à la prolifération d'algues toxiques dans nos cours d'eau.

Il n'est donc pas surprenant que de nombreux scientifiques estiment que l'ère géologique actuelle devrait officiellement porter le nom d'« Anthropocène ». En seulement quelques décennies, le genre humain a provoqué une hausse des températures mondiales 170 fois plus rapide que la normale. Nous avons également transformé délibérément plus de 75 pour cent de la surface terrestre, et modifié de façon permanente le flux de plus de 93 pour cent de nos cours d'eau. Non seulement nous modifions drastiquement la biosphère, mais nous sommes maintenant également capables de réécrire, et même de créer ex nihilo, les éléments

constitutifs de la vie.

Chaque année, un réseau de scientifiques, de spécialistes et d'institutions du monde entier collabore avec l'ONU Environnement pour identifier et examiner les problèmes émergents qui auront des effets marqués sur notre société, notre économie et notre environnement. Certains de ces problèmes sont liés aux nouvelles technologies qui ont des applications étonnantes mais présentent des risques incertains, tandis que d'autres, tels que la fragmentation des paysages sauvages et la fonte des pergélisols, constituent des préoccupations de longue date. Autre problème soulevé : la pollution azotée, qui représente l'une des conséquences inattendues de plusieurs décennies d'activités humaines dans la biosphère. Un mauvaise adaptation au changement climatique, dernier point abordé dans ce rapport, met en évidence notre incapacité à nous adapter suffisamment et convenablement à un monde en constante mutation.

Le présent rapport contient toutefois de bonnes nouvelles. Comme vous pourrez le lire dans les pages suivantes, une approche globale vis-à-vis de la gestion de l'azote, une problématique mondiale, est en train de se mettre en place. En Chine, en Inde et dans l'Union européenne, des efforts prometteurs commencent à être déployés en vue de réduire les pertes et d'améliorer l'efficacité des engrais azotés. À long terme, la récupération et le recyclage de l'azote, ainsi que d'autres matières et nutriments précieux, peuvent nous aider à mener des activités agricoles propres et durables en vue de mettre en place une économie véritablement circulaire.

Les problématiques abordées dans le rapport Frontières visent à nous rappeler que chaque fois que nous interférons avec la nature, que ce soit à l'échelle de la planète ou au niveau moléculaire, nous prenons le risque de créer des effets à long terme sur notre environnement. En faisant preuve de prévoyance et en travaillant de concert, nous pouvons éviter ces problèmes et mettre au point des solutions qui seront utiles à tous pendant des générations.

Joyce Msuya
Directrice exécutive par intérim,
Programme des Nations Unies pour l'Environnement

Remerciements

Biologie synthétique : reconfigurer l'environnement

Auteurs principaux

Bartłomiej Kolodziejczyk, H2SG Energy Pte. Ltd., Singapour
Natalie Kofler, Yale Institute for Biospheric Studies, Université de Yale, Connecticut, États-Unis

Contributeurs et réviseurs

Marianela Araya, Convention sur la diversité biologique, Montréal, Canada
James Bull, College of Natural Sciences, Université du Texas à Austin, Texas, États-Unis
Jackson Chamber, Département de statistiques biologiques et de bio-informatique, Cornell University, New York, États-Unis
Chen Liu, Département de statistiques biologiques et de bio-informatique, Cornell University, New York, États-Unis
Yongyuth Yuthavong, Agence nationale thaïlandaise pour le développement de la science et de la technologie, Pathumthani, Thaïlande

Connectivité écologique : une passerelle vers la préservation de la biodiversité

Auteur principal

Gary Tabor, Center for Large Landscape Conservation, Montana, États-Unis

Contributeurs et réviseurs

Maya Bankova-Todorova, Fonds Mohamed bin Zayed pour la conservation des espèces, Abou Dhabi, Émirats arabes unis
Camilo Andrés Correa Ayram, Institut Alexander von Humboldt de recherche sur les ressources biologiques, Bogotá, Colombie
Letícia Couto Garcia, Université fédérale du Mato Grosso do Sul, Campo Grande, Brésil
Valerie Kapos, ONU Environnement – Centre mondial de surveillance de la conservation de la nature, Cambridge, Royaume-Uni
Andrew Olds, School of Science and Engineering, University of the Sunshine Coast, Maroochydore, Australie
Ileana Stupariu, Faculté de géographie, Université de Bucarest, Roumanie

Les tourbières à pergélisol : perdre du terrain sur une planète qui se réchauffe

Auteur principal

Hans Joosten, Université de Greifswald/Greifswald Mire Centre, Greifswald, Allemagne

Contributeurs et réviseurs

Dianna Kopansky, ONU Environment, Nairobi, Kenya
David Olefeldt, Faculté des sciences de l'agriculture, de la vie et de l'environnement, Université de l'Alberta, Edmonton, Canada
Dmitry Streletskiy, Department de géographie, The George Washington University, Washington DC, États-Unis

La solution de l'azote : de la pollution du cycle de l'azote à l'économie circulaire de l'azote

Auteurs principaux

Mark Sutton, Centre for Ecology & Hydrology, Édimbourg, Royaume-Uni
Nandula Raghuram, Guru Gobind Singh Indraprastha University, New Delhi, Inde
Tapan Kumar Adhya, Kalinga Institute of Industrial Technology, Bhubaneswar, Odisha, Inde

Contributeurs et réviseurs

Jill Baron, Commission géologique des États-Unis, Colorado, États-Unis
Christopher Cox, ONU Environnement, Nairobi, Kenya
Wim de Vries, Université et centre de recherche de Wageningen, Wageningen, Pays-Bas
Kevin Hicks, Institut de Stockholm pour l'environnement, York, Royaume-Uni
Clare Howard, Centre for Ecology & Hydrology, Édimbourg, Royaume-Uni
Xiaotang Ju, College of Agricultural Resources and Environmental Science, Université agricole de Chine, Pékin, Chine
David Kanter, College of Arts and Science, Université de New York, New York, États-Unis
Cargele Masso, Institut international d'agriculture tropicale, Ibadan, Nigéria

Jean Pierre Ometto, Institut national de recherche spatiale, São José dos Campos, Brésil
Ramesh Ramachandran, Centre national de gestion durable des zones côtières, ministère de l'Environnement, des Forêts et du Changement climatique, Chennai, Inde
Hans Van Grinsven, Agence néerlandaise d'évaluation environnementale PBL, La Haye, Pays-Bas
Wilfried Winiwarter, Institut international pour l'analyse appliquée des systèmes, Laxenburg, Autriche

Une mauvaise adaptation au changement climatique : éviter les pièges se trouvant sur la voie de l'évolutivité

Auteur principal

Catherine McMullen, Institut de Stockholm pour l'environnement, Bangkok, Thaïlande

Contributeurs et réviseurs

Thomas Downing, Global Climate Adaptation Partnership, Oxford, Royaume-Uni

Anthony Patt, Institut pour les décisions environnementales, EPF Zürich, Zürich, Suisse

Bernadette Resurrección, Institut de Stockholm pour l'environnement, Bangkok, Thaïlande

Jessica Troni, ONU Environnement, Nairobi, Kenya

Nous tenons tout particulièrement à remercier :

Alexandra Barthelmes et Cosima Tegetmeyer, Greifswald Mire Centre, Allemagne ; Marin Klinger, National Snow and Ice Data Center, Colorado, États-Unis ; Salome Chamanje, David Cole, Nicolien Delange, Angeline Djampou, Philip Drost, Virginia Gitari, Jian Liu, Ariana Magini, Nada Matta, Pauline Mugo, Susan Mutebi-Richards, Shari Nijman, Andreas Obrecht, Samuel Opiyo, Moses Osani, Roxanna Samii, Rajinder Sian, Nandita Surendran et Josephine Wambua, ONU Environnement

Conseillers en production

Maarten Kappelle et Edoardo Zandri, ONU Environnement, Nairobi, Kenya

Équipe de production

Rédacteur en chef : Pinya Sarasas, ONU Environnement

Soutien technique : Allan Lelei, ONU Environnement

Relectrice : Alexandra Horton, Royaume-Uni

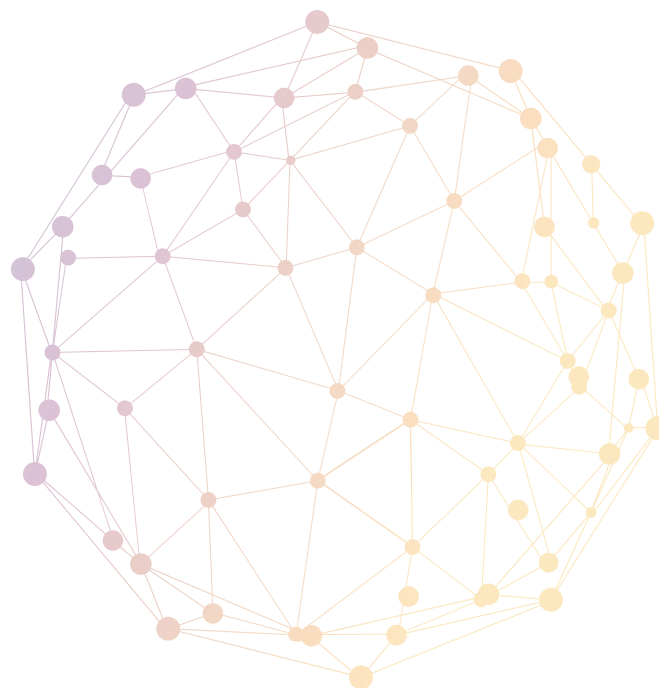
Conception graphique et mise en page

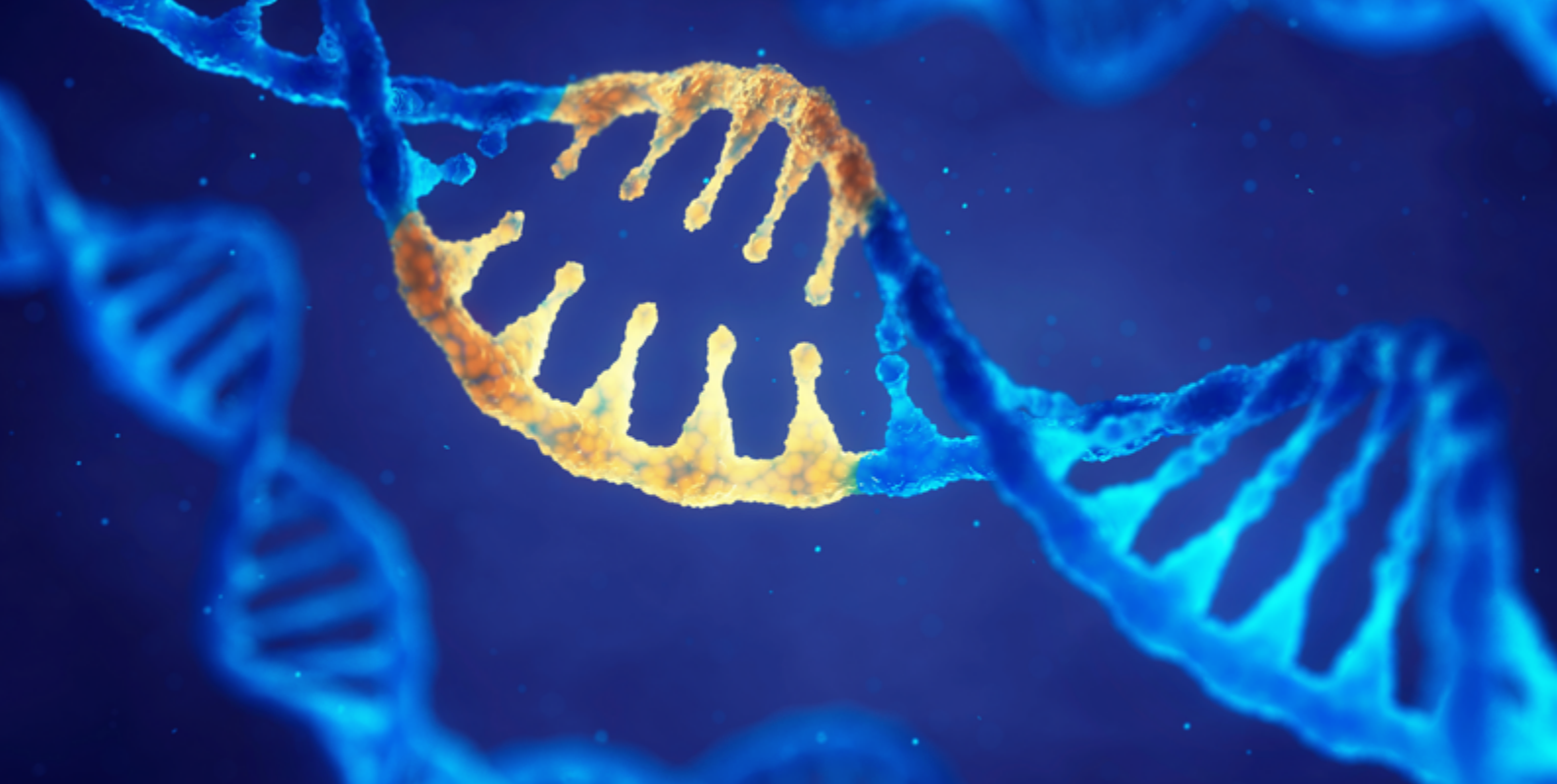
Infographiste : Audrey Ringler, ONU Environnement

Cartographe : Jane Muriithi, ONU Environnement

Impression

UNON/Section des services de publication/Nairobi, certifié ISO ISO14001:2004





Crédit photo : nobeastsofierce / Shutterstock.com

Biologie synthétique : reconfigurer l'environnement

Opportunités et défis

Le monde fait face à des difficultés sans précédent pour garantir un avenir sain et durable. La destruction des habitats, l'introduction d'espèces envahissantes et la surexploitation des ressources contribuent à une perte de biodiversité impressionnante¹. En outre, les pratiques non durables de l'industrie extractive alourdissent la charge qui pèse sur l'environnement et, par extension, sur le bien-être humain. Les maladies infectieuses à transmission vectorielle représentent une menace majeure pour la santé mondiale². Le changement rapide des conditions climatiques est susceptible d'élargir l'étendue géographique des maladies tropicales et de faire peser une pression supplémentaire sur les espèces et les écosystèmes sollicités³.

Plusieurs approches conçues pour faire face à ces défis, certaines ayant été seulement proposées et d'autres déjà mises en œuvre,

s'appuient sur une même stratégie, à savoir, avoir recours à la manipulation génétique des organismes vivants pour acquérir de nouvelles fonctions n'existant pas à l'état naturel et pouvoir ainsi répondre aux besoins humains. Les scientifiques sont capables de modifier des microorganismes, tels que la bactérie *E. coli*, en réécrivant leur code génétique pour les transformer en minuscules usines vivantes produisant des biocarburants⁴. Aussi bien la levure de boulanger que la bactérie *E. coli* peuvent être transformées pour produire de l'acide adipique, une substance chimique dérivée du pétrole et essentielle à la fabrication du nylon, offrant ainsi une autre possibilité à la fabrication dépendant du pétrole^{5,6}. La levure de boulanger peut elle aussi être reprogrammée pour obtenir un médicament antipaludique appelé artémisinine, produit normalement à partir de l'armoise annuelle⁷. Il s'agit là d'exemples de produits ayant pu être fabriqués grâce à la haute technologie du génie génétique, connue sous la dénomination de biologie synthétique.



L'acide succinique est un produit chimique à haute valeur ajoutée ; il est employé dans les industries alimentaire, pharmaceutique et chimique. *Basfia succiniciproducens*, illustrée ci-dessus, est une bactérie que l'on retrouve dans le rumen des bovins et qui produit naturellement de l'acide succinique. Des techniques de manipulation génétique sont employées pour en produire à l'échelle industrielle. Agrandissement de 4 000.

Crédit photo : BASF

La majorité des produits de biologie synthétique disponibles sur le marché ont été créés dans le but d'offrir des substituts aux produits à valeur élevée disponibles, en particulier ceux dépendant de la chaîne d'approvisionnement du pétrole et des ressources non renouvelables⁸. Par ailleurs, les solutions de remplacement et produits de substitution synthétiques aux produits conventionnels dérivés de la nature gagnent également du terrain dans le domaine de la recherche et sur les marchés⁹⁻¹². Modern Meadow, l'entreprise à l'origine de l'invention d'une levure produisant du collagène, cherche à proposer une alternative durable au cuir ayant des propriétés et une texture similaire au cuir d'origine animale¹¹. La biologie synthétique a aussi ouvert de nouvelles portes vers des matériaux de pointe aux fonctionnalités et aux performances novatrices, tels que les matériaux pouvant s'auto-assembler ou s'autoréparer¹³.

L'apparition récente des CRISPR (abréviation de *clustered regularly interspaced short palindromic repeats*, soit « courtes répétitions palindromiques groupées et régulièrement espacées », prononcé crisper) comme outil d'édition génomique a permis l'introduction de méthodes encore plus précises et moins coûteuses de modification d'organismes, de systèmes biologiques et de génomes entiers^{14,15}. Les applications de la biologie synthétique vont au-delà de la manipulation de microbes en laboratoire et permettent également de provoquer la propagation d'espèces en dehors d'environnements contrôlés, à des fins spécifiques. Des stratégies consistant à disséminer des organismes génétiquement

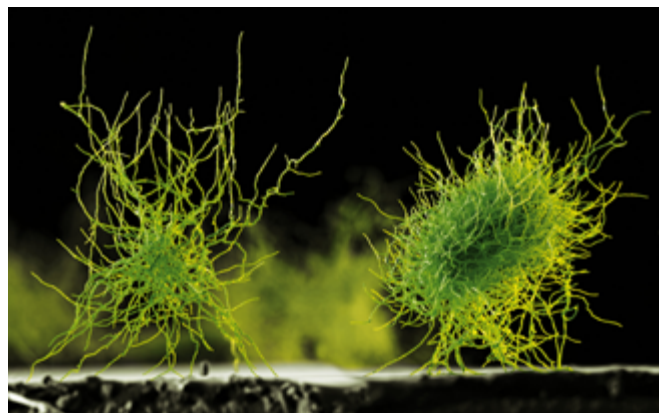


Les parties à la Convention sur la diversité biologique considèrent que la définition pratique suivante peut servir de point de départ pour favoriser la tenue de débats scientifiques et techniques dans le cadre de la Convention et de ses protocoles.

La biologie synthétique est une extension et une nouvelle dimension de la biotechnologie moderne qui allie la science, la technologie et l'ingénierie pour faciliter et accélérer la compréhension, la conception, la transformation, la fabrication ou la modification des matières génétiques, des organismes vivants et des systèmes biologiques²⁰.

modifiés dans l'environnement en vue de supprimer de manière permanente des populations entières d'espèces cibles ont été proposées comme moyen d'éradiquer des vecteurs de maladies, éliminer des espèces envahissantes et permettre la résilience des espèces végétales et animales menacées¹⁶.

La libération intentionnelle ou accidentelle d'organismes génétiquement modifiés dans l'environnement peut avoir des répercussions négatives importantes sur la santé humaine et environnementale. Le détournement de ces technologies et la non-prise en compte des conséquences indésirables peuvent causer des dommages écologiques irréversibles et poser des menaces géopolitiques considérables¹⁷. L'étendue potentielle des impacts de la biologie synthétique appelle l'adoption de méthodes de gouvernance et de lignes directrices de recherche promouvant son utilisation éthique et responsable^{18,19}.



Le champignon filamenteux *Aspergillus niger* produit naturellement des enzymes d'intérêt commercial pour l'industrie alimentaire humaine et animale. Ce microorganisme est modifié génétiquement de façon à produire des enzymes à grande échelle. Agrandissement de 180.

Crédit photo : BASF

Réécrire le code de la vie

Le développement de la technologie de l'ADN recombiné dans les années 1970 a marqué un tournant majeur dans le contrôle des génomes par l'être humain²¹. Les technologies de séquençage de l'ADN permettent de lire et de comprendre des séquences de l'ADN, tout en fournissant un modèle permettant de modifier l'expression des gènes d'un génome. Les séquences de l'ADN peuvent être réécrites entièrement en effaçant, en ajoutant ou en remplaçant certains segments. Des parties entières de l'ADN peuvent maintenant être synthétisées chimiquement et assemblées, ce qui a conduit à la création d'une vie synthétique²².

L'outil de modification génétique le plus récent, CRISPR-Cas9, a suscité un grand enthousiasme au sein de la communauté scientifique et du grand public. Décrits pour la première fois en 2012, les CRISPR sont plus rapides, moins coûteux, plus fiables et plus performants que tous les outils de modification des gènes qui l'ont précédé^{23,24}. Ils ont permis d'accélérer le processus de transformation de plusieurs mois à quelques jours à peine^{25,26}.

La technique de modification des gènes utilisée par l'outil CRISPR-Cas9 est inspirée du système de défense naturel de certaines bactéries contre une invasion virale^{27,28}. Dans le milieu naturel, une bactérie peut sécréter l'enzyme Cas9 pour couper le matériel génétique étranger inséré par un virus, repoussant ainsi l'attaque. Les chercheurs ont adapté ce mécanisme afin de couper l'ADN à l'endroit voulu. Avec l'outil de modification des gènes CRISPR-Cas9, les scientifiques utilisent une molécule d'ARN guide pour emmener l'enzyme Cas9 vers la séquence cible de l'ADN. L'enzyme Cas9 agit ensuite comme une paire de ciseaux moléculaires, coupant ou effaçant la séquence cible. En exploitant le processus naturel de réparation de l'ADN, les chercheurs sont aussi capables d'insérer un segment personnalisé de l'ADN dans le brin défectueux²⁹.

 Vidéo : La biologie synthétique expliquée



Lien vers la vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=rD5uNAMbDaQ>
Crédit photo : Omelchenko / Shutterstock.com

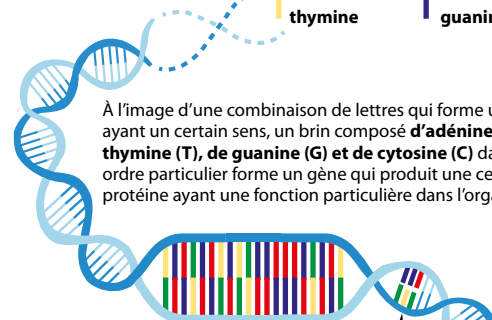
© techNyouvids

Chaque organisme vivant est doté d'un **ADN**. Ce dernier détermine la production de protéines nécessaires au bon fonctionnement de l'organisme.

L'**ADN**, ou acide désoxyribonucléique, est constitué de quatre bases nucléiques associées par paires.

L'**adénine** est toujours associée à la **thymine**

La **cytosine** est toujours associée à la **guanine**




À l'image d'un combinaison de lettres qui forme un mot ayant un certain sens, un brin composé d'**adénine (A)**, de **thymine (T)**, de **guanine (G)** et de **cytosine (C)** dans un ordre particulier forme un gène qui produit une certaine protéine ayant une fonction particulière dans l'organisme.

Lorsqu'une « **coquille** », ou mutation, survient dans une séquence d'ADN, cela a des répercussions sur la structure et la fonction des protéines synthétisées. Une cellule peut devenir cancéreuse en raison d'une « erreur » dans la séquence d'ADN.

Les scientifiques sont capables de déterminer l'ordre précis des lettres dans une **séquence d'ADN**. L'ensemble de la chaîne de l'ADN humain, appelée génome humain, compte trois milliards de combinaisons ou paires de bases.



 2,7 millions de paires de bases


 651 millions de paires de bases


 12 millions de paires de bases (levure de boulanger, *S. cerevisiae*)

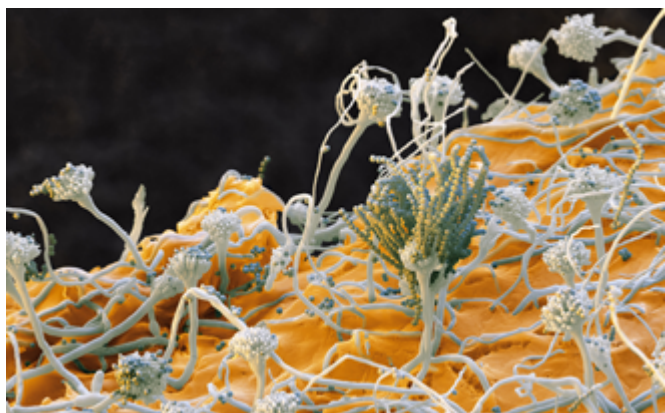
 278 millions de paires de bases

Des techniques de génie génétique sont utilisées depuis des décennies pour modifier les organismes en déplaçant le matériel génétique, comme cela est le cas pour les organismes génétiquement modifiés (OGM), où le gène d'une espèce est isolé et transféré dans l'ADN d'une autre espèce non apparentée dans le but de doter l'organisme cible des caractéristiques souhaitées.

La **biologie synthétique** est la prochaine étape du génie génétique : la recherche ne se cantonne plus à la manipulation du matériel génétique naturel, mais s'intéresse aujourd'hui également à la programmation et la construction de nouveaux systèmes biologiques à l'aide d'un ADN synthétisé de manière artificielle.

 En 2010, les scientifiques ont annoncé avoir réussi à créer la toute première cellule bactérienne synthétique, après une décennie d'études sur la manière dont concevoir, synthétiser et assembler une séquence d'ADN en partant de zéro.

 En utilisant le génome de la levure de boulanger naturelle comme modèle, un groupe de scientifiques travaillent actuellement à l'élaboration d'une cellule de levure fabriquée entièrement à partir d'un ADN synthétique.



Le champignon *Emericella nidulans* produit des spores sphériques dotées d'une couche d'hydrophobine, une protéine hydrophobe. Le gène responsable de la production d'hydrophobine a été introduit dans la bactérie *E. coli* en vue de fabriquer cette protéine à des fins commerciales. Agrandissement de 400.

Crédit photo : BASF

Cette procédure de remplacement peut être comparée à la manipulation consistant à rechercher et couper un mot ou une phrase dans un document et éventuellement à le ou la remplacer par une nouvelle formulation. Les CRISPR sont aujourd'hui utilisés pour réparer les mutations pathogènes chez l'être humain, introduire de nouvelles caractéristiques dans les plantes cultivées et synthétiser de nouveaux microorganismes¹⁴. Plus récemment, l'outil CRISPR-CAS13 a été utilisé pour modifier l'ARN au lieu de l'ADN³⁰.

La modification des gènes à l'aide des CRISPR est utilisée dans le domaine de la recherche pour transformer les organismes de la faune ou de la flore sauvages vivant en dehors des environnements contrôlés par l'homme. Le *forçage génétique* désigne une application de la biologie synthétique qui utilise la transformation des gènes CRISPR pour garantir l'expression d'un gène modifié chez les futures générations d'une espèce sauvage³¹. Le processus consiste à modifier certaines séquences CRISPR d'un gène forcé chez des populations de laboratoire pour encoder de nouvelles fonctions. L'organisme modifié est ensuite relâché afin qu'il se reproduise avec la population ordinaire dans le milieu naturel, forçant ainsi la transmission du gène modifié et du forçage génétique à sa progéniture. Le forçage génétique est un processus perpétuel qui se répète dès lors que la progéniture s'accouple avec la population sauvage. Au fil du temps, la population entière de cette espèce portera le gène modifié souhaité et le forçage génétique. Le forçage génétique par CRISPR peut également permettre la transmission de caractères empêchant la reproduction, telles que la stérilité, dans toute une population et mener potentiellement à son extinction. L'application du forçage génétique par CRISPR est plus adaptée aux espèces ayant une reproduction sexuée avec des temps de gestation courts, comme cela est le cas de la plupart des insectes et des rongeurs³².

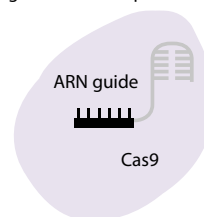
Méthode CRISPR-Cas9 de modification du génome

Dans le milieu naturel, CRISPR-Cas9 constitue l'immunité et la stratégie de défense d'une bactérie contre les attaques virales, lui permettant d'identifier précisément et de couper l'ADN d'un virus envahisseur, empêchant ainsi l'attaque. Les scientifiques ont adapté le mécanisme CRISPR-Cas9 à la modification du génome, car il offre un moyen plus précis, plus rapide et relativement moins coûteux de modifier un génome.

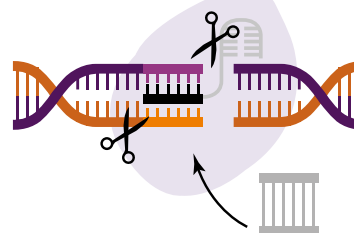
1
Les scientifiques identifient la séquence d'ADN qu'ils souhaitent modifier.



2
Ils créent ensuite une séquence génétique, appelée ARN guide, semblable à la séquence d'ADN cible et relient l'ARN guide à l'enzyme Cas9 qui agit comme une paire de ciseaux moléculaires.



3
L'ARN guide identifie la séquence d'ADN cible et dit à l'enzyme Cas9 où couper.

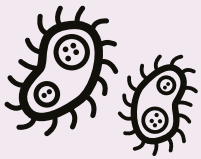


4
Une nouvelle séquence d'ADN peut être insérée à la place de la séquence coupée.



Biologie synthétique

Applications en faveur du développement durable



De nombreuses industries ont recours à la biologie synthétique : des microorganismes, des bactéries ou des levures sont génétiquement modifiés pour devenir de minuscules usines fabriquant des ingrédients plus durables qui seront ensuite utilisés dans des médicaments, des vaccins, des biocarburants, des produits chimiques verts et de nouveaux matériaux.

Produits pharmaceutiques



La bactérie *E. coli* est modifiée pour fabriquer un vaccin contre la chlamydia, qui est de plus en plus résistante aux antibiotiques conventionnels.

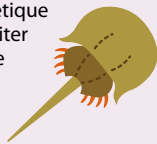


Produits chimiques verts et biosourcés

Divers produits chimiques entrant dans la composition de produits d'usage courant sont dérivés du pétrole. La biologie synthétique permet de produire des substances pouvant remplacer les produits chimiques dérivés du pétrole.

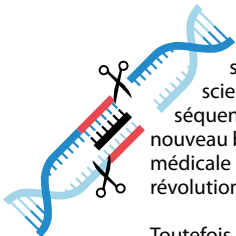
Substituts aux produits chimiques dérivés de sources non durables

Le **sang de limule** est l'une des principales substances biomédicales utilisées par l'industrie pharmaceutique pour tester la contamination bactérienne. Un substitut de biologie synthétique permettrait de limiter ou de supprimer le besoin de pêcher cette espèce pratiquement disparue.



L'**acide lactique**, l'**acide succinique** et le **propanediol** font partie des produits chimiques élaborés à partir de microbes génétiquement modifiés qui sont disponibles sur le marché mondial.

CRISPR-Cas9 genome editing technique



La découverte de la méthode CRISPR-Cas9 a chamboulé toutes les perspectives de la recherche sur la biologie synthétique. Elle permet aux scientifiques de couper la partie souhaitée d'une séquence particulière d'ADN ou de la remplacer par un nouveau brin d'ADN. De nombreux domaines de la recherche médicale requièrent des modifications aussi précises pour révolutionner les traitements.

Toutefois, cette technique fait l'objet d'un examen minutieux quant à son niveau de sécurité, car elle peut entraîner des effets indésirables potentiels en coupant par inadvertance une partie de l'ADN dont la séquence est similaire au brin cible, pouvant causer des cancers dans les cellules modifiées.

Marché et investissement

13,9 milliards USD
Valeur commerciale prévue des applications de biologie synthétique sur le marché mondial d'ici à 2022



1,9 milliard USD
Investissements mondiaux accordés en 2018 aux **start-up** du domaine de la biologie synthétique



Biologie participative (DIY Bio)

Le mouvement de « scientifiques citoyens » souhaitant réaliser des expériences de biologie synthétique connaît une croissance importante au niveau mondial. Les amateurs de biologie, dont beaucoup possèdent une formation scientifique, se réunissent dans des garages transformés en laboratoires pour réaliser eux-mêmes des expériences à l'aide de kits spécialisés et de protocoles simples disponibles en ligne.

Certains groupes acquièrent des équipements spécialisés et recrutent des professionnels pour aider les scientifiques citoyens, les biohackers et les amateurs de biologie à développer leurs projets.

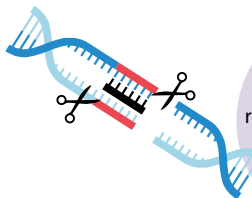
Prise en compte des risques et de la politique

D'aucuns craignent que la biologie synthétique soit utilisée pour reproduire des virus pathogènes existants, les rendre plus dangereux ou fabriquer des produits chimiques avec de simples ressources et une modeste organisation.

La biologie synthétique s'accompagne de nouveaux défis qui doivent être surmontés par l'action renforcée d'organismes gouvernementaux et internationaux. Il est essentiel d'élaborer des méthodes efficaces permettant de mieux gérer les risques émergents afin de garantir la sécurité technologique.

Applications en faveur de la conservation et de la santé publique

Le forçage génétique par CRISPR peut constituer un outil essentiel pour faire face à certains enjeux mondiaux, tels que des maladies à transmission vectorielle ou la propagation d'espèces envahissantes, mais il appelle un débat de société multidimensionnel en raison de sa capacité à modifier, supprimer ou remplacer la population entière d'une espèce cible, allant ainsi à l'encontre des principes fondamentaux de l'évolution.



Le forçage génétique a été rendu possible grâce à l'élaboration de la technologie CRISPR-Cas9.



La population de châtaigniers d'Amérique est sur le point de disparaître en raison d'un champignon pathogène, le *cryphonectria parasitica*, originaire d'Asie. Après approbation réglementaire, le châtaignier d'Amérique pourrait être génétiquement modifié pour résister à ce champignon, puis introduit dans la nature.

Le forçage génétique visant à supprimer certaines caractéristiques génétiques peut transmettre des modifications génétiques préjudiciables aux générations suivantes, telles que la stérilité, éliminant ainsi potentiellement la totalité de la population cible. Ce type de forçage est utilisé pour contrôler les populations de moustiques vecteurs de paludisme dans l'environnement.



L'introduction de seulement quelques organismes porteurs d'un gène forcé dans l'environnement peut transformer la population entière d'une espèce et possiblement l'ensemble de l'écosystème.

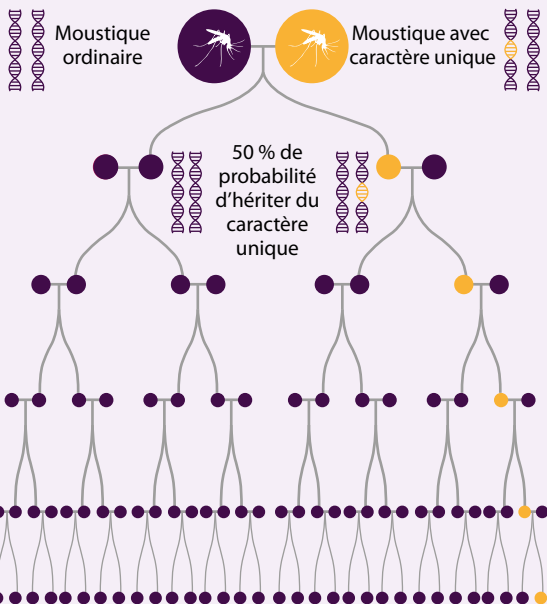


La contamination génétique croisée entre différentes espèces et les dommages écologiques involontaires constituent des préoccupations légitimes qui n'ont pas encore été résolues.

Forçage génétique par CRISPR : manipulation des populations sauvages d'espèces végétales et animales

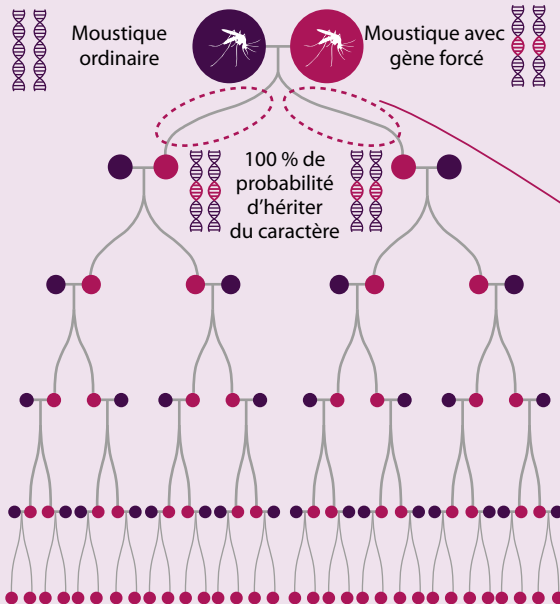
Hérédité normale

Lors de la reproduction sexuée, chaque parent transmet la moitié de son ADN à sa progéniture. Le caractère génétique unique d'un parent a 50 pour cent de probabilité d'être transmis à la génération suivante. Sur plusieurs générations, ce caractère génétique unique se retrouve toujours dans la population, mais à une faible fréquence. Les règles de l'hérédité normale s'appliquent également à la progéniture d'un parent normal et d'un parent OGM.



Hérédité du gène forcé

Le forçage génétique modifie les règles de l'hérédité normale. Ce mécanisme se répétant de manière autonome vise à garantir la transmission préférentielle d'un caractère génétique modifié aux générations futures. Au fil du temps, la population tout entière hérite du caractère génétiquement modifié souhaité.



Lors de la fécondation, la progéniture hérite d'un profil ADN du parent ordinaire et d'un autre profil ADN du parent génétiquement modifié, contenant le gène forcé par CRISPR. CRISPR-Cas9 identifie la séquence cible de l'ADN ordinaire et la coupe.

Lorsque l'ADN coupé tente de réparer les dommages, il copie le brin modifié contenant le gène forcé.

La progéniture obtient donc deux copies de l'ADN génétiquement modifié capable de passer le gène forcé aux futures générations.

Redéfinition des applications : du laboratoire aux écosystèmes

La biologie synthétique pourrait contribuer indirectement aux efforts de préservation en permettant la fabrication de solutions artificielles en remplacement des produits commerciaux provenant généralement du milieu sauvage. Par exemple, le sang de limule est l'une des principales substances biomédicales utilisées pour tester la contamination bactérienne des produits pharmaceutiques. Les pratiques de capture non durables poussent cette espèce vers l'extinction³³. Un produit synthétique de remplacement a été élaboré, ce qui pourrait permettre de réduire ou de supprimer le besoin de capturer cette espèce de crabe menacée^{34,35}. De même, les microbes et micro-algues génétiquement modifiés offrant un substitut aux huiles riches en oméga-3 pourraient alléger la pression qui pèse sur les stocks de poissons sauvages en baisse³⁶.

Des mesures de préservation proposant une application plus directe de cette technologie sur certaines espèces ont récemment été adoptées. Introduire des organismes génétiquement modifiés dans l'environnement pourrait permettre de rétablir la santé des populations menacées et d'améliorer leur résilience. Par exemple, grâce à une approche antérieure à la méthode CRISPR, les scientifiques ont pu synthétiser le gène de l'oxalate oxydase généralement exprimé par le blé et forcer son expression chez le châtaignier d'Amérique. Ce gène est capable de neutraliser la toxine sécrétée par le champignon *cryphonectria parasitica* responsable de l'extinction fonctionnelle de cette espèce d'arbre^{37,38}. Après l'approbation réglementaire, les châtaigniers résistants au champignon pourront être plantés pour réintroduire cette espèce autrefois dominante dans les forêts de l'est des États-Unis. À l'inverse des semences génétiquement modifiées, pour lesquelles les préoccupations liées à la sécurité portent principalement sur le confinement des semences, le châtaignier d'Amérique génétiquement modifié est intentionnellement conçu pour se répandre et prospérer dans le milieu naturel.

Au vu de l'accélération du taux d'extinction des espèces à l'échelle mondiale du fait du changement climatique, il est probable que la méthode CRISPR soit appliquée davantage à l'avenir à la restauration des écosystèmes³⁹. Les scientifiques ont proposé d'utiliser la méthode CRISPR pour les espèces menacées, telles que les coraux qui subissent une pression considérable en raison de la hausse de la température des océans, de leur acidification et de leur pollution. La recherche initiale, qui vise la validation de la méthode CRISPR pour réécrire le génome des coraux et exprimer les mutations qui encouragent la résilience, a été lancée^{40,41}. Cependant, le cadre de la mise en œuvre de cette recherche sur le terrain reste à définir.



Vidéo : Moustiques génétiquement modifiés



Lien vers la vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=z1STGkDyEFM>
Crédit photo : Ajintai / Shutterstock.com

© biointeractive

Les stratégies CRISPR pourraient aussi permettre de supprimer les espèces envahissantes des écosystèmes menacés. Sur de nombreuses îles du Pacifique, par exemple, des espèces envahissantes de rongeurs déciment des populations d'oiseaux indigènes⁴². Grâce à la collaboration internationale, le programme *Genetic Biocontrol of Invasive Rodents* (biocontrôle génétique des espèces envahissantes de rongeurs) effectue un forçage génétique par CRISPR qui répandrait la stérilité^{43,44}. En Nouvelle-Zélande, le forçage génétique par CRISPR est envisagé pour contribuer à l'élimination de toutes les espèces envahissantes de prédateurs d'ici 2050⁴⁵. À Hawaï, le forçage génétique a été proposé comme solution pour endiguer le paludisme aviaire répandu par les moustiques, responsable du déclin important d'espèces rares d'oiseaux^{46,47}. Néanmoins, des recherches récentes montrent que le forçage génétique peut se heurter à des résistances et démontrer une efficacité limitée pour ce qui est des populations sauvages de moustiques^{48,49}.

Il a même été proposé de ressusciter des espèces éteintes pour leur intérêt écologique, par exemple, ressusciter un animal similaire au mammouth laineux en modifiant les gènes de l'ADN de son plus proche parent actuel, à savoir l'éléphant d'Asie^{50,51}. La proposition de ramener à la vie des espèces éteintes est non seulement très discutable, mais souligne également l'importance de combattre les causes profondes des extinctions. La possibilité de pratiquer des interventions génétiques de ce type, même si elles ne sont pas concrétisées, encourage le lancement d'un vrai débat sur la manière dont les biotechnologies peuvent soutenir les objectifs de préservation, coexister avec ces objectifs ou les freiner⁵².

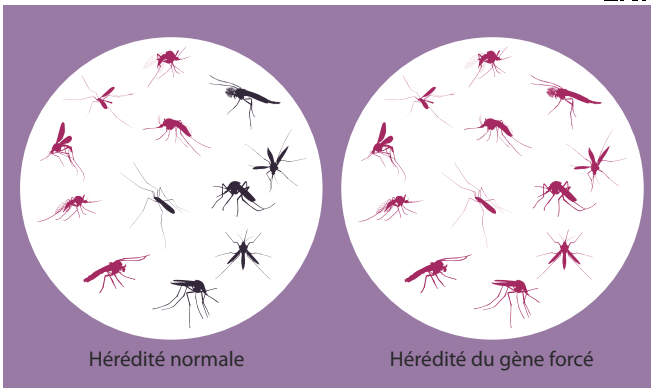


Ressusciter des espèces éteintes

À ce jour, plusieurs tentatives de ressusciter des espèces récemment éteintes ou proches de l'extinction ont été faites en utilisant des techniques de croisement intergénérationnel et de clonage⁵⁸⁻⁶⁰. Le recours à ces approches dépend de la disponibilité des tissus de l'animal éteint pouvant être clonés et des espèces existantes permettant le croisement intergénérationnel ou servant de mère porteuse^{61,62}. Aucun des efforts déployés jusqu'à présent pour tenter de ressusciter des espèces éteintes n'a porté ses fruits. Ramener à la vie des espèces disparues depuis longtemps de la surface du globe et pour lesquelles nous n'avons qu'une infime trace de leur ADN n'est que très peu probable. Cela nécessiterait la reconstruction de la totalité du génome et supposerait l'existence d'une espèce voisine pouvant servir de mère porteuse viable. Même si les difficultés technologiques peuvent un jour être surmontées, des défis persistent quant à la manière dont une espèce ressuscitée pourrait vivre dans l'environnement actuel. Sur le plan écologique, les principales préoccupations portent sur la concurrence et l'interaction incertaines des espèces, le risque que l'espèce ressuscitée soit porteuse de maladies et de parasites, la possibilité que cette espèce devienne elle-même vectrice de maladies ou envahissante, et la probabilité de créer et de préserver une population saine à partir d'individus présentant une faible diversité génétique⁶¹.



Vidéo : Qu'est-ce que le forçage génétique ?



Lien vers la vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=75iP5OLEHRU>

© STAT

Vidéo : Pourquoi le sang de la limule est-il si cher ?



Lien vers la vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=LgQZWSILBnA>
Crédit photo : Lysagor Roman / Shutterstock.com

© Business Insider

Afin de réduire la charge mondiale des maladies, plusieurs stratégies de biologie synthétique cherchent à éliminer directement les populations vectrices de maladies. Une entreprise appelée Oxitec a modifié le patrimoine génétique de moustiques afin d'exprimer un gène létal synthétique et les a relâché en Amérique du Sud, en Asie du Sud-Ouest et dans plusieurs pays des Caraïbes pour éliminer le vecteur de la dengue, du virus Zika, de la fièvre jaune et du Chikungunya^{53,54}. Ces moustiques « autolimitants » transmettent un gène létal à leur progéniture, l'empêchant d'atteindre la maturité. Toutefois, cette méthode de suppression s'arrête à partir du moment où des moustiques génétiquement modifiés ne sont plus relâchés continuellement dans le milieu naturel. Pour surmonter ce problème, Target Malaria, un consortium international financé par la Fondation Bill and Melinda Gates, met actuellement au point un forçage génétique par CRISPR permettant de contrôler le vecteur du paludisme en Afrique subsaharienne⁵⁵. Le forçage génétique par CRISPR est extrêmement invasif, car en théorie une seule introduction de quelques organismes porteurs d'un gène forcé suffit pour éliminer entièrement la population sauvage d'une espèce. Une autre stratégie consiste à utiliser le forçage génétique non pas pour éliminer la population de moustiques, mais pour l'empêcher de transmettre des pathogènes⁵⁶. Le forçage génétique par CRISPR a également été utilisé pour immuniser de manière permanente la souris à pattes blanches des îles du Massachusetts (États-Unis) contre la maladie de Lyme⁵⁷.

Innover avec sagesse

L'introduction accidentelle ou intentionnelle d'organismes génétiquement modifiés dans l'environnement a suscité des préoccupations légitimes quant à la sécurité biologique et les conséquences imprévisibles. Pour les organismes modifiés dans des installations industrielles ou de recherche fermées, des procédures de confinement et la réglementation en vigueur sur l'élimination des déchets sont appliquées afin d'éviter la fuite de ces organismes, bien que le risque zéro n'existe pas⁶³. Dans le cas d'une introduction intentionnelle, les questions relatives à la possible contamination génétique croisée entre les espèces, aux interactions écologiques et aux répercussions sur les écosystèmes et les services écosystémiques restent en grande partie sans réponse⁶⁴. Modifier le patrimoine génétique d'un vecteur de maladie peut entraîner la mutation d'un pathogène, le rendre plus virulent ou créer un nouveau vecteur de ce pathogène⁶⁵.

À ce jour, le forçage génétique par CRISPR n'a été testé que sur de petites populations dans des environnements contrôlés et seule une expérience récente est parvenue à éliminer entièrement une population de moustiques vecteurs de paludisme en laboratoire⁶⁶. Comme premier pas vers des essais à plus grande échelle, Target Malaria a récemment obtenu l'autorisation d'introduire 10 000 moustiques génétiquement modifiés au Burkina Faso. Ces spécimens seront modifiés génétiquement pour être rendus stériles, mais ne porteront pas de gène forcé afin d'examiner tout d'abord comment ils rivalisent avec les mâles à l'état sauvage⁶⁷. Cependant, la mise en œuvre d'essais sur le terrain pour évaluer l'efficacité du système de forçage génétique peut comporter des risques inhérents^{68,69}.

Conformément au principe de précaution, il convient de réaliser une évaluation des risques rigoureuse et de prendre en compte les différents points de vue des parties prenantes lors de la fabrication et de la manipulation des nouvelles applications et des nouveaux produits de biologie synthétique^{19,70,71}. Le principe de précaution énonce que lorsque des activités humaines risquent d'aboutir à un danger moralement inacceptable, qui est scientifiquement plausible, mais incertain, des mesures doivent être prises pour éviter ou diminuer ce danger⁷². Un concept d'équivalence substantielle, selon lequel un organisme génétiquement modifié est tout aussi sûr que le même organisme non modifié, est souvent avancé conjointement au principe de précaution⁷³. Certains pays ont mis en place une politique et des réglementations complètes concernant le génie génétique et la recherche génétique, tandis que d'autres font face principalement à des systèmes de réglementation non fonctionnels, à des lacunes dans leurs politiques et à des capacités d'évaluation des risques limitées⁷²⁻⁷⁴.

Des tentatives ont été faites pour identifier et évaluer les préoccupations éthiques et biosécuritaires de la biologie synthétique

et y répondre. En 2016, l'Académie des sciences, de l'ingénierie et de la médecine des États-Unis a publié un rapport sur le forçage génétique mettant en lumière le besoin de réaliser des évaluations des risques environnementaux et de procéder à des délibérations rigoureuses qui soulignent les valeurs humaines et exigent l'engagement ferme du public¹⁹.

En décembre 2017, le Groupe spécial d'experts techniques sur la biologie synthétique, créé par les parties à la Convention sur la diversité biologique est arrivé à la conclusion que les organismes, qu'ils aient déjà été fabriqués ou qu'ils le soient grâce aux méthodes actuelles de biologie synthétique, y compris le forçage génétique, correspondent à la description d'organismes vivants modifiés (OVM), régis par la réglementation du Protocole de Cartagena juridiquement contraignant⁷⁸. Avec 171 États parties, ce Protocole applique le principe de précaution et exige de chaque partie qu'elle prenne les mesures nécessaires pour garantir la manipulation, le transport et l'utilisation sûrs des OVM créés⁷⁹.

SYNBIOSAFE, un projet de recherche financé par l'UE, a été mis en œuvre pour identifier les principaux enjeux en matière de sûreté, de sécurité, d'éthique de la gestion des risques et, dans une large mesure, d'interface science-société, qui met l'accent sur la sensibilisation du public et le dialogue entre les scientifiques, les entreprises, le gouvernement et les éthiciens^{80,81}. Certains scientifiques travaillant sur le forçage génétique ont également proposé l'adoption de directives de recherche éthiques qui soulignent le besoin d'une participation significative du public⁸².



Vidéo: Pourquoi ce village africain laisse-t-il entrer des moustiques ?



Lien vers la vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=ooYShrGtLUQ>
Crédit photo : Dmitry Trashchenko

© BBC News

▶ Vidéo: Les souris génétiquement modifiées peuvent-elles endiguer la maladie de Lyme ?



Lien vers la vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=FOCNixYPs4>
Crédit photo : Szasz-Fabian Jozsef / Shutterstock.com

© PBS NewsHour

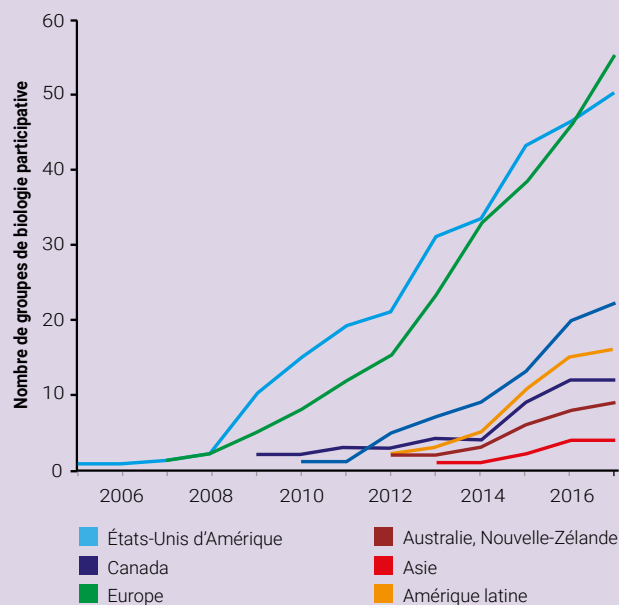
Néanmoins, l'introduction intentionnelle d'organismes modifiés dans le milieu naturel et leur capacité à transformer de façon permanente les espèces sauvages et à franchir les frontières internationales permettront probablement de tester les limites des politiques actuelles, amenant certains groupes environnementaux à appeler à un moratoire sur la recherche du forçage génétique⁸³. D'autres préoccupations liées à la réglementation portent spécifiquement sur l'utilisation potentielle de la biologie synthétique à des fins d'offensive militaire^{84,85}.

Il est probable que les cadres éthiques actuels ne soient pas en mesure de suivre l'évolution rapide de la biologie synthétique et de sa complexité, notamment concernant les espèces sauvages⁸⁶. Les décisions d'introduire des organismes génétiquement modifiés dans le milieu naturel sont influencées par l'éthique environnementale omniprésente, c'est-à-dire le lien que la majorité de la population entretient avec la nature non humaine⁸⁷. Modifier le code génétique d'espèces sauvages est considéré par certains comme un empiètement outrageant des humains, faisant écho aux préoccupations exprimées à propos des cultures génétiquement modifiées. D'autres jugent que nous avons une responsabilité morale d'utiliser une technologie qui pourrait sauver des vies et restaurer les écosystèmes dégradés⁸⁸. La solution à cette opposition des systèmes de valeurs nécessite une prise de décision responsable⁸⁹. Les applications de la biologie synthétique soulèvent également des questions quant à savoir à qui revient la responsabilité d'un OVM et de son génome, quelle protection est proposée aux communautés vulnérables et comment s'assurer que les populations les plus touchées peuvent faire entendre leur voix. Il est primordial que des organes de délibération inclusifs et équilibrés pilotent le domaine de la biologie synthétique et veillent à ce que ses applications environnementales profitent à tous les êtres de notre planète.



Scientifiques citoyens, biohackers et laboratoires de garage

La biologie synthétique et la modification du génome ont suscité l'intérêt non seulement d'entreprises, mais aussi de citoyens ordinaires. La biologie participative (DIY Bio), ce mouvement de « scientifiques citoyens » intéressés par les expériences de biologie synthétique, est devenue un phénomène international au cours de la dernière décennie. Avec souvent peu de connaissances dans ce domaine, des amateurs se réunissent dans des laboratoires improvisés pour suivre des cours accélérés en biotechnologie et réaliser des expériences pratiques^{90,91}. La mise à disposition en ligne de protocoles simples et de kits spécialisés allant de 150 à 1 600 USD a provoqué l'expansion rapide du mouvement. La plupart des grandes villes comptent des laboratoires de biologie participative et en 2017, on dénombrait près de 168 groupes à l'échelle mondiale^{92,93}. Réglementer l'utilisation de technologies peu coûteuses et facilement accessibles comme la technologie CRISPR et les kits de modification des gènes constituera probablement un défi pour les autorités. On craint également de plus en plus que cette technologie soit utilisée à mauvais escient par des terroristes pour détruire les cultures agricoles ou transformer des microbes inoffensifs en armes biologiques⁹⁴.



Source : The Brookings Institute⁹³

Bibliographie

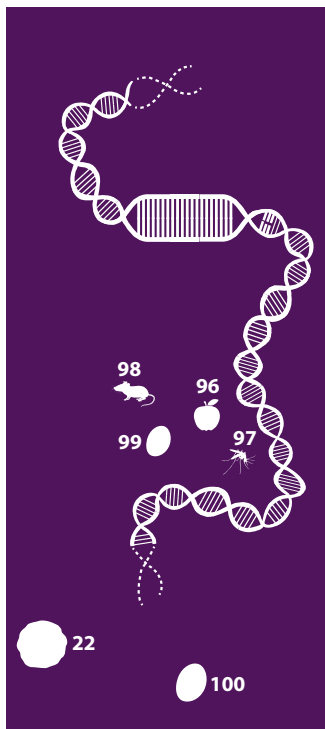
- International Union for Conservation of Nature (2018). The IUCN Red List of Threatened Species. <http://www.iucnredlist.org/>
- World Health Organization (2017). *Global vector control response 2017-2030*. Geneva. <http://www.who.int/vector-control/publications/global-control-response/en/>
- Scheffers, B.R., De Meester, L., Bridge, T.C., Hoffmann, A.A., Pandolfi, J.M., Corlett, R.T., *et al.* (2016). The broad footprint of climate change from genes to biomes to people. *Science* 354(6313), aaf7671. <https://doi.org/10.1126/science.aaf7671>
- Heo, M.J., Jung, H.M., Um, J., Lee, S.W. and Oh, M.K. (2017). Controlling citrate synthase expression by CRISPR/Cas9 genome editing for n-butanol production in *Escherichia coli*. *ACS Synthetic Biology* 6(2), 182-189. <https://doi.org/10.1021/acssynbio.6b00134>
- Raj, K., Partow, S., Correia, K., Khusnutdinova, A.N., Yakunin, A.F. and Mahadevan, R. (2018). Biocatalytic production of adipic acid from glucose using engineered *Saccharomyces cerevisiae*. *Metabolic Engineering Communications* 6, 28-32. <https://doi.org/10.1016/j.meten.2018.02.001>
- Averesch, N.J.H., Martínez, V.S., Nielsen, L.K. and Krömer, J.O. (2018). Toward synthetic biology strategies for adipic acid production: An *in silico* tool for combined thermodynamics and stoichiometric analysis of metabolic networks. *ACS Synthetic Biology* 7(2), 490-509. <https://doi.org/10.1021/acssynbio.7b00304>
- Peplow, M. (2016). Synthetic biology's first malaria drug meets market resistance. *Nature News*, 23 February. Doi: 10.1038/530390a. <https://www.nature.com/news/synthetic-biology-s-first-malaria-drug-meets-market-resistance-1.19426>
- Kelley, N.J., Whelan, D.J., Kerr, E., Apel, A., Beliveau, R. and Scanlon, R. (2014). Engineering biology to address global problems: Synthetic biology markets, needs, and applications. *Industrial Biotechnology* 10, 140-149. <https://www.liebertpub.com/doi/pdf/10.1089/ind.2014.1515>
- McEachran, R. (2015). Creators defend vanilla flavour made using synthetic biology. *The Guardian*, 28 May 2015. <https://www.theguardian.com/sustainable-business/2015/may/28/creators-defend-vanilla-flavour-made-using-synthetic-biology>
- Bhanawase, S.L. and Yadav, G.D. (2017). Novel silica-encapsulated Cu-Al hydrotalcite catalyst: oxidative decarboxylation of vanillyl mandelic acid to vanillin in water at atmospheric pressure. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 56(45), 12899-12908. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.iecr.6b04982>
- Purcell, B.P., Williamson, D.T., Marga, F.S., Shofer, S.J. and Cassingham, D.M. (2016). Method for making a biofabricated material containing collagen fibrils. International Patent Application No. PCT/US2017/017889, filed 15 February 2017. <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2017142896&tab=PCTBIBLIO&maxRec=1000>
- Amyris (2018). *Amyris Aprinnova joint venture launches pharmaceutical grade Neosance Squalane USP — opens new market among FDA regulated products*. 8 February. <http://investors.amyris.com/news-releases/news-release-details/amyris-aprinnova-joint-venture-launches-pharmaceutical-grade>
- Le Feuvre, R.A. and Scrutton, N.S. (2018). A living foundry for synthetic biological materials: a synthetic biology roadmap to new advanced materials. *Synthetic and Systems Biotechnology*, 3, 105-112. <https://doi.org/10.1016/j.synbio.2018.04.002>
- Barrangou, R. and Doudna, J.A. (2016). Applications of CRISPR technologies in research and beyond. *Nat Biotechnol* 34, 933-941. <https://doi.org/10.1038/nbt.3659>
- Piaggio, A.J., Segelbacher, G., Seddon, P.J., Alphey, L., Bennett, E.L., Carlson, R.H. *et al.* (2017). Is it time for synthetic biodiversity conservation? *Trends in Ecology & Evolution* 32, 97-107. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.10.016>
- Redford, K.H., Adams, W., Carlson, R., Mace, G.M. and Ceccarelli, B. (2014). Synthetic biology and the conservation of biodiversity. *Oryx* 48, 330-336. <https://doi.org/10.1017/S0030605314000040>
- Esvelt, K.M. and Gemmell, N.J. (2017). Conservation demands safe gene drive. *PLOS Biology* 15, e2003850. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2003850>
- Nuffield Council on Bioethics (2012). *Emerging biotechnologies: technology, choice and the public good*. London. http://nuffieldbioethics.org/wp-content/uploads/2014/07/Emerging_biotechnologies_full_report_web_0.pdf
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2016). *Gene drives on the horizon: Advancing science, navigating uncertainty, and aligning research with public values*. Washington DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/23405>
- Convention on Biological Diversity (2016). Decision adopted by the Conference of the Parties to the Convention on Biological Diversity XIII/17 Synthetic biology. 16 December. CBD/COP/DEC/XIII/17. <https://www.cbd.int/doc/decisions/cop-13/cop-13-dec-17-en.pdf>
- Cohen, S.N., Chang, A.C.Y., Boyer, H.W. and Helling, R.B. (1973) *Construction of biologically functional bacterial plasmids in vitro*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 70, 3240-3244
- Gibson, D.G., Glass, J.I., Lartigue, C., Noskov, V.N., Chuang, R.Y., Algire, M.A. *et al.* (2010). Creation of a bacterial cell controlled by a chemically synthesized genome. *Science* 329(5987), 52-56. Doi: 10.1126/science.1190719. <http://science.sciencemag.org/content/329/5987/52>
- Sternberg, S.H. and Doudna, J.A. (2015). Expanding the biologist's toolkit with CRISPR-Cas9. *Molecular Cell* 58(4), 568-574. <https://doi.org/10.1016/j.molcel.2015.02.032>
- Jinek, M., Chylinski, K., Fonfara, I., Hauer, M., Doudna, J.A. and Charpentier, E. (2012). A programmable dual-RNA-guided DNA endonuclease in adaptive bacterial immunity. *Science* 337(6096), 816-821. <https://doi.org/10.1126/science.1225829>
- Kim, Y.G., Cha, J. and Chandrasegaran, S. (1996). *Hybrid restriction enzymes: zinc finger fusions to Fok I cleavage domain*. Proceedings of the National Academy of Sciences 93, 1156-1160. <http://www.pnas.org/content/93/3/1156>
- Wei, C., Liu, J., Yu, Z., Zhang, B., Gao, G. and Jiao, R. (2013). TALEN or Cas9 - rapid, efficient and specific choices for genomic modifications. *Journal of Genetics and Genomics* 40, 281-289. <https://doi.org/10.1016/j.jgg.2013.03.013>
- Horvath, P. and Barrangou, R. (2010). CRISPR/Cas, the immune system of bacteria and archaea. *Science* 327(5962), 167-170. <https://doi.org/10.1126/science.1179555>
- Rath, D., Amlinger, L., Rath, A. and Lundgren, M. (2015). The CRISPR-Cas immune system: Biology, mechanisms and applications. *Biochimie* 117, 119-128. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2015.03.025>

29. Hsu, P.D., Lander, E.S. and Zhang, F. (2014). Development and applications of CRISPR-Cas9 for genome engineering. *Cell* 157(6), 1262-1278. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2014.05.010>
30. Cox, D.B.T., Gootenberg, J.S., Abudayyeh, O.O., Franklin, B., Kellner, M.J., Joung, J. *et al.* (2017). RNA editing with CRISPR-Cas13. *Science* 358(6366), 1019-1027. <https://doi.org/10.1126/science.aqa0180>
31. Esvelt, K.M., Smidler, A.L., Catteruccia, F. and Church, G.M. (2014). Concerning RNA-guided gene drives for the alteration of wild populations. *eLife* 3, e03401. <https://doi.org/10.7554/eLife.03401>
32. Champer, J., Buchman, A. and Akbari, O.S. (2016). Cheating evolution: engineering gene drives to manipulate the fate of wild populations. *Nature Reviews Genetics* 17(3), 146-159. <https://doi.org/10.1038/nrg.2015.34>
33. Smith, D.R., Brockmann, H.J., Beekey, M.A., King, T.L., Millard, M.J. and Zaldivar-Rae, J. (2017). Conservation status of the American horseshoe crab (*Limulus polyphemus*): a regional assessment. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 27(1), 135-175. <https://doi.org/10.1007/s11160-016-9461-y>
34. Ding, J.L. and Ho, B. (2010). Endotoxin detection - from *Limulus* amoebocyte lysate to recombinant factor C. *Subcell Biochem* 53, 187-208. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9078-2_9
35. Zhang, S. (2018). *The last days of the blue-blood harvest*. The Atlantic, May 9. <https://www.theatlantic.com/science/archive/2018/05/blood-in-the-water/559229/>
36. Sprague, M., Betancor, M.B. and Tocher, D.R. (2017). Microbial and genetically engineered oils as replacements for fish oil in aquaculture feeds. *Biotechnology Letters* 39(11), 1599-1609. <https://doi.org/10.1007/s10529-017-2402-6>
37. Newhouse, A.E., Polin-McGuigan, L.D., Baier, K.A., Valletta, K.E.R., Rottmann, W.H., Tschaplinski, T.J. *et al.* (2014). Transgenic American chestnuts show enhanced blight resistance and transmit the trait to T1 progeny. *Plant Science* 228, 88-97. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2014.04.004>
38. Steiner, K.C., Westbrook, J.W., Hebard, F.V., Georgi, L.L., Powell, W.A. and Fitzsimmons, S.F. (2017). Rescue of American chestnut with extraspecific genes following its destruction by a naturalized pathogen. *New Forests* 48, 317-336. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016894521400079X>
39. Urban, M.C. (2015). Accelerating extinction risk from climate change. *Science* 348, 571-573. <https://doi.org/10.1126/science.aaa4984>
40. Van Oppen, M.J.H., Oliver, J.K., Putnam, H.M. and Gates, R.D. (2015). *Building coral reef resilience through assisted evolution*. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112, 2307-2313. <https://doi.org/10.1073/pnas.1422301112>
41. Cleves, P.A., Strader, M.E., Bay, L.K., Pringle, J.R. and Matz, M.V. (2018). *CRISPR/Cas9-mediated genome editing in a reef-building coral*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. <https://doi.org/10.1073/pnas.1722151115>
42. Harper, G.A. and Bunbury, N. (2015). Invasive rats on tropical islands: Their population biology and impacts on native species. *Global Ecology and Conservation*, 3, 607-6027. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2015.02.010>
43. Leitschuh, C.M., Kanavy, D., Backus, G.A., Valdez, R.X., Serr, M., Pitts, E.A. *et al.* (2018). Developing gene drive technologies to eradicate invasive rodents from islands. *Journal of Responsible Innovation* 5, 121-138. <https://doi.org/10.1080/232299460.2017.1365232>
44. The Genetic Biocontrol of Invasive Rodents (2018). GBIRD program. <http://www.geneticbiocontrol.org>
45. Predator free New Zealand (2018). Predator free NZ. <https://predatorfreenz.org>
46. Paxton, E.H., Camp, R.J., Gorresen, P.M., Crampton, L.H., Leonard, D.L. Jr. and VanderWerf, E.A. (2016). Collapsing avian community on a Hawaiian island. *Science Advances* 2(9), e1600029. <http://advances.sciencemag.org/content/2/9/e1600029>
47. Regalado, A. (2016). The plan to rescue Hawaii's birds with genetic engineering. *MIT Technology Review*, 11 May. <https://www.technologyreview.com/s/601383/the-plan-to-rescue-hawaii-birds-with-genetic-engineering/>
48. Hammond, A.M., Kyrou, K., Bruttini, M., North, A., Galizi, R., Karlsson, X. *et al.* (2017). The creation and selection of mutations resistant to a gene drive over multiple generations in the malaria mosquito. *PLoS Genet* 13(10), e1007039. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1007039>
49. Shaw, W.R. and Catteruccia, F. (2018). Vector biology meets disease control: using basic research to fight vector-borne diseases. *Nature Microbiology*. <https://doi.org/10.1038/s41564-018-0214-7>
50. Zimov, S.A., Zimov, N.S., Tikhonov, A.N. and Chapin, F.S. (2012). Mammoth steppe: a high-productivity phenomenon. *Quaternary Science Reviews* 57, 26-45. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.10.005>
51. Shapiro, B. (2015). Mammoth 2.0: will genome engineering resurrect extinct species? *Genome Biology* 16, 228. <https://doi.org/10.1186/s13059-015-0800-4>
52. Kaebnick, G.E. and Jennings, G. (2017). De-extinction and conservation. *Hastings Center Report* 47(4), S2-S3. <https://doi.org/10.1002/hast.744>
53. Phuc, H.K., Andreasen, M.H., Burton, R.S., Vass, C., Epton, M.J., Pape, G. *et al.* (2007). Late-acting dominant lethal genetic systems and mosquito control. *BMC Biol* 5, 11. <https://doi.org/10.1186/1741-7007-5-11>
54. Harris, A.F., McKemey, A.R., Nimmo, D., Curtis, Z., Black, I., Morgan, S.A. *et al.* (2012). Successful suppression of a field mosquito population by sustained release of engineered male mosquitoes. *Nat Biotechnol* 30, 828-830. <https://doi.org/10.1038/nbt.2350>
55. Target Malaria (2017). Our work. <http://targetmalaria.org/our-work/>
56. Hoffmann, A.A., Montgomery, B.L., Popovici, J., Iturbe-Ormaetxe, I., Johnson, P.H., Muzzi, F. *et al.* (2011). Successful establishment of *Wolbachia* in *Aedes* populations to suppress dengue transmission. *Nature* 476, 454-457. <https://doi.org/10.1038/nature10356>
57. MIT Media Lab (2017). Preventing tick-borne disease by permanently immunizing mice. <https://www.media.mit.edu/projects/preventing-tick-borne-disease-by-permanently-immunizing-mice/overview/>
58. Folch, J., Cocero, M.J., Chesné, P., Alabart, J.L., Domínguez, V., Cogliani, Y. *et al.* (2009). First birth of an animal from an extinct subspecies (*Capra pyrenaica pyrenaica*) by cloning. *Theriogenology*, 71(6), 1026-1034. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2008.11.005>
59. Shapiro, B. (2016). Pathways to de-extinction: how close can we get to resurrection of an extinct species? *Functional Ecology*. <http://dx.doi.org/10.1111/1365-2435.12705>
60. Stokstad, E. (2015). Bringing back the aurochs. *Science*, 350, 1144-1147. <https://doi.org/10.1126/science.350.6265.1144>
61. Richmond, D.J., Sinding, M.H.S. and Gilbert, M.T.P. (2016). The potential and pitfalls of de-extinction. *Zoologica Scripta*, 45, 22-36. <https://doi.org/10.1111/zsc.12212>

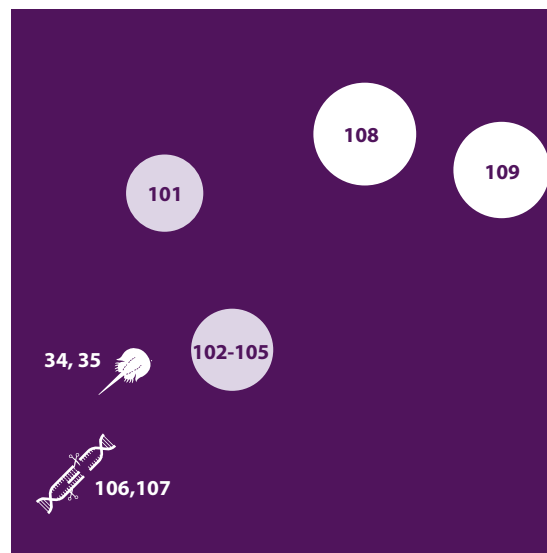
62. Sherkow, J.S. and Greely, H.T. (2013). What if extinction is not forever? *Science* 340(6128), 32-33. <https://doi.org/10.1126/science.1236965>
63. Moe-Behrens, G.H.G., Davis, R. and Haynes, K.A. (2013). Preparing synthetic biology for the world. *Front Microbiol* 4, 5. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2013.00005>
64. Hayes, K.R., Hosack, G.R., Dana, G.V., Foster, S.D., Ford, J.H., Thresher, R. et al. (2018). Identifying and detecting potentially adverse ecological outcomes associated with the release of gene-drive modified organisms. *Journal of Responsible Innovation* 5(S1), S139–S158. <https://doi.org/10.1080/23299460.2017.1415585>
65. David, A.S., Kaser, J.M., Morey, A.C., Roth, A.M. and Andow, D.A. (2013). Release of genetically engineered insects: a framework to identify potential ecological effects. *Ecology and Evolution* 3(11), 4000–4015. <https://doi.org/10.1002/ece3.737>
66. Kyrou, K., Hammond, A.M., Galizi, R., Kranjc, N., Burt, A., Beaghton, A.K. et al. (2018). A CRISPR–Cas9 gene drive targeting doublesex causes complete population suppression in caged *Anopheles gambiae* mosquitoes. *Nature Biotechnology*, 36, 1062–1066. <http://dx.doi.org/10.1038/nbt.4245>
67. Alliance for Science (2018). African scientists confident GMO mosquitoes will be game changer in fight to control malaria, September 13. <https://alliancefor-science.cornell.edu/blog/2018/09/african-scientists-confident-gmo-mosquitoes-will-game-changer-fight-control-malaria/>
68. Akbari, O.S., Bellen, H.J., Bier, E., Bullock, S.L., Burt, A., Church, G.M. et al. (2015). Safeguarding gene drive experiments in the laboratory. *Science* 349(6251), 927. <https://doi.org/10.1126/science.aac7932>
69. James, S., Collins, F.H., Welkhoff, P.A., Emerson, C., Godfray, H.C.J., Gottlieb, M. et al. (2018). Pathway to deployment of gene drive mosquitoes as a potential biocontrol tool for elimination of malaria in sub-Saharan Africa: Recommendations of a Scientific Working Group. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene* 98(6_Suppl), 1–49. <https://doi.org/10.4269/ajtmh.18-0083>
70. Kwok, R. (2010) Five hard truths for synthetic biology. *Nature* 463, 288–290. <https://doi.org/10.1038/463288a>
71. Kaebnick, G.E., Heitman, E., Collins, J.P., Delborne, J.A., Landis, W.G., Sawyer, K. et al. (2016) Precaution and governance of emerging technologies. *Science* 354, 710–711. <http://dx.doi.org/10.1126/science.aah5125>
72. Kriebel, D., Tickner, J., Epstein, P., Lemons, J., Levins, R., Loechler, E.L. et al. (2001). The precautionary principle in environmental science. *Environmental Health Perspectives* 109, 871–876. <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/10.1289/ehp.01109871>
73. Organisation for Economic Co-operation and Development (1993) *Safety evaluation of foods derived by modern biotechnology: concepts and principles*. Paris: OECD.
74. Oye, K.A., Esvelt, K., Appleton, E., Catteruccia, F., Church, G., Kuiken, T. et al. (2014) Regulating gene drives. *Science* 345, 626–628. <https://doi.org/10.1126/science.1254287>
75. Douglas, C.M.W. and Stemerding, D. (2014) Challenges for the European governance of synthetic biology for human health. *Life Sciences, Society and Policy* 10, 6. <https://doi.org/10.1186/s40504-014-0006-7>
76. Trump, B.D. (2017). Synthetic biology regulation and governance: Lessons from TAPIC for the United States, European Union, and Singapore. *Health Policy* 121, 1139–1146. <https://doi.org/10.1016/j.healthpol.2017.07.010>
77. Glover, B., Akinbo, O., Savadogo, M., Timpo, S., Lemgo, G., Sinebo, W. et al. (2018). Strengthening regulatory capacity for gene drives in Africa: leveraging NEPAD's experience in establishing regulatory systems for medicines and GM crops in Africa. *BMC Proc.* 12(8). <https://doi.org/10.1186/s12919-018-0108-y>
78. Convention on Biological Diversity (2017). *Report of the ad hoc technical expert group on synthetic biology*. Montreal, Canada, 5–8 December 2017. CBD/SYN-BIO/AHTEG/2017/1/3. <https://www.cbd.int/doc/c/aa10/9160/6c3fcded265d-bee686715016/synbio-ahteg-2017-01-03-en.pdf>
79. Convention on Biological Diversity (2018). The Cartagena Protocol on Biosafety. Convention on Biological Diversity, Montreal. <http://bch.cbd.int/protocol>
80. Schmidt, M., Torgesen, H., Ganguli-Mitra, A., Kelle, A., Deplazes, A. and Biller-Andorno, N. (2008). SYNBIOSAFE e-conference: online community discussion on the societal aspects of synthetic biology. *Systems and Synthetic Biology* 2, 7–17. <https://doi.org/10.1007/s11693-008-9019-y>
81. Schmidt, M., Kelle, A., Ganguli-Mitra, A. and de Vriend, H. (2009). *Synthetic Biology: the technoscience and its societal consequences*. Springer, Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-2678-1>
82. Emerson, C., James, S., Littler, K. and Randazzo, F. (2017). Principles for gene drive research. *Science*, 358, 1135–1136. <https://doi.org/10.1126/science.aap9026>
83. ETC Group. (2016). Reckless driving: gene drives and the end of nature, 1 September. <http://www.etcgroup.org/content/reckless-driving-gene-drives-and-end-nature>
84. Callaway, E. (2017). US defence agencies grapple with gene drives. *Nature News*, 21 July. <https://doi.org/10.1038/nature.2017.22345>
85. Defense Advanced Research Projects Agency (2018). Safe Genes program, DARPA. <https://www.darpa.mil/program/safe-genes>
86. Kaebnick, G.E., Gusmano, M.K. and Murray, T.H. (2014). The ethics of synthetic biology: next steps and prior questions. *Hastings Center Report* 44, S4–S26. <https://doi.org/10.1002/hast.392>
87. Batavia, C. and Nelson, M.P. (2017). For goodness sake! What is intrinsic value and why should we care? *Biological Conservation* 209, 366–376. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biocon.2017.03.003>
88. Kaebnick, G.E. (2017). The spectacular garden: where might de-extinction lead? *Hastings Center Report* 47, S60–S64. <https://doi.org/10.1002/hast.754>
89. Kofler, N., Collins, J.P., Kuzma, J., Marris, E., Esvelt, K., Nelson, M.P. et al. (2018). Editing nature: Local roots of global governance. *Science* 362(6414), 527–529. <https://doi.org/10.1126/science.aat4612>
90. Ledford, H. (2010). Garage biotech: Life hackers. *Nature* 467, 650–652. <https://doi.org/10.1038/467650a>
91. Regalado, A. (2017). One man's quest to hack his own genes. *MIT Technology Review*, January 10. <https://www.technologyreview.com/s/603217/one-mans-quest-to-hack-his-own-genes/>
92. Ochoa Cruz, E.A., de la Barrera Benavidez, O.J., Giménez, M., Chavez, M. and Van Sluys, M-A. (2016). The biohacking landscape in Latin America. *BioCoder* 10, 5–12. <https://www.oreilly.com/ideas/biohacking-latin-america>.
93. Kolodziejczyk, B. (2017). Do-it-yourself biology shows safety risks of an open innovation movement. Brookings Institution, October 9. <https://www.brookings.edu/blog/techtank/2017/10/09/do-it-yourself-biology-shows-safety-risks-of-an-open-innovation-movement>

94. United Nations (2018). Terrorists potentially target millions in makeshift biological weapons 'laboratories', UN forum hears. UN News, 17 August 2018. United Nations, New York. <https://news.un.org/en/story/2018/08/1017352>
95. National Human Genome Research Institute (NHGRI). (2002). International Team of Researchers Assembles Draft Sequence of Mouse Genome. <https://www.genome.gov/10002983/2002-release-draft-sequence-of-mouse-genome>

Références des illustrations



96. Daccord, N., Celton, J., Linsmith, G., Becker, C., Choisine, N., Schijlen, E., van de Geest, H., et al. (2017). High-quality *de novo* assembly of the apple genome and methylome dynamics of early fruit development. *Nature Genetics*, 49(7), 1099-1106. <https://doi.org/10.1038/ng.3886>
97. Holt, R.A., Subramanian, G.M., Halpern, A., Sutton, G.G., Charlab, R., Nusskern, D.R., Wincker, P., et al. (2002). The genome sequence of the malaria mosquito *Anopheles gambiae*. *Science*, 298(5591), 129-149. <https://doi.org/10.1126/science.1076181>
98. Cooper, G. (2000). *The Cell: A Molecular Approach*. 2nd ed. Sunderland, MA: Sinauer Associates.
99. Annaluru, N., Muller, H., Mitchell, L., Ramalingam, S., Stracquadanio, G., Richardson, S., Dymond, J., et al. (2014). Total Synthesis of a Functional Designer Eukaryotic Chromosome. *Science*, 344(6179), 55-58. <https://doi.org/10.1126/science.1249252>



100. SAVI (2019). Synthetic yeast 2.0. The Science Across Virtual Institutes program. <http://syntheticyeast.org>
101. He, W., Felderman, M., Evans, A., Geng, J., Homan, D., Bourguet, F., Fischer, N., et al. (2017). Cell-free production of a functional oligomeric form of a Chlamydia major outer-membrane protein (MOMP) for vaccine development. *Journal of Biological Chemistry*, 292(36), 15121-15132. <https://doi.org/10.1074/jbc.M117.784561>
102. Woodrow Wilson Center (2019). Synthetic biology project. <http://www.synbio-project.org/cpi/applications/>
103. Reverdia (2019). Biosuccinium® sustainable succinic acid. <https://reverdia.com/biosuccinium-menu/biosuccinium/>
104. GC Innovation America (2019). Biotechnology Research & Development. <https://www.gcinnovationamerica.com/biocatalyst-rd/>
105. DuPont Tate & Lyle Bio Products Company (2019). Susterra® Propanediol. <http://duponttateandlyle.com/susterra>
106. Ihry, R.J., Worringer, K.A., Salick, M.R., Frias, E., Ho, D., Theriault, K., Kommineni, S., et al. (2018). p53 inhibits CRISPR-Cas9 engineering in human pluripotent stem cells. *Nature Medicine*, 24, 939-946. <https://doi.org/10.1038/s41591-018-0050-6>
107. Haapaniemi, E., Botla, S., Persson, J., Schmierer, B. and Taipale, J. (2018). CRISPR-Cas9 genome editing induces a p53-mediated DNA damage response. *Nature Medicine*, 24, 927-930. <https://doi.org/10.1038/s41591-018-0049-z>
108. BCC Research (2018). Synthetic Biology Global Markets to Reach \$13.9 Billion by 2022. [https://www.bccresearch.com/pressroom/bio/synthetic-biology-global-markets-to-reach-\\$139-billion-by-2022](https://www.bccresearch.com/pressroom/bio/synthetic-biology-global-markets-to-reach-$139-billion-by-2022)
109. Cumbers, J. and Bünger, M. (2019). Synthetic Biology Annual Investment Report (2018) - SynBioBeta. SynBioBeta.com. <https://synbiobeta.com/synthetic-biology-industry-strategy-reports/investment-report-2018>



Crédit photo : ALEX_UGALEK / Shutterstock

Connectivité écologique : une passerelle vers la préservation de la biodiversité

Rétablir le lien entre les écosystèmes fragmentés

Autrefois, la nature était vaste et s'étendait à l'infini, mais dans notre monde industrialisé du XXI^e siècle cela n'est plus le cas. Aux quatre coins de la planète, les paysages terrestres et marins sont de plus en plus fragmentés. Les espèces sauvages sont davantage limitées dans leurs déplacements et les cours d'eau sauvages se raréfient. Le long des côtes tropicales, les vastes étendues de mangrove, les herbiers marins et les récifs coralliens sont aujourd'hui plus fragmentés, entravant ainsi la productivité et la résilience essentielles des écosystèmes face aux perturbations naturelles et anthropiques¹. L'une des conséquences de cette fragmentation des espaces naturels est la réduction de la distance parcourue par les mammifères et les autres espèces, qui est aujourd'hui deux fois moins importante qu'elle ne l'était auparavant². Cette capacité limitée à migrer, se disperser, se reproduire, se nourrir et prospérer signifie que les espèces sauvages sont prises au piège dans des situations où la menace d'extinction se fait de plus en plus pesante.

La fragmentation est une conséquence typique de la transformation et de la destruction du paysage. Le morcellement des habitats engendre trois effets spécifiques : la réduction de la surface totale et de la qualité des habitats, l'isolement accru de petites parcelles d'habitats, et les perturbations croissantes liées à la délimitation artificielle de ces parcelles, appelées « effets lisière »³⁻⁶. Des parcelles d'habitats plus petites et isolées sont synonymes d'une moins grande diversité d'espèces et de plus petites populations à l'intérieur de chaque parcelle, avec des interactions limitées entre chacune d'elles. La fragmentation accrue des lisières expose les populations vivant dans les parcelles aux perturbations externes le long de leurs frontières. Tôt ou tard, lorsqu'une parcelle devient trop petite et trop isolée, la viabilité des populations et la diversité des espèces ne peuvent plus être maintenues⁵. La fragmentation entraîne finalement une spirale destructrice de dysfonctionnements écologiques en chaîne, allant de l'appauvrissement du réseau trophique à l'extinction directe d'espèces, en passant par la perte de processus écologiques essentiels, tels que les flux de minéraux et de nutriments^{3,5,7-9}.

Maintenir ou rétablir la connectivité entre les habitats fragmentés ou les parcelles de paysage est considéré comme la solution pour contrer un grand nombre d'impacts négatifs dus à la fragmentation¹⁰. La connectivité se définit comme le degré de liberté qu'offrent les paysages terrestres et marins aux espèces pour se déplacer et aux processus écologiques pour fonctionner. Des preuves scientifiques s'appuyant sur des recherches de biogéographie insulaire et des études de métapopulations d'espèces démontrent très clairement que les habitats connectés offrent une meilleure préservation des espèces et des fonctions écologiques^{11,12}. Les communautés écologiques et les parcelles d'habitats connectées soutiennent des processus écologiques vitaux, tels que la pollinisation, la productivité, la décomposition et les cycles biochimiques et nutritifs. La connectivité écologique peut aussi aider les espèces à s'adapter aux conditions environnementales futures et à contrer les changements en renforçant la résilience écologique aux menaces, telles que le changement climatique¹³.

Malgré les avantages flagrants de la connectivité écologique, les nations du monde entier manquent actuellement d'une approche de conservation de la connectivité. Quelles sont les meilleures mesures pour évaluer l'efficacité de la conservation de la connectivité ? Comment les gouvernements et les organismes de protection de l'environnement créent-ils des corridors écologiques, conçoivent-ils des réseaux écologiques ou déterminent-ils l'efficacité des efforts de conservation de la connectivité ? La préservation des paysages terrestres et marins intacts grâce à la délimitation de zones protégées plus nombreuses ou plus larges est possible, mais nécessite de faire des choix politiques, sociaux et économiques difficiles^{14,15}. La connectivité dans un but de préservation requiert la définition d'objectifs communs à toutes les parties prenantes afin de garantir une prise en charge multidimensionnelle et la mise en œuvre d'une action coordonnée. Pour atteindre des résultats efficaces, une collaboration doit être instaurée entre les secteurs public et privé. Il incombe à tous les secteurs, du niveau communautaire à l'échelle mondiale, d'enrayer la perte de biodiversité et de réduire l'impact sur les écosystèmes. Dans de nombreux cas, les efforts de connectivité peuvent intégrer les préoccupations socioéconomiques locales dans un système de préservation plus large.



Richesse et diversité des espèces, et interactions entre celles-ci



Variabilité et flux génétiques



Déplacements et dispersion

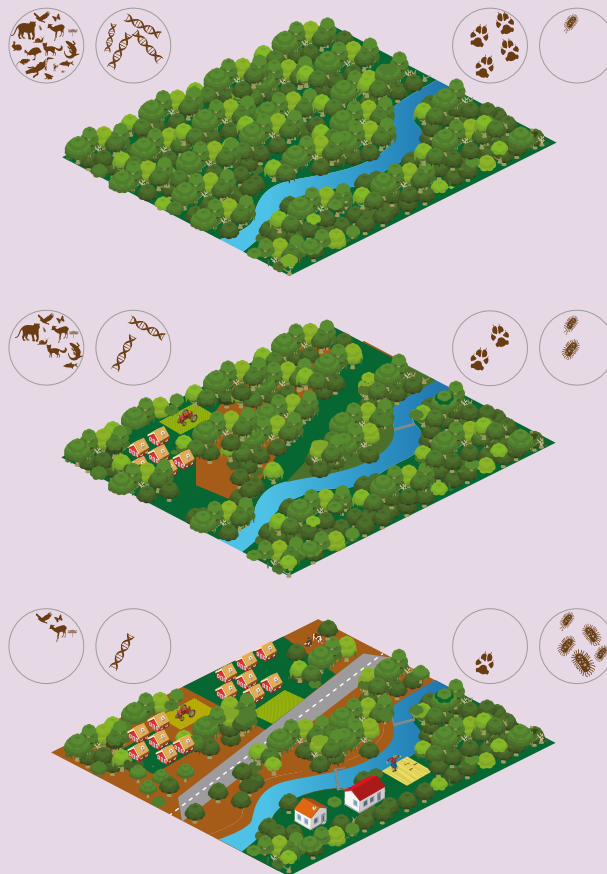


Risques d'apparition de zoonoses, d'épidémies et d'exposition de l'être humain à ces maladies



Fragmentation des habitats

Près de 40 pour cent des écosystèmes terrestres ont été transformés en terres agricoles¹⁶. La modification des terres et des cours d'eau à des fins d'utilisation par l'homme engendre une fragmentation des habitats. Les parcelles d'habitats plus petites et plus isolées, entourées de zones d'activité anthropique, sont moins susceptibles de préserver les fonctions des espèces animales et végétales qu'elles abritent et de garantir leur survie. La fragmentation des habitats a des répercussions négatives sur l'abondance, la répartition, la circulation et la diversité des espèces, leurs interactions, leur reproduction et leur diversité génétique⁵. Elle entrave la capacité des espèces à s'adapter aux nouvelles conditions climatiques¹⁷.



Les forces de fragmentation

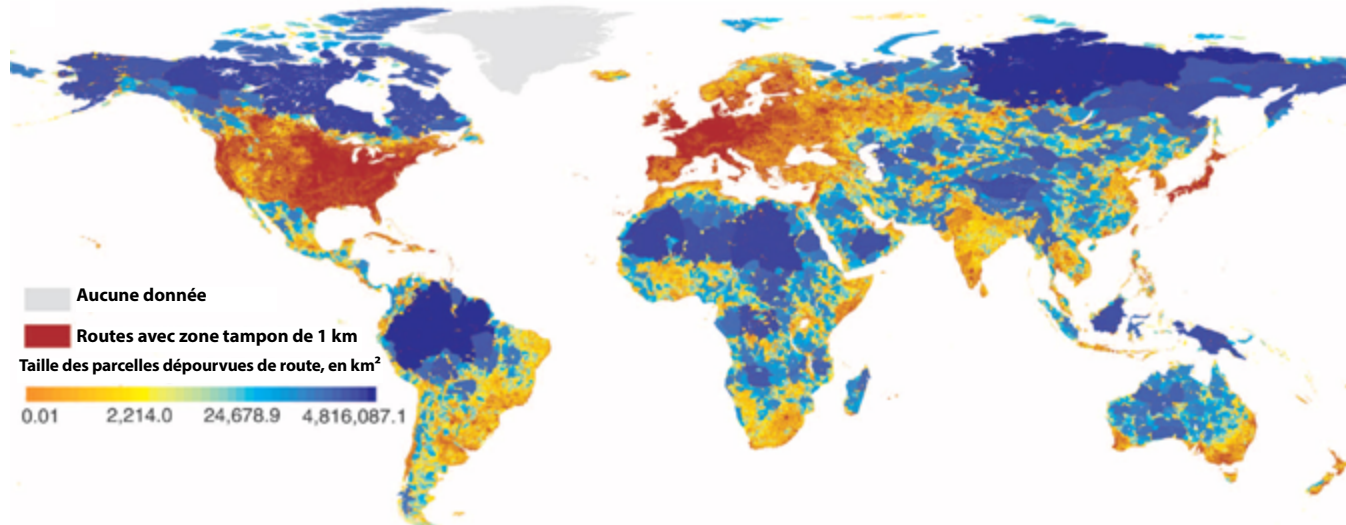
Les sociétés transforment actuellement la biosphère terrestre et son écologie de manière inédite. Les dernières recherches montrent que plus de 75 pour cent des terres émergées de la planète ont été modifiées par l'homme¹⁸⁻²¹. Les pressions démographiques, l'urbanisation croissante, l'expansion agricole, la pollution et le développement des infrastructures sont des forces de fragmentation qui agissent en synergie. Selon certaines estimations sur l'occupation des sols, d'ici à 2050, près d'un milliard d'hectares de terres tropicales pourront être défrichés à des fins agricoles²². Le milieu marin est encore plus en proie à ces changements. Comme le montrent de nouvelles recherches, seuls près de 13 pour cent des océans de la planète sont encore considérés comme des espaces marins sauvages, soit un pourcentage bien inférieur aux prédictions de nombreux organismes de protection de l'environnement²³.

Les infrastructures linéaires représentent souvent le fer de lance du développement moderne. Des routes, des voies de chemin de fer, des canalisations, des clôtures et des canaux sont construits à un rythme record, en particulier dans les régions tropicales isolées et jusqu'ici non développées. Sur l'ensemble des nouvelles routes qui devraient être construites à l'échelle mondiale, 90 pour cent devraient l'être dans les pays en développement²⁴. En Inde, où l'on

recense près de 60 pour cent de la population mondiale de tigres, des corridors essentiels à la population de tigres sont menacés par un projet de 4 300 kilomètres de nouvelles routes nationales et d'État²⁵. À l'échelle mondiale, plus de 25 millions de kilomètres de nouvelles routes devraient voir le jour d'ici à 2050, soit une augmentation de 60 pour cent du réseau routier par rapport à 2010²⁶.

Les cours d'eau sauvages, considérés comme la force de vie des paysages terrestres et des estuaires, sont menacés par la fragmentation due à la taille et à la portée des constructions de barrages actuelles. À l'échelle mondiale, 59 pour cent des cours d'eau sont morcelés par de grands barrages, perturbant ainsi l'écoulement naturel de 93 pour cent du volume mondial des cours d'eau, avec près de 28 pour cent faisant l'objet d'une régulation importante ou sévère²⁷. Dans le seul bassin de l'Amazonie, plus de 400 projets de barrages sont actuellement élaborés, mis en œuvre ou planifiés²⁸. Ensemble, l'édification de barrages, la construction de routes et la déforestation affaiblissent l'intégrité écologique des bassins fluviaux continentaux et ont de réelles répercussions sur d'autres activités anthropiques économiques ou de loisir. Par exemple, la connectivité des systèmes d'eau douce rapporte près de 200 millions USD par an au secteur de la pêche dans le bassin de l'Amazonie et offre une source de revenus à près de 200 000 pêcheurs²⁹.

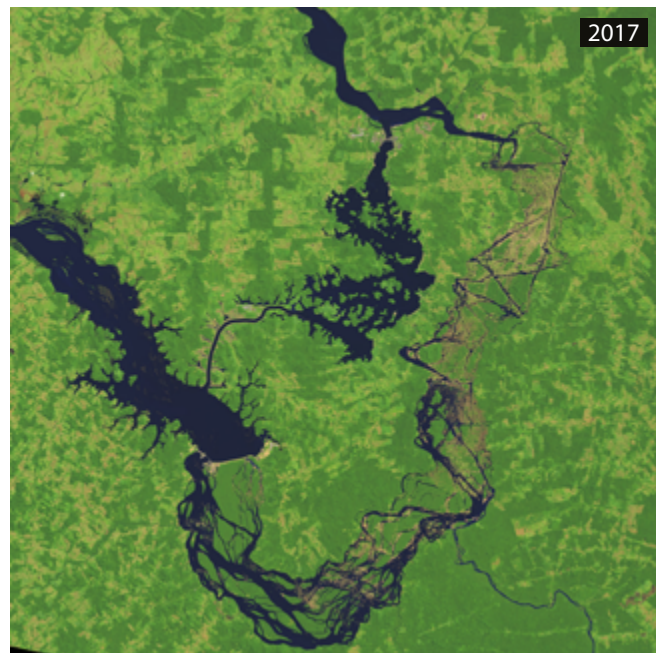
La fragmentation du paysage par les routes



L'analyse d'un ensemble de données portant sur 36 millions de km de routes à l'échelle mondiale montre que les routes ont fragmenté le paysage de la Terre en plus de 600 000 parcelles. Plus de la moitié d'entre elles se situe dans un périmètre d'un kilomètre d'une route (en rouge). Les parcelles se rapprochant des nuances de bleu sont plus éloignées des routes et moins influencées par leurs effets.

Source: Ibsch et al. (2016)³⁰

Le rio Xingu au nord du Brésil, en 2000 et 2017



La construction du barrage hydroélectrique de Belo Monte en 2011 a entièrement remodelé le rio Xingu. Plus de 80 pour cent du débit de la rivière a été détourné, entraînant l'assèchement de vastes zones (en orange/marron) et affectant les communautés autochtones et les espèces sauvages de la région.

Crédit photo : Joshua Stevens / NASA Earth Observatory

Les cours d'eau, les paysages terrestres et les littoraux sont inextricablement liés. La connectivité reconnaît également que la nature fonctionne comme la somme de ses différentes parties. La connectivité entre les systèmes aquatiques et terrestres est essentielle à l'intégrité écologique et ces éléments sont trop souvent gérés comme des entités distinctes. Dans les écosystèmes tempérés, par exemple, les recherches ont montré que l'empreinte des plaines inondables des rivières ayant un lit de gravier s'étendait bien au-delà des zones ripariennes. Cette empreinte influe sur l'écologie souterraine, au-delà des canaux fluviaux visibles et de leurs deltas, jusque dans le milieu marin. Les réseaux hydrographiques à écoulement libre relient les communautés aquatiques, aviaires et terrestres, des microbes aux ours grizzly, influençant ainsi la biogéochimie des paysages terrestres et marins³¹.



Vidéo : Dispersion des graines et fragmentation de la forêt



Lien vers la vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=0m6AJWZ2p8I>

Crédit photo : Jess Kraft / Shutterstock

© HHMI BioInteractive

Fragmentation du paysage et connectivité écologique

La **fragmentation du paysage** désigne la subdivision de vastes habitats continus en parcelles plus petites et plus isolées.

La **connectivité écologique** évalue dans quelle mesure un habitat permet la libre circulation des animaux et des autres flux écologiques.

Tandis que le climat se réchauffe, conserver une connexion entre des zones de températures différentes permettrait aux organismes de passer d'un **gradient de température** à un autre, facilitant ainsi l'adaptation des espèces.

Des **espaces bien connectés** permettent aux espèces de migrer vers de nouveaux habitats, notamment **en réponse au changement climatique**.



La **fragmentation des cours d'eau** est due principalement aux **barrages et réservoirs**, qui séparent les écosystèmes en amont et ceux en aval, perturbant les voies de dispersion et de migration des espèces, ainsi que le transport des matières organiques et inorganiques

Plus de **3 700 grands barrages hydroélectriques** devraient voir le jour à l'échelle mondiale

Les **routes modifient les comportements** de certaines espèces ; par exemple, les escargots de terre évitent de traverser les routes, même celles dotées d'aucun revêtement

Les infrastructures de transport, telles que les **routes** et les **voies de chemin de fer** entravent le déplacement des espèces sauvages

Certains facteurs, comme la **largeur et la courbure de la route** et la densité du trafic, peuvent également influencer le nombre d'espèces tuées

Il a été démontré que la fragmentation des habitats entraînait une **baisse du nombre de grands prédateurs**

Une étude mondiale a montré que la répartition géographique de **177 espèces de mammifères** avait été réduite de plus de **30 %**, et **40 %** de ces espèces connaissent un déclin majeur de leur population

La **connectivité terre-mer** englobe la migration biologique, le cycle hydrologique, le transport des nutriments et d'autres processus climatiques vitaux pour les écosystèmes côtiers et mondiaux

La connectivité améliore les **interactions plantes-animaux**, telles que la pollinisation et la dispersion des graines. Les plantes des zones mieux connectées produisent plus de fruits.



D'ici 2030, environ **40 %** des cours d'eau de la planète seront **gravement fragmentés**

Les **pratiques forestières modernes** dégradent la connectivité écologique

Une importante étude portant sur l'Amazone a conclu que la meilleure façon de protéger le fleuve des activités anthropiques et de garantir sa résilience face au changement climatique était de créer de **très grandes réserves naturelles étendues et connectées**

59 % des bassins hydrographiques de la planète sont équipés de grands barrages et ce chiffre devrait atteindre les **75 % d'ici 2030**

Les **corridors écologiques** sont des bandes de végétation qui relient une zone d'habitat à une autre, facilitant ainsi la circulation des plantes et des animaux.

Un **corridor en pas japonais** est un corridor constitué de différentes petites tâches de végétation indigène promouvant le déplacement des espèces et la dispersion sur de longues distances.

Ce type de corridor permet aux espèces de se déplacer entre des habitats isolés et de coloniser de nouveaux habitats.

La création de **corridors entre les réserves naturelles** facilite la connectivité écologique, ce qui accroît la diversité des espèces au sein de chaque réserve

Au Brésil, une étude portant sur des espèces d'oiseaux extrêmement vulnérables a montré que les **forêts davantage connectées** abritaient une plus grande diversité d'espèces d'oiseaux que les forêts moins connectées

Les **habitats marins mieux connectés** sont plus résilients face au changement climatique

La connectivité est vitale pour les **organismes vivant dans les eaux côtières tropicales et subtropicales peu profondes** qui dépendent de la migration entre les récifs coralliens, les mangroves, les estuaires et les écosystèmes des cours d'eau inférieurs

Dans la baie Moreton, en Australie, une étude des **récifs coralliens** a montré que les parcelles présentant une **meilleure connectivité avec les mangroves** abritaient une plus grande abondance d'espèces que celles isolées des mangroves

Promouvoir des solutions de connectivité

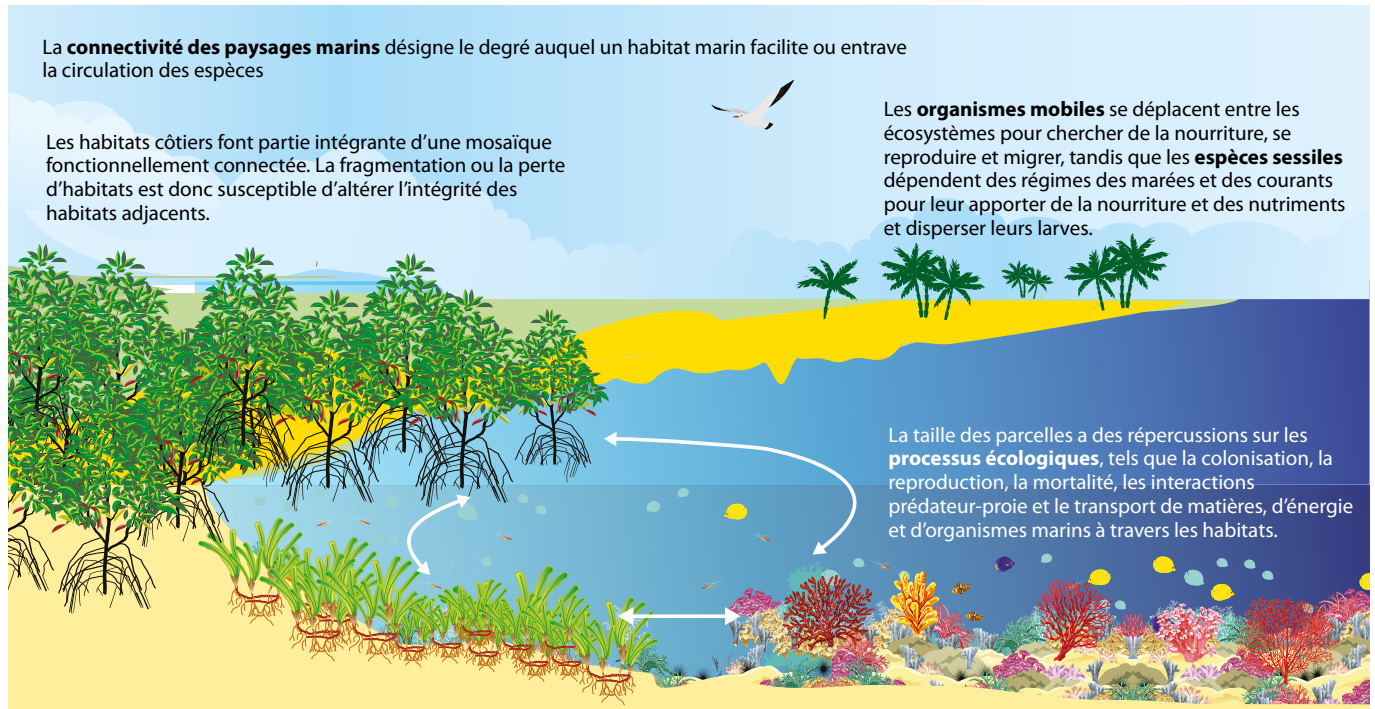
Le maintien de la connectivité est la solution à la fragmentation. À une époque où les menaces auxquelles fait face la nature se multiplient et exigent des capacités humaines et financières plus importantes, certains pays mettent en œuvre des initiatives progressives. Au Brésil, le maintien de la connectivité se matérialise par les efforts ambitieux déployés par le pays pour rétablir des connexions viables entre les habitats de la forêt pluviale atlantique Mata Atlantica qui a été largement fragmentée. Les projets de restauration visant à rétablir le lien entre les populations isolées se sont concentrés sur certaines espèces menacées, comme le Tamarin lion doré. Les activités de restauration ciblées ont démontré leur efficacité sur la réduction du taux d'extinction des espèces dans les blocs forestiers autrefois fragmentés³². La connectivité est aujourd'hui l'objectif affiché de plusieurs politiques brésiliennes de préservation de la biodiversité. La Loi sur les forêts et la Loi de protection de la végétation indigène du Brésil insistent particulièrement sur le rôle de la connectivité comme stratégie

majeure de restauration du paysage et de préservation des habitats^{33,34}. Le gouvernement d'El Salvador a récemment proposé que la période 2021-2030 soit déclarée « décennie des Nations Unies pour la restauration des écosystèmes », avec pour objectif de restaurer et d'accroître la connectivité et les fonctions écologiques.

En Afrique, le gouvernement de Tanzanie a adopté récemment une nouvelle loi sur la conservation des espèces sauvages qui souligne le besoin de garantir une meilleure préservation des corridors biologiques dans ses zones protégées. Au Kenya, où l'on retrouve les plus grandes populations d'espèces sauvages en dehors des zones protégées et où la planification à l'échelle des provinces n'en est qu'à ses débuts, le Kenya Wildlife Service a répertorié systématiquement les principaux corridors biologiques et zones de dispersion du pays et a élaboré une politique nationale sur les corridors biologiques³⁵.

Dans le milieu marin, la connectivité s'articule autour de trois dimensions, car les colonnes d'eau ajoutent une variable à l'écologie du mouvement. La mer constitue elle-même un moyen de connexion. Ainsi, la connectivité dans le milieu marin se

Connectivité des paysages marins



manifeste de plusieurs manières au sein des connexions mer-côtes, des interactions surface-fonds marins et des dynamiques de courant océanique³⁶.

Il est presque impossible pour les zones marines protégées, la pierre angulaire de la préservation des océans, de fonctionner de manière isolée dans cet environnement extrêmement interconnecté. La mer favorise donc la création de réseaux écologiques qui relie d'importants habitats à travers le temps et l'espace.

Par ailleurs, l'évolution complexe de nombreuses espèces marines s'est faite en parallèle des dynamiques de mouvement de cet univers fluide. Les herbiers marins et les mangroves sont connus pour leur fonction de pouponnière pour de nombreuses espèces marines, qui doivent ensuite voyager vers des récifs coralliens, des promontoires marins ou d'autres eaux pour arriver à maturité. La connectivité des paysages marins est considérée comme un principe directeur clé de la préservation et de l'aménagement du milieu marin, ainsi que des efforts de restauration. Cependant, en pratique, elle est rarement prise en compte dans la conception des réseaux de réserves marines³⁶⁻³⁹. Ce manquement est en grande partie dû au nombre limité de données quantitatives sur les multiples aspects de la connectivité disponibles au cours de la phase de conception, par exemple, sur les schémas de dispersion et de circulation des principales espèces à différentes étapes du cycle de vie, sur la connectivité écologique à l'intérieur et au-delà des réserves, ainsi qu'entre les types d'habitats, et sur la connectivité génétique entre les populations^{10,38-40}. Toutefois, des études portant sur la relation entre la connectivité et les performances des réserves marines des Caraïbes, des îles Keys de la Floride, des îles Salomon, de la baie de Moreton et de la Grande Barrière de corail en Australie démontrent l'importance écologique d'une meilleure connectivité. Dans ces zones protégées, des répercussions positives ont été observées sur l'abondance de poisson, la richesse et la composition des espèces, le recrutement des poissons et différents processus écologiques^{10,41-44}.

Des efforts ont été déployés par la communauté internationale pour promouvoir des solutions de connectivité. En 2016, l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) a créé le Groupe de spécialistes sur le maintien de la connectivité (CCSG) dont la mission est de catalyser et stimuler la pratique croissante du maintien de la connectivité. Composé d'environ 900 membres provenant de 80 pays, le CCSG se concentre sur le renforcement des capacités de maintien constant de la connectivité à l'échelle mondiale en développant des réseaux et en prodiguant des conseils sur la base d'une expertise scientifique, de l'ingénierie et des politiques.

 Vidéo : Qu'est-ce que la connectivité marine ?



Lien vers la vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=MowPR5GYqKM>
Crédit photo : Damsea / Shutterstock

© Ifremer

 Vidéo : La face cachée de la migration du crabe rouge – île Christmas 2012



Lien vers la vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=n9yJ51LQ0sl>
Crédit photo : David Stanley

© Parks Australia

Fixer des objectifs de connectivité future

Les objectifs d'Aichi pour la biodiversité adoptés dans le cadre de la mise en œuvre du Plan stratégique pour la diversité biologique 2011-2020 par la Convention sur la diversité biologique abordent les problèmes de connectivité des paysages terrestres et marins. L'objectif d'Aichi pour la biodiversité n° 11 dispose qu'au moins 17 pour cent des zones terrestres et d'eaux intérieures et 10 pour cent des zones marines et côtières devront être protégées à l'échelle mondiale au moyen d'un système de zones protégées largement interconnectées. Pourtant, de nombreux scientifiques sont convaincus que la préservation de la biodiversité actuelle mérite un objectif plus ambitieux^{45,46}. La communauté scientifique de la conservation fait valoir, qu'en moyenne, 50 pour cent de toutes les terres et les mers doivent être gérées pour pouvoir maintenir les processus écologiques qui préservent la nature et les seuils critiques pour la santé de la planète, y compris pour les services écosystémiques qui soutiennent les moyens de subsistance de l'être humain^{4,14,15}. Pour de nombreuses zones ayant une importance écologique mondiale, un objectif plus ambitieux est soutenu par les secteurs scientifiques et politiques. Par exemple, le bassin de l'Amazonie demande une protection accrue pour maintenir les fonctions hydrologiques et climatiques d'importance régionale et mondiale de ce vaste bassin hydrographique. Si l'Amazonie venait à perdre plus de 20 pour cent de ses forêts, les modélisations du paysage prévoient un renversement des seuils qui soutiendrait davantage la savane tropicale que les forêts, affectant ainsi les tendances climatiques mondiales⁴⁷. En vue de la réalisation des objectifs d'Aichi pour la biodiversité, le gouvernement brésilien a intensifié ses efforts visant à protéger 30 pour cent de l'Amazonie tout en s'assurant que chaque autre biome de son territoire atteigne l'objectif d'Aichi de protéger 17 pour cent des zones terrestres et d'eaux intérieures⁴⁸. Le prochain plan stratégique décennal pour la diversité biologique 2021-2030 sera négocié en octobre 2020 en Chine. Les acteurs de la conservation des ressources sont enthousiastes à l'idée que l'objectif d'Aichi pour la biodiversité n° 11 soit dépassé, conformément aux aspirations de l'objectif « 50 % for nature and climate » d'ici 2050.

Bien qu'une grande partie des efforts déployés visent à atteindre les pourcentages fixés de protection des terres, des eaux douces et des mers, il est également admis que davantage pourrait être fait pour mieux connecter les zones protégées et mettre en place d'autres mesures de conservation efficaces par zone. Les données scientifiques montrent que des zones protégées connectées sont des zones protégées plus efficaces^{49,50}. Connecter des paysages terrestres et marins fragmentés par le biais de réseaux écologiques peut renforcer efficacement les fonctionnalités de la nature et encourager des approches de conservation plus ambitieuses. Actuellement, les zones protégées occupent 14,7 pour cent des



Les **corridors biologiques** désignent une stratégie de connectivité largement acceptée pour protéger la migration des espèces. Les corridors sont souvent conçus pour des espèces particulières, et se concentrent sur ces espèces, telles que l'Antilope d'Amérique en Amérique du Nord, les tigres en Asie et le jaguar en Amérique du Sud. Les corridors peuvent prendre plusieurs formes et plusieurs tailles selon l'espèce concernée et les contraintes environnementales, allant de pistes linéaires discrètes à des parcelles d'habitats « tremplin » qui facilitent la migration des oiseaux et des tortues de mer.

Les **zones de connectivité** sont de vastes zones terrestres ou marines favorisant la connectivité d'une grande diversité d'espèces et de processus écologiques. Ces zones sont constituées de larges étendues terrestres ou marines qui facilitent la dispersion entre les zones protégées et s'avèrent indispensables dans des régions comme l'Afrique de l'Est où une écrasante majorité des espèces sauvages se trouve en dehors des zones protégées. Les zones de connectivité encouragent également le déplacement des animaux, de la biomasse et de l'énergie entre les parcelles d'habitats ou entre les différents écosystèmes d'une même zone protégée.

Les **zones de perméabilité** désignent le concept à plus grande échelle utilisé par les organismes de protection de l'environnement pour maintenir la connectivité dans les régions dominées par l'homme en dehors des zones protégées. Ces zones répondent aux besoins saisonniers ou d'espace des espèces en mouvement, ainsi qu'aux besoins des processus écologiques, en abritant des bassins vernaux ou certaines trajectoires hydrologiques d'eau douce.

Les **corridors climatiques** sont une solution proposée par les scientifiques pour protéger le mouvement des espèces le long des gradients de température. Ces mêmes corridors servent souvent de « refuges climatiques »⁵¹. Certains efforts de maintien de la connectivité intègrent spécifiquement la résilience aux changements climatiques à leurs objectifs, tels que l'initiative Great Eastern Ranges en Australie⁵².

terres de la planète et moins de la moitié sont connectées⁵⁰. Comme le montre ce chiffre, il existe une marge importante d'amélioration de la connectivité des zones protégées à l'échelle mondiale. Même si la communauté internationale recherche des mesures de conservation à grande échelle rapides, améliorer la connectivité des zones protégées grâce aux réseaux écologiques offre un espoir.

Actuellement, les zones protégées occupent 14,7 pour cent des terres de la planète et moins de la moitié sont connectées⁵⁰. Comme le montre ce chiffre, il existe une marge importante d'amélioration de la connectivité des zones protégées à l'échelle mondiale. Même si la communauté internationale recherche des mesures de conservation à grande échelle rapides, améliorer la connectivité des zones protégées grâce aux réseaux écologiques offre un espoir.

Les activités de maintien de la connectivité sont une composante relativement récente des efforts de conservation plus larges et il reste beaucoup à apprendre pour parfaire les bonnes pratiques en la matière^{53,54}. En tant que pratique émergente, la préservation de la connectivité écologique fait face à ses principales difficultés de mise en œuvre en dehors des zones protégées. Limiter l'impact des forces de fragmentation, telles que le développement linéaire d'infrastructures, constitue un besoin fondamental évident. Sensibiliser les décideurs, les agences gouvernementales et les parties prenantes communautaires locales à l'importance de la connectivité écologique est tout aussi essentiel. Même si certaines nations sont susceptibles de prendre des mesures réglementaires pour maintenir la connectivité, la grande majorité des efforts de connectivité écologique viendront d'approches de conservation participatives et incitatives⁵⁵. L'adaptation des politiques environnementales existantes peut faciliter la mise en œuvre de mesures de connectivité plus larges en intégrant des objectifs liés à la connectivité dans les études d'impact environnemental et dans différents programmes d'incitations fiscales et financières en faveur de la conservation.

Les zones protégées seules ne peuvent pas sauver la biodiversité ou préserver les fonctions écologiques interconnectées qui garantissent la vie sur cette planète. La connectivité incarne l'écologie, c'est-à-dire la science de l'interdépendance. Elle est indispensable, car l'interaction des terres, des eaux douces et des mers représente le force de vie d'une nature intacte. Ainsi, des réseaux connectés sont le meilleur moyen de maintenir et restaurer les processus écologiques et évolutifs, éviter l'extinction des espèces et protéger les écosystèmes terrestres, d'eau douce et marins indispensables à l'humanité et à toute forme de vie. La connectivité peut améliorer la résilience et l'adaptation des écosystèmes du monde entier au changement climatique et faire en sorte qu'ils soient en mesure de conserver leur intégrité écologique qui répond aux besoins des générations actuelles et futures. Jusqu'à ce que les forces de fragmentation soient anéanties, la conception de mesures de préservation de la connectivité permet de créer un filet de sécurité pour maintenir la biodiversité et finalement, l'espèce humaine.

Corridor en pas japonais et écoduc

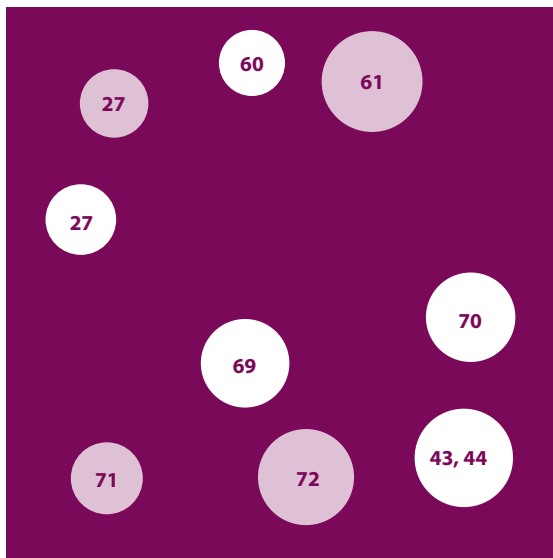
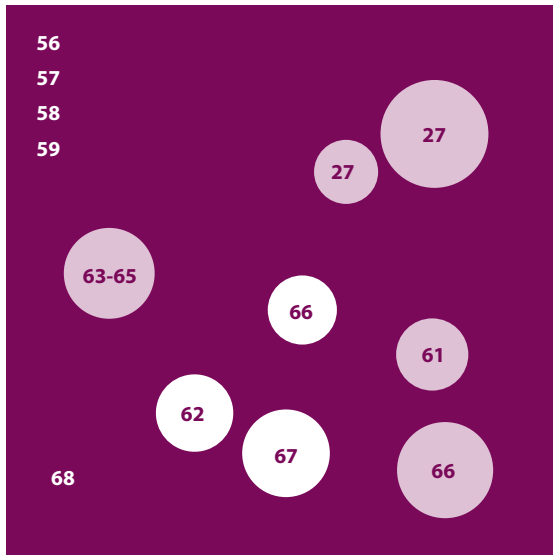


Bibliographie

1. Cullen-Unsworth, L.C. and Unsworth, R. (2018). A call for seagrass protection. *Science* 361(6401), 446-448. <https://doi.org/10.1126/science.aat7318>
2. Tucker, M.A., Böhning-Gaese, K., Fagan W.F., Fryxell J.M., Van Moorter, B., Alberts, S.C. *et al.* (2018) Moving in the Anthropocene: Global reductions in terrestrial mammalian movements. *Science* 359(6374), 466-469. <https://doi.org/10.1126/science.aam9712>
3. Haddad, N.M., Brudvig, L.A., Clobert, J., Davies, K.F., Gonzalez, A., Holt, R.D. *et al.* (2015). Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. *Science Advances* 1(2), e1500052. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500052>
4. Wilson, E.O. (2016). *Half-Earth: our planet's fight for life*. London: W.W. Norton & Company
5. Fahrig, L. (2003) Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*. 34, 487-515. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.34.011802.132419>
6. Laurance, W.F., Nascimento, H.E.M., Laurance, S.G., Ana Andrade, A., Ewers, R.M., Harms, K.E. *et al.* (2007) Habitat fragmentation, variable edge effects, and the landscape-divergence hypothesis *PLoS ONE* 2(10), e1017. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0001017>
7. Crook, D.A., Winsor, H., Lowe, W.H., Allendorf, F.W., Eros, T., Finn, D.S., Gillanders, B.M. *et al.* (2015) Human effects on ecological connectivity in aquatic ecosystems: Integrating scientific approaches to support management and mitigation. *Science of The Total Environment* 534, 52-64. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.034>
8. Crooks, K.R., Burdett, C.L., Theobald, D.M., King, S.R.B., Di Marco, M., Rondinini, C. *et al.* (2017) Quantification of habitat fragmentation reveals extinction risk in terrestrial mammals. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(29), 7635-7640. <https://doi.org/10.1073/pnas.1705769114>
9. Laurance, W.F., Camargo, J.L.C., Luizão, R.C.C., Laurance, S.G., Pimm, S.L., Bruna, E.M. *et al.* (2011) The fate of Amazonian forest fragments: A 32-year investigation. *Biological Conservation* 144(1), 56-67. <http://doi.org/10.1016/j.biocon.2010.09.021>
10. Olds, A.D., Connolly, R.M., Pitt, K.A., Pittman, S.J., Maxwell, P.S., Huijbers, C.M. *et al.* (2015). Quantifying the conservation value of seascape connectivity: a global synthesis. *Global Ecology and Biogeography* 25, 3-15. <https://doi.org/10.1111/geb.12388>
11. MacArthur, R.H. and Wilson, E.O. (1967). *The theory of island biogeography*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
12. Gilbert-Norton, L., Wilson, R., Stevens, J.R. and Beard, K.H. (2010). A meta-analytic review of corridor effectiveness. *Conservation Biology* 24(3), 660-668. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2010.01450.x>
13. Heller, N.E. and Zavaleta, E.S. (2009). Biodiversity management in the face of climate change: a review of 22 years of recommendations. *Biological Conservation* 142(1), 14-32. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biocon.2008.10.006>
14. Noss, R.F., Dobson, A.P., Baldwin, R., Beier, P. Davis, C.R., Dellasala, D.A. *et al.* (2012) Bolder thinking for conservation. *Conservation Biology* 26(1), 1-4. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2011.01738.x>
15. Dinerstein, E., Olson, D., Joshi, A., Vynne, C., Burgess, N.D., Wikramanayake, E. *et al.* (2017). An ecoregion-based approach to protecting half the terrestrial realm. *BioScience* 67(6), 534-545. <https://doi.org/10.1093/biosci/bix014>
16. Barnosky, A.D., Hadly, E.A., Bascompte, J., Berlow, E.L., Brown, J.H., Fortelius, M. *et al.* (2012). Approaching a state shift in Earth's biosphere. *Nature* 486(7401), 52. <https://doi.org/10.1038/nature11018>
17. McGuire, J.L., Lawler, J.J., McRae, B.H., Nunez, T.A. and Theobald, D.M. (2016). Achieving climate connectivity in a fragmented landscape. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(26), 7195-7200. <https://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1602817113>
18. Ellis, E.C., Goldewijk, K.K., Siebert, S., Lightman, D. and Ramankutty, N. (2010). Anthropogenic transformation of the biomes, 1700 to 2000. *Global Ecology and Biogeography* 19(5), 589-606. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00540.x>
19. Oakleaf, J.R. and Kennedy, C.M. (2016). Comparison of global human modification and human footprint maps. *The Nature Conservancy*. http://www.conservationgateway.org/ConservationPractices/lands/science/publications/Documents/HM_HF_comparison_documentation.pdf
20. Venter, O., Sanderson, E.W., Magrach, A., Allan, J.R., Beher, J., Jones, K.R. *et al.* (2016). Sixteen years of change in the global terrestrial human footprint and implications for biodiversity conservation. *Nature Communications* 7, 12558. <https://doi.org/10.1038/ncomms12558>
21. Watson, J.E.M., Shanahan, D.F., Di Marco, M., Allan, J., Laurance, W.F., Sanderson, E.W. *et al.* (2016). Catastrophic declines in wilderness areas undermine global environment targets. *Current Biology* 26, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2016.08.049>
22. Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., and Befort, B.L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108(50), 20260-20264. <https://doi.org/10.1073/pnas.1116437108>
23. Jones, K.R., Klein, C.J., Halpern, B.S., Venter, O., Grantham, H., Kuempel, C.D. *et al.* (2018). The location and protection status of Earth's diminishing marine wilderness. *Current Biology* 28(15), 2506-2512. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2018.06.010>
24. Laurance, W.F., Clements, G.R., Sloan, S., O'Connell, C.S., Mueller, N.D., Goosem, M. *et al.* (2014). A global strategy for road building. *Nature* 513(7517), 229. <https://doi.org/10.1038/nature13717>
25. Habib, B., Rajvanshi, A., Mathur, V.B., and Saxena, A. (2016). Corridors at crossroads: Linear development-induced ecological triage as a conservation opportunity. *Frontiers in Ecology and Evolution* 4, 132. <https://doi.org/10.3389/fevo.2016.00132>
26. Dulac, J. (2013). Global land transport infrastructure requirements - estimating infrastructure capacity and costs to 2050. Paris: International Energy Agency. https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TransportInfrastructureInsights_FINAL_WEB.pdf
27. Grill, G., Lehner, B., Lumsdon, A.E., MacDonald, G.K., Zarfl, C. and Liermann, C.R. (2015) An index-based framework for assessing patterns and trends in river fragmentation and flow regulation by global dams at multiple scales. *Environmental Research Letters* 10(1). <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/10/1/015001/meta>
28. Fundación Proteger, International Rivers and ECOA (2018). Dams in Amazonia website. <http://dams-info.org/>
29. Tundisi, J.G., Goldemberg, J., Matsumura-Tundisi, T. and Saraiva, A.C.F. (2014). How many more dams in the Amazon? *Energy Policy* 74, 703-708. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.07.013>

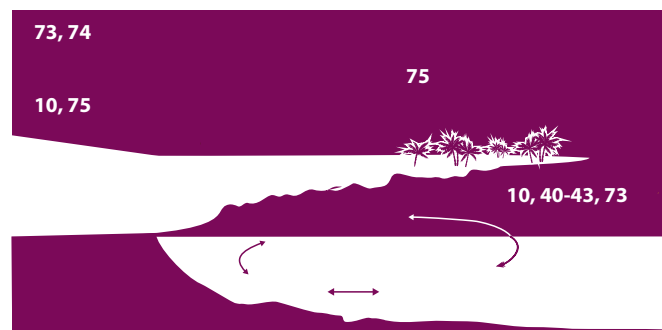
30. Ibsch, P.L., Hoffmann, M.T., Kreft, S., Pe'er, G., Kati, V., Biber-Freudenberger, L., DellaSala, D.A., et al. (2016). A global map of roadless areas and their conservation status. *Science*, 354(6318), 1423-1427. <https://doi.org/10.1126/science.aaf7166>
31. Hauer, F.R., Locke, H., Dreitz, V.J., Hebblewhite, M., Lowe, W.H., Muhlfeld, C.C. et al. (2016). Gravel-bed river floodplains are the ecological nexus of glaciated mountain landscapes. *Science Advances* 2(6), e1600026. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600026>
32. Newmark, W.D., Jenkins, C.N., Pimm, S.L., McNeally, P.B. and Halley, J.M. (2017). Targeted habitat restoration can reduce extinction rates in fragmented forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114(36), 9635-9640. <https://doi.org/10.1073/pnas.1705834114>
33. Garcia, L.C., Santos, J.S., Matsumoto, M., Silva, T.S.F., Padovezi, A., Sparovek, G. et al. (2013). Restoration challenges and opportunities for increasing landscape connectivity under the new Brazilian Forest Act. *Natureza & Conservação* 11(1), 181-185. <http://dx.doi.org/10.4322/natcon.2013.028>
34. Brancalion, P.H.S., Garcia, L.C., Loyola, R., Rodrigues, R.R., Pillar, V.P., and Lewinsohn, T.M. (2016). A critical analysis of the Native Vegetation Protection Law of Brazil (2012): updates and ongoing initiatives. *Natureza & Conservação* 14(1), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.ncon.2016.03.003>
35. Ojwang', G.O., Wargute, P.W., Said, M.Y., Worden, J.S., Davidson, Z., Muruthi, P. et al. (2017). Wildlife Migratory Corridors and Dispersal Areas: Kenya Rangelands and Coastal Terrestrial Ecosystems. Nairobi: Kenya Wildlife Service
36. Carr, M.H., Robinson, S.P., Wahle, C., Davis, G., Kroll, S., Murray, S. et al. (2017). The central importance of ecological spatial connectivity to effective marine protected areas and to meeting the challenges of climate change in the marine environment. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 27(S1), 6–29. <https://doi.org/10.1002/aqc.2800>
37. Magris, R.A., Pressey, R.L., Weeks, R. and Ban, N.C. (2014). Integrating connectivity and climate change into marine conservation planning. *Biological Conservation* 170, 207–221. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.12.032>
38. Green, A.L., Maypa, A.P., Almany, G.R., Rhodes, K.L., Weeks, R., Abesamis, R.A. et al. (2015). Larval dispersal and movement patterns of coral reef fishes, and implications for marine reserve network design. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society* 90(4), 1215–1247. <https://doi.org/10.1111/brv.12155>
39. Engelhard, S.L., Huijbers, C.M., Stewart-Koster, B., Olds, A.D., Schlacher, T.A. and Connolly, R.M. (2016). Prioritising seascape connectivity in conservation using network analysis. *Journal of Applied Ecology* 54(4), 1130–1141. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12824>
40. Foster, N.L., Paris, C.B., Kool, J.T., Baums, I.B., Stevens, J.R., Sanchez, J.A., Bastidas, C. et al. (2012). Connectivity of Caribbean coral populations: complementary insights from empirical and modelled gene flow. *Molecular Ecology* 21(5), 1143–1157. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2012.05455.x>
41. Huntington, B.E., Karnauskas, M., Babcock, E.A. and Limran, D. (2010). Untangling natural seascape variation from marine reserve effects using a landscape approach. *PLoS ONE* 5, e12327. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0012327>
42. Valentine, J.F., Heck, K.L., Jr, Blackmon, D., Goecker, M.E., Christian, J., Kroutil, R.M. et al. (2008). Exploited species impacts on trophic linkages along reef-seagrass interfaces in the Florida keys. *Ecological Applications* 18(6), 1501–1515. <https://doi.org/10.1890/07-1720.1>
43. Olds, A.D., Pitt, K.A., Maxwell, P.S. and Connolly, R.M. (2012). Synergistic effects of reserves and connectivity on ecological resilience. *Journal of Applied Ecology* 49(6), 1195–1203. <https://doi.org/10.1111/jpe.12002>
44. Olds, A.D., Albert, S., Maxwell, P.S., Pitt, K.A. and Connolly, R.M. (2013). Mangrove-reef connectivity promotes the functioning of marine reserves across the western Pacific. *Global Ecology and Biogeography* 22(9), 1040–1049. <https://doi.org/10.1111/geb.12072>
45. Butchart, S.H., Clarke, M., Smith, R.J., Sykes, R.E., Scharlemann, J.P., Harfoot, M. et al. (2015). Shortfalls and solutions for meeting national and global conservation area targets. *Conservation Letters* 8(5), 329-337. <https://doi.org/10.1111/conl.12158>
46. Dudley, N., Jonas, H., Nelson, F., Parrish, J., Pyhälä, A., Stolton, S. et al. (2018). The essential role of other effective area-based conservation measures in achieving big bold conservation targets. *Global Ecology and Conservation* 15, e00424. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2018.e00424>
47. Zemp, D.C., Schleussner, C.F., Barbosa, H.M., Hirota, M., Montade, V., Sampaio, G. et al. (2017). Self-amplified Amazon forest loss due to vegetation-atmosphere feedbacks. *Nature Communications* 8, 14681. <https://doi.org/10.1038/ncomms14681>
48. Pacheco, A.A., Neves, A.C.O. and Fernandes, G.W. (2018). Uneven conservation efforts compromise Brazil to meet the Target 11 of Convention on Biological Diversity. *Perspectives in Ecology and Conservation* 16(1), 43-48. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2017.12.001>
49. Beier, P. and Noss, R.F. (1998). Do habitat corridors provide connectivity? *Conservation Biology* 12(6), 1241-1252. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.1998.98036.x>
50. Saura, S., Bastin, L., Battistella, L., Mandrici, A. and Dubois, G. (2017). Protected areas in the world's ecoregions: How well connected are they? *Ecological Indicators* 76, 144-158. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.12.047>
51. Krosby, M., Tewksbury, J., Haddad, N.M. and Hoekstra, J. (2010). Ecological connectivity for a changing climate. *Conservation Biology* 24(6), 1686-1689. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2010.01585.x>
52. Pulsford, I., Fitzsimons, J. and Wescott, G. (eds.) (2013). *Linking Australia's landscapes: Lessons and opportunities from large-scale conservation networks*. CSIRO Publishing. <https://doi.org/10.1111/1745-5871.12060>
53. Correa Ayram, C.A., Mendoza, M.E., Etter, A. and Salicrup, D.R.P. (2016). Habitat connectivity in biodiversity conservation: a review of recent studies and applications. *Progress in Physical Geography* 40(1), 7-37. <https://doi.org/10.1177%2F0309133315598713>
54. Worboys, G., Francis, W.L. and Lockwood, M. (eds.) (2010). *Connectivity conservation management: a global guide (with particular reference to mountain connectivity conservation)*. London: Earthscan
55. Watson, J.E.M., Venter, O., Lee, J., Jones, K.R., Robinson, J.G., Possingham, H.P. et al. (2018) Protect the last of the wild, 31 October. <https://www.nature.com/articles/d41586-018-07183-6>

Références des illustrations



56. Didham, R. (2010). The Ecological Consequences of Habitat Fragmentation. Wiley Online Library. <https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0021904>
57. Clevenger, A. P. and Wierzchowski, J. (2006) Maintaining and restoring connectivity in landscapes fragmented by roads. In Crooks, K. R. and Sanjayan, M. (eds), *Connectivity Conservation*. Cambridge: Cambridge University Press, 502–535. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511754821.023>
58. Nuñez, T., Lawler, J., Mcrae, B., Pierce, J., Krosby, M., Kavanagh, D., Singleton, P. et al (2013). Connectivity Planning to Address Climate Change. *Conservation Biology*, 27(2), 407-416. <https://doi.org/10.1111/cobi.12014>
59. Proctor, S., McClean, C. and Hill, J. (2011). Protected areas of Borneo fail to protect forest landscapes with high habitat connectivity. *Biodiversity and Conservation*, 20(12), 2693-2704. <https://doi.org/10.1007/s10531-011-0099-8>
60. Bergsten, A., Bodin, Ö. and Ecke, F. (2013). Protected areas in a landscape dominated by logging – A connectivity analysis that integrates varying protection levels with competition–colonization tradeoffs. *Biological Conservation*, 160, 279-288. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.01.016>
61. Laurance, W. and Useche, D. (2009). Environmental Synergisms and Extinctions of Tropical Species. *Conservation Biology*, 23(6), 1427-1437. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2009.01336.x>
62. Morris, R. (2010). Anthropogenic impacts on tropical forest biodiversity: a network structure and ecosystem functioning perspective. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1558), 3709-3718. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0273>
63. Trombulak, S. and Frissell, C. (2000). Review of Ecological Effects of Roads on Terrestrial and Aquatic Communities. *Conservation Biology*, 14(1), 18-30. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2000.99084.x>
64. Chen, H.L. and Koprowski, J.L. (2016). Differential effects of roads and traffic on space use and movements of native forest-dependent and introduced edge-tolerant species. *PLoS ONE*, 11(1), e0148121. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0148121>
65. Shepard, D.B., Kuhn, A.R., Dreslik, M.J. and Phillips, C.A. (2008). Roads as barriers to animal movement in fragmented landscapes. *Animal Conservation*, 11, 288-296. <https://doi.org/10.1111/j.1469-1795.2008.00183.x>
66. Gurrutxaga, M. and Saura, S. (2013). Prioritizing highway defragmentation locations for restoring landscape connectivity. *Environmental Conservation*, 41(02), 157-164. <https://doi.org/10.1017/S0376892913000325>
67. Ceballos, G., Ehrlich, P. and Dirzo, R. (2017). Biological annihilation via the ongoing sixth mass extinction signaled by vertebrate population losses and declines. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(30), E6089-E6096. <https://doi.org/10.1073/pnas.1704949114>
68. Tewksbury, J., Levey, D., Haddad, N., Sargent, S., Orrock, J., Weldon, A., Danielson, B., et al (2002). Corridors affect plants, animals, and their interactions in fragmented landscapes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(20), 12923-12926. <https://doi.org/10.1073/pnas.202242699>
69. Brudvig, L.A., Damschen, E.I., Tewksbury, J.J., Haddad, N.M. and Levey, D.J. (2009). Landscape connectivity promotes plant biodiversity spillover into non-target habitats. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(23), 9328-9332. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0809658106
70. Martensen, A.C., Ribeiro, M.C., Banks-Leite, C., Prado, P.I. and Metzger, J.P. (2012). Associations of forest cover, fragment area, and connectivity with neotropical understory bird species richness and abundance. *Conservation Biology*, 26(6), 1100-1111. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2012.01940.x>

71. Fox, A.D., Henry, L-A., Corne, D.W. and Roberts, J.M. (2016). Sensitivity of marine protected area network connectivity to atmospheric variability. *Royal Society Open Science*, 3: 160494. <http://dx.doi.org/10.1098/rsos.160494>
72. Fang, X., Hou, X., Li, X., Hou, W., Nakaoka, M. and Yu, X. (2018). Ecological connectivity between land and sea: a review. *Ecological Research*, 33, 51–61. <https://doi.org/10.1007/s11284-017-1549-x>



73. Grober-Dunsmore, R., Pittman, S.J., Caldwell, C., Kendall, M.S. and Frazer, T.K. (2009). A landscape ecology approach for the study of ecological connectivity across tropical marine seascapes. In: Nagelkerken, I. (ed), *Ecological connectivity among tropical coastal ecosystems*. Springer, Dordrecht, 493–530. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2406-0_14
74. Earp, H.S., Prinz, N., Cziesielski, M.J. and Andskog, M. (2018). For a world without boundaries: Connectivity between tropical ecosystems in times of change. In S. Jungblut, V. Liebich and M. Bode (eds.), *YOUMARES 8 – Oceans Across Boundaries: Learning from each other*. Proceedings of the 2017 conference for YOUnG MARine REsearchers in Kiel, Germany. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93284-2_9
75. Boström, C., Pittman, S.J., Simenstad, C. and Kneib, R.T. (2011). Seascape ecology of coastal biogenic habitats: advances, gaps, and challenges. *Marine Ecology Progress Series*, 427, 191-217. <https://doi.org/10.3354/meps09051>



*Tourbières à pergélisol avec plusieurs dépressions lacustres, Cape Bolvansky, Russie
Crédit photo : Hans Joosten*

Les tourbières à pergélisol : perdre du terrain sur une planète qui se réchauffe

L'évolution accélérée de l'Arctique

Les tourbières situées sous les tropiques attirent davantage l'attention en raison de leur rôle de haut lieu mondial du stockage du carbone et de moteur de l'atténuation du changement climatique. Celles-ci renferment près de 120 gigatonnes de carbone, mais ce chiffre ne représente que près de 20 pour cent de la totalité du carbone contenu dans les tourbières à l'échelle mondiale¹. La plus grande partie se situe dans les zones les plus septentrionales de la planète, avec la région circumpolaire nordique renfermant près de la moitié du carbone organique de la planète piégé dans la terre, principalement sous la forme de tourbe gelée en permanence²⁻⁵.

Dans l'hémisphère nord, si la majorité des sols gèlent et dégèlent en fonction des saisons, certains restent gelés toute l'année. Le pergélisol, à savoir les terres qui restent à une température inférieure à zéro degré pendant au moins deux années

consécutives, représente environ 23 millions de kilomètres carrés du nord. On retrouve des tourbières arctiques et subarctiques dans les zones de pergélisol du Canada, du Danemark/Groenland, de Finlande, de Norvège, de Russie, de Suède et des États-Unis. Les tourbières à pergélisol dont l'épaisseur de la couche de tourbe est supérieure à 40 centimètres s'étendent sur plus de 1,4 million de kilomètres carrés et la superficie des tourbières à pergélisol dont la couche de tourbe est moins profonde est d'autant plus vaste^{3,6-8}. De larges dépôts de tourbe à pergélisol se situent bien au-delà des régions arctiques et subarctiques, par exemple en Mongolie et sur le plateau de Qinghai au Tibet, où les chaînes de montagnes empêchent l'air chaud océanique de pénétrer dans les terres, maintenant les températures très basses en hiver^{9,10}.

Les tourbières à pergélisol connaissent une transformation rapide. L'Arctique se réchauffe à un rythme deux fois plus élevé que la moyenne mondiale¹¹. Au cours des dernières décennies, les limites sud du pergélisol ont reculé de 30 à 80 km vers le nord, soit une

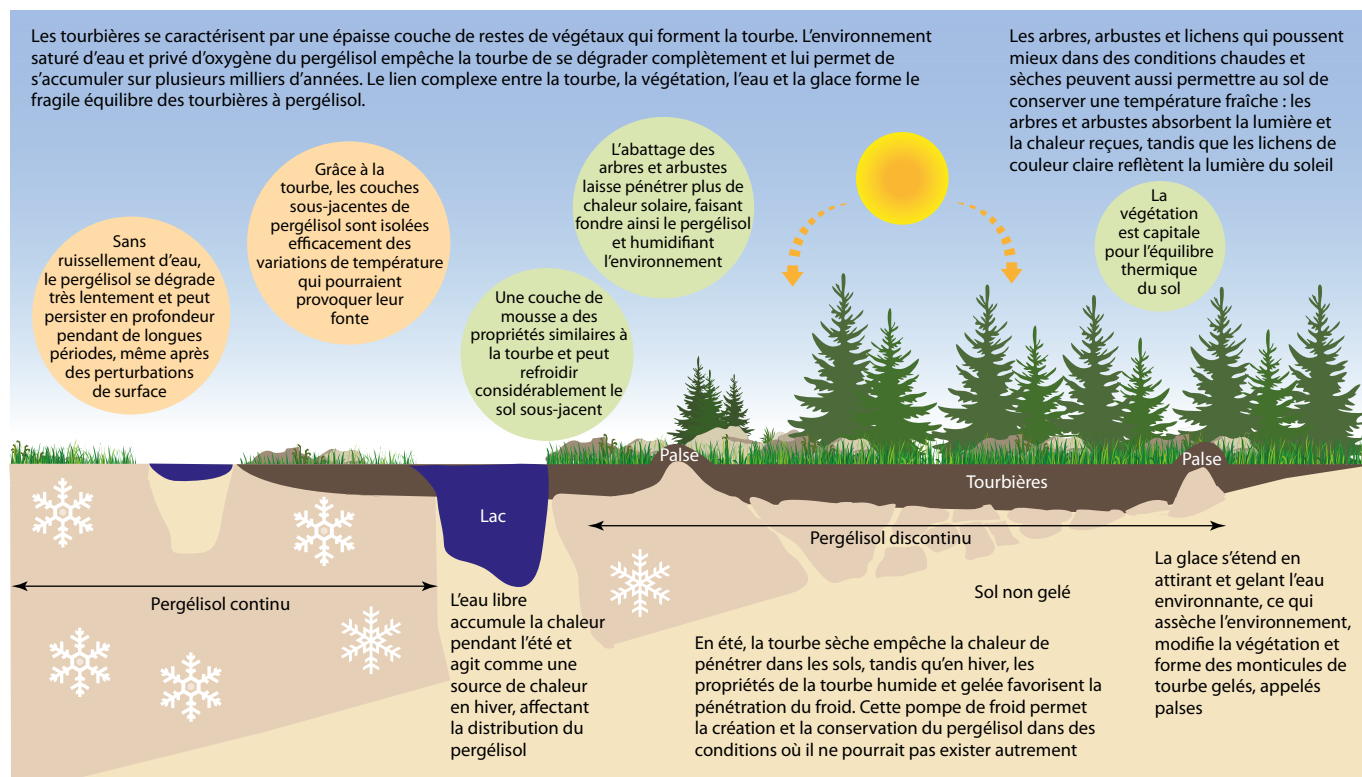
perte de couverture importante¹²⁻¹⁵. Les risques liés à la dégradation du pergélisol sont la mobilisation et la décomposition microbienne des matières organiques gelées enfouies qui peuvent dégager des volumes importants de dioxyde de carbone et de méthane qui sont susceptibles, à leur tour, d'accélérer considérablement le réchauffement climatique¹⁶⁻¹⁹. La dégradation généralisée du pergélisol aurait également des répercussions directes colossales sur les écosystèmes, l'hydrologie et les infrastructures des régions concernées.

Même si le pergélisol est étudié de façon approfondie depuis plus d'un siècle, il est absolument indispensable de mener davantage de recherches sur sa distribution, ses caractéristiques et ses dynamiques afin de mieux comprendre sa réaction face au changement climatique et aux perturbations anthropiques²⁰. Pour ce qui est des tourbières à pergélisol, les connaissances sont encore plus limitées. La manière dont les tourbières à pergélisol

réagissent au réchauffement climatique et leur rôle collectif dans le changement climatique mondial ne sont pas simples ni clairement comprises, car l'interaction du pergélisol, des écosystèmes et du climat est extrêmement complexe²⁰⁻²². Par exemple, même si les tourbières gelées (sèches) et dégelées (humides) affichent des taux de stockage du carbone similaires et jouent le rôle de puits de carbone, elles présentent généralement des volumes d'émissions de gaz à effet de serre totalement différents et peuvent constituer une source nette d'émissions²³⁻²⁵. En outre, les points de tourbières gelées et dégelées peuvent alterner rapidement dans le temps et l'espace^{23,26}.

La fonte du pergélisol est considérée comme l'un des principaux éléments pouvant faire basculer la planète vers un effet de serre incontrôlé ou une « serre » incontrôlable²⁷. Pour éviter un scénario aussi catastrophique, il est essentiel que le pergélisol de la planète et ses tourbières restent gelés et retiennent leurs dépôts de carbone.

Tourbières et pergélisol : le rôle de la tourbe, des plantes et de l'eau



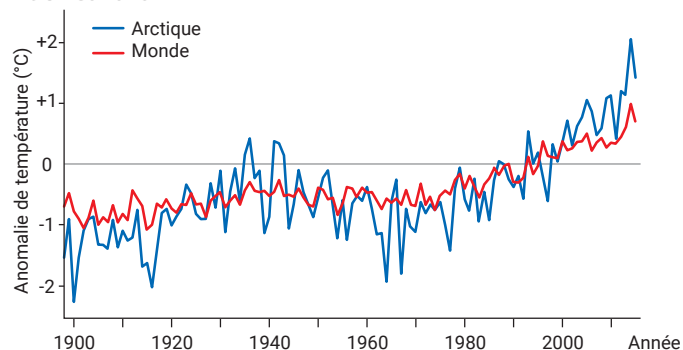
Fonte du pergélisol, décomposition de la tourbe et interactions complexes

En Arctique, chaque année de la dernière décennie a systématiquement dépassé le record de chaleur annuel enregistré au XX^e siècle¹⁵. À l'échelle mondiale, les températures du pergélisol ont continué à grimper ces dernières années. La plus forte hausse des températures moyennes annuelles du pergélisol a été observée dans les régions les plus froides de l'Arctique, tandis que la hausse a été bien moins importante dans les zones de pergélisol « plus chaudes » et dans les zones de pergélisol discontinues. À certains endroits, les températures du pergélisol ont légèrement diminué en raison des récents hivers rigoureux^{15,28}.

Avec la hausse des températures, la fonte du pergélisol contenant beaucoup de glace ou de la glace souterraine entraîne des dépressions significatives dans le paysage, appelées thermokarsts. Au cours des dernières décennies, la formation de thermokarsts dans les tourbières semble s'être accélérée dans les zones de pergélisol discontinues²⁹⁻³¹. Cependant, en Arctique, des observations à long terme n'ont pas permis de dégager de tendances uniformes dans l'évolution du thermokarst due au réchauffement climatique¹⁵.

Lorsque les sols gelés s'effondrent du fait de leur fonte, l'affaissement crée la formation de nouvelles petites masses d'eau pouvant se transformer par la suite en lacs. À son tour, la formation de lacs thermokarstiques accélère la fonte plus rapide et plus

Température annuelle de l'air en surface à l'échelle mondiale et en Arctique (60-90°N) par rapport à la valeur moyenne entre 1981 et 2010



Source : adapté du rapport 2018 sur l'Arctique de l'Agence américaine d'observation océanique et atmosphérique¹¹

profonde du pergélisol¹⁹. D'un autre côté, l'élargissement de ces lacs peut accroître la connectivité des réseaux de drainage, favorisant le drainage des lacs, la repousse de la végétation, la formation de tourbe et la nouvelle formation de pergélisol³²⁻³⁷. Ce contraste des dynamiques illustre le besoin accru de mieux comprendre les répercussions potentielles de la tendance au réchauffement.

Le changement climatique et les températures élevées ont entraîné une forte augmentation de l'incidence des incendies de forêt en Arctique qui s'étendent jusqu'aux régions du pourtour de la toundra et de la toundra forestière. Alimentés par des dépôts de tourbe sous-jacents, les incendies dégagent d'importants volumes de carbone, détruisent la végétation et les couches isolantes du sol et diminuent l'albédo du sol, ou sa capacité de réflexion de la lumière, ce qui accroît sa vulnérabilité au changement climatique et la formation généralisée de thermokarsts³⁸⁻⁴⁴. Même les scénarios climatiques les moins pessimistes prédisent que l'impact combiné de la hausse des températures et des incendies de forêt sera particulièrement important dans les zones de pergélisol discontinues, avec des conditions climatiques totalement défavorables au pergélisol³¹. Ceci pourrait entraîner des changements dans le type de végétation de ces zones et sa productivité, favorisant des incendies plus fréquents et de plus grande ampleur^{45,46}.

Un autre effet potentiel de la hausse de la température due au réchauffement climatique est la libération d'importants volumes de méthane, un puissant gaz à effet de serre, dans l'atmosphère à la suite de la fonte du pergélisol. Bien que les estimations des émissions de méthane en Arctique varient considérablement, les projections du changement climatique mondiales actuelles semblent indiquer uniquement une légère augmentation des émissions de méthane dans la zone de pergélisol septentrionale^{47,48}. Toutefois, il convient de souligner que la plupart des modèles ne prennent pas en compte une représentation adéquate des

 Vidéo : Qu'est-ce que le pergélisol ?



Lien vers la vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=kixy1u8GjY>
Photo : échantillon de pergélisol fraîchement prélevé, Pokhodsk, Russie
Crédit photo : Hans Joosten

© Alfred-Wegener-Institut,
Helmholtz-Zentrum für Polar
und Meeresforschung



Thermokarst



Crédit photo : Hans Joosten

Le **thermokarst** est une caractéristique du paysage créée par la fonte des glaces souterraines dans les régions présentant des couches sous-jacentes de pergélisol, qui entraîne un affaissement de la surface. Les formations typiques de thermokarst se composent de lacs thermokarstiques, de gouffres, de dépressions et de fosses sur un terrain doté de polygones^{56,57}. Les thermokarsts sont très répandus dans les zones de pergélisol discontinues^{58,59}. On les retrouve également fréquemment dans les zones de pergélisol continus bien plus froides, où les coins de glace créent une instabilité du pergélisol^{60,61}.

L'accumulation de l'eau due au thermokarst renforce initialement l'augmentation de la chaleur et la dégradation à travers des réactions positives. À l'inverse, la croissance de la végétation et l'accumulation de matière organique limitent progressivement la poursuite de la fonte en aval. En raison de nouvelles accumulations rapides de tourbe dans les dépressions thermokarstiques, la fonte du pergélisol ne transforme pas systématiquement les tourbières en source de carbone^{22,23,62}. Néanmoins, un sol humide causera certainement la libération de méthane.

processus de fonte⁶. Une récente étude de modélisation a évalué les répercussions à long terme de la dégradation du pergélisol sur le climat, en prenant en compte le processus brutal de fonte dû à la formation récente de lacs thermokarstiques. Les résultats de cette étude ont indiqué qu'au cours du XXI^e siècle, l'émission de carbone sous forme de méthane (CH₄) devrait représenter uniquement une

petite portion des émissions totales de carbone dues au récent dégel du pergélisol. Pourtant, elle pourrait représenter jusqu'à 40 pour cent du réchauffement supplémentaire imputable au récent dégel du pergélisol⁴⁹.

Le changement climatique n'est que l'un des nombreux facteurs exerçant une influence directe sur l'évolution des tourbières à pergélisol. Toute perturbation du sol de surface peut entraîner la dégradation du pergélisol, y compris les processus naturels comme les incendies de forêt ou de toundra, ou les perturbations anthropiques, telles que les activités de construction et de développement des infrastructures urbaines et industrielles, les activités minières, le tourisme et l'agriculture^{50,51}. Ces nombreux modèles de développement dans les zones de tourbières à pergélisol ne tiennent souvent pas compte des caractéristiques uniques de ces zones, entraînant la fragmentation du paysage et la perturbation du cycle de l'eau^{14,52}. En Russie, 15 pour cent du territoire de la toundra a été détruit par les activités de transport, ce qui a entraîné une fonte du pergélisol, une érosion et un affaissement des sols, ainsi que la création de thermokarsts⁵³. Dans l'Arctique russe, près de 45 pour cent de la production de pétrole et de gaz naturel se situe dans les zones les plus sensibles sur le plan écologique, bien souvent dans les tourbières, comme cela est le cas dans la région de Petchora, sur le territoire de l'Oural polaire et en Sibérie centrale et du nord-ouest^{54,55}. La demande croissante en ressources naturelles et l'accessibilité accrue des régions gelées du fait du réchauffement climatique peuvent à l'avenir conduire à une intensification des activités industrielles et de développement des infrastructures, perturbant encore davantage les tourbières et le pergélisol. Les changements qui en découleront affecteront également les populations autochtones qui dépendent traditionnellement de l'utilisation des tourbières pour se nourrir, élever leurs rennes, chasser le gibier et pêcher le poisson¹⁴.



Fonte et effondrement du pergélisol en Mongolie

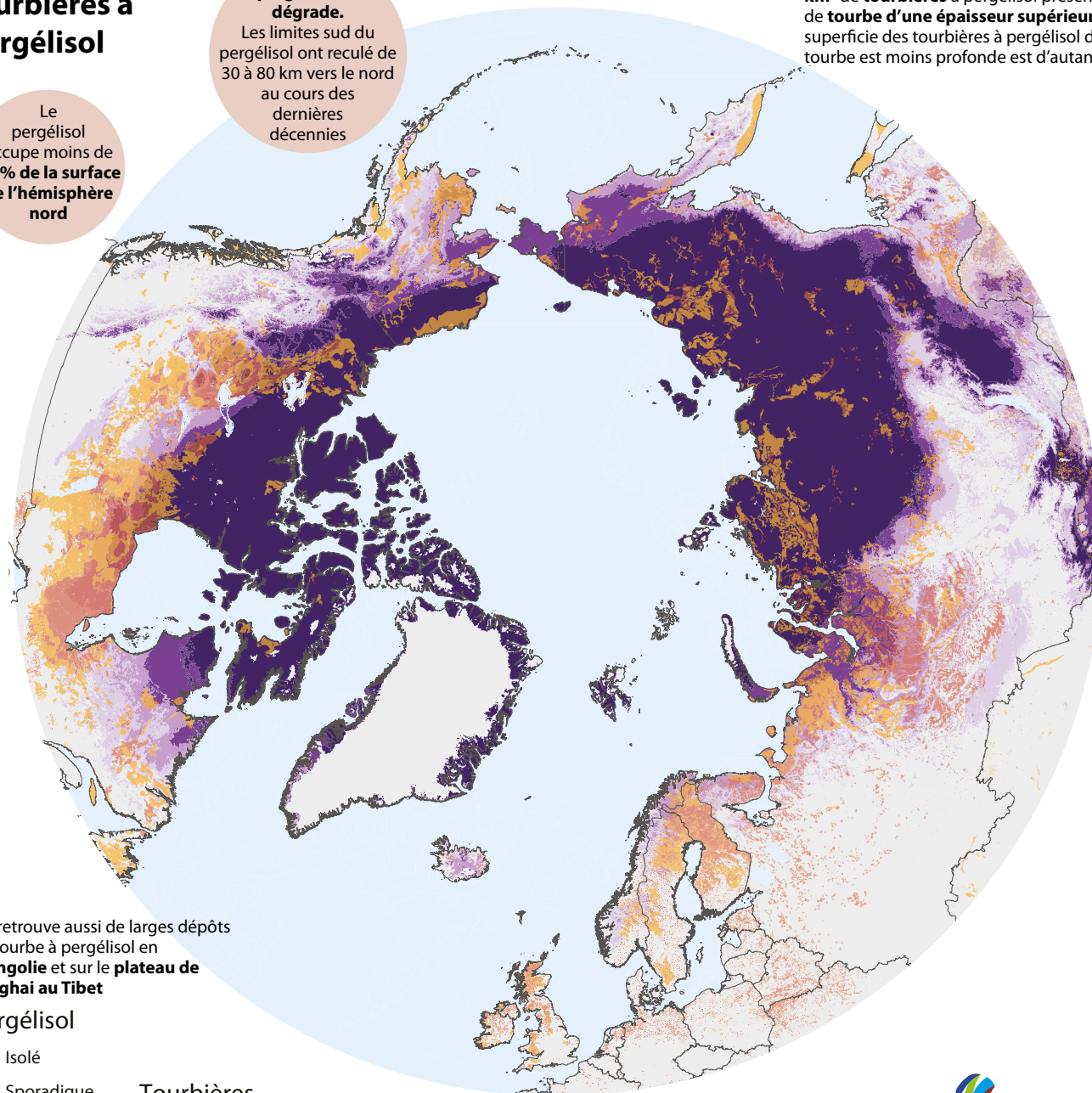
Crédit photo : Hans Joosten

Répartition des tourbières à pergélisol

Le pergélisol occupe moins de **25 % de la surface de l'hémisphère nord**

Le pergélisol se dégrade.
Les limites sud du pergélisol ont reculé de 30 à 80 km vers le nord au cours des dernières décennies

Les **tourbières** s'étendent sur de vastes surfaces dans les zones de pergélisol. Pas moins de **1,4 million de km² de tourbières à pergélisol** présentent une couche de **tourbe d'une épaisseur supérieure à 40 cm** et la superficie des tourbières à pergélisol dont la couche de tourbe est moins profonde est d'autant plus vaste.



On retrouve aussi de larges dépôts de tourbe à pergélisol en **Mongolie** et sur le **plateau de Qinghai au Tibet**

Pergélisol

- Isolé
- Sporadique
- Discontinu
- Continu

Tourbières

- Couverture > 50 %
- Couverture entre 20 et 50 %



Sources des données géospatiales :

Les données sur les tourbières ont été fournies par le Greifswald Mire Centre, Greifswald, Allemagne
Les données sur le pergélisol ont été fournies par l'Institut Alfred Wegener du Centre Helmholtz pour la recherche polaire et marine, Bremerhaven, Allemagne⁹⁰

Les températures arctiques augmentent deux fois plus rapidement que les températures moyennes mondiales

Les tourbières représentent la **plus grande réserve de carbone organique à long terme** de tous les écosystèmes terrestres

Le modèle climatique prévoit une **perte du pergélisol près de la surface de 35 % d'ici à 2050**

Les **arbustes, les arbres** et les **lichens** peuvent conserver la fraîcheur du sol en absorbant ou en réfléchissant la lumière du soleil. L'élimination du couvert végétal peut entraîner une dégradation rapide du pergélisol

Les incendies détruisent les couches isolantes de végétation, de tourbe et de sol, augmentant la vulnérabilité des tourbières au changement climatique

Le réchauffement de l'Arctique a **augmenté l'activité des incendies de forêt** dans les régions de toundra et de toundra forestière, réduisant de manière significative la teneur en carbone du sol

L'effet combiné du réchauffement climatique et des **incendies de forêt** est accentué dans les zones de pergélisol discontinues

Lorsque la tourbe n'est plus gelée du fait de la fonte du pergélisol, des micro-organismes décomposeurs deviennent actifs et décomposent les matières organiques, générant des émissions de CO₂ et de méthane (CH₄)

Les **masses d'eau plus profondes** accumulent de la chaleur en été et jouent le rôle de source de chaleur en hiver, affectant la répartition locale du pergélisol

Le **thermokarst** est une dépression caractéristique due à la fonte du pergélisol ou des glaces souterraines

En l'absence d'écoulement d'eau en surface ou sous terre, le pergélisol se dégrade très lentement et peut persister en profondeur pendant longtemps

Le thermokarst est très répandu dans les zones de pergélisol discontinues

Les **tourbières** sont des zones composées d'une couche de **restes de végétaux** (tourbe) en surface. L'environnement saturé d'eau et privé d'oxygène empêche la tourbe de se dégrader complètement

Les sols de la région circumpolaire renferment près de la **moitié du carbone organique de la planète piégé dans la terre**, stocké principalement dans les tourbières et souvent sous la forme de pergélisol

La fonte du pergélisol pourrait donc libérer d'importants volumes de **mercure** dans l'environnement

Le carbone organique contenu dans le sol peut être libéré sous différentes formes (CO₂ ou CH₄), être rejeté sous forme de gaz dans l'atmosphère, être dissous ou être transporté sous forme de particules dans les cours d'eau

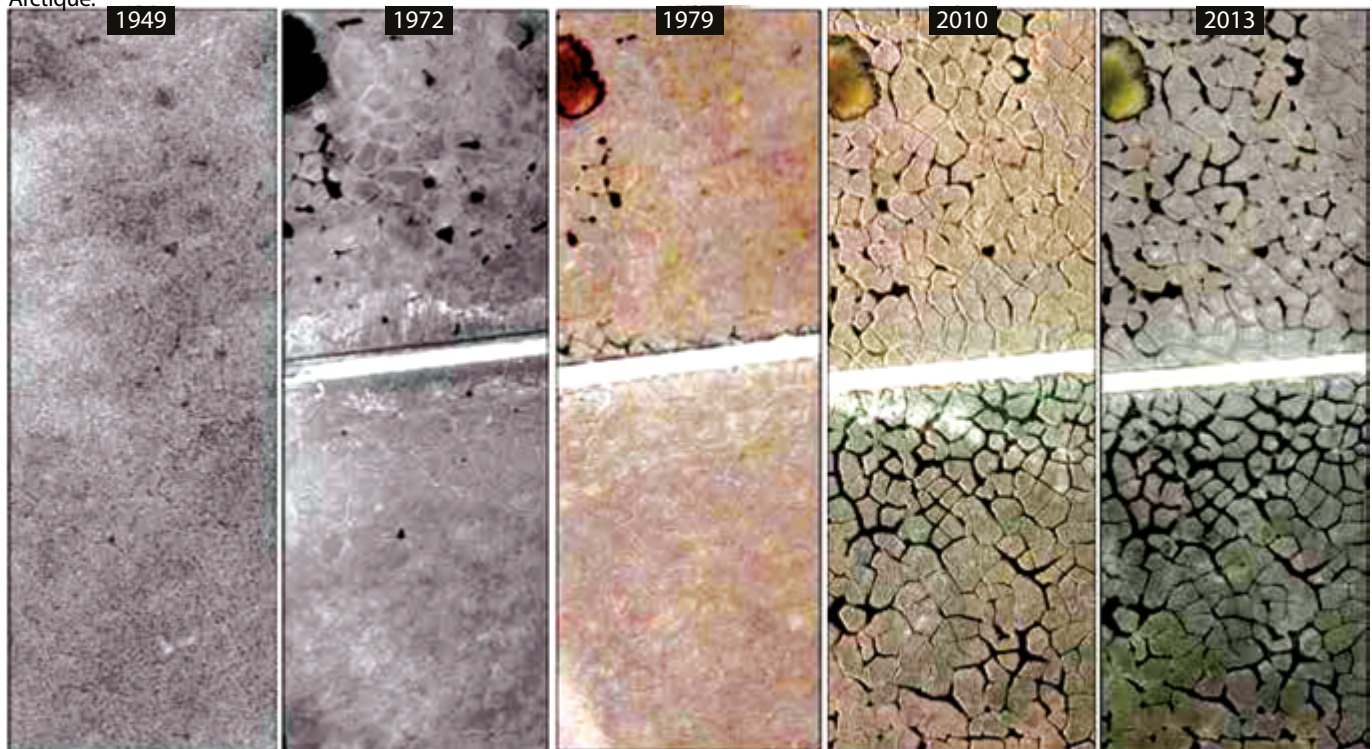
Les experts estiment que les pergélisols deviendront des **sources de carbone** d'ici à 2100

Les sols de pergélisol comprenant des dépôts de tourbe contiennent **deux fois plus de mercure** que le reste des sols de la planète, l'atmosphère et les océans combinés

Une meilleure connaissance des tourbières à pergélisol

Depuis plus d'un siècle, et de façon encore plus marquée ces dernières décennies, les régions de pergélisol ont fait l'objet de recherches et des technologies ont été élaborées pour surmonter les défis scientifiques et techniques auxquels ces régions font face. Malgré les efforts déployés par l'Association internationale du pergélisol et le Réseau terrestre mondial pour le pergélisol, d'importantes lacunes persistent quant aux connaissances propres à ces régions et à cet habitat, principalement en raison des conditions climatiques extrêmes, de l'accès limité et du contexte géopolitique complexe. Un examen récent a montré qu'un peu plus de 30 pour cent de l'ensemble des références au pergélisol dans la documentation scientifique portant sur les expérimentations menées sur le terrain en Arctique provenaient essentiellement des environs de seulement deux stations de recherche : le lac Toolik en Alaska (États-Unis) et Abisko en Suède⁶³. Cela pourrait fausser le consensus scientifique et mener à des prévisions inexactes concernant les répercussions du changement climatique en Arctique.

Avec la considération croissante du changement climatique et de la fonte des glaces en Arctique, les récentes évaluations tentent de plus en plus de tenir compte de certains aspects, comme les changements sociaux et écologiques, les changements de régime et le rôle des activités anthropiques sur l'adaptation et la transformation^{64,65}. Des projets de recherche à grande échelle sont mis en place afin de se pencher sur les répercussions de la fonte et de la dégradation du pergélisol. Ces derniers comprennent l'initiative Arctic Development and Adaptation to Permafrost in Transition (ADAPT), qui collabore avec 15 laboratoires à travers tout le Canada et d'autres groupes de chercheurs pour élaborer un cadre scientifique intégré sur les systèmes de notre planète dans l'Arctique canadien. Des lois spécifiques, telles que la Loi sur le Grand Nord de 2010 adoptée par l'Ontario, sont associées à de nouvelles initiatives de planification pour rendre le Grand Nord plus accessible et le protéger grâce à un processus de planification de l'affectation des sols, en consultation avec les Premières Nations⁶⁶.



Évolution de la formation du thermokarst due à la fonte du pergélisol entre 1949 et 2013 sur un site d'étude situé dans la baie de Prudhoe, Alaska, États-Unis. La ligne blanche est la route Spine construite en 1969.

Source : Walker et al. (2014)⁵²

Le Conseil de l'Arctique est un exemple de solide coopération internationale qui s'est montrée particulièrement utile dans la création et l'amélioration des connaissances nécessaires à l'élaboration de politiques nationales et internationales, telles que son rapport de 2017 sur la neige, l'eau, la glace et le pergélisol en Arctique^{16,67}. Même s'il est établi que les États de l'Arctique jouent un rôle essentiel dans la gérance de la région, les autres acteurs doivent également déployer davantage d'efforts pour protéger les tourbières à pergélisol et améliorer les connaissances à leur sujet. Plusieurs organisations internationales, telles que le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) à travers son Rapporteur spécial sur l'océan et la cryosphère dans le contexte du changement climatique, l'Organisation météorologique mondiale et le Conseil international des sciences au travers du Comité scientifique international de l'Arctique, s'engagent de plus en plus et contribuent à mieux comprendre les répercussions du changement climatique dans l'Arctique et à sensibiliser à ce sujet.



La fonte du pergélisol a entraîné la formation de thermokarst dans les tourbières proches de Naryan-Mar, région autonome de Nenets, Russie

Crédit photo : Hans Joosten



Loi du Grand Nord de l'Ontario et le rôle des Premières Nations dans la protection des tourbières à pergélisol

Le **Grand Nord de l'Ontario** (Canada) se situe entre la latitude 50-57 °N et la longitude 79-94 °O et désigne un paysage dynamique qui englobe des biomes arctiques, boréaux et tempérés. Ce paysage est marqué principalement par des tourbières qui couvrent 47 pour cent soit 21 millions d'hectares, du Grand Nord et stockent près de 36 gigatonnes de carbone sous la forme de tourbe⁶⁸. Cette quantité équivaut à un quart du carbone stocké dans l'ensemble des tourbières du Canada.

Adoptée en octobre 2010, la **Loi sur le Grand Nord** reconnaît le rôle important du Grand Nord dans les capacités de stockage et de piégeage du carbone et soutient la planification de l'occupation des sols à l'échelle communautaire comme stratégie de lutte contre le changement climatique^{66,69}. La Loi se concentre sur le rôle important des Premières Nations, à savoir les populations autochtones du Canada qui ne sont ni métisses ni inuits, dans la planification de l'occupation des sols qui comprend des aspects culturels, sociaux, écologiques et économiques.

Comme l'exige la loi, la **stratégie d'occupation des sols du Grand Nord** contribue à l'élaboration de plans communautaires d'occupation des sols tout en intégrant des problématiques dépassant la portée de chaque domaine de planification, telles que les connaissances autochtones. La stratégie comprend les quatre objectifs suivants :

1. L'attribution aux Premières Nations d'un rôle important en matière de planification.
2. La protection des systèmes écologiques et des zones de valeur culturelle du Grand Nord en intégrant au moins 225 000 kilomètres carrés de la région à un réseau interconnecté de zones protégées prévu dans les plans communautaires d'occupation des sols.
3. Le maintien de la diversité biologique et des processus et fonctions écologiques, y compris le stockage et le piégeage du carbone dans le Grand Nord.
4. Permettre un développement économique durable qui profite aux Premières Nations.

La stratégie aurait dû prendre fin en 2016, mais elle est toujours en cours, dirigée par les Premières Nations intéressées, en collaboration avec le ministère des Richesses naturelles et des Forêts de l'Ontario. Certains plans communautaires d'occupation des sols ont été approuvés, tandis que d'autres ont seulement été rédigés, mis en œuvre ou n'ont pas encore commencé⁷⁰. Bien que des avancées ont été réalisées dans ce domaine, des incertitudes subsistent quant à la manière dont certains objectifs de la Loi seront atteints, notamment concernant les domaines de la gouvernance, et des connaissances scientifiques en particulier. Il est impératif de comprendre comment le changement climatique influe sur le stockage et le piégeage du carbone dans les tourbières du Grand Nord et d'en apprendre davantage sur les processus écologiques qui en découlent afin de pouvoir élaborer des politiques et des méthodes de gestion adaptées.

Priorités en matière de connaissances et expansion du réseau

Beaucoup d'incertitudes subsistent quant à la vitesse à laquelle les tourbières à pergélisol vont évoluer et quelles seront les répercussions de ces changements à l'échelle locale et mondiale. Une coopération internationale est indispensable pour continuer à financer la recherche sur le long terme et élaborer des stratégies viables pour réduire les vulnérabilités. Les nations doivent collaborer sur la mise en œuvre d'une série de mesures applicables qui reconnaissent et appliquent les connaissances traditionnelles et locales, facilitent l'engagement auprès des parties prenantes et développent des réseaux d'observation efficaces¹⁵. En parallèle, il est indispensable de sensibiliser et éduquer le public aux risques, aux répercussions probables et aux possibilités d'adaptation pour élaborer une gouvernance et des politiques éclairées.

Bien qu'il existe un réseau de stations d'observation qui communiquent des informations sur les tendances générales d'évolution du pergélisol, la répartition géographique de ces sites est très inégale. Le réseau présente en particulier d'importantes lacunes dans le centre de l'Arctique canadien et le centre de l'Arctique sibérien, au Groenland, dans l'Extrême-Orient russe, sur le plateau tibétain et dans la région subarctique^{30,63}. L'évaluation

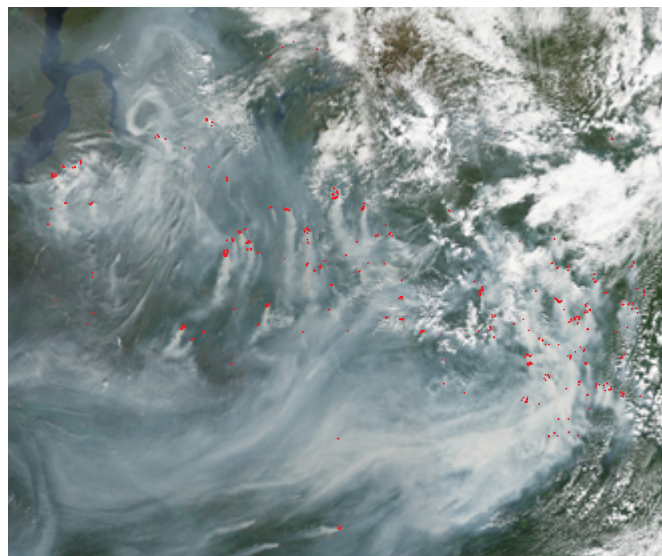


Image satellite prise le 19 juillet 2016 montrant une épaisse fumée au-dessus des tourbières à pergélisol du centre-nord de la Russie. Les démarcations rouges indiquent des températures de surface élevées, probablement causées par des feux de tourbières.

Crédit photo : NASA Earth Observatory/Jesse Allen and Joshua Stevens

en temps utile du statut mondial du pergélisol requiert l'expansion des réseaux de recherche existants pour former un réseau de suivi plus complet. Dans l'idéal, ce réseau élargi doit être conçu pour être facile d'utilisation pour toutes les parties prenantes, qu'il s'agisse des climatologues ou du grand public, et doit s'appuyer sur des mesures standards et des bases de données facilement accessibles^{15,64}. Les pays dotés de larges zones de pergélisol pourraient bénéficier de l'élaboration de plans d'adaptation qui évaluent les risques potentiels et intègrent des stratégies d'atténuation des dommages et des coûts engendrés par la dégradation du pergélisol⁶⁴.

En tant que réserves de carbone, les tourbières à pergélisol constituent un environnement dynamique, spécial et extrêmement divers, marqué par des relations complexes entre la teneur en carbone du sol, l'hydrologie, le pergélisol, la végétation et les populations. Les principales lacunes en matière de connaissances reposent sur la compréhension limitée des interactions entre les différents processus et sur l'insuffisance des études et modèles actuels. Davantage de recherches doivent être menées sur la localisation précise des tourbières à pergélisol, leur évolution et leur rejet possible de carbone. Les modèles climatiques doivent intégrer les émissions carbonées dues à la mobilisation du carbone contenu dans le pergélisol. Pour mieux saisir la réponse et la réaction des tourbières à pergélisol face au changement climatique, il est essentiel de réaliser des enquêtes interdisciplinaires. Pour cela,



Vidéo : Restaurer les tourbières de Russie pour prévenir les incendies et atténuer les effets du changement climatique



Lien vers la vidéo : https://www.youtube.com/watch?v=QZ5qu_nPHYM

Photo : incendie dans la toundra de bouleaux nains en République des Komis, Russie

© Wetlands International

Crédit photo : Hans Joosten

 Vidéo : Tourbières – régulation du climat et biodiversité



Lien vers la vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=ZcxZ9gvNf5U>
Palses plats en République des Komis, Russie

© Naturstyrelsen
Crédit photo : Hans Joosten

il convient d'intégrer des observations de terrain, des études rétrospectives (ou paléoenvironnementales), des données de télédétection et des modélisations dynamiques^{22,30}. La complexité physique des tourbières à pergélisol et les risques potentiels importants qu'entraînent leur dégradation et leur perturbation nécessitent également la mise en œuvre d'une approche de gestion et de planification de l'occupation des sols plus holistique et la mise à disposition de connaissances mieux intégrées pour les planificateurs et les décideurs.

L'Arctique a déjà commencé à changer considérablement. Même avec la mise en œuvre intégrale de l'Accord de Paris dans le cadre de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, il est encore probable que d'ici la fin du siècle l'environnement de l'Arctique soit très différent de celui que nous connaissons aujourd'hui¹⁵. L'accélération quasi inévitable des impacts de ce changement renforce le besoin urgent d'adopter des stratégies d'adaptation locales et régionales qui ciblent ces écosystèmes nordiques riches en carbone. La gestion avisée des tourbières à pergélisol est primordiale pour limiter les émissions de gaz à effet de serre, réduire les vulnérabilités humaines et écologiques et développer une résilience au changement climatique sur le long terme.



Palse de tourbière à pergélisol près de Noiaabrsk, Sibérie occidentale, Russie

Crédit photo : Franziska Tanneberger

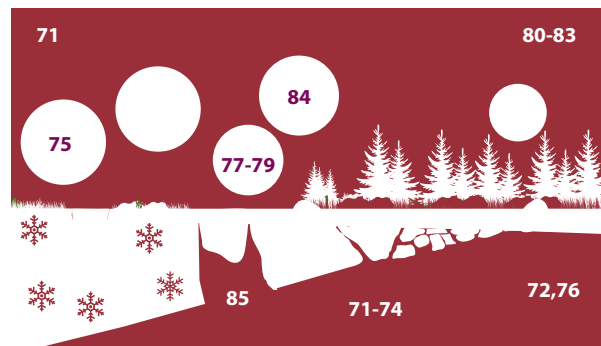
Bibliographie

1. Leifeld, J. and Menichetti, L. (2018). The underappreciated potential of peatlands in global climate change mitigation strategies. *Nature Communications* 9, 1071. <https://www.nature.com/articles/s41467-018-03406-6>
2. Tarnocai, C., Canadell, J.G., Schuur, E.A.G., Kuhry, P., Mazhitova, G. and Zimov, S. (2009). Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. *Global Biogeochemical Cycles* 23(2), 1–11. <https://doi.org/10.1029/2008GB003327>
3. Hugelius, G., Strauss, J., Zubrzycki, S., Harden, J.W., Schuur, E.A.G., Ping, C.L. et al. (2014). Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps. *Biogeosciences* 11, 6573–6593. <https://doi.org/10.5194/bg-11-6573-2014>
4. Schuur, E.A.G., McGuire, A.D., Schädel, C., Grosse, G., Harden, J.W., Hayes, D.J. et al. (2015). Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature* 520, 171–179. <https://doi.org/10.1038/nature14338>
5. Strauss, J., Schirmer, L., Grosse, G., Fortier, D., Hugelius, G., Knoblauch, C. et al. (2017) Deep Yedoma permafrost: a synthesis of depositional characteristics and carbon vulnerability. *Earth-Science Reviews* 172, 75–86. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.007>
6. Brown, J., Ferrians, O., Heginbottom, J.A. and Melnikov, E. (2002). *Circum-Arctic map of permafrost and ground-ice conditions, Version 2*. Colorado, USA: National Snow and Ice Data Center. https://nsidc.org/fgdc/maps/ipa_browse.html
7. Ballantyne, C.K. (2018). *Periglacial geomorphology*. Chichester, UK: Wiley-Blackwell.
8. Olefeldt, D., Goswami, S., Grosse, G., Hayes, D., Hugelius, G., Kuhry, P. et al. (2016). Circumpolar distribution and carbon storage of thermokarst landscapes. *Nature Communications* 7, 13043. <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms13043>
9. Brown, R.J.E. (1960). The distribution of permafrost and its relation to air temperature in Canada and the USSR. *Arctic* 13(3), 163–177. <http://pubs.ainu.ucalgary.ca/arctic/Arctic13-3-163.pdf>
10. Gravis, G.F., Melnikov, E.S., Guo, D., Li, S., Li, S., Tong, B. et al. (2003). Principles of classification and mapping of permafrost in Central Asia. *8th International Conference on Permafrost 2003*. Arenson, L.U., Springman, S.M. and Phillips, M. (eds.). AA Balkema Publishers. 297–302
11. Overland, J.E., Hanna, E., Hanssen-Bauer, I., Kim, S.J., Walsh, J.E., Wang, M. et al. (2017). Surface Air Temperature. Arctic Report Card: Update for 2017. <https://www.arctic.noaa.gov/Report-Card/Report-Card-2017/ArtMID/7798/ArticleID/700/Surface-Air-Temperature>
12. Intergovernmental Panel on Climate Change (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 1535. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
13. Park, H., Kim, Y. and Kimball, J.S. (2016). Widespread permafrost vulnerability and soil active layer increases over the high northern latitudes inferred from satellite remote sensing and process model assessments. *Remote Sensing of Environment* 175, 349–358. <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.rse.2015.12.046>
14. Minayeva, T., Sirin, A., Kershaw, P. and Bragg, O. (2018). Arctic peatlands. In *The Wetland Book II: Distribution, Description, and Conservation*. by Finlayson, C.M., Milton, G.R., Prentice, R.C. and Davidson, N.C. (eds.). Dordrecht, NL: Springer 1–15. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4001-3_109
15. Arctic Monitoring and Assessment Programme (2017a). *Snow, water, ice and permafrost in the Arctic (SWIPA) 2017*. Oslo, Norway: AMAP. <https://www.amap.no/documents/doc/Snow-Water-Ice-and-Permafrost-in-the-Arctic-SWIPA-2017/1610>
16. Schuur, E.A.G., Abbott, B.W., Bowden, W.R., Brovkin, V., Camill, P., Canadell, J.G. et al. (2013). Expert assessment of vulnerability of permafrost carbon to climate change. *Climate Change* 119(2), 359–374. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0730-7>
17. Koven, C.D., Schuur, E.A.G., Schädel, C., Bohn, T.J., Burke, E.J., Chen, G. et al. (2015). A simplified, data-constrained approach to estimate the permafrost carbon–climate feedback. *Phil. Trans. R. Soc. A* 373, 20140423. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0423>
18. Schädel, C., Bader, M.K.F., Schuur, E.A.G., Biasi, C., Bracho, R., Capek, P. et al. (2016). Potential carbon emissions dominated by carbon dioxide from thawed permafrost soils. *Nature Climate Change* 6, 950–953. <https://www.nature.com/articles/nclimate3054>
19. Walter Anthony, K., Schneider von Deimling, T., Nitze, I., Frolking, S., Emond, A., Daanen, R. et al. (2018). 21st-century modeled permafrost carbon emissions accelerated by abrupt thaw beneath lakes. *Nature Communications* 9(1), 3262. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05738-9>
20. Grosse, G., Goetz, S., McGuire, A.D., Romanovsky, V.E. and Schuur, E.A.G. (2016). Changing permafrost in a warming world and feedbacks to the Earth system. *Environmental Research Letters* 11, 040201. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/11/4/040201>
21. Shur, Y.L. and Jorgenson, M.T. (2007). Patterns of permafrost formation and degradation in relation to climate and ecosystems. *Permafrost and Periglacial Processes* 18, 7–19. <https://doi.org/10.1002/ppp.582>
22. Swindles, G.T., Morris, P.J., Mullan, D., Watson, E.J., Turner, E., Roland, T.P. et al. (2015). The long-term fate of permafrost peatlands under rapid climate warming. *Nature Scientific Reports* 5, 17951. <https://doi.org/10.1038/srep17951>
23. Gao, Y. and Couwenberg, J. (2015). Carbon accumulation in a permafrost polygon peatland: steady long-term rates in spite of shifts between dry and wet conditions. *Global Change Biology* 21(2), 803–815. <https://doi.org/10.1111/gcb.12742>
24. Ström, L., Ekberg, A., Mastepanov, M. and Christensen, T.R. (2003). The effect of vascular plants on carbon turnover and methane emissions from a tundra wetland. *Global Change Biology* 9(8), 1185–1192. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00655.x>
25. Turetsky, M.R., Wieder, R.K., Vitt, D.H., Evans, R.J. and Scott, K.D. (2007). The disappearance of relict permafrost in boreal North America: effects on peatland carbon storage and fluxes. *Global Change Biology* 13(9), 1922–1934. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01381.x>
26. De Klerk, P., Donner, N., Karpov, N. S., Minke, M. & Joosten, H. 2011. Short-term dynamics of a low-centred ice-wedge polygon near Chokurdakh (NE Yakutia, NE Siberia) and climate change during the last ca. 1250 years. *Quaternary Science Reviews*, 30, 3013–3031. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.06.016>

27. Steffen, W., Rockström, J., Richardson, K., Lenton, T.M., Folke, C., Liverman, D. et al. (2018). Trajectories of the Earth system in the Anthropocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115(33), 8252-8259. <https://doi.org/10.1073/pnas.1810141115>
28. Hartfield, G., Blunden, J. and Arndt, D.S. (eds.) (2018). State of the climate in 2017. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 99(8), Si-5332. <https://doi.org/10.1175/2018BAMSStateoftheClimate.1>
29. Baltzer, J.L., Veness, T., Chasmer, L.E., Sniderhan, A.E. and Quinton, W.L. (2014). Forests on thawing permafrost: fragmentation, edge effects, and net forest loss. *Global Change Biology* 20(3) 824-834. <https://doi.org/10.1111/gcb.12349>
30. Carpino, O.A., Berg, A.A., Quinton, W.L. and Adams, J.R. (2018). Climate change and permafrost thaw-induced boreal forest loss in northwestern Canada. *Environ. Res. Lett.* 13, 084018. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aad74e>
31. Gibson, C.M., Chasmer, L.E., Thompson, D.K., Quinton, W.L., Flannigan, M.D. and Olefeldt, D. (2018). Wildfire as a major driver of recent permafrost thaw in boreal peatlands. *Nature Communications* 9(1), 3041. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05457-1>
32. Jones, B.M., Grosse, G., Arp, M.C., Jones, K.M., Walter, A. and Romanovsky, V.E. (2011). Modern thermokarst lake dynamics in the continuous permafrost zone, northern Seward Peninsula, Alaska. *Journal of Geophysical Research* 116, G00M03. <https://doi.org/10.1029/2011JG001666>
33. Jones, M.C., Grosse, G., Jones, B.M. and Walter Anthony, K.M. (2012). Peat accumulation in drained thermokarst lake basins in continuous, ice-rich permafrost, northern Seward Peninsula, Alaska. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences* 117, G00M07. <https://doi.org/10.1029/2011JG001766>
34. Jones, B.M. and Arp, C.D. (2015). Observing a catastrophic thermokarst lake drainage in Northern Alaska. *Permafrost and Periglacial Processes* 26, 119-128. <https://doi.org/10.1002/ppp.1842>
35. Van Huissteden, J., Berrittella, C., Parmentier, F.J.W., Mi, Y., Maximov, T.C. and Dolman, A.J. (2011). Methane emissions from permafrost thaw lakes limited by lake drainage. *Nature Climate Change* 1, 119-123. <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE1101>
36. Roach, J., Griffith, B., Verbyla, D. and Jones, J. (2011). Mechanisms influencing changes in lake area in the Alaskan boreal forest. *Global Change Biology* 17, 2567-2583. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02446.x>
37. Jepsen, S.M., Voss, C.I., Walvoord, M.A., Minsley, B.J. and Rover, J. (2013). Linkages between lake shrinkage/expansion and sublacustrine permafrost distribution determined from remote sensing of interior Alaska, USA. *Geophysical Research Letters* 40, 882-887. <https://doi.org/10.1002/grl.50187>
38. Flannigan, M., Stocks, B., Turetsky, M. and Wotton, M. (2009). Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest. *Global Change Biology* 15(3), 549-560. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01660.x>
39. Jones, B.M., Kolden, C.A., Jandt, R., Abatzoglou, J.T., Urban, F. and Arp, C.D. (2009). Fire behavior, weather, and burn severity of the 2007 Anaktuvuk river tundra fire, North Slope, Alaska. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 41, 309-316. <https://doi.org/10.1657/1938-4246-41.3.309>
40. Hu, F.S., Higuera, P.E., Walsh, J.E., Chapman, W.L., Duffy, P.A., Brubaker, L.B. et al. (2010). Tundra burning in Alaska: Linkages to climatic change and sea ice retreat. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 115, G04002. <http://dx.doi.org/10.1029/2009JG001270>
41. Hu, F.S., Higuera, P.E., Duffy, P.A., Chipman, M.L., Rocha, A.V., Young, A.M. et al. (2015). Arctic tundra fires: natural variability and responses to climate change. *Frontiers in Ecology and the Environment* 13(7), 369-377. <https://doi.org/10.1890/150063>
42. Mack, M.C., Bret-Harte, M.S., Hollingsworth, T.N., Jandt, R.R., Schuur, E.A.G., Shaver, G.R. et al. (2011). Carbon loss from an unprecedented Arctic tundra wildfire. *Nature* 475, 489-492. <https://www.nature.com/articles/nature10283>
43. Kelly, R., Chipman, M.L., Higuera, P.E., Stefanova, I., Brubaker, L.B. and Hu, F.S. (2013). Recent burning of boreal forests exceeds fire regime limits of the past 10,000 years. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 110, 13055-13060. <https://doi.org/10.1073/pnas.1305069110>
44. Rupp, T.S., Duffy, P., Leonawicz, M., Lindgren, M., Breen, A., Kurkowski, T. et al. (2016). Climate scenarios, land cover, and wildland fire. In Zhu, Z. and McGuire, A.D. (eds.), *Baseline and projected future carbon storage and greenhouse-gas fluxes in ecosystems of Alaska*. USGS Professional Paper 1826, 17-52
45. Bret-Harte, M.S., Mack, M.C., Shaver, G.R., Huebner, D.C., Johnston, M., Mojica, C.A. et al. (2013). The response of Arctic vegetation and soils following an unusually severe tundra fire. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 368, 20120490. <https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0490>
46. Arctic Climate Impact Assessment (2005). *Impacts of a warming Arctic: Arctic climate impact assessment*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
47. Riley, W.J., Subin, Z.M., Lawrence, D.M., Swenson, S.C., Torn, M.S., Meng, L. et al. (2011). Barriers to predicting changes in global terrestrial methane fluxes: analyses using CLM4Me, a methane biogeochemistry model integrated in CESM. *Biogeosciences* 8, 1925-1953. <https://doi.org/10.5194/bg-8-1925-2011>
48. Gao, X., Schlosser, C.A., Sokolov, A., Walter Anthony, K., Zhuang, Q. and Kicklighter, D. (2013). Permafrost degradation and methane: low risk of biogeochemical climate-warming feedback. *Environmental Research Letters* 8(3), 035014. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/8/3/035014>
49. Schneider von Deimling, T., Grosse, G., Strauss, J., Schirmermeister, L., Morgenstern, A., Schaphoff, S. et al. (2015). Observation-based modelling of permafrost carbon fluxes with accounting for deep carbon deposits and thermokarst activity. *Biogeosciences* 12(11), 3469-3488. <https://doi.org/10.5194/bg-12-3469-2015>
50. Grosse, G., Harden, J., Turetsky, M., McGuire, A.D., Camilli, P., Tarnocai, C. et al. (2011). Vulnerability of high-latitude soil organic carbon in North America to disturbance. *Journal of Geophysical Research* 116, G00K06. <https://doi.org/10.1029/2010JG001507>
51. Instanes, A., Anisimov, O., Brigham, L., Goering, D., Khrestalev, L.N., Ladanyi, B. et al. (2005). Infrastructure: buildings, support systems, and industrial facilities. In *ACIA: Arctic Climate Impact Assessment*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 908-944.
52. Walker, D.A., Reynolds, M.K., Buchhorn, M. and Peirce, J.L. (eds.) (2014). *Landscapes and permafrost changes in the Prudhoe Bay Oilfield, Alaska*. Alaska Geobotany Center Publication AGC 14-01. Fairbanks, AK: University of Alaska Fairbanks. https://www.geobotany.uaf.edu/library/pubs/WalkerDA2014_agc14-01.pdf

53. Vlassova, T. (2002). Human impacts on the tundra-taiga zone dynamics: the case of the Russian lesotundra. *Ambio Special Report*, 12, 30–36.
54. Instanes, A. (2016). Incorporating climate warming scenarios in coastal permafrost engineering design – Case studies from Svalbard and northwest Russia. *Cold Regions Science and Technology* 131, 76–87. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2016.09.004>
55. Shiklomanov, N.I., Streletskiy, D.A., Swales, T.B. and Kokorev, V.A. (2017). Climate change and stability of urban infrastructure in Russian permafrost regions: Prognostic assessment based on GCM climate projections. *Geographical Review* 107, 125–142. <https://doi.org/10.1111/gere.12214>
56. Jorgenson, T., Shur, Y.L. and Osterkamp, T.E. (2008). Thermokarst in Alaska. *Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost* 1, 869–876. Fairbanks, AK: University of Alaska Fairbanks
57. Kokelj, S.V. and Jorgenson, M.T. (2013). Advances in thermokarst research. *Permafrost and Periglacial Processes* 24, 108–119. <https://doi.org/10.1002/ppp.1779>
58. Jorgenson, M.T., Racine, C.H., Walters, J.C. and Osterkamp, T.E. (2001). Permafrost degradation and ecological changes associated with a warming climate in central Alaska. *Climatic Change* 48, 551–579. <https://doi.org/10.1023/A:100566742>
59. Halsey, L.A., Vitt, D.H. and Zoltai, S.C. (1995). Initiation and expansion of peatlands in Alberta, Canada. *Climate, landscape and vegetation change in the Canadian Prairie Provinces Proceedings* 45–53. Edmonton, Alberta: Canadian Forestry Service. <http://cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/18992.pdf>
60. Jorgenson, M.T., Shur, Y.L. and Walker, H.J. (1998). Evolution of a permafrost-dominated landscape on the Colville River Delta, northern Alaska. *Proceedings of Seventh International Conference on Permafrost, Collection Nordicana* 57, 523–529.
61. Fortier, D. and Allard, M. (2004). Late Holocene syngenetic ice-wedge polygons development, Bylot Island, Canadian Arctic Archipelago. *Canadian Journal of Earth Sciences* 41(8), 997–1012. <https://doi.org/10.1139/e04-031>
62. Payette, S., Delwaide, A., Caccianiga, M. and Beauchemin, M. (2004). Accelerated thawing of subarctic peatland permafrost over the last 50 years. *Geophysical Research Letters* 31, L18208. <https://doi.org/10.1029/2004GL020358>
63. Metcalfe, D.B., Hermans, T.D.G., Ahlstrand, J., Becker, M., Berggren, M., Björk, R. G. et al. (2018). Patchy field sampling biases understanding of climate change impacts across the Arctic. *Nature Ecology & Evolution* 2, 1443–1448. <https://www.nature.com/articles/s41559-018-0612-5>
64. United Nations Environment Programme (2012). *Policy implications of warming permafrost*. UNEP : Nairobi. <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8533>
65. Arctic Monitoring and Assessment Programme (2017b) *Adaptation actions for a changing Arctic: Perspectives from the Barents area*. Oslo, Norway: AMAP. <https://www.amap.no/documents/doc/Adaptation-Actions-for-a-Changing-Arctic-Perspectives-from-the-Barents-Area/1604>
66. Chetkiewicz, C. and Lintner, A. (2014). *Getting it right in Ontario's Far North: the need for a regional strategic environmental assessment in the Ring of Fire [Wawagajing]*. Canada: Wildlife Conservation Society Canada and Ecojustice Canada. https://www.wcsCanada.org/Portals/96/Documents/RSEA_Report_WCSCanada_Ecojustice_FINAL.pdf
67. Koivuova, T. (2016). Arctic resources: Exploitation of natural resources in the Arctic from the perspective of international law. In *Research Handbooks on International Law and Natural Resources*. Morgera, E. and Kulovesi, K. (eds.) Cheltenham/Northampton: Edward Elgar Publishing. Chapter 17. 349–366. <https://www.elgaronline.com/view/9781783478323.00031.xml>
68. McLaughlin, J.W. and Webster, K. (2013). *Effects of a changing climate on peatlands in permafrost zones: a literature review and application to Ontario's Far North*. Climate Change Research Report CCCR-34. Canada: Ontario Ministry of Natural Resources. <http://www.ontla.on.ca/library/repository/mon/27008/323518.pdf>
69. Legislative Assembly of Ontario (2010). Ontario House Bill 191 2010. An Act with respect to land use planning and protection in the Far North. Ontario. <https://www.ola.org/en/legislative-business/bills/parliament-39/session-2/bill-191>
70. Government of Ontario (2018). Land use planning process in the Far North. Ontario. <https://www.ontario.ca/page/land-use-planning-process-far-north#section-1>

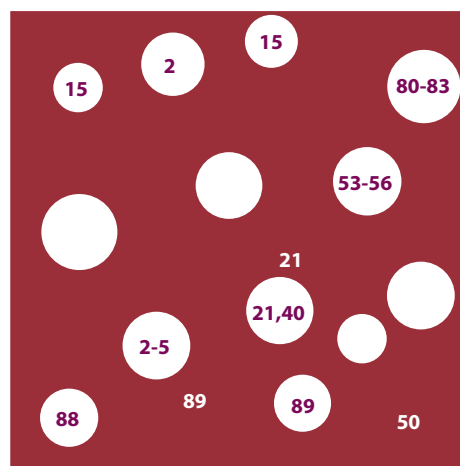
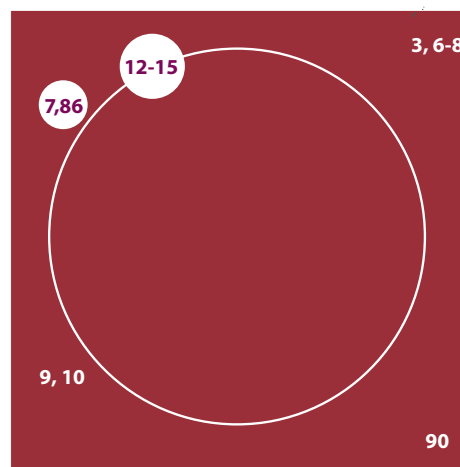
Références des illustrations



71. Washburn, A.L. (1979). *Geocryology. A survey of periglacial processes and environments*. London: Edward Arnold.
72. Kujala, K., Seppälä, M. and Holappa, T. (2008). Physical properties of peat and palsa formation. *Cold Regions Science and Technology* 52, 408–414. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2007.08.002>
73. Vasil'chuk, Y.K. (2013). Syngenetic ice wedges: cyclical formation, radiocarbon age and stable-isotope records. *Permafrost and Periglacial Processes* 24(1), 82–93. <https://doi.org/10.1002/ppp.1764>
74. Harris, S.A., Brouchkov, A. and Cheng, G. (2018). *Geocryology: Characteristics and use of frozen ground and permafrost landforms*. Leiden, NL: CRC Press/Balkema.
75. Burn, C.R. (1998). The response (1958–1997) of permafrost and near-surface ground temperatures to forest fire, Takhini River valley, southern Yukon Territory. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 35(2), 184–199. <https://doi.org/10.1139/cjes-35-2-184>
76. Routh, J., Hugelius, G., Kuhry, P., Filley, T., Kaislahti, P., Becher, M. et al. (2014). Multi-proxy study of soil organic matter dynamics in permafrost peat deposits reveal vulnerability to climate change in the European

Russian Arctic. *Chemical Geology* 368, 104-117. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.12.022>

77. Soudzilovskaia, N.A., van Bodegom, P.M. and Cornelissen, H.C. (2013). Dominant bryophyte control over high-latitude soil temperature fluctuations predicted by heat transfer traits, field moisture regime and laws of thermal insulation. *Functional Ecology* 27, 1442–1454. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12127>
78. Porada, P., Ekici, A. and Beer, C. (2016). Effects of bryophyte and lichen cover on permafrost soil temperature at large scale. *Cryosphere* 10, 2291–2315. <https://doi.org/10.5194/tc-10-2291-2016>
79. Park, H., Launiainen, S., Konstantinov, P.Y., Iijima, Y. and Fedorov, A.N. (2018). Modeling the effect of moss cover on soil temperature and carbon fluxes at a tundra site in northeastern Siberia. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. <https://doi.org/10.1029/2018JG004491>
80. Chapin III, F., Sturm, M., Serreze, M., McFadden, J., Key, J., Lloyd, A. et al. (2005). Role of land-surface changes in Arctic summer warming. *Science* 310(5748), 657-660. <https://doi.org/10.1126/science.1117368>
81. Blok, D., Heijmans, M.P.D., Schaepman-Strub, G., Kononov, A.V., Maximov, T.C. and Berendse, F. (2010). Shrub expansion may reduce summer permafrost thaw in Siberian tundra. *Global Change Biology* 16(4), 1296-1305. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02110.x>
82. Briggs, M.A., Walvoord, M.A., McKenzie, J.M., Voss, C.I., Day-Lewis, F. D. and Lane, J.W. (2014). New permafrost is forming around shrinking Arctic lakes, but will it last? *Geophysical Research Letters* 41(5), 1585–1592. <https://doi.org/10.1002/2014GL059251>
83. Druel, A., Peylin, P., Krinner, G., Ciais, P., Viovy, N., Peregon, A. et al. (2017). Towards a more detailed representation of high-latitude vegetation in the global land surface model ORCHIDEE (ORC-HL-VEGv1.0). *Geoscientific Model Development* 10, 4693–4722. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4693-2017>
84. Nauta, A.L., Heijmans, M.M.P.D., Blok, D., Limpens, J., Elberling, B., Gallagher, A. et al. (2015). Permafrost collapse after shrub removal shifts tundra ecosystem to a methane source. *Nature Climate Change* 5, 67-70. <https://www.nature.com/articles/nclimate2446>
85. Johansson, M., Christensen, T.R., Åkerman, H.J., and Callaghan, T.V. (2006). What determines the current presence or absence of permafrost in the Torneträsk region, a sub-arctic landscape in northern Sweden? *Ambio* 35, 190-197. [https://doi.org/10.1579/0044-7447\(2006\)35\[190:WDTCP0\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1579/0044-7447(2006)35[190:WDTCP0]2.0.CO;2)
86. Zhang, T., Barry, R.G., Knowles, K., Ling, F. and Armstrong, R.L. (2003). Distribution of seasonally and perennially frozen ground in the Northern Hemisphere. In Phillips, M., Springman, S.M. and Arenson, L.U. (eds), *Permafrost, Proceedings of the 8th International Conference on Permafrost*, Zurich, Switzerland, 21-25 July 2003, Volume 2.
87. Joosten, H. and Couwenberg, J. (2008) Peatlands and Carbon. In: Parish, F., Sirin, A., Charman, D., Joosten, H., Minayeva, T., Silvius, M. & Stringer, L. (eds.) *Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change: Main Report*, Global Environment Centre, Kuala Lumpur and Wetlands International, Wageningen, 99–117. http://www.imcg.net/media/download_gallery/books/assessment_peatland.pdf



88. Abbott, B.W., Jones, J.B., Schuur, E.A.G., Chapin, F.S. III, Bowden, W.B., Bret-Harte, M.S., Epstein, H.E., et al. (2016) Biomass offsets little or none of permafrost carbon release from soils, streams and wildfire: an expert assessment. *Environmental Research Letters*, 11: 034014. doi: 10.1088/1748-9326/11/3/034014
89. Schuster, P. F., Schaefer, K. M., Aiken, G. R., Antweiler, R. C., Dewild, J. F., Gryziec, J. D., Gusmeroli, A., et al. (2018). Permafrost stores a globally significant amount of mercury. *Geophysical Research Letters*, 45, 1463–1471. <https://doi.org/10.1002/2017GL075571>
90. Brown, J., O. Ferriani, J. A. Heginbottom, and E. Melnikov. 2002. Circum-Arctic Map of Permafrost and Ground-Ice Conditions, Version 2. Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center. <https://doi.org/nsidc.org/data/GGD318/versions/2>



Crédit photo : oticki / Shutterstock.com

La solution de l'azote : de la pollution du cycle de l'azote à l'économie circulaire de l'azote

Le défi mondial de la gestion de l'azote

L'Annuaire 2014 du PNUE a mis en lumière l'importance de l'excès d'azote réactif dans l'environnement¹. Ses conclusions sont alarmantes, non seulement du fait de l'ampleur et de la complexité de la pollution azotée, mais aussi en raison du peu de progrès réalisés pour la réduire. Quelques-unes des solutions identifiées ont été déployées à plus grande échelle, tandis que le monde continue de générer de la pollution azotée qui contribue largement à la dégradation de la qualité de l'air, à la détérioration des environnements terrestres et aquatiques, à l'accélération du changement climatique et à l'appauvrissement de la couche d'ozone²⁻¹⁰. Ces impacts freinent la progression vers la réalisation des objectifs de développement durable, car ils entravent la santé humaine, la gestion des ressources, les moyens de subsistance et les économies¹¹⁻¹⁵. Cependant, il y a des signes d'espoir. Les approches de gestion de la pollution azotée se sont transformées au cours des quatre dernières années. Les visions de la

consommation et de la production ont notamment été repensées afin de traiter sérieusement le problème de l'azote¹⁶⁻²⁴.

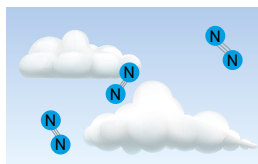
On retrouve l'azote en grande abondance dans l'atmosphère terrestre. Sous la forme de la molécule N_2 , l'azote est inoffensif et compose jusqu'à 78 pour cent de l'air que nous respirons. Les deux atomes d'azote sont rattachés l'un à l'autre par une triple liaison solide ($N\equiv N$) qui rend la molécule extrêmement stable et chimiquement non réactive. L'azote est bénéfique à la planète, car il permet une atmosphère saine dans laquelle la vie peut se développer, tout en évitant l'effet inflammable d'une trop grande quantité d'oxygène. Si l'azote suscite un intérêt d'ordre environnemental, c'est essentiellement parce qu'il est possible de transformer la molécule N_2 en d'autres composés chimiques réactifs. Pour faire simple, les scientifiques désignent toutes les autres formes d'azote comme « azote fixé » ou « azote réactif » (N_r)^{11,25}. Cependant, il existe de nombreuses formes de N_r qui présentent des caractéristiques différentes, aussi bien bénéfiques

que nuisibles, ce qui soulève des difficultés. L'azote réactif est essentiel à toute forme de vie sur Terre. Par exemple, l'ammoniac (NH_3) est à la base des acides aminés, des protéines, des enzymes et de l'ADN et donc du métabolisme de toute forme de vie. De même, le monoxyde d'azote (NO) constitue un indicateur biologique essentiel, tandis que l'ammonium (NH_4^+) et le nitrate (NO_3^-) sont les principales formes nutritives de l'azote, essentielles à la croissance d'une plante. On distingue ici l'un des principaux atouts des composés N_r qui est d'aider à la production de denrées alimentaires et d'aliments pour animaux. Grâce au procédé Haber-Bosch de « fixation » artificielle de l'azote, l'être humain a développé massivement la fabrication d'engrais – ammoniac, urée et nitrates – pour subvenir aux besoins d'une démographie mondiale grandissante²⁶. En parallèle, les humains tirent parti de la fixation biologique naturelle de l'azote qui crée de l'azote réactif (N_r) grâce à des bactéries spécifiques trouvées dans le sol et liées aux racines des légumineuses.

Ces avantages doivent être mis en balance avec la libération considérable d'ammoniac, de nitrate, de monoxyde d'azote (NO), de protoxyde d'azote (N_2O) et de nombreuses autres formes

polluantes d'azote réactif (N_r) qui créent de multiples impacts sur l'environnement. Cette pollution environnementale peut survenir immédiatement après l'utilisation d'un engrais, mais le fumier animal, les excréments humains et d'autres déchets organiques peuvent également libérer de grandes quantités de N_r dans l'environnement. Même si la proportion de N_r libérée dans l'environnement par la fixation biologique de l'azote est considérée comme moindre par rapport aux émanations de nombreux engrais, les excréments animaux et humains contribuent tout de même à la pollution azotée. L'azote réactif est également un sous-produit des activités humaines. Par exemple, les processus de combustion des combustibles fossiles et de la biomasse dégagent du NO et NO_2 , qui ensemble forment l'oxyde d'azote (NOX). Bien que d'importants efforts aient été faits pour réduire les émissions de NO_x générées par les véhicules et la production d'énergie, les émissions ne cessent de croître dans les pays à croissance rapide^{6,12}. Dans l'ensemble, les humains produisent un cocktail d'azote réactif qui menace la santé, le climat et les écosystèmes, faisant de l'azote l'une des sources de pollution les plus importantes auxquelles l'humanité doit faire face. Néanmoins, l'ampleur du problème reste largement méconnue et n'est pas reconnue en dehors des cercles scientifiques.

Les différentes formes d'azote dans l'environnement



Diazoxy (N_2)

Source

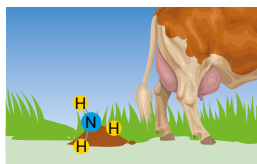
N_2 compose jusqu'à 78 % de l'air que nous respirons.

Intérêts

N_2 maintient une atmosphère stable nécessaire à la vie sur Terre. Il donne sa couleur bleue au ciel.

Effets

N_2 est sans danger et chimiquement non réactif.



Ammoniac (NH_3)

Source

Fumier, urine, engrais et combustion de la biomasse.

Intérêts

NH_3 constitue la base des acides aminés, des protéines et des enzymes. L'ammoniac est fréquemment utilisé comme engrais.

Effets

NH_3 provoque l'eutrophisation et affecte la biodiversité. Il crée des particules dans l'air qui sont néfastes pour la santé.



Monoxyde d'azote (NO) et dioxyde d'azote (NO_2)

Source

Combustion créée par les secteurs des transports, de l'industrie et de l'énergie. Ensemble, NO et NO_2 forment NO_x .

Intérêts

NO est indispensable à la physiologie humaine. NO_2 n'a aucun bienfait connu.

Effets

NO et NO_2 (ou NO_x) sont d'importants polluants atmosphériques, responsables de maladies cardiaques et respiratoires.



Nitrate (NO_3^-)

Source

Eaux usées, agriculture et oxydation des NO_x .

Intérêts

Largement utilisés dans les engrais et les explosifs.

Effets

Il crée des particules dans l'air qui sont néfastes pour la santé. Il provoque l'eutrophisation de l'eau.



Protoxyde d'azote (N_2O)

Source

Agriculture, industrie et combustion.

Intérêts

Utilisé dans les propergols pour fusées et dans le cadre d'interventions médicales comme anesthésiant (« gaz hilarant »).

Effets

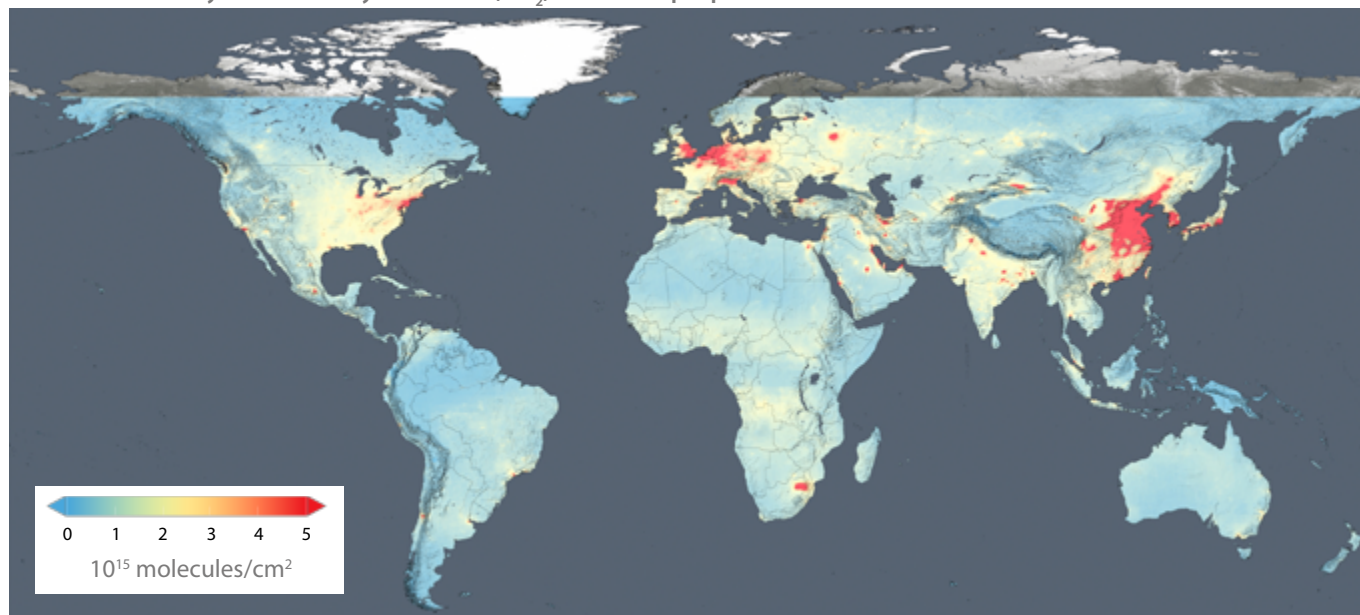
N_2O est un gaz à effet de serre – 300 fois plus puissant que le CO_2 . Il provoque également l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique.

Les éléments connus et les « inconnues connues » concernant l'azote

Le cycle des composés azotés et l'impact de ces composés sur la santé humaine sont bien documentés^{4,12,27,28}. Pourtant, en comparaison de l'influence du carbone sur le changement climatique, peu de débats publics se sont concentrés sur le besoin de prendre des mesures concernant l'azote. La hausse des niveaux de composés N_r dans l'air des villes et des zones agricoles est mesurable, notamment pour ce qui est des NO_x , NH_3 et des fines particules, ou de $PM^{2.5}$. De même, des niveaux élevés de NO_3^- dans les eaux souterraines situées sous les zones agricoles de plusieurs régions du monde et dans les cours d'eau en aval de villes qui disposent d'un traitement des eaux usées non fonctionnel, ou d'aucun traitement, peuvent aussi être mesurés. Les concentrations atmosphériques du gaz à effet de serre N_2O augmentent à un rythme de plus en plus soutenu. Le message est clair : l'être humain modifie largement le cycle mondial de l'azote, ce qui génère de multiples formes de pollution et d'impacts, faisant du N_r l'un des principaux polluants à combattre aux échelles locale et mondiale²².

L'Évaluation de l'azote à l'échelle européenne a permis d'identifier

Concentration moyenne du dioxyde d'azote (NO_2) dans la troposphère en 2014




Le NO_2 est un gaz émis principalement par les voitures, les centrales énergétiques et les activités industrielles. Le NO_2 et les autres NO_x réagissent avec d'autres polluants atmosphériques et forment de l'ozone troposphérique, des pluies acides et des particules néfastes.

Crédit photo : NASA Goddard Space Flight Center

cinq grands domaines qui sont menacés par la pollution azotée : la qualité de l'eau, la qualité de l'air, le bilan des gaz à effet de serre, les écosystèmes et la biodiversité, et la qualité des sols⁴. Elle a également souligné le fait que la pollution à l'azote n'est pas un problème nouveau, mais que la gestion de l'azote doit faire partie des solutions apportées à de nombreux problèmes environnementaux existants. Concernant la production de nourriture, l'utilisation mondiale de l'azote est particulièrement inefficace^{20,29}. Sur l'ensemble de la chaîne alimentaire, seul près de 20 pour cent du N_r utilisé en agriculture se retrouve dans les denrées alimentaires consommées par l'homme^{11,17}. Il est donc inquiétant de constater que 80 pour cent se transforme en N_2 et en polluant pour l'environnement, ce qui montre que la pollution au N_r constitue une perte massive de ressources utiles.

Tandis que les efforts déployés jusqu'à présent ont adopté une approche fragmentée des différentes formes de N_r , étudier toutes ces formes simultanément offre plusieurs avantages. Premièrement, cela permet de commencer à examiner les synergies et la balance entre les intérêts du N_r et ses différentes formes de pollution. Deuxièmement, et ce point est tout aussi important, cette méthode nous incite à quantifier le coût sociétal de l'ensemble des impacts de la pollution azotée afin d'étayer les politiques et de sensibiliser

 Vidéo : Sauver les Grands Lacs des algues toxiques

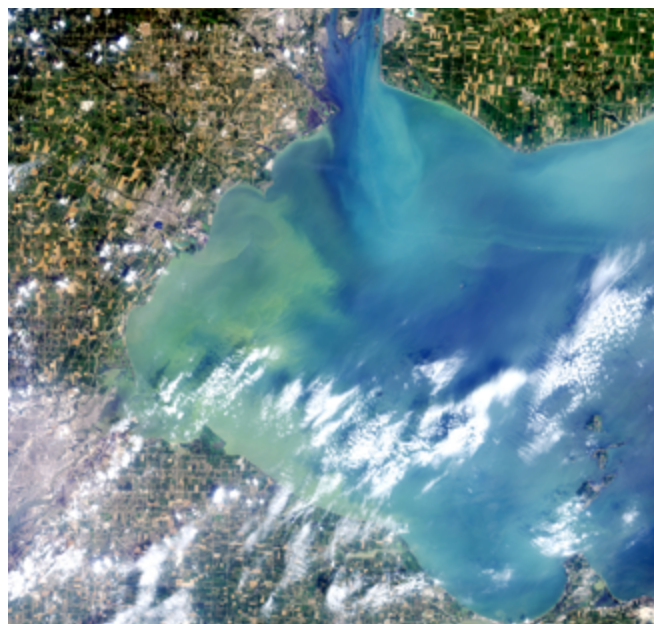


Lien vers la vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=b6JzL4NG26k>
Photo : prolifération d'algues sur l'île Pelée, au sud-est du lac Érié
Crédit photo : Tom Archer / Michigan Sea Grant (www.miseagrant.umich.edu)

© PBS NewsHour


le grand public^{13,30}. L'estimation des coûts peut permettre d'orienter les politiques d'atténuation, néanmoins, le véritable coût de la pollution due au N_f est une inconnue connue, car les impacts semblent être fondamentalement « incommensurables », c'est-à-dire sans commune mesure. Les estimations disponibles, basées sur la volonté des personnes à réduire les risques de pollution au N_f , ou les estimations des coûts engendrés pour les écosystèmes et les services de soins de santé se montrent toutefois utiles et indiquent un coût global compris entre environ 340 milliards USD et 3 400 milliards USD par an¹¹.

Cependant, une méthode de calcul plus simple peut s'avérer tout aussi efficace. À l'échelle mondiale, près de 200 millions de tonnes de N_f sont gaspillées ou déversées dans l'environnement chaque année sous la forme de N_f et de N_2 ^{11,28}. Si l'on multiplie ce chiffre par le prix nominal d'un engrais de 1 USD par kilo d'azote, la perte monétaire totale s'élève à près de 200 milliards USD par an. Ce résultat constitue une forte motivation pour agir. Cette constatation s'avère également pertinente pour les régions présentant un trop faible taux de N_f , comme cela est le cas de l'Afrique subsaharienne, où la diminution de la pollution au N_f contribuerait à consacrer les sources disponibles de N_f au soutien de la production alimentaire³¹. La conversion des composés N_f en N_2 (appelée « dénitrification ») ne constitue pas un moyen sûr d'éviter la pollution au N_f . Elle nécessite plutôt un besoin de nouveaux apports en N_f . En effet, toutes les pertes de N_2 et N_f doivent être réduites si l'on souhaite améliorer l'efficacité d'utilisation de l'azote dans l'ensemble de l'économie.



Prolifération d'algues (formant ce vert laiteux) à l'ouest du lac Érié, entre le Canada et les États-Unis, le 3 août 2014. Les fréquentes proliférations d'algues au bord du lac Érié sont causées par les apports d'azote et de phosphore des rejets agricoles d'engrais et de fumier, des effluents d'eaux usées municipales et des retombées atmosphériques.

Crédit photo : Jeff Schmaltz / NASA Goddard Space Flight Center

 Vidéo : Empreinte de l'homme sur la qualité de l'air mondial



Lien vers la vidéo : https://www.youtube.com/watch?time_continue=7&v=aMnDoXuTG54 © NASA Goddard Space Flight Center
Crédit photo : Doin / Shutterstock.com

Combustions de combustibles fossiles dans les secteurs des transports, de l'énergie et de l'industrie



La combustion à haute température du **charbon**, du **pétrole** et du **gaz naturel** dégage des volumes importants de N_r sous la forme de **NO** et de **NO₂**, formant ensemble les **NO_x**

Le **secteur des transports** est responsable de plus de **65 %** des émissions de **NO_x**

La **combustion des combustibles fossiles** est responsable de **13 %** de la **fixation anthropique de N₂ en N_r**



Fabrication d'engrais

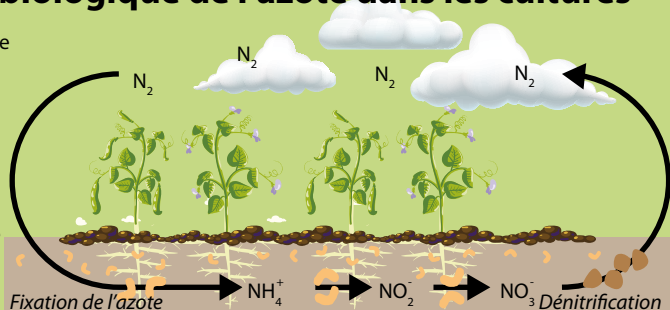
Le procédé Haber-Bosch a été inventé il y a plus de 100 ans pour répondre au besoin croissant de produire en masse des engrais à base d'azote réactif et des explosifs à base d'azote. En s'inspirant de la fixation naturelle de l'azote par les bactéries, **ce procédé fixe le N₂ atmosphérique dans l'ammoniac (NH₃)**.



La **fabrication d'engrais** génère **63 %** de la fixation anthropique de **N₂ en N_r**

Fixation biologique de l'azote dans les cultures

À l'état naturel, le **N₂** peut être converti en **N_r** grâce à la lumière des éclairs et la fixation biologique de l'azote peut être provoquée par une bactérie.

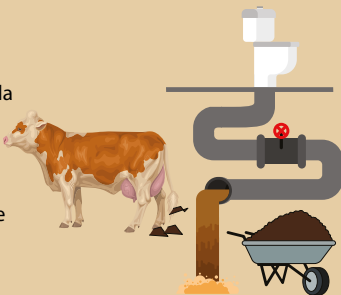


N_r peut aussi être reconverti naturellement en **N₂** par le **processus de dénitrification** réalisé par des bactéries anaérobies. Ces processus naturels permettent de maintenir un cycle de l'azote équilibré, mais le **développement des cultures de plantes fixatrices d'azote**, telles que les légumineuses, a augmenté considérablement les apports et les pertes de **N_r** dans l'environnement.

La **fixation biologique de l'azote dans les cultures** est responsable de **24 %** de la conversion de **N₂ en N_r**

Déchets

Outre le rôle essentiel de la production alimentaire et de la combustion de combustibles fossiles dans les émissions de **N_r**, la **gestion des déchets** s'avère importante pour empêcher davantage de **N_r** de se déverser dans l'environnement.



Les **boues**, les **eaux usées** et les **déchets alimentaires** contiennent des protéines. Près de **16 %** de ces **protéines** sont de **l'azote**

À la différence des boues et des eaux usées, **une grande partie des déchets alimentaires peut être évitée.**



Les **céréales**, les **fruits**, les **légumes**, les **racines** et les **tubercules** constituent la plus grande partie des pertes et des déchets alimentaires

Chaque année, **un tiers** environ de la **nourriture produite** à l'échelle mondiale pour la consommation humaine est **perdue ou gaspillée**

The Nitrogen Cascade

78 %
de l'air est
composé
de N_2

L'azote est essentiel pour chaque organisme vivant. On le retrouve dans l'ADN, les acides aminés, les protéines, les chlorophylles, les enzymes, les vitamines et de nombreux autres composés organiques.

N_2 existe en abondance, mais **ne peut pas être utilisé par le métabolisme** des organismes vivants, à l'exception de certains microbes. Pour le rendre utilisable, N_2 doit être converti en d'autres formes d'azote ou d'azote réactif (N_r).

Les **oxydes d'azote (NO_x)** affectent la qualité de l'air urbain. L'exposition prolongée ou à de fortes doses au NO_2 est associée à des **maladies respiratoires et cardiovasculaires** et à une mortalité plus élevée. Les enfants, les personnes âgées et les personnes asthmatiques sont sensibles au NO_2

Le **protoxyde d'azote (N_2O)** est un gaz à **effet de serre** 300 fois plus puissant que le CO_2 , qui détruit la couche d'ozone

Environ **80 %** des émissions anthropiques de N_2O proviennent de l'agriculture

80 % des émissions mondiales d'**ammoniac (NH_3)** proviennent des activités humaines, principalement des **épandages d'engrais** et de l'**élevage animal**

Ensemble, l'ammoniac et l'acide nitrique réagissent et forment des **particules** de nitrate d'ammonium qui peuvent provoquer des **maladies respiratoires ou cardiaques**

Mélangées aux précipitations, les émissions de N_r créent des **pluies acides**

50 % des engrais azotés utilisés dans les champs sont sources de **pollution** ou sont gaspillés pour reconverter N_r en N_2 grâce à la **dénitrification**

Le **nitrate (NO_3^-)** utilisé en agriculture peut s'infiltrer dans les sols, puis dans les **eaux souterraines**, affectant la qualité des réserves d'**eau potable** et présentant un risque important pour la **santé humaine**

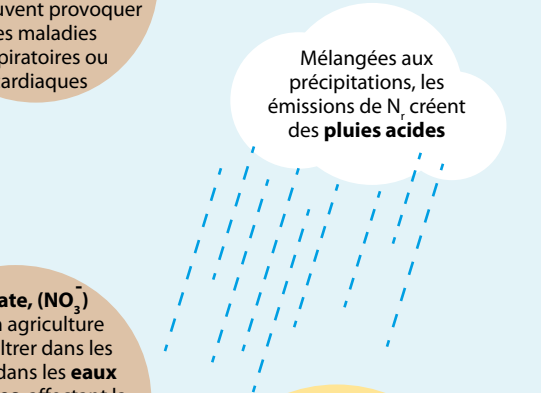
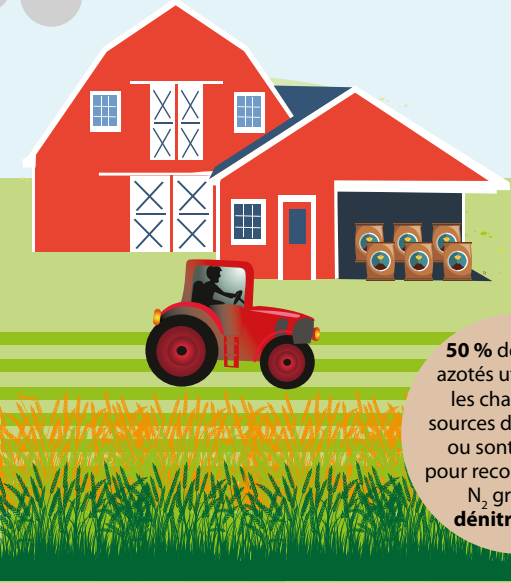
L'enrichissement en azote favorise l'**eutrophisation**, causant la **prolifération d'algues néfastes**, la **création de zones mortes** et la **perte de biodiversité** dans les environnements d'eau douce et marins



En 2016, **105 millions de tonnes métriques** d'engrais azotés ont été utilisées à l'échelle mondiale, soit l'équivalent de **4,2 millions de camions** d'engrais

L'utilisation à long terme des engrais à base d'ammonium **acidifie les sols** et affecte la production agricole

La pollution à l'ammoniac entraîne une eutrophisation, l'acidification des sols et la toxicité directe des organismes, **réduisant la richesse et la diversité des espèces**



Fragmentation des politiques et solutions d'économie circulaire

Les recherches scientifiques sur l'azote ont été fragmentées entre les milieux naturels et les formes de N_r et il en va de même pour les politiques sur l'azote. Les impacts de N_r touchent plusieurs domaines d'action, tels que la pollution atmosphérique, le climat, l'eau douce et les espaces marins, la biodiversité, la santé et la sécurité alimentaire. Cette fragmentation, très répandue dans les politiques nationales de nombreux pays, se retrouve également dans les objectifs de développement durable (ODD). L'examen des ODD et des indicateurs sous-jacents montre que l'azote concerne presque tous les domaines, mais est quasiment invisible. Actuellement, seule la cible 14.1 des ODD relative à la vie aquatique est en train de se doter d'un indicateur lié à l'azote³². Les propositions d'intégrer l'efficacité d'utilisation de l'azote ou les pertes d'azote aux indicateurs des ODD n'ont pas été acceptées jusqu'à présent^{20,33}.

Une telle fragmentation des politiques tout au long du cycle de l'azote a des répercussions flagrantes sur les choix politiques. Par exemple, les politiques de réduction de la pollution de l'eau au NO₃- dans l'Union européenne ont conduit à l'interdiction d'épandre du fumier dans les champs pendant les « périodes de fermeture » hivernales. Cependant, cette décision a entraîné une augmentation de l'épandage de fumier pendant le printemps et l'été, faisant augmenter les concentrations atmosphériques maximales d'ammoniac³⁴. Cet effet dans le temps n'a pu être évité en partie que dans quelques pays de l'UE, en obligeant un épandage de fumier faible en émissions de NH₃³⁵. Un autre exemple concerne la recommandation de garder les troupeaux en intérieur pour réduire les émissions de N₂O ayant une incidence sur le climat. Toutefois, même les meilleures mesures techniques visant à limiter les émissions n'ont pas permis d'enrayer la hausse des émissions de NH₃³⁶. On constate des contrastes similaires concernant les sources de combustion. Par exemple, l'introduction de catalyseurs dans les années 1990 pour réduire les émissions de NO_x a conduit à une augmentation des émissions de N₂O et de NH₃.

Ces exemples montrent combien, pour faire face à de nombreuses menaces, il est urgent de rassembler les données scientifiques et les politiques sur l'azote^{11,30,37}. Par exemple, le Plan d'action pour le gel de l'augmentation de l'utilisation des engrais mis en œuvre en 2015 par le gouvernement chinois visait à prévenir la hausse de l'utilisation des engrais de synthèse d'ici 2020 sans réduire la production alimentaire, permettant ainsi de limiter toutes les formes de pollution liée au N_r. Il a été suggéré de se concentrer ensuite sur les blocages socioéconomiques liés à la taille des exploitations, à l'innovation et au transfert d'informations³⁸.



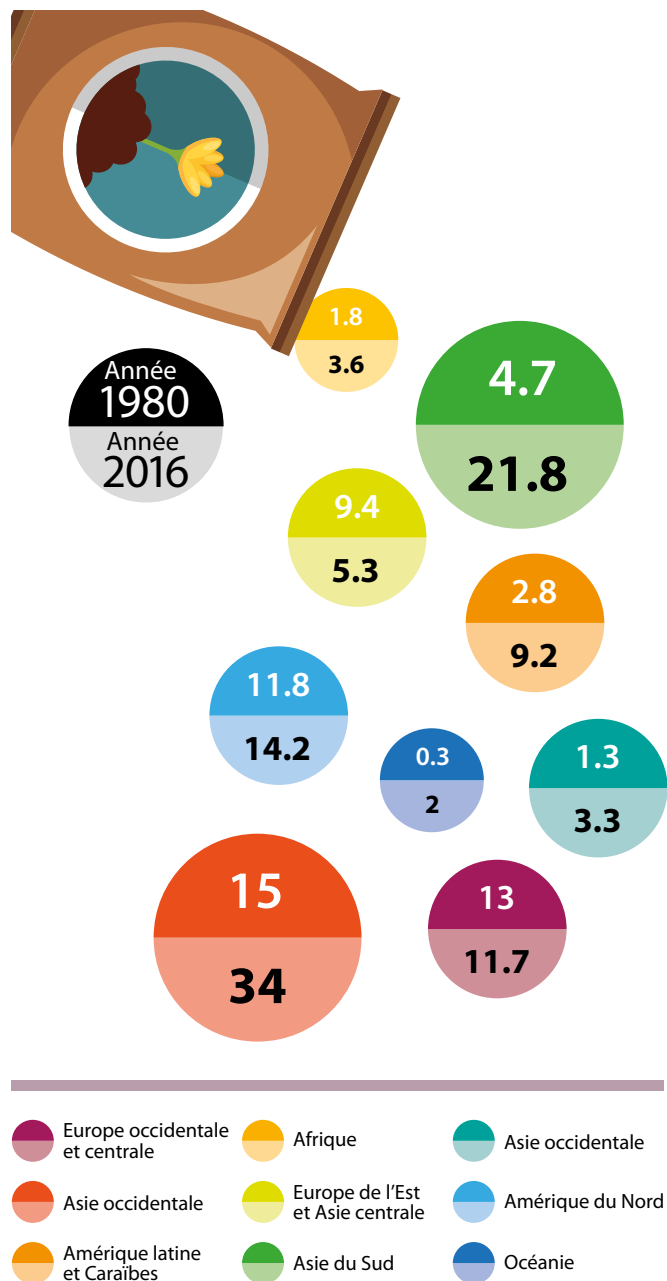
Azote, nutriments et économie circulaire

Le train de mesures relatives à l'économie circulaire adopté par l'Union européenne en 2015 vise à améliorer l'efficacité des ressources utilisées tout au long de la chaîne de valeur, à savoir la production, la consommation, la gestion des déchets et le recyclage des matières premières de récupération^{42,43}. Le plan reconnaît que la gestion et le commerce des engrais organiques et des engrais à base de fumier sont essentiels pour récupérer et recycler les nutriments biologiques, tels que l'azote et le phosphore, dans l'économie de l'Union européenne. La nouvelle réglementation encourage la production durable et innovante d'engrais organiques à partir des biodéchets disponibles localement, des sous-produits animaux comme le fumier séché ou traité par digestion, et d'autres résidus agricoles. Actuellement, seuls 5 pour cent des déchets organiques sont recyclés et utilisés comme engrais dans l'Union européenne. Autoriser la libre circulation transfrontière des engrais organiques permettrait de créer un nouveau marché et une nouvelle chaîne d'approvisionnement des matières premières de récupération au sein de l'UE. Selon les estimations, près de 120 000 emplois pourraient ainsi être créés. La récupération de l'azote à partir des déchets organiques devrait permettre de réduire ou de supprimer le besoin en engrais azotés inorganiques ou de synthèse, dont la fabrication présente une empreinte carbone et énergétique importante. Parallèlement, cette récupération contribuera à réduire davantage les pertes d'azote réactif dans l'environnement.

L'économie circulaire de l'azote et d'autres nutriments commence dans les exploitations agricoles, où la réduction des pertes permet un apport en nutriments plus efficace pour soutenir la croissance des cultures. Pour cela, il est indispensable de fournir des outils pratiques aux agriculteurs pour les aider à réduire leurs intrants d'azote dans le cadre de l'objectif de diminution de la pollution azotée grâce à des méthodes d'atténuation. Ces outils doivent s'accompagner d'analyses appropriées du sol de sorte que les agriculteurs puissent ajuster en toute confiance l'apport en nutriments.

Néanmoins, il existe également un potentiel énorme pour ce qui est de renforcer la réutilisation de l'azote et d'autres nutriments pour la production de produits commercialisables et à valeur ajoutée. La transformation de la société en une « économie à faible émission de carbone » (grâce notamment à l'utilisation de sources d'énergie renouvelable) représente un investissement majeur et l'azote constitue une grande ouverture économique s'il est investi dans une « économie circulaire de l'azote ».

Consommations régionales de tous les types d'engrais azotés en 1980 et 2016 (en millions de tonnes métriques)



Source des données : Association internationale de l'industrie des engrais
(<https://www.ifastat.org/databases/plant-nutrition>)

Par ailleurs, il est facile d'envisager la transformation du cycle de l'azote dans l'agriculture en un modèle d'économie circulaire de l'azote. L'amélioration de l'efficacité des engrais et la réduction des pertes d'azote dues aux engrais, à la fixation biologique de l'azote, à l'urine et au fumier permettent à l'azote frais d'atteindre les aliments et les produits bioénergétiques souhaités. Dans le même temps, le retraitement des excréta humains et des excréments du bétail en nouveaux engrais offre la possibilité de commercialiser des produits d'engrais recyclés.

La situation est très différente pour ce qui est des sources de combustion du NO_x , car toutes les technologies disponibles, telles que la réduction catalytique et non catalytique des NO_x , se concentrent sur le processus de dénitrification de NO_x en N_2 . Ces technologies représentent pourtant une perte massive de ressources. Multiplier les émissions mondiales de NO_x par le prix de l'engrais azoté donne des ressources annuelles de 50 milliards USD à l'échelle mondiale, tout en soulignant le besoin de recapturer les NO_x sous la forme de NO_3^- grâce aux technologies^{11,39}.

En Inde, des perspectives financières étayent les politiques du gouvernement depuis 2016 et imposent que tous les engrais à base d'urée soient enrobés d'huile de neem afin de réduire les pertes de N_r dans l'environnement et éviter que les subventions ne soient utilisées pour des applications non agricoles de l'urée. Le même principe a poussé le Premier ministre indien à appeler, en novembre 2017, tous les agriculteurs à réduire de moitié leur utilisation d'engrais d'ici 2020, ainsi que leur recours aux subventions de l'État de l'initiative *Zero Budget Natural Farming (ZBNF)* dans certains États de l'Inde. Le mouvement ZBNF s'attache à éviter les intrants externes et coûteux d'engrais et de pesticides et à empêcher que les agriculteurs ne s'endettent, tout en favorisant des solutions biologiques pour améliorer la composition organique, la biologie et la fertilité du sol. Dans l'État d'Andhra Pradesh, l'expansion de l'initiative ZBNF à des milliers d'agriculteurs enthousiastes est soutenue par des partenariats entre BNP Paribas, le Programme des Nations Unies pour l'environnement et le Centre mondial d'agroforesterie (CIRAF), par l'intermédiaire de la plateforme Sustainable India Finance Facility (SIFF). Cette approche innovante s'appuie sur l'octroi de prêts pour soutenir l'investissement et le développement financé par le gouvernement, car moins de subventions à l'achat d'engrais seront nécessaires si l'utilisation d'engrais diminue^{40,41}.

Vers une approche internationale holistique de l'azote

La bonne nouvelle est qu'une poignée de pays mettent à l'essai des approches plus intégrées de gestion de l'azote. L'Allemagne, par exemple, a rapidement réagi à l'Évaluation de l'azote à l'échelle européenne en travaillant à l'élaboration d'une stratégie de gestion de l'azote intégrée^{23,44}. Pour de nombreux pays, la difficulté réside dans le fait que la réponse à la menace de l'azote est répartie entre plusieurs ministères, compliquant ainsi la coordination de l'action. Au Brésil, par exemple, l'agriculture s'étend encore sur de larges zones et le besoin de mieux séparer les productions animales et végétales ayant un impact environnemental est toujours présent⁴⁵. À l'échelle internationale, les impacts transfrontières du N₂ nécessitent également des actions politiques et législatives claires.

Les membres de l'Initiative internationale pour l'azote (INI) se sont largement penchés sur ces défis. La première étape a consisté à collaborer avec le Programme des Nations Unies pour l'environnement afin d'élaborer une approche coordonnée du soutien scientifique venant étayer le développement des politiques internationales, sous la forme du « Système international de gestion de l'azote ».

Avec le soutien du Fonds pour l'environnement mondial et de 80 organisations partenaires, le Système international de gestion de l'azote élabore actuellement des lignes directrices sur la gestion de l'azote, l'intégration des flux et des impacts, l'évaluation du rapport

▶ Vidéo : Pollution de l'air par l'agriculture



Lien vers la vidéo : https://www.youtube.com/watch?v=07P_wXTTusI
Crédit photo : gillmar / Shutterstock.com

© Union européenne

▶ Vidéo : Quelle est l'importance des engrais pour l'environnement et pour votre chiffre d'affaires



Lien vers la vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=5TzzPOy1T3g>
Crédit photo : Visual Generation / Shutterstock.com

© Environmental Defense Fund

coût/avantage et les futurs scénarios liés à l'azote. Par ailleurs, le système met sur pied des démonstrations régionales multipays pour montrer en quoi la gestion holistique de l'azote peut porter ses fruits. L'un des principaux résultats apportés par cette forme de gestion est l'évaluation mondiale de l'azote qui devrait être publiée en 2022.

Le prochain défi consiste à élaborer un cadre politique plus cohérent pour le cycle de l'azote. La multitude de résolutions adoptées par l'Assemblée des Nations Unies pour l'environnement montre combien l'adoption d'un tel cadre politique est essentielle : 2/6 (Accord de Paris), 2/7 (produits chimiques et déchets), 2/8 (consommation et production durables), 2/9 (déchets alimentaires), 2/10 (océans), 2/12 (récifs coralliens), 2/24 (dégradation des terres), 3/4 (environnement et santé), 3/6 (sols), 3/8 (qualité de l'air) et 3/10 (pollution des eaux)^{46,47}. La Résolution 3/8 le formule très bien en encourageant les gouvernements « à tirer parti des effets synergiques d'une gestion efficace de l'azote dans l'optique de réduire la pollution de l'air et des eaux douces et marines ».

Les récentes discussions engagées dans les communautés politiques et scientifiques ont abordé la manière dont coordonner plus efficacement l'engagement politique relatif à l'azote⁴⁸. Quelques possibilités figurent ci-après :

Option 1 : Fragmentation de la gestion de l'azote à travers différents cadres politiques – status quo

Option 2 : Gestion de l'azote par un seul cadre politique existant. Cette solution constitue un défi concernant le mandat du cadre responsable, car les accords multilatéraux sur l'environnement existants n'abordent qu'une partie du problème.

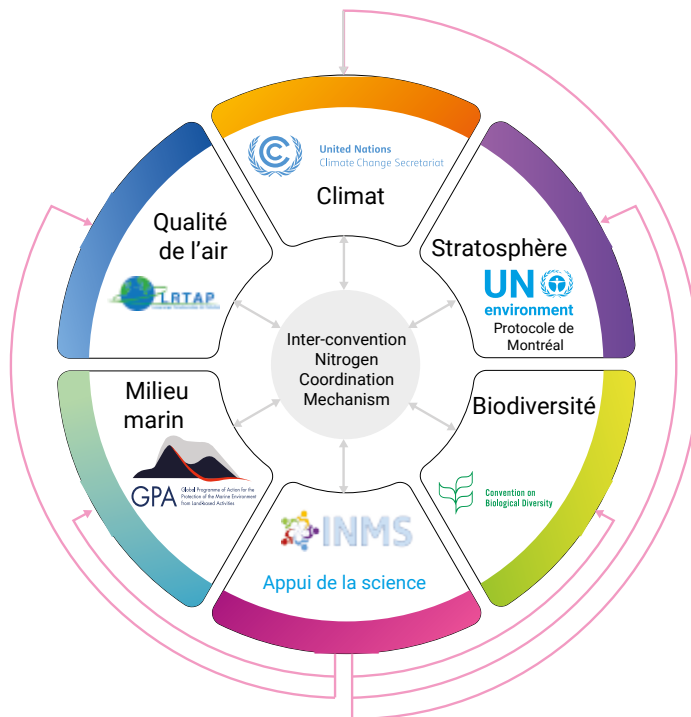
Option 3 : Adoption d'une nouvelle convention internationale pour faire face au défi de l'azote. Cette approche est actuellement peu probable.

Option 4 : Mise en place d'un mécanisme interconventions de coordination de l'azote qui fournit une tribune intergouvernementale de coopération interinstitutionnelle concernant l'azote, éventuellement sous l'égide de l'Assemblée des Nations Unies pour l'environnement.

À l'heure actuelle, aucun mécanisme de coordination n'a été mis en place, ce qui limite le partage d'enseignements entre les accords multilatéraux sur l'environnement existants et ne permet pas de s'assurer que le Système international de gestion de l'azote coopère avec plusieurs accords multilatéraux sur l'environnement. Un mécanisme de coordination permettrait d'impliquer activement les États membres et les accords multilatéraux sur l'environnement concernés. Les grands groupes et les parties prenantes du Programme des Nations Unies pour l'environnement facilitent déjà l'implication des entreprises et de la société civile. Il convient donc de noter que l'option 4 n'est qu'une possibilité. Il appartient aux gouvernements de choisir l'approche la plus flexible, performante et rentable.

Toutefois, cette discussion met en lumière un autre avantage. Il apparaît de plus en plus évident que la société mondiale a besoin d'adopter une approche holistique de la science et des politiques concernant l'azote. Premièrement, la perspective multisectorielle axée sur plusieurs sources permet d'étudier les synergies et les compromis. Elle s'avère bénéfique pour l'agriculture et l'industrie en fournissant une base plus cohérente pour la prise de décisions commerciales. Deuxièmement, l'approche holistique constitue la base de développement de l'économie circulaire qui s'avère vitale pour mobiliser le changement. En outre, une telle approche de l'azote servirait d'exemple quant à la manière dont on pourrait coordonner plus efficacement les futures politiques environnementales pour répondre aux différents problèmes rencontrés. Les leçons relatives à l'interaction des sources de pollution sont susceptibles d'être de plus en plus utiles au Programme des Nations Unies pour l'environnement, au fur et à mesure qu'il progresse vers la réalisation de son objectif pour une planète non polluée.

Mécanisme interconventions de coordination de l'azote



🎥 Vidéo : Les émissions agricoles d'ammoniac : un véritable défi



Lien vers la vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=y0IG5mOWyAs>
Crédit photo : Mark Sutton

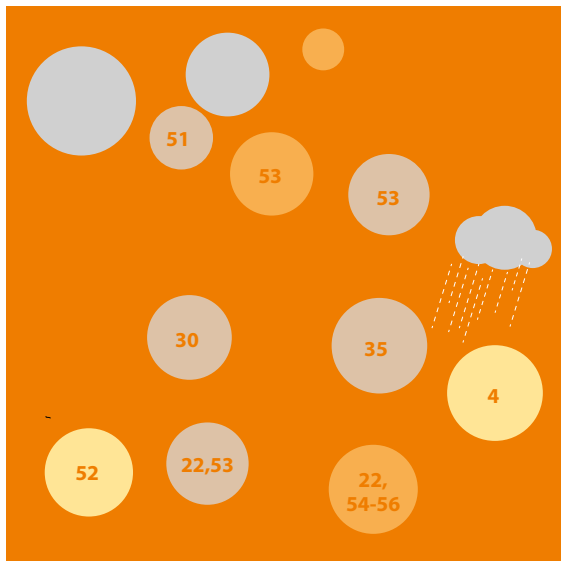
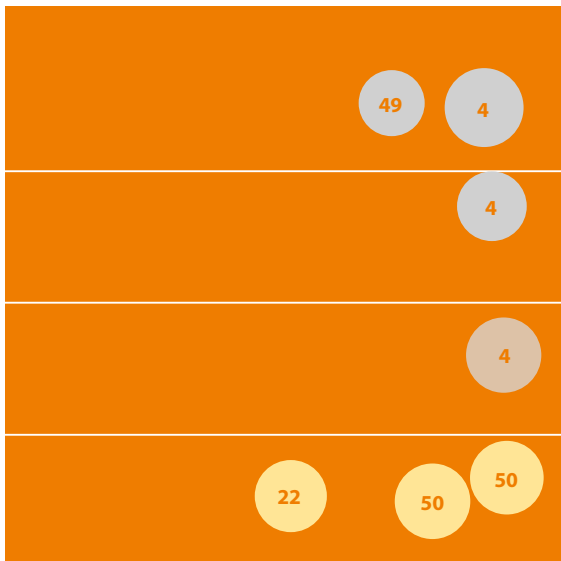
© CAFREtv

Bibliographie

- United Nations Environment Programme (2014). *UNEP Year Book 2014*. Nairobi. <http://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/9240>
- Duce, R.A., LaRoche, J., Altieri, K., Arrigo, K.R., Baker, A.R., Capone, D.G. *et al.* (2008). Impacts of atmospheric anthropogenic nitrogen on the open ocean. *Science* 320, 893–897. <https://doi.org/10.1126/science.1150369>
- Voss, M., Bange, H.W., Dippner, J.W., Middelburg, J.J., Montoya, J.P. and Ward, B. (2013). The marine nitrogen cycle: recent discoveries, uncertainties and the potential relevance of climate change. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 368, 20130121–20130121. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0121>
- Sutton, M.A., Howard, C.M., Erismann, J.W., Billen, G., Bleeker, A., Grennfelt, P. van Grinsven, H. and Grizzetti, B. (eds.) (2011). *The European Nitrogen Assessment*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. <http://www.nine-esf.org/node/360/ENA-Book.html>
- Pearce, F. (2018). Can the world find solutions to the nitrogen pollution crisis? *Yale Environment* 360, 6 February. <http://e360.yale.edu/features/can-the-world-find-solutions-to-the-nitrogen-pollution-crisis>
- Liu, X., Zhang, Y., Han, W., Tang, A., Shen, J., Cui, Z. *et al.* (2013). Enhanced nitrogen deposition over China. *Nature* 494, 459–462. <http://dx.doi.org/10.1038/nature11917>
- Fowler, D., Steadman, C.E., Stevenson, D., Coyle, M. Rees, R.M. Skiba, U.M. *et al.* (2015). Effects of global change during the 21st century on the nitrogen cycle. *Atmospheric Chemistry and Physics* 15, 13849–13893. <https://doi.org/10.5194/acp-15-13849-2015>
- Lelieveld, J., Evans, J.S., Fnais, M., Giannadaki, D. and Pozzer, A. (2015). The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature* 525, 367–371. <https://doi.org/10.1038/nature15371>
- United Nations Environment Programme (2013). *Drawing Down N₂O to Protect Climate and the Ozone Layer: A UNEP Synthesis Report*. Alcamo, J., Leonard, S.A., Ravishankara, A.R. and Sutton, M.A. (eds.) Nairobi. <http://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8489>
- Suddick, E.C., Whitney, P., Townsend, A.R. and Davidson, E.A. (2012). The role of nitrogen in climate change and the impacts of nitrogen–climate interactions in the United States: foreword to thematic issue. *Biogeochemistry* 114, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10533-012-9795-z>
- Sutton, M.A., Bleeker, A., Howard, C.M., Bekunda, M., Grizzetti, B., de Vries, W. *et al.* (2013). Our nutrient world: the challenge to produce more food and energy with less pollution. Edinburgh, UK: NERC/Centre for Ecology & Hydrology. <http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/500700/>
- Abrol, Y.P., Adhya, T.K., Aneja, V.P., Raghuram, N., Pathak, H., Kulshrestha, U., Sharma, C. and Singh, B. (eds.) (2017). *The Indian Nitrogen Assessment: Sources of Reactive Nitrogen, Environmental and Climate Effects, Management Options, and Policies*. UK: Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/book/9780128118368/the-indian-nitrogen-assessment>
- Van Grinsven, H.J.M., Holland, M., Jacobsen, B.H., Klimont, Z., Sutton, M.A. and Willems, W.J. (2013). Costs and benefits of nitrogen for Europe and implications for mitigation. *Environmental Science & Technology* 47, 3571–3579. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es303804g>
- Organisation for Economic Cooperation and Development (2018). *Human Acceleration of the Nitrogen Cycle: Managing Risk and Uncertainty*. Paris. <https://doi.org/10.1787/9789264307438-en>
- Brunekreef, B., Harrison, R.M., Künzli, N., Querol, X., Sutton, M.A., Heederik, D.J.J. *et al.* (2015) Reducing the health effect of particles from agriculture. *Lancet Respiratory Medicine* 3(11), 831–832. [https://doi.org/10.1016/S2213-2600\(15\)00413-0](https://doi.org/10.1016/S2213-2600(15)00413-0)
- Westhoek, H., Lesschen, J.P., Rood, T., Wagner, S., De Marco, A., Murphy-Bokern, D. *et al.* (2014). Food choices, health and environment: Effects of cutting Europe's meat and dairy intake. *Global Environmental Change* 26, 196–205. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.02.004>
- Westhoek, H., Lesschen, J.P., Rood, T., Leip, A., Wagner, S., De Marco, A. *et al.* (2015). *Nitrogen on the Table: The influence of food choices on nitrogen emissions and the European environment*. European Nitrogen Assessment Special Report on Nitrogen and Food. UK: Centre for Ecology & Hydrology. https://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/Nitrogen_on_the_Table_Report_WEB.pdf
- Springmann, M., Clark, M., Mason-D'Croz, D., Wiebe, K., Bodirsky, B.J., Lassaletta, L. *et al.* (2018). Options for keeping the food system within environmental limits. *Nature* 562, 519–525. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0594-0>
- Brownlie W.J., Howard, C.M., Pasda, G., Nave, B., Zerulla, W. and Sutton, M.A. (2015). Developing a global perspective on improving agricultural nitrogen use. *Environmental Development* 15, 145–151. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2015.05.002>
- EU Nitrogen Expert Panel (2015). *Nitrogen Use Efficiency (NUE) - an indicator for the utilization of nitrogen in food systems*. Wageningen, NL: Wageningen University. <http://www.eunep.com/wp-content/uploads/2017/03/N-ExpertPanel-NUE-Session-1.pdf>
- Sutton, M.A., Howard, C.M., Brownlie, W.J., Skiba, U., Hicks, K.W., Winiwarter, W. *et al.* (2017). The European Nitrogen Assessment 6 years after: What was the outcome and what are the future research challenges? In *Innovative Solutions for Sustainable Management of Nitrogen*. Dalgaard, T. *et al.* (eds). Aarhus, Denmark, 25–28 June. Aarhus, DK: Aarhus University and the dNmark Research Alliance. http://sustainableconference.dnmark.org/wp-content/uploads/2017/06/JYC_Final_Book-of-abstracts160617.pdf
- Reis, S., Bekunda, M. Howard, C.M., Karanja, N. Winiwarter, W., Yan, X. *et al.* (2016). Synthesis and review: Tackling the nitrogen management challenge: from global to local scales. *Environmental Research Letters* 11, 120205. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/12/120205/meta>
- Umweltbundesamt (2015). *Reactive Nitrogen in Germany: Causes and effects - measures and recommendations*. Dessau-Roßlau: The German Environment Agency (Umweltbundesamt). <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/reactive-nitrogen-in-germany>

24. Tomich T.P., Brodt, S.B., Dahlgren, R.A. and Scow, K.M. (eds.) (2016). Davis, CA: University of California Press. <http://asi.ucdavis.edu/programs/sarep/research-initiatives/are/nutrient-mgmt/california-nitrogen-assessment>
25. Galloway J.N., Townsend, A.R., Erisman, J.W., Bekunda, M., Cai, Z., Freney, J.R. et al. (2008). Transformation of the Nitrogen Cycle: Recent Trends, Questions and Potential Solutions. *Science* 320, 889-892. <https://doi.org/10.1126/science.1136674>
26. Erisman, J.W., Sutton, M.A., Galloway, J., Klimont, Z. and Winiwarter, W. (2008). How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geoscience* 1, 636-639. <https://doi.org/10.1038/ngeo325>
27. Davidson, E.A., Davidson, M.B., David, J.N., Galloway, C.L., Goodale, R., Haeuber, J.A. . (2012). Excess nitrogen in the U.S. environment: trends, risks, and solutions. 15. The Ecological Society of America, Washington. <http://www.esa.org/esa/wp-content/uploads/2013/03/issuesinecology15.pdf>
28. Fowler, D., Coyle, M., Skiba, U., Sutton, M.A., Cape, J.N., Reis, S. (2013). The global nitrogen cycle of the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society, B*. 368, 2130164. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2013.0164>
29. Bleeker, A., Sutton, M., Winiwarter, W. and Leip, A. (2013) *Economy Wide Nitrogen Balances and Indicators: Concept and Methodology*. OECD, Environment Directorate, Environment Policy Committee, Working Party on Environmental Information, Paris, France ENV/EPOC/WPEI(2012)4/REV1. Paris. <http://inms.iwlearn.org/inms-meeting-lisbon/NBalancesandIndicators.pdf>
30. Sutton, M.A., Oenema, O., Erisman, J.W., Leip, A., van Grinsven, H. and Winiwarter, W. (2011). Too much of a good thing. *Nature* 472, 159-161. <https://doi.org/10.1038/472159a>
31. Masso, C., Baijukya, F., Ebanyat, P., Bouaziz, S., Wendt, J., Bekunda, M. et al. (2017). Dilemma of nitrogen management for future food security in sub-Saharan Africa – a review. *Soil Research* 55(6), 425-434. <https://doi.org/10.1071/SR16332>
32. United Nations Statistic Division (2018). *Global indicator framework for the Sustainable Development Goals and targets of the 2030 Agenda for Sustainable Development*. New York. A/RES/71/313 E/CN.3/2018/2. <https://unstats.un.org/sdgs/indicators/indicators-list/>
33. Zhang, X., Davidson, E.A., Mauzerall, D.L., Searchinger, T.D., Dumas, P. and Shen, Y. (2015). Managing nitrogen for sustainable development. *Nature* 528, 51-59. <https://doi.org/10.1038/nature15743>
34. Sutton, M.A., Reis, S., Riddick, S.N., Dragosits, U., Nemitz, E., Theobald, M.R. et al. (2013). Toward a climate-dependent paradigm of ammonia emission & deposition. *Phil. Trans. Roy. Soc. (Ser. B)* 368, 20130166. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2013.0166>
35. Van Grinsven, H.J., Tiktak, A. and Rougoor, C.W. (2016). Evaluation of the Dutch implementation of the nitrates directive, the water framework directive and the national emission ceilings directive. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences* 78, 69-84. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2016.03.010>
36. Bittman, S., Dedina, M., Howard C.M., Oenema, O. and Sutton, M.A. (eds.) (2014). Options for Ammonia Mitigation: Guidance from the UNECE Task Force on Reactive Nitrogen. Edinburgh: Centre for Ecology and Hydrology. <http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/510206/1/N510206CR.pdf>
37. Gu, B.J., Ju, X.T., Chang, J., Ge, Y. and Vitousek, P.M. (2015). Integrated reactive nitrogen budgets and future trends in China. 112, 8792-8797. <https://doi.org/10.1073/pnas.1510211112>
38. Ju, X.T., Gu, B.J., Wu, Y.Y. and Galloway, J.N. (2016). Reducing China's fertilizer use by increasing farm size. 41, 26-32. <https://doi.org/10.1073/pnas.1806645115>
39. Mangano E., Kahr, J., Wright, P.A. and Brandani, S. (2016). Accelerated degradation of MOFs under flue gas conditions. *Faraday Discussions*, 192. <https://doi.org/10.1039/C6FD00045B>
40. Food and Agriculture Organization (2016). Zero Budget Natural Farming in India. *Agroecology Knowledge Hub Trends in Biosciences Circular Economy Package: Questions & Answers*. 2 December. http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-15-6204_en.htm Closing the loop – An EU action plan for the Circular Economy. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions <https://www.eea.europa.eu/policy-documents/com-2015-0614-final>.
41. Bishnoi, R. and Bhati, A. (2017) An Overview : Zero Budget Natural Farming. *Trends in Biosciences* 10(46), 9314-9316
42. European Commission (2015). Circular Economy Package: Questions & Answers. 2 December. http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-15-6204_en.htm
43. European Commission (2015). Closing the loop – An EU action plan for the Circular Economy. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. COM(2015) 614 final. <https://www.eea.europa.eu/policy-documents/com-2015-0614-final>
44. Sachverständigenrat für Umweltfragen (2015). *Nitrogen: Strategies for resolving an urgent environmental problem - Summary*. Berlin. https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/EN/02_Special_Reports/2012_2016/2015_01_Nitrogen_Strategies_summary.html
45. Austin, A.T., Bustamante, M.M.C., Nardoto, G.B., Mitre, S.K., Perez, T., Ometto, J.P.H.B. et al. (2013). Latin America's Nitrogen Challenge. *Science* 340, 149. <https://doi.org/10.1126/science.1231679>
46. United Nations Environment Programme (2018). *Resolutions and Decisions: UNEA 2*. Nairobi. <http://web.unep.org/environmentassembly/resolutions-and-decisions-unea-2>
47. United Nations Environment Programme (2018). *Documents: Third session of the UN Environment Assembly*. Nairobi. <http://web.unep.org/environmentassembly/node/40741>
48. Sutton, M. (2018). The global nitrogen challenge: a case of too much and too little nutrients. A presentation to the Committee of Permanent Representatives to the United Nations Environment Programme, 24 October 2018. <http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/26379/Sutton%20Global%20Nitrogen%20Challenge%20%28UNEP%20CPR%20Oct%202018%29.pdf?sequence=24&isAllowed=y>

Références des illustrations



49. Zhang, R., Tie, X. and Bond, D.W. (2002). Impacts of anthropogenic and natural NOx sources over the U.S. on tropospheric chemistry. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100(4), 1505-1509. <https://doi.org/10.1073/pnas.252763799>
50. FAO (2011). *Global food losses and food waste – Extent, causes and prevention*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. <http://www.fao.org/docrep/014/mb060e/mb060e00.pdf>
51. Ussiri D., Lal R. (2013) *Global Sources of Nitrous Oxide*. In: *Soil Emission of Nitrous Oxide and its Mitigation*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5364-8_5
52. IFA (2018). *International Fertilizer Association database (IFASTAT)*. International Fertilizer Association, Paris. <https://www.ifastat.org/>
53. Behera, S.N., Sharma, M., Aneja, V.P. and Balasubramanian, R. (2013). Ammonia in the atmosphere: a review on emission sources, atmospheric chemistry and deposition on terrestrial bodies. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(11), 8092-8131. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2051-9>
54. Field, C.D., Dise, N.B., Payne, R.J., Britton, A.J., Emmett, B.A., Helliwell, R.C., Hughes, S, et al. 2014. The Role of Nitrogen Deposition in Widespread Plant Community Change Across Semi-natural Habitats. *Ecosystems*, 17, 864-877. <https://doi.org/10.1007/s10021-014-9765-5>
55. Payne, R. J., N. B. Dise, C. J. Stevens, D. J. Gowing, and Begin Partners. 2013. 'Impact of Nitrogen Deposition at the Species Level'. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(3): 984–87. <https://doi.org/10.1073/pnas.1214299109>
56. Sheppard, L. J., Leith, I. D., Mizunuma, T., Cape, N., Crossley, A., Leeson, S., Sutton, M.A., Dijk, N. and Fowler, D. (2011). Dry deposition of ammonia gas drives species change faster than wet deposition of ammonium ions: evidence from a long-term field manipulation'. *Global Change Biology*, 17: 3589-3607. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02478.x>







*Inondation de Bangkok en 2011, Thaïlande
Crédit photo : Wutthichai / Shutterstock.com*

Mauvaise adaptation au changement climatique : éviter les pièges se trouvant sur la voie de l'évolutivité

Définir l'adaptation et la mauvaise adaptation dans le cadre du changement climatique

Les métaphores sont essentielles à la pensée logique. Les termes « adaptation » et « mauvaise adaptation » utilisés dans le cadre de la recherche et des politiques relatives au changement climatique proviennent de la biologie évolutionniste¹. Essentiellement, des mutations génétiques surviennent spontanément à chaque génération d'une espèce et un processus de sélection naturelle, imposé par l'environnement extérieur, décide de la réussite ou de l'échec de ces mutations et, par conséquent, de l'espèce. Ce concept peut s'appliquer aux bactéries, aux plantes, aux animaux, aux écosystèmes et même aux comportements humains. L'une des principales caractéristiques d'une adaptation réussie est l'évolutivité, c'est-à-dire la capacité d'une espèce à continuer à évoluer en s'adaptant aux conditions environnantes qui se modifient². En biologie évolutionniste, une caractéristique typique d'une mauvaise adaptation est l'absence d'évolutivité.

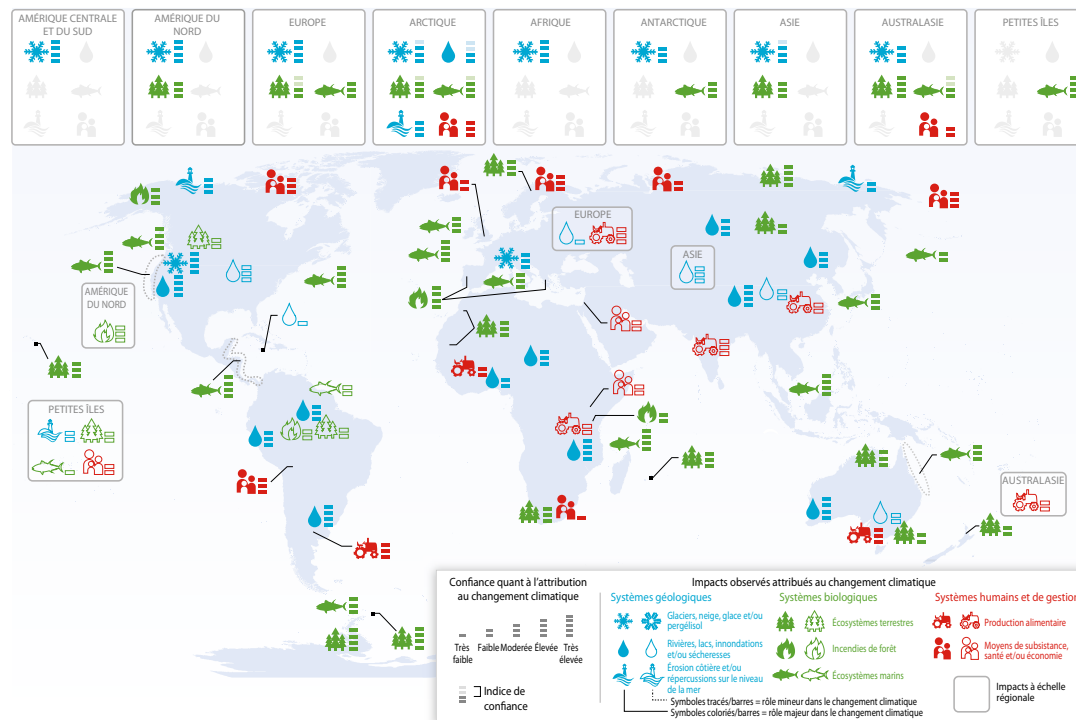
Elle est le signe de la fin annoncée d'une espèce. Tandis que le terme « adaptation » vient de la biologie évolutionniste, son utilisation pour désigner les réponses humaines réussies face aux changements environnementaux a débuté avec la gestion des catastrophes. Dans ce domaine, toutes les réponses humaines à une catastrophe sont considérées comme des adaptations au changement de situation, y compris les efforts visant à atténuer ou interrompre l'origine de la catastrophe³. La distinction entre la réduction et l'adaptation a été faite lors des négociations de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC). L'une des raisons de cette distinction est que les négociateurs n'accordaient pas toute leur attention à un accord de réduction ou d'atténuation si une solution d'adaptation apparaissait comme une possibilité plus accessible⁴. Une autre explication est que les pays développés étaient uniquement prêts à soutenir les efforts ayant des répercussions mondiales, tels que la réduction du dioxyde de carbone dans l'atmosphère, et non ceux visant une adaptation locale⁵.

Au fur et à mesure que les négociations avançaient, les chercheurs ont cherché à comprendre comment et pourquoi certaines mesures d'adaptation échouaient, en particulier celles entraînant le gaspillage d'un volume important de ressources humaines, naturelles et financières⁶. La formulation des théories ci-dessus a fait prendre conscience au Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) combien il était important d'adopter une terminologie précise et claire. En 2001, le GIEC a proposé une définition nuancée de la mauvaise adaptation, différente de celle utilisée en biologie ou en sciences comportementales, en définissant la mauvaise adaptation comme « une adaptation qui échoue à réduire la vulnérabilité, mais au contraire, l'accroît »⁷. Les discussions se sont ensuite concentrées sur les différences entre une mauvaise adaptation et une adaptation infructueuse. Une adaptation infructueuse peut être neutre et signifier simplement qu'une action a échoué. Toutefois, lorsqu'une adaptation prévue entraîne un accroissement de la vulnérabilité d'autres groupes ou secteurs, même à plus long terme, on la considère comme étant une mauvaise adaptation⁸. De même, une adaptation infructueuse ou une mauvaise adaptation ne doit pas être confondue avec

une fausse adaptation, à savoir des projets inutiles présentés comme une adaptation, tels que des infrastructures coûteuses servant uniquement les intérêts d'un petit groupe, sans réellement améliorer la résilience ou réduire la vulnérabilité au changement climatique⁹.

La réflexion sur la mauvaise adaptation se poursuit et une étude influente a abordé le problème du point de vue de ses résultats, identifiant ainsi cinq catégories de mauvaise adaptation par rapport aux autres possibilités. Selon cette analyse, les mauvaises adaptations désignent des actions qui augmentent les émissions de gaz à effet de serre, font peser une charge disproportionnée sur les plus vulnérables, induisent des coûts d'opportunité élevés, limitent les mesures incitatives à l'adaptation ou tracent un chemin qui limite les choix dont disposeront les générations futures⁸. Ces caractéristiques ont été développées et approfondies par le GIEC dans son cinquième Rapport d'évaluation 2014¹⁰. Au fur et à mesure que la différence entre les concepts d'adaptation et de mauvaise adaptation s'éclaircit et que nous sommes mieux à même de les distinguer, la gestion des conséquences du changement climatique devrait s'avérer moins intimidante.

Schémas mondiaux des impacts observés du changement climatique



Chaque symbole colorié figurant dans le panneau supérieur indique un groupe de systèmes pour lequel le changement climatique a joué un rôle majeur dans les changements observés dans au moins un système de ce groupe, dans la région concernée. L'indice de confiance quant à l'attribution de ces impacts pour toute la région est symbolisé par les barres. Les symboles dont seul le contour est dessiné et figurant dans un cadre avec le nom de la région concernée représentent les impacts régionaux pour lesquels le changement climatique a joué un rôle mineur. Les impacts infrarégionaux sont indiqués par des symboles sur la carte, placés approximativement à l'endroit où ils ont été observés. La région touchée peut aller d'un lieu précis à une vaste région, telle qu'un grand bassin hydrographique. Les impacts sur les systèmes physiques (bleu), biologiques (vert) et humains (rouge) se distinguent par leur couleur. Le fait qu'un impact du changement climatique ne soit pas représenté sur ce graphique ne signifie pas qu'il n'a pas eu lieu.

Source : cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat¹¹

La mauvaise adaptation à grande échelle

Face au changement climatique, le concept de mauvaise adaptation est passé de la notion d'adaptation qui a échoué à des mesures d'adaptation qui endommagent les ressources, réduisent les perspectives futures, aggravent le problème pour les populations vulnérables ou transfèrent la responsabilité de trouver des solutions aux générations futures. Si une mesure d'adaptation freine l'atteinte des objectifs de développement durable, d'équité sociale et d'éradication de la pauvreté, notamment en faisant peser une charge disproportionnée sur les populations vulnérables, elle est considérée comme une mauvaise adaptation¹². Les efforts mis en œuvre pour éviter la mauvaise adaptation à grande échelle comprennent des recherches pour identifier les principaux risques, ainsi que des stratégies d'adaptation responsables tout au long du cycle de vie des éléments d'infrastructure qui peuvent étayer les décisions et les actions des planificateurs et législateurs, des concepteurs, constructeurs, opérateurs, investisseurs et assureurs¹³. Les menaces associées à la mauvaise adaptation s'aggraveront probablement avec le déploiement des efforts à plus grande échelle. Rappeler les caractéristiques de l'évolutivité biologique pourrait permettre un examen préliminaire des actions d'adaptation, tandis qu'accorder la priorité à la préservation de l'évolutivité pourrait prévenir de graves erreurs.

Limiter les possibilités futures à l'installation d'une digue le long d'une propriété privée pourrait être considéré comme une forme de mauvaise adaptation, car elle entraînerait des problèmes et entraverait les possibilités qui s'offrent aux voisins, mais les conséquences d'une telle action se limitent généralement au contexte local. Toutefois, si une action mal étudiée vient aggraver le problème initial ou limiter les possibilités futures à l'échelle régionale ou mondiale, elle est considérée comme une mauvaise adaptation beaucoup plus dangereuse. À une échelle plus large, de telles mauvaises adaptations peuvent non seulement freiner l'évolutivité, mais également mettre en péril la résilience des écosystèmes, les modes de vie et les sociétés tout entières. La portée des mesures mal adaptées, en particulier celles augmentant les émissions de gaz à effet de serre ou accélérant la dégradation des écosystèmes, pourrait contribuer à la réponse biogéophysique qui fera basculer les fonctions du système terrestre. Nombre de ces éléments responsables du basculement sont irréversibles, tels que la perte du pergélisol, des récifs coralliens ou de la forêt tropicale amazonienne, et pourraient nous faire dépasser les seuils planétaires¹⁴.

Le rapport *Global Warming of 1.5°C* du GIEC de 2018 sur un réchauffement planétaire de 1,5 °C identifie plusieurs conditions préalables à une adaptation réussie, démontrant l'importance



Résumé de la notion de mauvaise adaptation abordée dans le cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat¹⁰

Dans le cinquième Rapport d'évaluation du GIEC de 2014, le Groupe de Travail II sur les incidences, l'adaptation et la vulnérabilité définit la mauvaise adaptation comme « des actions pouvant engendrer un risque accru de répercussions néfastes sur le climat, une plus grande vulnérabilité au changement climatique ou une diminution du niveau de bien-être, maintenant ou à l'avenir ». Il présente également un tableau récapitulatif des douze grandes catégories de mauvaise adaptation.

Deux de ces catégories définies par le Groupe de travail II décrivent des actions qui ignorent délibérément des paramètres connus : l'incapacité à anticiper les changements climatiques prévus et la non-prise en compte des répercussions plus larges. D'autres catégories portent sur la préférence des avantages à court terme au détriment des vulnérabilités à long terme, y compris l'épuisement des ressources qui entraîne une vulnérabilité future ; sur la procrastination à défaut d'une action immédiate ; sur l'installation d'infrastructures non durables ; et sur le risque moral encouru lorsque l'on encourage la prise de risques au travers de différents plans offrant des compensations.

Les catégories restantes se concentrent sur les actions favorisant un groupe spécifique, souvent une élite, sachant que le maintien des privilèges peut entraîner des conflits, et sur les actions qui ne tiennent pas compte des connaissances, des traditions et des relations locales. Cependant, continuer à appliquer des mesures traditionnelles si celles-ci sont considérées comme inappropriées est également une forme de mauvaise adaptation.

En outre, le Groupe de travail II met en garde contre les actions qui créent des dépendances ne pouvant pas être corrigées facilement, et contre les actions, en particulier celles créant des protections et des solutions, qui excluent les approches parallèles, telles que les mesures d'adaptation écosystémiques. Enfin, la migration peut être considérée comme une adaptation ou une mauvaise adaptation, ou les deux, selon le contexte et le résultat.

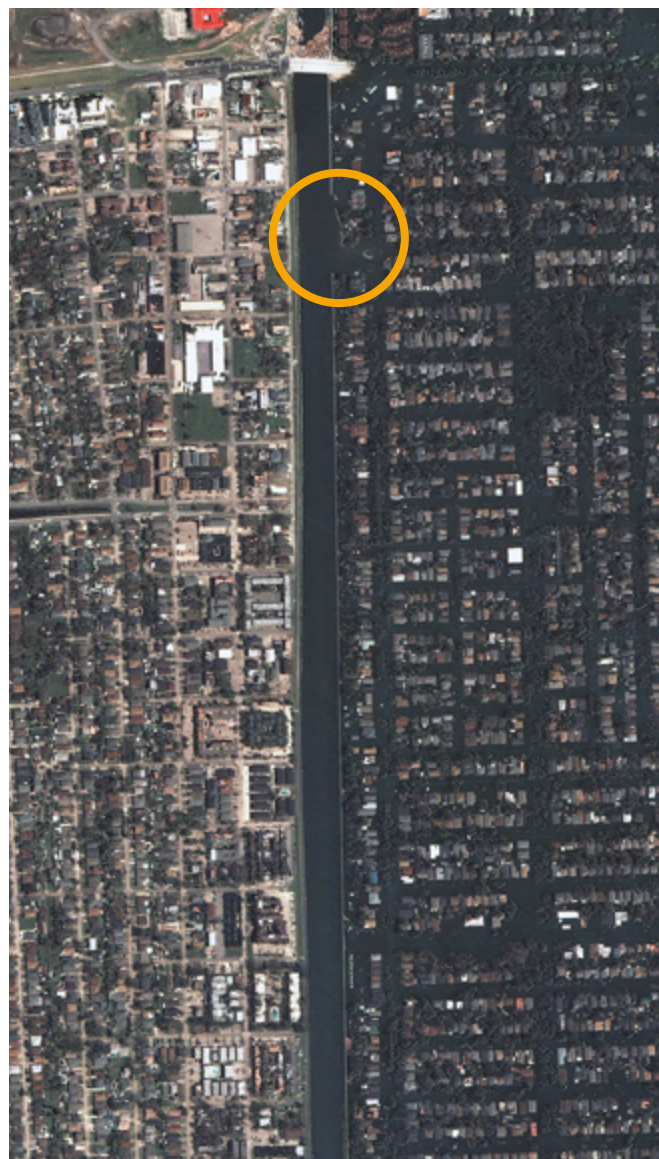
d'une planification et d'une mise en œuvre adaptées au climat durant la transition vers une hausse de la température acceptable¹⁵. Il est crucial d'éviter une mauvaise adaptation dans cette démarche de transition. Plusieurs exemples régionaux, s'identifiant ou non comme des réponses au changement climatique, peuvent s'avérer utiles pour examiner les différents scénarios possibles face au changement climatique à venir. Ces exemples sont des échantillons de catégories présentés dans le cinquième Rapport du GIEC et dans la documentation existante.

Équilibrer la demande à court terme et la planification de la résilience à long terme

En matière d'équilibre entre les avantages à court et à long terme, le Projet d'infrastructures côtières résilientes au climat mis en œuvre dans le sud-ouest du Bangladesh a déjà été présenté comme un exemple de mauvaise adaptation possible¹⁶. L'avance d'un tel constat est basée sur l'examen des avantages d'adaptation au cours des deux prochaines décennies par rapport aux coûts à long terme d'une mauvaise adaptation qui augmenteront considérablement d'ici 2050 lorsque la région sera inondée du fait de l'élévation du niveau de la mer¹⁶. Les problèmes d'adaptation possibles portent sur la migration, qu'il s'agisse d'immigration vers la région ou d'émigration de la région. Les investisseurs s'attendent à ce que les nouveaux marchés et des routes, ponts, systèmes de tout-à-l'égout et abris anticycloniques de meilleure qualité incitent les populations côtières à rester, alors qu'elles devraient probablement migrer vers l'intérieur des terres. Il est fort probable que ces installations attirent de nouveaux arrivants, y compris une partie de la population des quartiers informels de Dhaka qui a déjà été déplacée à la suite de catastrophes environnementales¹⁹.

Une charge disproportionnée pèse sur les populations les plus vulnérables

Les tentatives d'adaptation aux conditions changeantes en agissant sur plusieurs fronts peuvent être synonymes de mauvaise adaptation pour certains groupes de population. Après le passage dévastateur de l'ouragan Katrina en 2005 à la Nouvelle-Orléans et ses environs (États-Unis), les projets initiaux prévoyant l'installation de nouvelles zones vertes pour renforcer la résilience de la ville contre les futures inondations semblaient porter principalement sur l'acquisition de terres de basse altitude appartenant traditionnellement aux populations afro-américaines pauvres, plutôt qu'à d'autres groupes^{12,19}. Cette proposition de rénovation urbaine n'a pas été acceptée. Toutefois, plus d'une décennie plus tard, des études ont montré qu'une grande partie des habitants les plus pauvres et les plus marginalisés de la ville n'avait pas retrouvé le peu de biens qu'elle possédait avant la catastrophe et qu'une majorité avait été contrainte de quitter la région^{12,20}.



En août 2005, l'ouragan Katrina a causé d'importants dégâts sur plusieurs parties du système de digue conçu pour protéger la ville de la Nouvelle-Orléans, située sur les basses terres, contre les inondations et les ondes de tempête. Comme le montre cette image satellite, une rupture de la digue a permis à l'eau du 17th Street Canal de se répandre et d'inonder les quartiers situés à l'est du canal, causant des millions de dollars de dégâts matériels.

Crédit photo : Digital Globe (www.digitalglobe.com)

Mauvaise adaptation au changement climatique

Les exemples représentés ci-contre montrent un éventail de mesures d'adaptation au changement climatique à différents niveaux. Certains exemples sont considérés comme des formes de mauvaise adaptation en raison des conséquences imprévues qu'ils engendrent ou de leurs répercussions dans un avenir proche. D'autres sont des mesures prises après avoir examiné plusieurs facteurs afin d'éviter la mauvaise adaptation.

La mauvaise adaptation, telle que définie par le GIEC, est une mesure visant à améliorer l'adaptation, mais qui accroît à la place le risque de dommages liés au changement climatique, augmente la vulnérabilité au changement climatique et diminue le bien-être, maintenant ou à long terme.

Les mauvaises adaptations sont un mauvais choix parmi les possibilités existantes, qui augmente les émissions de gaz à effet de serre, affecte de manière disproportionnée les populations les plus vulnérables, entraîne des coûts injustifiés, réduit les incitations à l'adaptation ou limite les choix qui s'offriront aux générations futures.

Prise de décision qui **ignore la science**, les implications plus larges ou les conséquences probables

Actions favorisant un groupe d'intérêt par rapport à un autre, jetant les bases de **futurs conflits et dommages**

Compromis peu judicieux : avantages à court terme contre avantages à long terme, risque contre récompense (risque moral), période de réflexion trop courte contre trop longue

Actions qui **créent un enfermement et une dépendance** ou qui suppriment les possibilités pour les générations futures

Reinstallation plaçant les populations dans des **conditions encore plus menaçantes**

Sécheresse

Le changement climatique perturbe le cycle hydrologique. Les sécheresses vont s'intensifier et devenir plus fréquentes et plus longues, compromettant les usages anthropiques de l'eau et le fonctionnement écologique. Les périodes de sécheresse prolongées provoquent la surexploitation des eaux souterraines et les aquifères sont rarement suffisamment rechargés au moment des pluies.

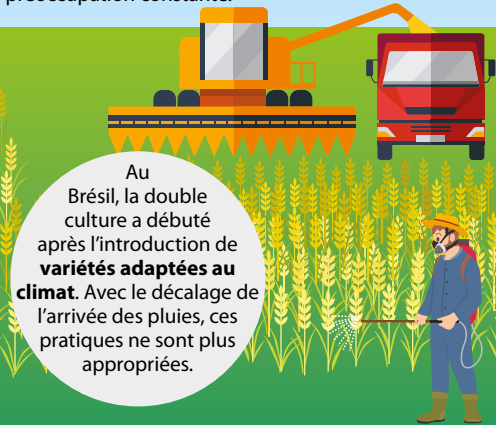
D'ici à 2025, **48 % des terres émergées de la planète** seront probablement des terres arides.

Des sécheresses à répétition ont poussé 70% des pauvres éleveurs Somalis à se reconvertir dans la production de charbon, ce qui a entraîné un déboisement ayant lui-même conduit à l'**accélération du processus de désertification** et au **renforcement des vulnérabilités**.

Agriculture

Les événements climatiques extrêmes persistants menacent les systèmes de production agricole. Les agriculteurs se vantent de leurs capacités d'adaptation, mais ces événements extrêmes surviennent si fréquemment, et pour une durée si imprévisible, que l'adaptation devient une préoccupation constante.

Au Zimbabwe, certains agriculteurs compensent les incertitudes climatiques en augmentant l'utilisation de pesticides. Trop souvent, les insectes utiles sont éliminés, aggravant ainsi la situation.



Au Brésil, la double culture a débuté après l'introduction de **variétés adaptées au climat**. Avec le décalage de l'arrivée des pluies, ces pratiques ne sont plus appropriées.

Pénurie d'eau

D'ici à 2050, il est probable que 5,7 millions de personnes vivent dans des zones caractérisées par une pénurie d'eau. Certaines régions doivent déjà s'adapter à l'heure actuelle à une pénurie d'eau en exploitant les eaux souterraines, en rationalisant l'eau ou en la dessalant. De telles mesures peuvent s'avérer de mauvaises adaptations sur le long terme.

La ville de Mexico est confrontée à une pénurie d'eau. Exploiter les sources d'eau souterraine éloignées est une solution à court terme. Les mesures d'adaptation actuelles consistent à investir dans des solutions à long terme, telles que des moyens de collecte de l'eau de pluie et de traitement puis de réutilisation des eaux grises.

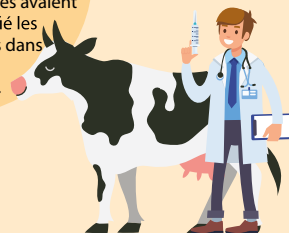


Santé

La modification des zones climatiques et l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements climatiques extrêmes ont des répercussions sur la santé. Cette variabilité entraîne des pertes de récoltes et élargit l'aire de répartition des vecteurs de maladies qui menacent certaines espèces, ainsi que la population humaine.

Les antibiotiques sont utilisés à outrance et à mauvais escient pour prévenir et pour traiter les problèmes vétérinaires. Cette mauvaise adaptation aux **maladies vectorielles** accentue la menace de résistance des antibiotiques.

Une étude a montré que les bouses d'un bétail traité aux antibiotiques **contenaient davantage de méthane** que celles ne contenant pas d'antibiotiques. Les résidus antibiotiques avaient également modifié les microbes présents dans les intestins des bousiers.



Élévation du niveau des océans

Le niveau des océans continue de monter à l'échelle de la planète, menaçant les infrastructures, les ressources d'eau souterraines, les îles formant une barrière naturelle et les communautés côtières. La menace existentielle à laquelle font face les nations de faible altitude et les petits États insulaires se transforme en mode de vie pour des millions de personnes.

La loi de l'État garantit l'accès des populations autochtones d'Hawaï aux côtes à des fins culturelles et d'activités de pêche de subsistance. L'élévation du niveau des océans limite l'accès du public aux zones côtières, affectant de manière disproportionnée les populations pauvres, tout en favorisant les développements qui génèrent des profits privés.

Les niveaux d'eau du « Canal de Floride » sont contrôlés de façon à limiter l'**intrusion d'eau salée** dans les eaux souterraines. Toutefois, augmenter les niveaux d'eau du Canal pour empêcher l'intrusion saline contribue à accroître les risques d'inondation.

Inondations

Les inondations sont l'un des effets du changement climatique les plus fréquemment recensés à l'échelle mondiale. Les systèmes de gestion de l'eau et des inondations qui ont fait leurs preuves par le passé ne suffisent plus. Alors que les changements climatiques se poursuivent, il est indispensable d'adopter une gestion adaptative et d'impliquer un large panel d'intervenants afin d'éviter une mauvaise adaptation.

La région métropolitaine de Bangkok est en proie aux inondations du fait du manque de planification et d'investissement. L'« **adaptation autonome** » non planifiée et non coordonnée entraîne des inondations en aval et affaiblit l'ensemble du système public d'évacuation des eaux usées. En 2011, les interventions officielles en réponse aux inondations ont protégé les populations aisées et ont fait peser une lourde charge sur les groupes vulnérables.

Incendies de forêt

Au niveau mondial, la durée de la saison des incendies a augmenté de 19 pour cent entre 1979 et 2013. Les incendies de forêt jouent un rôle prépondérant dans la régulation des écosystèmes de la planète ; toutefois, les destructions qu'ils entraînent sur leur passage constituent une menace pour les systèmes socioéconomiques. Dans certaines régions, les stratégies de gestion courantes exacerbent le problème.

Après des décennies de lutte contre les incendies et cinq ans de sécheresses liées au climat, les forêts californiennes contiennent énormément de **matériaux combustibles**. Dans une optique de transformation, l'État met en œuvre le brûlage dirigé pour pouvoir gérer cette menace.

Villes

D'ici à 2050, 70 pour cent de la population globale vivra en ville. À l'échelle mondiale, les villes subissent déjà les effets du changement climatique sous la forme de vagues de chaleur, d'inondations et d'échec d'adaptation. Les adaptations urbaines peuvent prendre la forme de politiques, d'aménagements d'infrastructures ou de solutions technologiques. Les solutions apportées sont rarement bénéfiques pour l'ensemble de la population et peuvent menacer certains groupes marginalisés.

Vulnérabilité sociétale

Partout dans le monde, les populations ont pris diverses mesures pour s'adapter au changement climatique : un nouveau système d'approvisionnement en eau, des plans d'assurance, de nouvelles stratégies de subsistance, une migration volontaire ou forcée et des projets de réinstallation. Lorsque ces méthodes basées sur de bonnes intentions ne sont pas adaptées au contexte local ou ne prennent pas en compte les multiples facettes d'un problème, elles peuvent accroître la vulnérabilité.

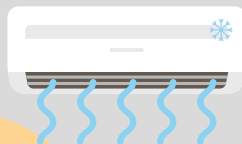
Certains agriculteurs cherchent à se protéger des événements climatiques extrêmes en **assurant leurs récoltes**, ce qui freine la mise en place de stratégies d'adaptation.

Les **politiques d'assurance** sont mal adaptées lorsqu'elles soutiennent les comportements risqués, tels que la reconstruction dans les lieux dangereux, ou qu'elles encouragent le remplacement plutôt que la nouvelle conception d'infrastructures adaptées à l'évolution de la situation. Tandis que les menaces climatiques s'intensifient, les assurances peuvent procurer un **faux sentiment de sécurité**.

Les projets de réinstallation de la Chine en vue d'une adaptation au changement climatique ont offert des incitations financières et ont amélioré les conditions de vie. Ils ont également **accru la charge disproportionnée** qui pesait déjà sur les laissés-pour-compte, les personnes déplacées et les populations pauvres.

Dans les petits États insulaires, la hausse des marées balaie les côtes, anéantissant les ressources en eau douce et les cultures. Selon les chercheurs, la **mobilité des travailleurs** est la meilleure solution à long terme pour éviter les formes de mauvaise adaptation liées à la réinstallation.

La hausse des températures et les pénuries d'eau ont incité Melbourne (Australie) à accroître la climatisation et le dessalement. Il s'agit là d'une forme de mauvaise adaptation : en augmentant les émissions de GES, le pays augmente la vulnérabilité d'autres systèmes, secteurs et communautés.



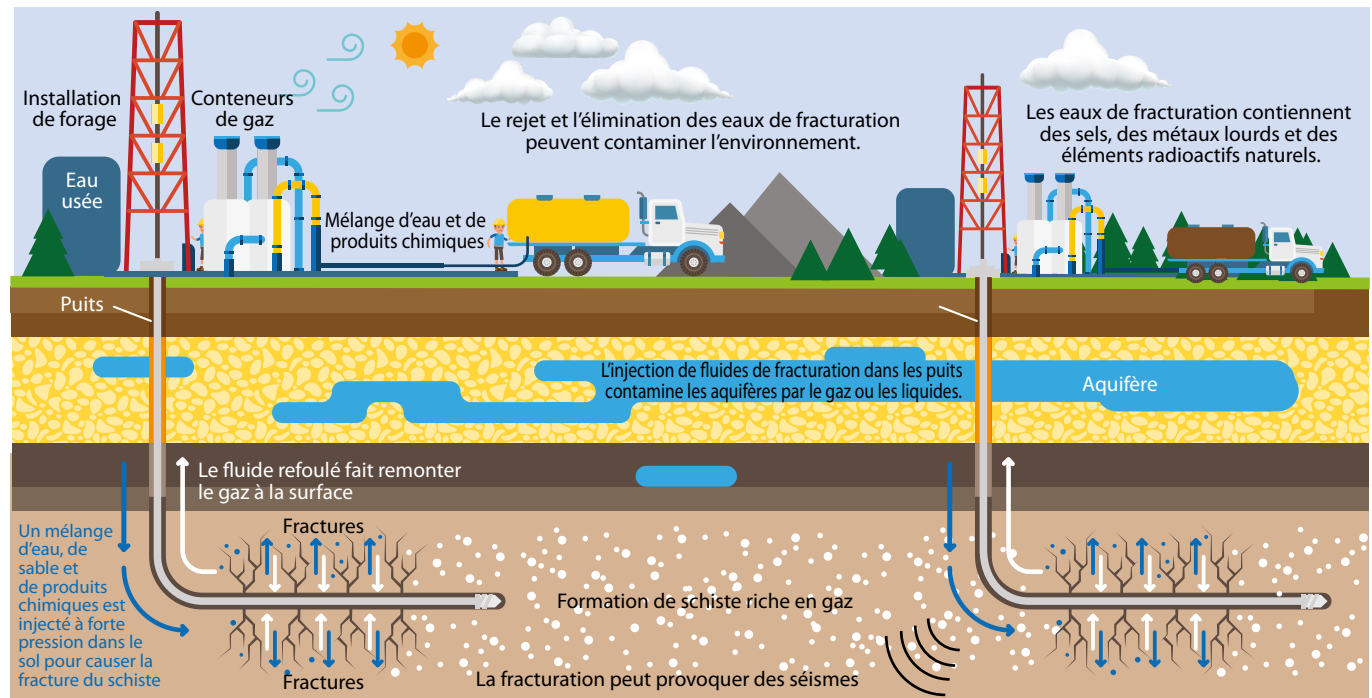
Des possibilités d'action future limitées

Les géologues et ingénieurs pétroliers ont développé la capacité à extraire du gaz et du pétrole de profonds réservoirs souterrains scellés par la roche de couverture²¹. Certains des réservoirs qui ont été vidés, sont considérés comme particulièrement bien adaptés pour piéger le dioxyde de carbone pendant au moins plusieurs siècles²². Selon les connaissances dont nous disposons, cette capacité est due à la perméabilité du réservoir et à la qualité de la couche de roche de couverture qui scelle le réservoir^{21,23}. Lorsque le gaz naturel a été proposé comme solution d'atténuation, c'est-à-dire comme carburant de transition du charbon et du pétrole vers les énergies renouvelables, les investissements dans cette source d'énergie ont augmenté et la technologie a évolué²⁴. Toutefois, ce carburant de transition pose plus de problèmes qu'on ne l'avait prévu. La plupart d'entre eux sont dus à l'évolution d'une technique d'extraction appelée fracturation hydraulique ou hydrofracturation^{25,26}. Cette technique consiste à injecter un mélange d'eau, de sable et de produits chimiques à haute pression pour causer intentionnellement des fissures et des crevasses dans le réservoir pour libérer le gaz naturel. La fracturation hydraulique

cause plusieurs problèmes environnementaux, notamment l'assèchement des aquifères et leur contamination par les produits chimiques utilisés pour le forage et l'injection, la fuite de méthane dans l'environnement et l'augmentation de la sismicité²⁷⁻³⁰. Par ailleurs, certains avancent que la fracturation hydraulique pourrait détruire la roche de couverture qui scelle les réservoirs qui ont été vidés, les écartant ainsi comme solution possible pour piéger le carbone^{31,32}.

Le rapport Global Warming of 1.5 °C du GIEC définit deux moyens de réduire les émissions et limiter les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère afin d'atteindre l'objectif de maintenir l'augmentation de la température moyenne mondiale par rapport aux niveaux préindustriels à 1,5 °C. Les deux moyens décrits reposent largement sur la possibilité de piéger le carbone dans les formations géologiques¹⁵. Cette politique industrielle de fracturation hydraulique témoigne d'une forme de mauvaise adaptation à deux niveaux : la possibilité de renoncer aux avantages à long terme au profit de bénéfices à court terme et s'enfermer dans une voie en endommageant les ressources futures. Dans le même temps, la fracturation hydraulique augmente les émissions de gaz à effet de serre en relâchant du méthane tout au long du processus^{26,33-35}.

Fracturation hydraulique ou hydrofracturation





Champ gazier Jonah, Wyoming (États-Unis)

Crédit photo : EcoFlight

Éviter la mauvaise adaptation dans un avenir limité à une hausse de la température de 1,5 °C

La vision du rapport Global Warming of 1.5 °C du GIEC et la volonté de maintenir l'augmentation de la température à ce niveau suggèrent que les effets du changement climatique doivent davantage être pris en compte lors des prises de décision par les acteurs des secteurs privé et public et par la société civile¹⁴. Plutôt que de limiter le concept de mauvaise adaptation aux résultats compliqués et regrettables des actions étiquetées comme des mesures d'adaptation, les conseillers pour les politiques et les décideurs œuvrant à différents niveaux et dans un large éventail d'institutions pourraient élargir leurs délibérations afin d'éviter les mauvaises adaptations au changement climatique dans leur planification.

Par ailleurs, le rapport *Global Warming of 1.5 °C* vient renforcer le Programme 2030 des Nations Unies et ses objectifs de développement durable, en particulier ceux portant sur l'égalité et l'équité¹⁴. La vision consistant à relever les défis climatiques à venir s'appuie sur un avenir offrant une meilleure qualité de vie que celle dont bénéficient un trop grand nombre de personnes aujourd'hui. Pour réaliser cette vision, il est indispensable de s'attaquer aux causes profondes des conflits, des guerres, de l'insécurité, de la pauvreté et des migrations. L'espèce humaine s'est toujours adaptée aux conditions changeantes et nous sommes par nature des êtres

adaptables. La méthode par tâtonnements est une méthode d'apprentissage bien établie qui nous permet d'orienter notre adaptation. Néanmoins, nous sommes également une espèce qui fait preuve d'anticipation et de planification. Nous pouvons modéliser notre avenir. Pour éviter les mauvaises adaptations, il nous faut non seulement apprendre de nos propres erreurs, mais aussi de celles des personnes et des communautés du monde entier. L'anticipation ne se limite pas aux présomptions, aux hypothèses ou même aux aspirations d'un seul groupe, mais doit se baser sur des preuves scientifiques et des probabilités réalistes.

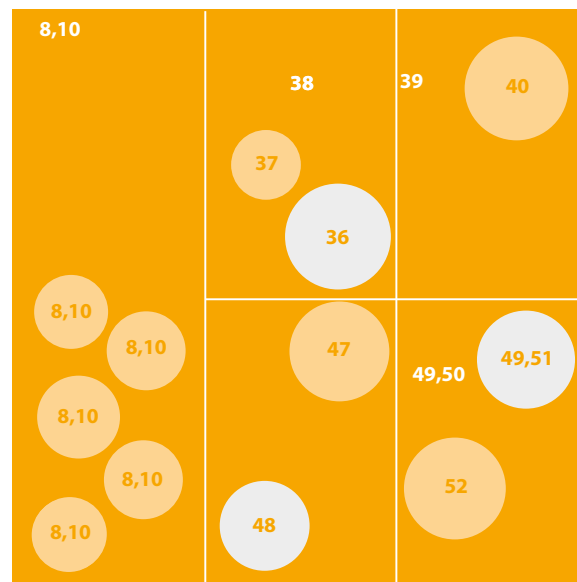
Des données indiquent que la mauvaise adaptation peut être évitée en évaluant tous les coûts et les avantages, y compris les retombées positives, pour chaque groupe de la société, ainsi qu'en définissant clairement les perdants et les gagnants et la manière dont la charge pourrait être mieux répartie. L'habitude ancrée consistant à ne pas tenir compte des intérêts des générations futures n'est compatible avec aucune des deux voies décrites dans le rapport *Global Warming of 1.5 °C* pour maintenir la température moyenne mondiale à ce niveau gérable. Nous vivons actuellement les prédictions qui ont été largement écartées à l'époque de la ratification de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques de 1992. Éviter la mauvaise adaptation signifie écarter les solutions qui créent un enfermement et une dépendance et privilégier celles qui favorisent l'évolutivité. À défaut de quoi, nous nous retrouverons dans ce que la biologie considère comme une impasse.

Bibliographie

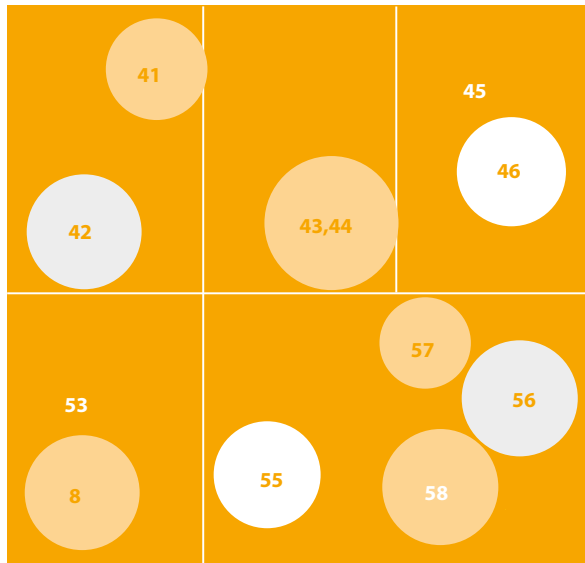
1. Darwin, C.R. (1859). *On the origin of the species by means of natural selection*. London: John Murray.
2. Martínez-Padilla, J., Estrada, A., Early, R. and García-González, F. (2017). Evolvability meets biogeography: evolutionary potential decreases at high and low environmental favourability. *Proceedings of the Royal Society B*, 284(1856), 20170516. <https://doi.org/10.1098/rspb.2017.0516>
3. Burton, I., Kates, R.W. and White, G.F. (1993). *The environment as hazard*. New York: Guilford Press.
4. Greenhill, B., Dolšák, N. and Prakash, A. (2018). Exploring the adaptation-mitigation relationship: Does information on the costs of adapting to climate change influence support for mitigation? *Environmental Communication*, 12(7), 911-927. <https://doi.org/10.1080/10.1080/17524032.2018.1508046>
5. Bodansky, D. (1993). The United Nations Framework Convention on Climate Change: A commentary. *Yale Journal of International Law*, 18, 451. <https://digitalcommons.law.yale.edu/yjil/vol18/iss2/2>
6. Burton, I. and van Aalst, M.K. (1999). Come hell or high water: integrating climate change vulnerability and adaptation into Bank work. Environment Department working paper No. 72, Climate change series. Washington DC: World Bank. <http://documents.worldbank.org/curated/en/212171468756566936/pdf/multi-page.pdf>
7. McCarthy, J.J., Canziani, O.F., Leary, N.A., Dokken, D.J. and White, K.S. (eds.). (2001). Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press
8. Barnett, J., and O'Neill, S. (2010). Maladaptation. *Global Environmental Change*, 2(20), 211-213. <https://www.sciencedirect.com/journal/global-environmental-change/vol/20/issue/2>
9. Dolšák, N. and Prakash, A. (2018). The politics of climate change adaptation. *Annual Review of Environment and Resources*, 43, 317-341. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102017-025739>
10. Noble, I.R., Huq, S., Anokhin, Y.A., Carmin, J., Goudou, D., Lansigan, F.P. et al. (2014). Adaptation needs and options. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E. et al. (eds.). Cambridge, UK: Cambridge University Press. 833-868. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-Chap14_FINAL.pdf
11. Cramer, W., Yohe, G.W., Auffhammer, M., Huggel, C., Molau, U., da Silva Dias, M.A.F. et al. (2014) Detection and attribution of observed impacts. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E. et al. (eds.). Cambridge, UK: Cambridge University Press. 979-1037. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>
12. Anguelovski, I., Shi, L., Chu, E., Gallagher, D., Goh, K., Lamb, Z. et al. (2016). Equity impacts of urban land use planning for climate adaptation: critical perspectives from the global north and south. *Journal of Planning Education and Research*, 36(3), 333-348. <https://doi.org/10.1177%2F0739456X16645166>
13. Hayes, S. (2019). Adapting infrastructure to climate change: who bears the risk and responsibility? In *Asset Intelligence through Integration and Interoperability and Contemporary Vibration Engineering Technologies*. Mathew, J., Lim, C.W., Ma, L., Sands, D., Cholette, M.E. and Borghesani, P. (eds.). Proceedings of the 12th World Congress on Engineering Asset Management and the 13th International Conference on Vibration Engineering and Technology of Machinery. Switzerland: Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95711-1_24
14. Steffen, W., Rockström, J., Richardson, K., Lenton, T.M., Folke, C., Liverman, D. et al. (2018). Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(33), 8252-8259. <https://doi.org/10.1073/pnas.1810141115>
15. Intergovernmental Panel on Climate Change (2018). *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P.R. et al. (eds.). Switzerland: IPCC. <https://www.ipcc.ch/sr15/>
16. Magnan, A.K., Schipper, E.L.F., Burkett, M., Bharwani, S., Burton, I., Eriksen, S. et al. (2016). Addressing the risk of maladaptation to climate change. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 7(5), 646-665. <https://doi.org/10.1002/wcc.409>
17. Asian Development Bank (2018). *Bangladesh: Coastal Climate-Resilient Infrastructure Project*. Sovereign (Public) Project 45084-002. <https://www.adb.org/projects/45084-002/main>
18. International Organization for Migration (2009). Climate Change and Displacement in Bangladesh - A Silent Crisis? <https://www.iom.int/migrant-stories/climate-change-and-displacement-bangladesh-silent-crisis>
19. Kates, R.W., Colten, C.E., Laska, S., and Leatherman, S.P. (2006). Reconstruction of New Orleans after Hurricane Katrina: a research perspective. *Proceedings of the National Academy of Science*, 103(40), 14653-14660. <https://doi.org/10.1073/pnas.0605726103>
20. Bleemer, Z. and van der Klaauw, W. (2017). Disaster (over-)insurance: the long-term financial and socioeconomic consequences of Hurricane Katrina. Staff Report, No. 807. New York, NY: Federal Reserve Bank of New York. https://www.newyorkfed.org/research/staff_reports/sr807
21. Orr Jr, F.M. (2003). Sequestration via injection of carbon dioxide into the deep earth. In *The Carbon Dioxide Dilemma: Promising Technologies and Policies*. National Academy of Engineering and National Research Council. Washington, DC: The National Academies Press. <https://www.nap.edu/read/10798/chapter/3#17>
22. Benson, S. M. and Orr, F. M. (2008). Carbon dioxide capture and storage. *MRS bulletin*, 33(4), 303-305. <https://doi.org/10.1557/mrs2008.63>
23. Huppert, H.E. and Neufeld, J.A. (2014). The fluid mechanics of carbon dioxide sequestration. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 46, 255-272. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-011212-140627>

24. Weissman, S. (2016). Natural Gas as a Bridge Fuel – Measuring the Bridge. Center for Sustainable Energy, San Diego. http://energycenter.org/sites/default/files/docs/nav/policy/research-and-reports/Natural_Gas_Bridge_Fuel.pdf
25. Howarth, R.W., Santoro, R., and Ingraffea, A. (2011). Methane and the greenhouse-gas footprint of natural gas from shale formations. *Climatic Change*, 106(4), 679. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0061-5>
26. United Nations Conference on Trade and Development (2018). Commodities at a glance. *Special Issue on Shale Gas 9*. New York and Geneva: UNCTAD. https://unctad.org/en/PublicationsLibrary/suc2017d10_en.pdf
27. Chen, H. and Carter, K.E. (2016). Water usage for natural gas production through hydraulic fracturing in the United States from 2008 to 2014. *Journal of Environmental Management*, 170, 152-159. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.01.023>
28. U.S. EPA. (2016). Hydraulic Fracturing for Oil and Gas: Impacts from the Hydraulic Fracturing Water Cycle on Drinking Water Resources in the United States. United States Environmental Protection Agency/Office of Research and Development, Washington, DC. EPA/600/R-16/236Fa. <https://cfpub.epa.gov/ncea/hfstudy/recordisplay.cfm?deid=332990>
29. Drollette, B.D., Hoelzer, K., Warner, N.R., Darrah, T.H., Karatum, O., O'Connor, M.P., Nelson, R.K. et al. (2015). Elevated levels of diesel range organic compounds in groundwater near Marcellus gas operations are derived from surface activities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*, 112(43), 13184-13189. <https://doi.org/10.1073/pnas.1511474112>
30. Skoumal, R.J., Brudzinski, M.R. and Currie, B.S. (2015). Earthquakes Induced by Hydraulic Fracturing in Poland Township, Ohio. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(1), 189-197. <https://doi.org/10.1785/0120140168>
31. Elliot, T.R. and Celia, M.A. (2012). Potential restrictions for CO2 sequestration sites due to shale and tight gas production. *Environmental Science & Technology*, 46(7), 4223-4227. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es2040015>
32. Moriarty, P. and Honnery, D. (2018). Energy policy and economics under climate change. *AIMS Energy*, 6(2): 272-290. <https://doi.org/10.3934/energy.2018.2.272>
33. Jackson, R.B., Vengosh, A., Darrah, T.H., Warner, N.R., Down, A., Poreda, R.J., Osborn, S.G., Zhao, K. and Karr, J.D. (2013). Increased stray gas abundance in a subset of drinking water wells near Marcellus shale gas extraction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(28), 11250-11255. <https://doi.org/10.1073/pnas.1221635110>
34. Omara, M., Sullivan, M.R., Li, X., Subramanian, R., Robinson, A.L. and Presto, A.A. (2016). Methane Emissions from Conventional and Unconventional Natural Gas Production Sites in the Marcellus Shale Basin. *Environmental Science & Technology*, 50, 2099-2107. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05503>
35. Osborn, S.G., Vengosh, A., Warner, N.R. and Jackson, R.B. (2011). Methane contamination of drinking water accompanying gas-well drilling and hydraulic fracturing. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(20), 8172-8176. <https://doi.org/10.1073/pnas.1100682108>

Références des illustrations

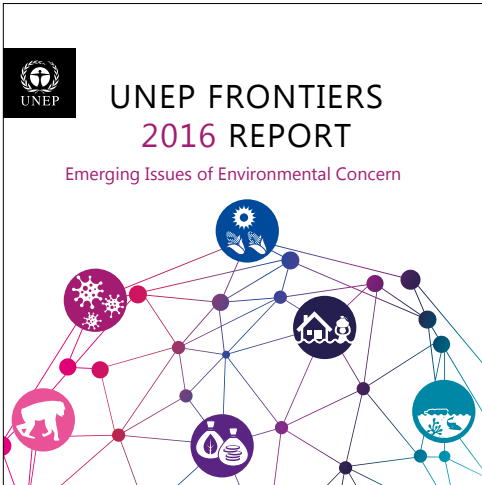


36. Hartmann, I., Sugulle, A.J. and Awale, A.I. (2010). The Impact of Climate Change on Pastoralism in Salahley and Bali-gubadle Districts, Somaliland. Heinrich Böll Stift ung, East and Horn of Africa, Nairobi. https://ke.boell.org/sites/default/files/the_impact_of_climate_change_on_pastoralism_in_salahley_and_bali-gubadle_districts_-_somaliland.pdf
37. Huang, J., Yu, H., Guan, X., Wang, G. and Guo, R. (2015). Accelerated dryland expansion under climate change. *Nature Climate Change*, 6, pages 166-171. <https://doi.org/10.1038/nclimate2837>
38. IPCC (2013). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
39. WWAP (2018). The United Nations world water development report 2018: nature-based solutions for water. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261424>
40. Tellman, B., Bausch, J.C., Eakin, H., Anderies, J.M., Mazari-Hiriart, M., Manuel-Navarrete, D. and Redman, C.L. (2018). Adaptive pathways and coupled infrastructure: seven centuries of adaptation to water risk and the production of vulnerability in Mexico City. *Ecology and Society*, 23(1):1. <https://doi.org/10.5751/ES-09712-230101>



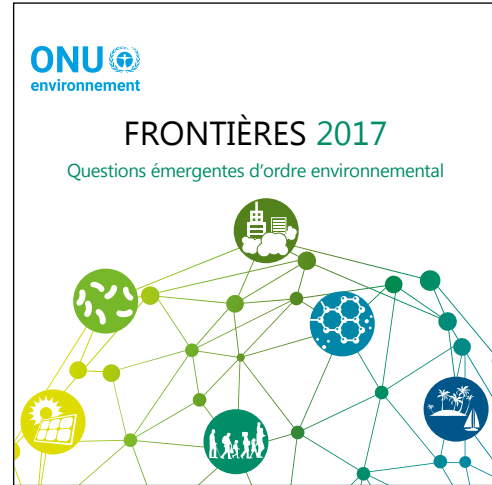
41. Czajkowski, J., Engel, V., Martinez, C., Mirchi, A., Watkins, D., Hughes, J., Sukop, M. (2015). Economic impacts of urban flooding in south Florida: Potential consequences of managing groundwater to prevent salt water intrusion. Working paper no. 2015-10, Risk Management and Decision Processes Center, University of Pennsylvania. http://opim.wharton.upenn.edu/risk/library/WP201510_GWLevelsFloodClaims_Czajkowski-etal.pdf
42. Finkbeiner, E.M., Micheli, F., Bennett, N.J., Ayers, A.L., Le Cornu, E. and Doerr, A.N. (2017). Exploring trade-offs in climate change response in the context of Pacific Island fisheries. *Marine Policy*, 88, 359-364. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpol.2017.09.032>
43. Limthongsakul, S., Nitivattananon, V. and Arifwidodo, S.D. (2017). Localized flooding and autonomous adaptation in peri-urban Bangkok. *Environment and Urbanization*, 29(1), 51-68. <https://doi.org/10.1177/0956247816683854>
44. Marks, D. (2015). The Urban Political Ecology of the 2011 Floods in Bangkok: The Creation of Uneven Vulnerabilities. *Pacific Affairs*, 88(3), 623-651. <http://dx.doi.org/10.5509/2015883623>
45. Jolly, W.M., Cochrane, M.A., Freeborn, P.H., Holden, Z.A., Brown, T.J., Williamson, G.J. and Bowman, D.M. (2015). Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. *Nature Communications*, 6:7537. <https://doi.org/10.1038/ncomms8537>
46. Little, J. B. (2018) Fighting Fire with Fire: California Turns to Prescribed Burning. Yale Environment 360. Yale School of Forestry & Environmental Studies. <https://e360.yale.edu/features/fighting-fire-with-fire-california-turns-to-prescribed-burning>
47. Zinyemba, C., Archer, E. and Rother, H-A. (2018). Climate variability, perceptions and political ecology: Factors influencing changes in pesticide use over 30 years by Zimbabwean smallholder cotton producers. *PLoS ONE*, 13(5): e0196901. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0196901>
48. Pires, G.F., Abrahão, G.M., Brumatti, L.M., Oliveira, L.J.C., Costa, M.H., Liddicoat, S. and Ladle, R.J. (2016). Increased climate risk in Brazilian double cropping agriculture systems: Implications for land use in Northern Brazil. *Agricultural and Forest Meteorology*, 228: 286-298. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.07.005>
49. Bett, B., Kiunga, P., Gachohi, J., Sindato, C., Mbotha, D., Robinson, T., Lindahl, J. and Grace, D. (2017). Effects of climate change on the occurrence and distribution of livestock diseases. *Preventive Veterinary Medicine*, 137, Part B, 119-129. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2016.11.019>
50. UNEP (2016). UNEP Frontiers 2016 Report: Emerging Issues of Environmental Concern. United Nations Environment Programme, Nairobi. www.unenvironment.org/frontiers
51. UNEP (2017). Frontiers 2017: Emerging Issues of Environmental Concern. United Nations Environment Programme, Nairobi. <http://www.unenvironment.org/frontiers>
52. Hammer, T.J., Fierer, N., Hardwick, B., Sijmoki, A., Slade, E., Taponen, J., Viljanen, H. and Roslin, T. (2016). Treating cattle with antibiotics affects greenhouse gas emissions, and microbiota in dung and dung beetles. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 283:20160150. <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2016.0150>
53. UN (2014). World Urbanisation Prospects: the 2014 Revision, Highlights (ST/ESA/SER.A/352). Department of Economic and Social Affairs. Population Division, New York: United Nations.
54. Ford, J.D., Labbé, J., Flynn, M., Araos, M. and IHACC Research Team (2017). Readiness for climate change adaptation in the Arctic: a case study from Nunavut, Canada. *Climatic Change*, 145(1-2), 85-100. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-2071-4>
55. Lei, Y., Finlayson, C.M., Thwaites, R., Shi, G. and Cui, L. (2017). Using Government Resettlement Projects as a Sustainable Adaptation Strategy for Climate Change. *Sustainability*, 9, 1373. <https://doi.org/10.3390/su9081373>
56. O'Hare, P., White, I. and Connelly, A. (2016). Insurance as maladaptation: Resilience and the 'business as usual' paradox. *Environment and Planning C: Government and Policy*, 34(6), 1175-1193. <https://doi.org/10.1177/0263774X15602022>
57. Bryant, C.R., Bousbaine, A.D., Akkari, C., Daouda, O., Delusca, K., Épule, T.E. and Drouin-Lavigne, C. (2016). The roles of governments and other actors in adaptation to climate change and variability: The examples of agriculture and coastal communities. *AIMS Environmental Science*, 3(3), 326-346. <https://doi.org/10.3934/environsci.2016.3.326>
58. ILO (2016). Labour Mobility and Regional Climate Adaptation. International Labour Organization Technical Note https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_protect/---protrav/---migrant/documents/publication/wcms_534341.pdf





En 2016, le PNUE a lancé sa nouvelle série de publications annuelles *Frontières – Questions émergentes d'ordre environnemental*. Ce rapport identifie et présente diverses problématiques émergentes d'ordre environnemental qui nécessitent l'attention et l'action des gouvernements, des parties prenantes, des décideurs et du grand public. La première édition de 2016 aborde les six questions émergentes suivantes :

- Secteur financier : un élément central du développement durable
- Zoonoses : les lignes floues des maladies émergentes et de la santé des écosystèmes
- Microplastiques : des perturbateurs de la chaîne alimentaire
- Pertes et dommages : des effets inévitables du changement climatique sur les écosystèmes
- Cadeau empoisonné : l'accumulation de toxines dans les cultures à l'ère du changement climatique
- Consommation de produits exotiques : le commerce illicite d'animaux vivants



Le rapport *Frontières 2017* aborde les questions émergentes suivantes :

- Résistance aux antimicrobiens : examiner la dimension environnementale
- Nanomatériaux : appliquer le principe de précaution
- Garantir l'efficacité des aires marines protégées pour favoriser le développement durable
- Tempêtes de sable et de poussière : maîtriser un phénomène mondial
- Énergie solaire : favoriser l'accès à l'électricité des quartiers non raccordés au réseau
- Déplacements environnementaux : la mobilité humaine à l'ère de l'anthropocène

unenvironment.org/frontiers



**Programme des Nations Unies
pour l'environnement**

United Nations Avenue, Gigiri
P O Box 30552, 00100 Nairobi, Kenya
Tél. : +254 20 7621234 | publications@unenvironment.org
www.unenvironment.org

