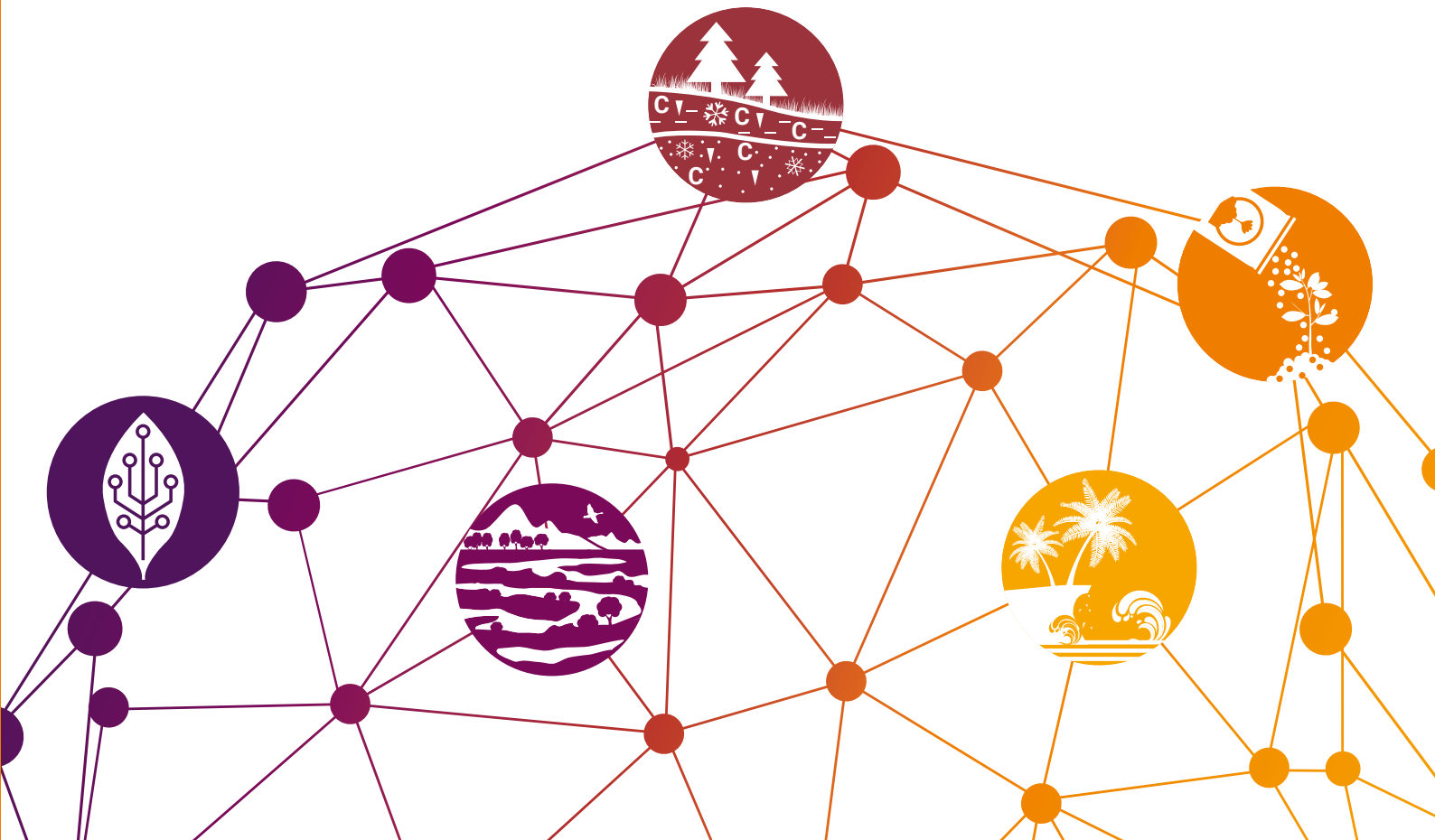


FRONTIÈRES 2018/19

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.

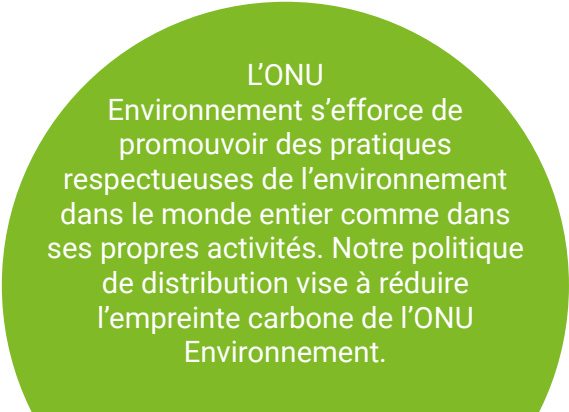
© Cartes, photos et illustrations, comme précisé.

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

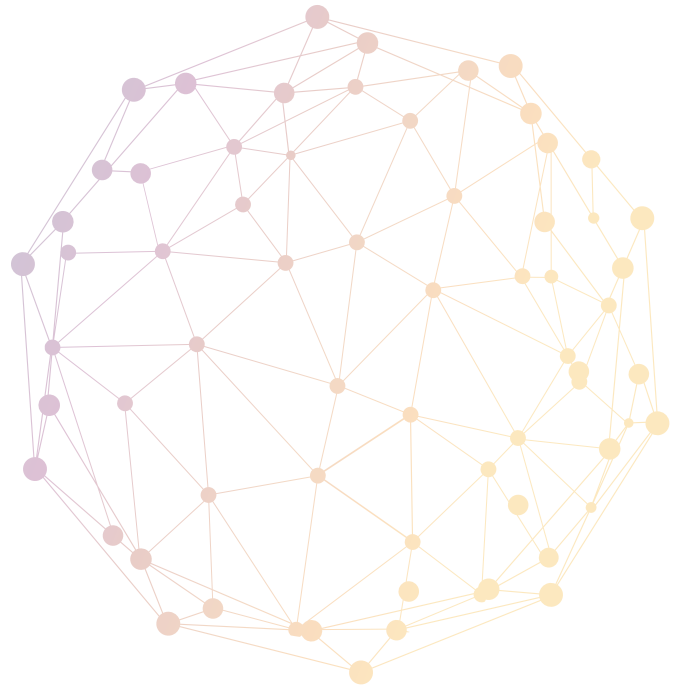









Table des matières

	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

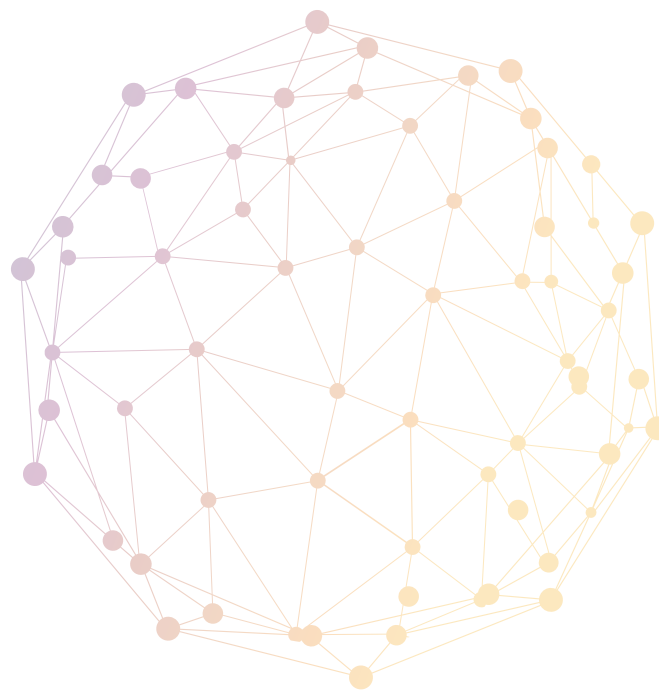
Conception graphique et mise en page

Infographiste : Audrey Ringler, ONU Environnement

Cartographe : Jane Muriithi, ONU Environnement

Impression

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





Crédit photo : 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.

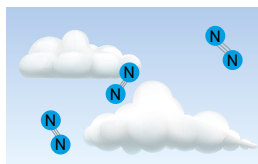
On retrouve l'azote en grande abondance dans l'atmosphère terrestre. Sous la forme de la molécule N_2 , l'azote est inoffensif et compose jusqu'à 78 pour cent de l'air que nous respirons. Les deux atomes d'azote sont rattachés l'un à l'autre par une triple liaison solide ($N\equiv N$) qui rend la molécule 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 (NO_x). 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



Diazone (N_2)

Source

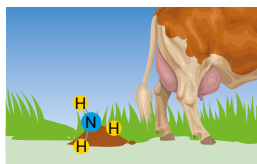
N_2 compose jusqu'à 78 % de l'air que nous respirons.

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

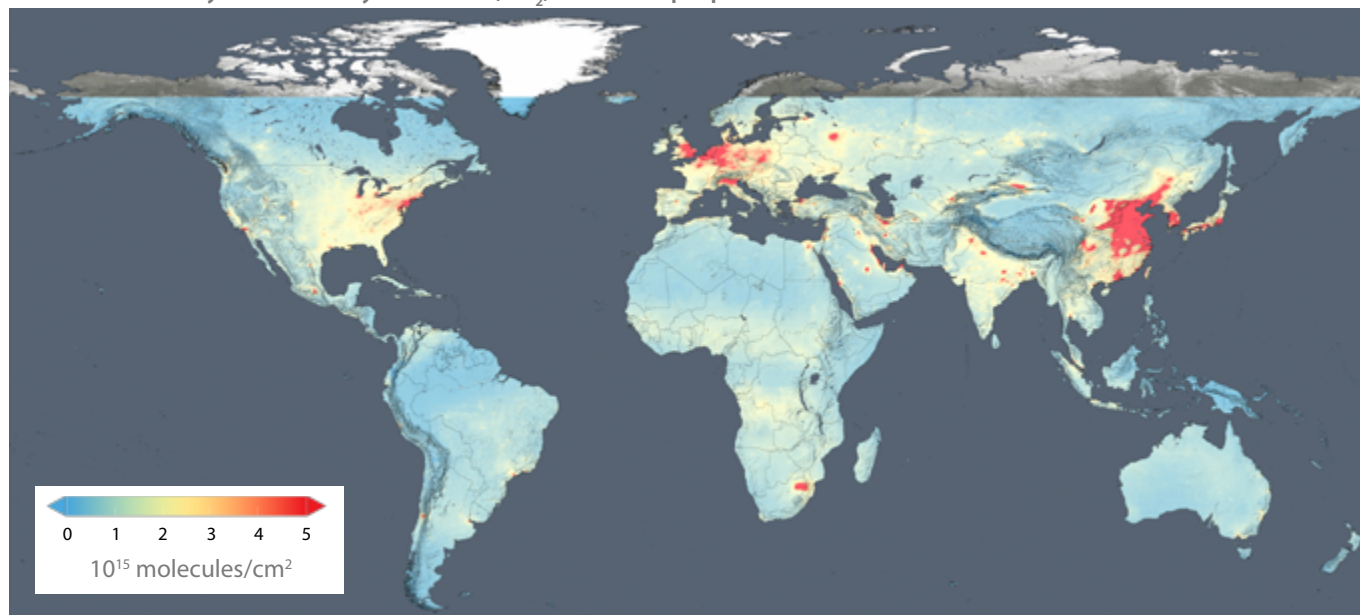
N_2O est un gaz à effet de serre – 300 fois plus puissant que le CO_2 . Il provoque également l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique.

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

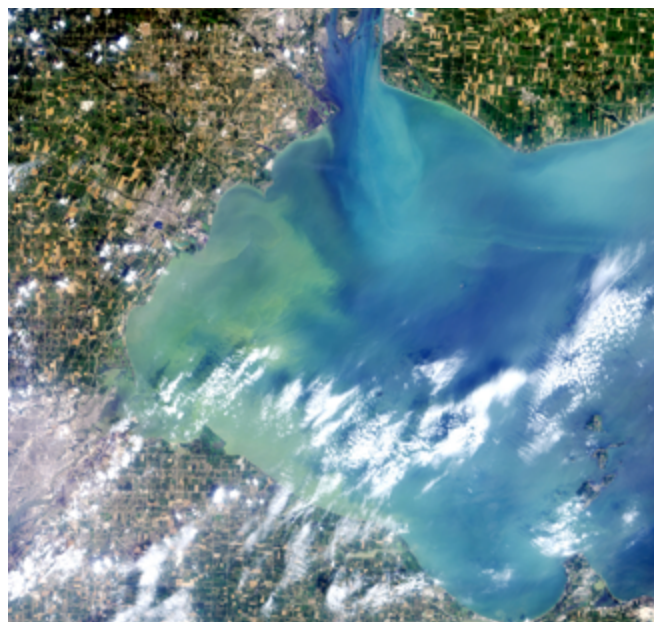


Lien vers la vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=b6JzL4NG26k>
Photo : prolifération d'algues sur l'île Pelée, au sud-est du lac Érié
Crédit photo : Tom Archer / Michigan Sea Grant (www.miseagrant.umich.edu)

© 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=aMnDoXuTGS4 © 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

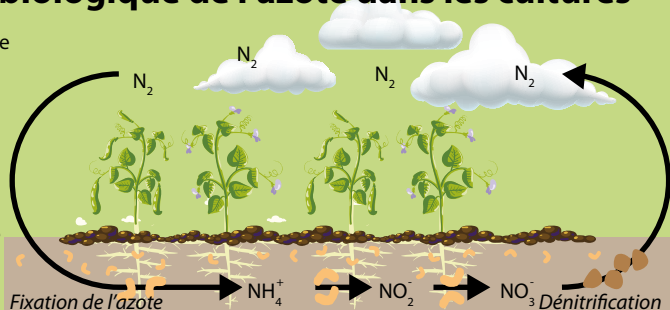
Le procédé Haber-Bosch a été inventé il y a plus de 100 ans pour répondre au besoin croissant de produire en masse des engrais à base d'azote réactif et des explosifs à base d'azote. En s'inspirant de la fixation naturelle de l'azote par les bactéries, **ce procédé fixe le N₂ atmosphérique dans l'ammoniac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

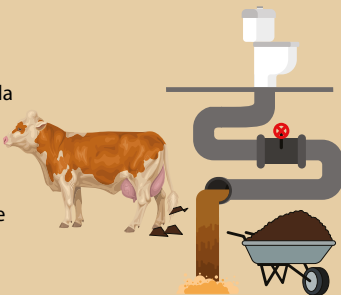


N_r peut aussi être reconverti naturellement en **N₂** par le **processus de dénitrification** réalisé par des bactéries anaérobies. Ces processus naturels permettent de maintenir un cycle de l'azote équilibré, mais le **développement des cultures de plantes fixatrices d'azote**, telles que les légumineuses,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

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

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

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_x 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**

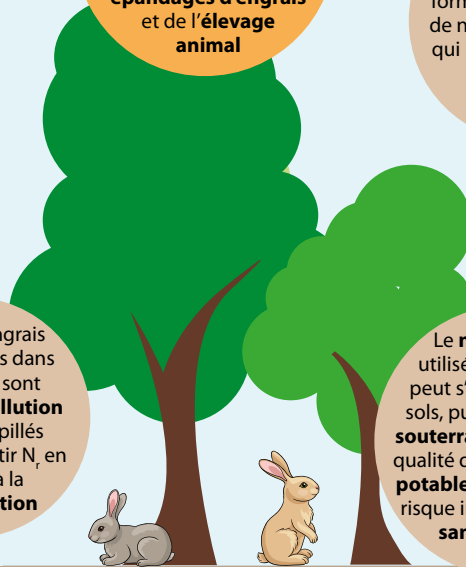
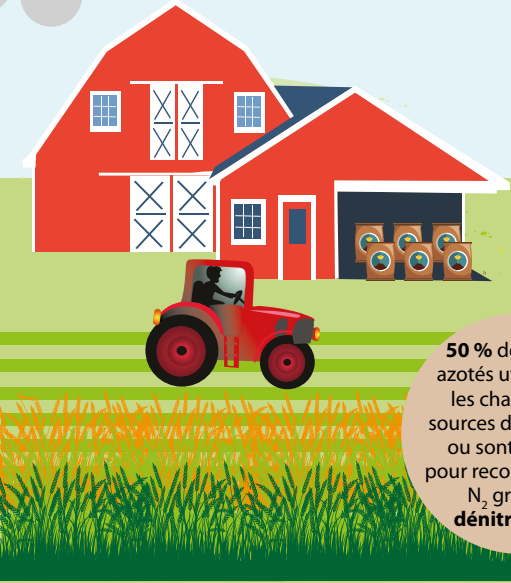
Le **nitrate (NO_3^-)** utilisé en agriculture peut s'infiltrer dans les sols, puis dans les **eaux souterraines**, affectant la qualité des réserves d'**eau potable** et présentant un risque important pour la **santé humaine**

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

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**

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

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



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.



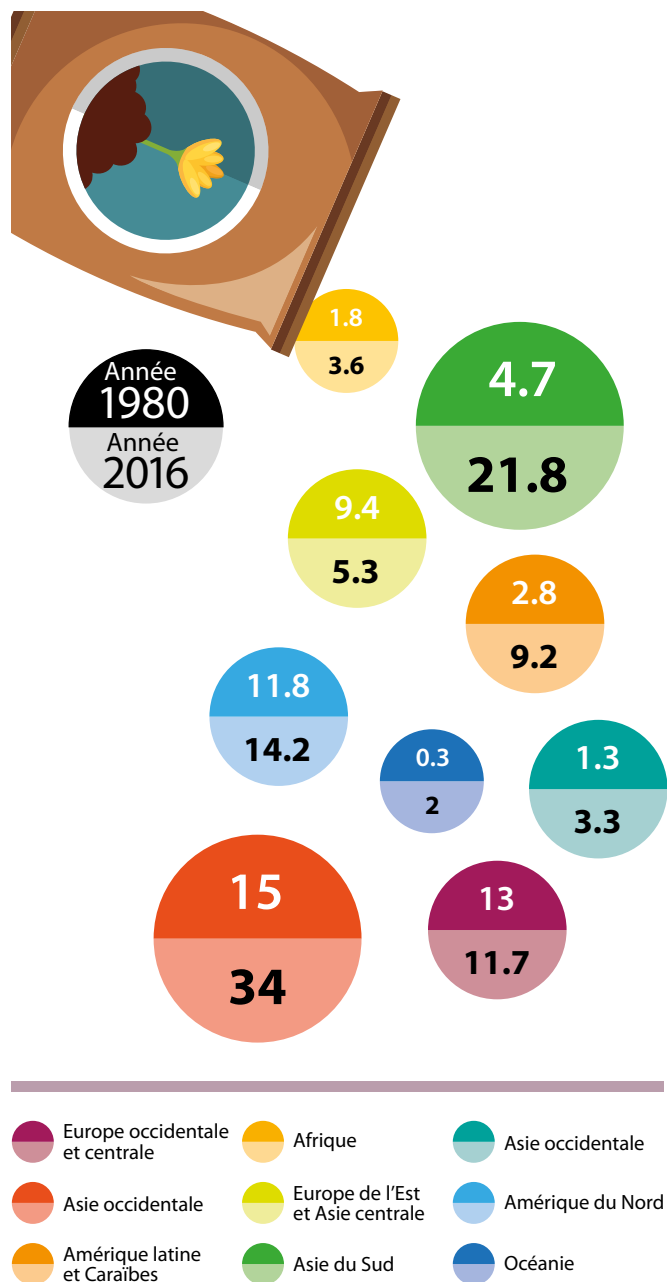
Azote, nutriments et économie circulaire

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.

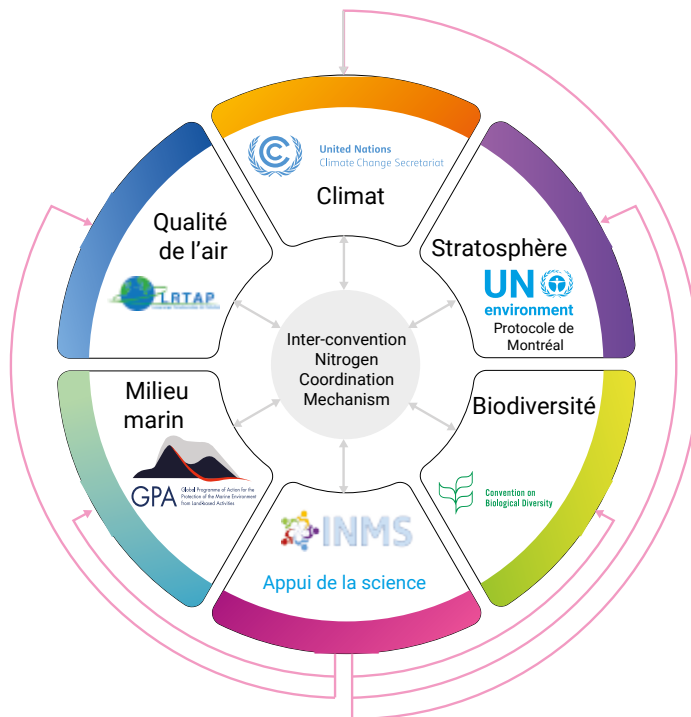
Option 3 : Adoption d'une nouvelle convention internationale pour faire face au défi de l'azote. Cette approche est actuellement peu probable.

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

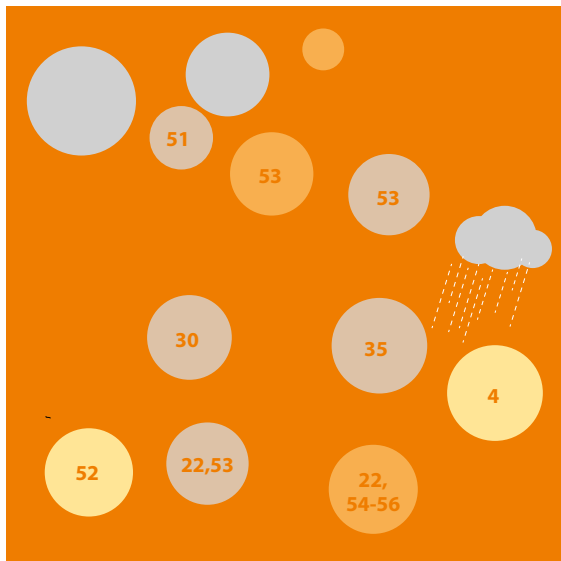
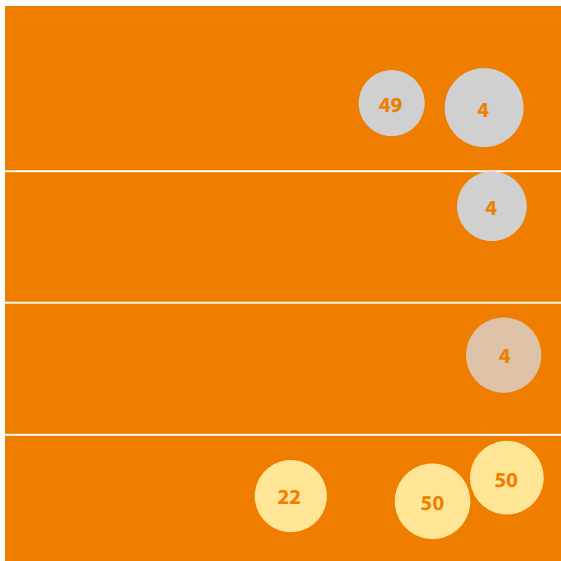
© CAFREtv

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., Erisman, 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>

