

FRONTIÈRES 2017

Questions émergentes d'ordre environnemental



© 2017 Programme des Nations Unies pour l'environnement
ISBN : 978-92-807-3681-6
Job n° : DEW/2147/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 (2017), *Frontières 2017, 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 Web : 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 d'ONU Environnement.

FRONTIÈRES 2017

Questions émergentes d'ordre environnemental

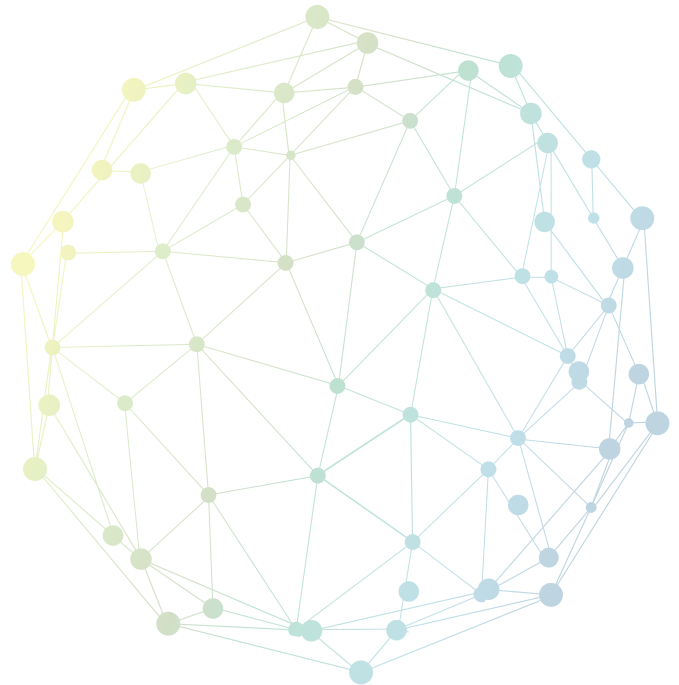


Table des matières

	Avant-propos	7
	Introduction	8
	Remerciements	10
	Résistance aux antimicrobiens : examiner la dimension environnementale	12
	Qu'est-ce que la résistance aux antimicrobiens ?	12
	Antibiotiques, co-sélection et bactéries résistantes dans l'environnement	14
	Réduire les rejets d'antimicrobiens dans l'environnement	17
	Perspectives de recherche et activités visant à éclairer l'élaboration des politiques	19
	Références bibliographiques	20
	Nanomatériaux : appliquer le principe de précaution	24
	Nanodimensions : de nouvelles découvertes sur des matériaux bien connus	24
	Formes, applications et effets spécifiques	26
	Exposition aux nanomatériaux manufacturés : risques pour la santé et l'environnement	29
	Adopter des réglementations adéquates pour protéger la santé et l'environnement	30
	Références bibliographiques	32
	Aires marines protégées : pour garantir le développement durable	36
	La santé des océans se détériore en raison de la surexploitation des ressources	36
	L'essor des aires marines protégées	38
	Une meilleure gouvernance renforce l'efficacité des aires marines protégées	39
	Perspectives d'avenir : utiliser les aires protégées pour appuyer le développement durable	42
	Références bibliographiques	44



Tempêtes de sable et de poussière : maîtriser un phénomène mondial

L'invasion du sable et de la poussière	46
Rôle de la nature, de la mauvaise gestion des terres et du changement climatique	48
Limiter les dommages en œuvrant à plus petite échelle	50
Un soutien multilatéral pour réduire les dégâts dus aux tempêtes de sable et de poussière	52
Références bibliographiques	54



Énergie solaire : favoriser l'accès à l'électricité des quartiers non raccordés au réseau

La population urbaine non raccordée au réseau	58
L'évolution de l'énergie solaire photovoltaïque	60
Des stratégies innovantes de commercialisation du solaire hors réseau	62
Poursuivre le développement des énergies renouvelables	64
Références bibliographiques	66



Déplacements environnementaux : la mobilité humaine à l'ère de l'anthropocène

Qu'est-ce que le déplacement environnemental ?	70
Comprendre le déplacement environnemental	72
Des solutions institutionnelles	74
Faire face au déplacement environnemental	76
Références bibliographiques	77



Avant-propos



Notre planète et ses habitants font face à des défis de plus en plus nombreux. Ceux-ci sont aussi variés que nos cultures et nos environnements, mais ils peuvent tous être relevés grâce à un ensemble de données scientifiques, de décisions politiques et d'actions. Le rapport *Frontières 2017* met en exergue les défis émergents qui attendent les décideurs des gouvernements, le secteur privé et la société civile. Il apporte à ces derniers les connaissances nécessaires à une action rapide et propose des solutions.

Selon un réseau mondial de scientifiques, de spécialistes et d'institutions, les questions soulevées dans ce rapport sont susceptibles d'avoir des effets considérables sur la société, l'économie et l'environnement. Certaines d'entre elles sont des problèmes de longue date qui n'ont pas fait l'objet de l'attention qu'ils méritent, comme la mauvaise gestion des terres et la désertification, responsables de tempêtes de sable et de poussière ainsi que de déplacements de population. D'autres sont des problèmes persistants dont la résolution passe par l'émergence de nouveaux outils et de nouvelles solutions comme les aires protégées, qui bénéficient aux ressources marines et côtières, ou des solutions énergétiques fiables et financièrement abordables. Enfin, certaines questions, comme l'adoption rapide des nanomatériaux et la résistance croissante aux antibiotiques, ont été soulevées à la suite de nouvelles découvertes scientifiques justifiant la mise en œuvre de mesures urgentes.

Par exemple, une station d'épuration située dans la ville de Patancheru, près d'Hyderabad, en Inde, traite chaque jour les eaux usées provenant de 90 fabricants de médicaments. Une fois traitées, celles-ci sont déversées dans l'Isakavagu, un cours d'eau qui alimente de nombreuses rivières. Or, une équipe de recherche dirigée par le professeur Joakim Larsson a analysé les eaux rejetées et a découvert que la concentration de ciprofloxacine, un antibiotique à large spectre, était suffisamment élevée pour soigner 44 000 personnes chaque jour. Ce cas n'est pas isolé : partout dans le monde, en raison du rejet des effluents municipaux, agricoles et industriels dans l'environnement, de nombreux cours d'eau, sédiments et sols sont pollués par de fortes concentrations d'antibiotiques. Ce phénomène conduit à l'augmentation progressive de la résistance des bactéries : un médicament qui protégeait jusqu'alors notre santé risque à présent de la mettre en péril sans que personne s'en aperçoive.

Il est temps pour les autorités nationales et locales, le secteur privé et la société civile de s'attaquer à l'émergence de ces menaces pour la santé de la planète et de ses habitants. J'espère que ce rapport inspirera la mise en œuvre de politiques, de stratégies et d'actions coordonnées capables de transformer ces risques en opportunités à mesure que nous œuvrons à la dépollution de notre planète et à un avenir prospère.

A handwritten signature in black ink, which reads "Erik Solheim". The signature is fluid and cursive.

Erik Solheim
Directeur de l'ONU Environnement

Introduction

Le rapport *Frontières 2017* présente six questions émergentes d'ordre environnemental revêtant une dimension mondiale. La résistance aux antimicrobiens est désormais considérée par la communauté internationale comme une menace pour la santé publique et le développement durable. Compte tenu de l'augmentation toujours plus rapide du nombre de maladies transmissibles développant une résistance aux médicaments existants, les chefs d'État ont reconnu l'urgence de la situation lors de l'Assemblée générale des Nations Unies en septembre 2016. Ils se sont engagés à traiter les causes profondes de la résistance aux antimicrobiens dans tous les secteurs, en particulier dans les domaines de la santé humaine et animale et de l'agriculture. Il existe toutefois un autre facteur de l'intensification de la résistance, moins connu mais important : le rôle des composantes environnementales. Les eaux usées et les déchets solides ménagers et agricoles finissent souvent par être rejetés dans la nature. Celle-ci devient donc un réservoir de résidus d'antibiotiques, d'agents pathogènes résistants et d'autres molécules possédant des propriétés antimicrobiennes qui favorisent le développement de gènes de résistance dans les communautés microbiennes. Dans ce rapport, l'ONU Environnement vise à mettre en exergue la dimension environnementale du problème, et à souligner la nécessité de tenir compte de l'exposition de l'environnement aux antimicrobiens dans la prise de mesures de lutte contre l'antibiorésistance.

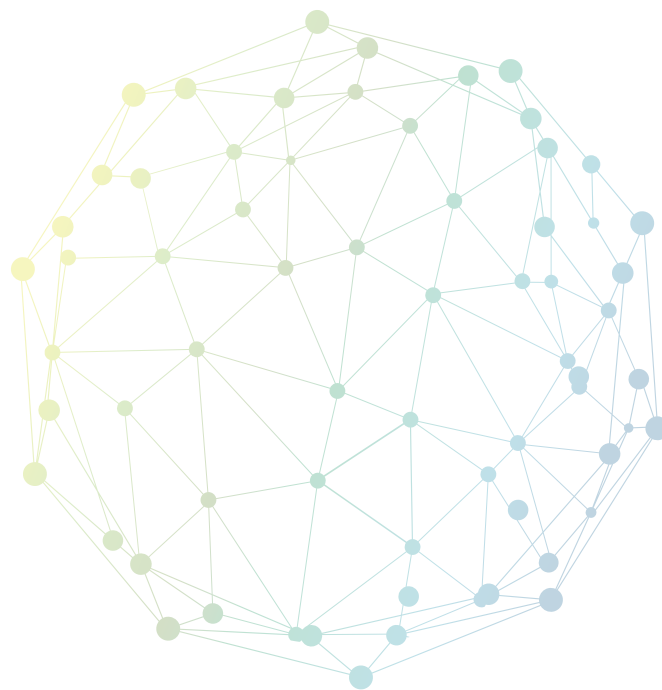
Les nanomatériaux ont rapidement intégré de nombreux aspects de notre vie quotidienne. Certains, comme le nano-argent, peuvent servir d'agents antimicrobiens. Ils sont présents dans notre environnement quotidien : produits alimentaires, cosmétiques, désinfectants, ustensiles de cuisine, produits pour bébés, vêtements, tissus, meubles ou encore appareils électroniques et électroménagers. Bien que les nanotechnologies connaissent un certain essor depuis plusieurs décennies, il est désormais possible, dans l'état actuel de la recherche, de fabriquer des matériaux traditionnels à une échelle minuscule. Les propriétés uniques des nanomatériaux manufacturés offrent des possibilités d'application incroyables. Toutefois, des questions se posent quant aux risques que ces nouveaux matériaux posent pour la santé. Certaines restent en suspens. Les enseignements tirés d'autres substances dangereuses possédant une taille, une forme et des propriétés chimiques similaires pourraient éclairer la manière de gérer l'exposition aux nanomatériaux et de profiter de leurs nombreux bénéfices en toute sécurité.

Lors de la Conférence des Nations Unies sur les océans qui s'est tenue en juin 2017, les États membres ont réaffirmé leur obligation de conserver et d'exploiter de manière responsable les océans, les mers et les ressources marines aux fins du développement durable. Encourager l'utilisation d'outils de gestion par zone efficaces et appropriés, comme les aires marines protégées, figurait parmi les engagements renouvelés des États membres. Les aires marines protégées sont l'un des meilleurs moyens de préserver la santé des océans. Au cours des dix dernières années, les pays du monde entier ont progressivement pris des mesures afin de définir de nouvelles aires marines protégées ou d'élargir les aires existantes, en vue de préserver les ressources naturelles et les fonctions écologiques des océans. À ce jour, environ 14,4 % des zones marines et côtières du monde situées dans les limites d'une juridiction nationale sont déclarées protégées. Cela témoigne de la volonté de la communauté internationale de préserver ces précieux écosystèmes. Toutefois, pour garantir l'efficacité des aires marines protégées, une gouvernance solide est également nécessaire, laquelle doit mobiliser les parties prenantes et les usagers concernés et influencer sur leurs comportements afin de réduire les effets de l'exploitation des ressources. Un réel partage des coûts et des bénéfices des aires marines protégées est indispensable pour véritablement favoriser le développement durable.

Les tempêtes de sable et de poussière sont un autre problème environnemental aux répercussions mondiales ; elles entraînent des problèmes de santé chroniques, causent des dommages à l'agriculture et aux infrastructures, intensifient l'érosion des sols et sont à l'origine de pertes économiques qui s'élèvent à des millions de dollars chaque année. Ces tempêtes sont liées à plusieurs questions environnementales et de développement qui dépassent les frontières nationales, régionales et continentales. Plusieurs études font état d'une fréquence accrue des tempêtes de poussière dans certaines régions du monde. Il existe en outre une forte corrélation entre l'utilisation non durable des terres et de l'eau d'une part et la hausse des émissions de poussières d'autre part. L'adoption de stratégies intégrées qui encouragent la gestion durable des terres et de l'eau, la restauration des écosystèmes et l'adaptation au changement climatique peut contribuer à réduire et atténuer, sur le long terme, les menaces posées par les tempêtes de sable et de poussière.

En 2015, les énergies renouvelables ont dépassé le charbon en matière de puissance installée, en grande partie grâce à l'énergie solaire. Le nombre de panneaux solaires installés chaque jour cette année-là est en effet estimé à près d'un demi-million. Dans certaines régions d'Afrique et d'Asie où l'accès à un réseau électrique fiable n'est pas garanti, les systèmes pico-photovoltaïques autonomes ont vite gagné en popularité auprès des communautés non raccordées, tant dans les régions rurales qu'urbaines, et en particulier dans les quartiers informels. Cette popularité s'explique notamment par la baisse considérable du prix des équipements et des services, ainsi que par la mise en place de formules de microcrédits innovantes et de services bancaires mobiles. Même si l'adoption d'installations solaires de petite taille ne permet pas nécessairement de résoudre sur le long terme le problème global de l'inégalité face à l'électrification et à l'accès à l'énergie, il s'agit de l'une des nombreuses possibilités de développement pouvant contribuer à éviter de futures émissions de carbone.

On estime à près de 31,1 millions le nombre de nouvelles personnes déplacées internes en 2016 en raison de conflits, de violences et de catastrophes naturelles, ces dernières ayant été à l'origine du déplacement de 24,2 millions d'entre elles. La survenue de catastrophes naturelles, telles que les tempêtes et les inondations, tout comme le changement climatique et la dégradation de l'environnement, phénomènes plus lents incluant la désertification et l'élévation du niveau de la mer, peuvent rendre des régions inhabitables et causer le déplacement temporaire ou permanent des populations qui les habitent. L'amélioration de la connaissance des risques posés par les changements climatiques et environnementaux accentue la nécessité de planifier rigoureusement l'adaptation sur place et d'élaborer des politiques adéquates afin d'éviter ou de gérer les déplacements de populations.



Remerciements

Résistance aux antimicrobiens : examiner la dimension environnementale

Auteurs principaux

[William Gaze](#), École de médecine de l'université d'Exeter, Truro, Royaume-Uni

[Michael Depledge](#), École de médecine de l'université d'Exeter, Truro, Royaume-Uni

Contributeurs et réviseurs

[Ernesto Liebana Criado](#), Autorité européenne de sécurité des aliments, Parme, Italie

[Klaus Kümmerer](#), Institut de chimie environnementale et durable, Lüneburg, Germany

[Angelo Maggiore](#), Autorité européenne de sécurité des aliments, Parme, Italie

[Oladele Ogunseitan](#), Bureau de la santé internationale et de la biodéfense, Département d'État des États-Unis, Washington DC, États-Unis

[Jessica Petrillo](#), Bureau de la santé internationale et la biodéfense, Département d'État des États-Unis, Washington DC, États-Unis

[Thomas Van Boeckel](#), ETH Zürich, Zurich, Suisse

[Evelyn Wesangula](#), ministère kenyan de la Santé, Nairobi, Kenya

[Tong Zhang](#), université de Hong Kong, Hong Kong, Chine

Nanomatériaux : appliquer le principe de précaution

Auteur principal

[Jacqueline McGlade](#), ONU Environnement, Nairobi, Kenya

Contributeurs et réviseurs

[Maarten Kappelle](#), ONU Environnement, Nairobi, Kenya

[David Quist](#), réviseur indépendant, Copenhague, Danemark

[Pinya Sarasas](#), ONU Environnement, Nairobi, Kenya

Aires marines protégées : pour garantir le développement durable

Auteurs principaux

[Peter Jones](#), University College London, Londres, Royaume-Uni

[Ruth Murray](#), University College London, Londres, Royaume-Uni

[Ole Vestergaard](#), ONU Environnement, Nairobi, Kenya

Contributeurs et réviseurs

[Steve Fletcher](#), ONU Environnement – Centre mondial de surveillance de la conservation de la nature, Cambridge, Royaume-Uni

[Richard Kenchington](#), université de Wollongong, Wollongong, Australie

[Brian MacSharry](#), ONU Environnement – Centre mondial de surveillance de la conservation de la nature, Cambridge, Royaume-Uni

[Mary Elizabeth Miller](#), Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome, Italie

Tempêtes de sable et de poussière : maîtriser un phénomène mondial

Auteurs principaux

[Gemma Shepherd](#), ONU Environnement, Nairobi, Kenya

Contributeurs et réviseurs

[Alexander Baklanov](#), Organisation météorologique mondiale, Genève, Suisse

[Valentin Foltescu](#), Coalition pour le climat et la qualité de l'air, ONU Environnement, Paris, France

[Utchang Kang](#), Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification, Bonn, Allemagne

Énergie solaire : favoriser l'accès à l'électricité des quartiers non raccordés au réseau

Auteurs principaux

Xavier Lemaire, University College London – Energy Institute, Londres, Royaume-Uni

Daniel Kerr, University College London – Energy Institute, Londres, Royaume-Uni

Contributeurs et réviseurs

Sean Khan, ONU Environnement, Nairobi, Kenya

Vincent Kitio, ONU-Habitat, Nairobi, Kenya

Yachika Reddy, société à but non lucratif Sustainable Energy Africa, Le Cap, Afrique du Sud

Alexie Seller, Pollinate Energy, Lucknow, Inde

Louise Tait, Energy Research Centre, université du Cap, Afrique du Sud

Déplacements environnementaux : la mobilité humaine à l'ère de l'anthropocène

Auteur principal

Oli Brown, ONU Environnement, Nairobi, Kenya

Contributeurs et réviseurs

Sasha Alexander, Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification, Bonn, Allemagne

Pablo Manzano Baena, Commission Gestion des écosystèmes, UICN, Gland, Suisse

Jonathan Davies, Union internationale pour la conservation de la nature (UICN), Gland, Suisse

Paolo Groppo, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome, Italie

Dina Ionesco, Organisation internationale pour les migrations, Genève, Suisse

Alice Kimani, Organisation internationale pour les migrations, Genève, Suisse

Diane Klaimi, ONU Environnement, Manama, Bahreïn

Mounir Louhaichi, Centre international de recherche agricole dans les zones arides, Beyrouth, Liban

Hassan Partow, ONU Environnement, Genève, Suisse

Nous tenons tout particulièrement à remercier :

Eili Klein et Suraj Pant, The Center for Disease Dynamics, Economics & Policy, Washington DC, États-Unis ; Amber Anderson, Angeline Djampou, Robert Few, Valentin Foltescu, Maarten Kappelle, Jian Liu, Jacqueline Martinez de Rosso, Nada Matta, Jacqueline McGlade, Pascal Muchesia, Susan Mutebi-Richards, Theuri Mwangi, Oona Tully, Edoardo Zandri et Shereen Zorba, ONU Environnement, Nairobi, Kenya

Rédacteur en chef

Pinya Sarasas, ONU Environnement, Nairobi, Kenya

Relectrice (chapitres 1 à 5)

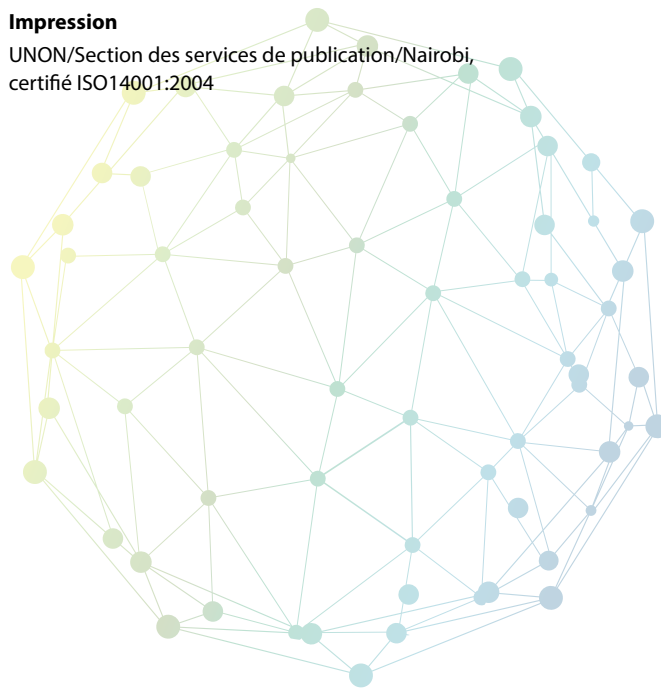
Catherine McMullen, Irlande

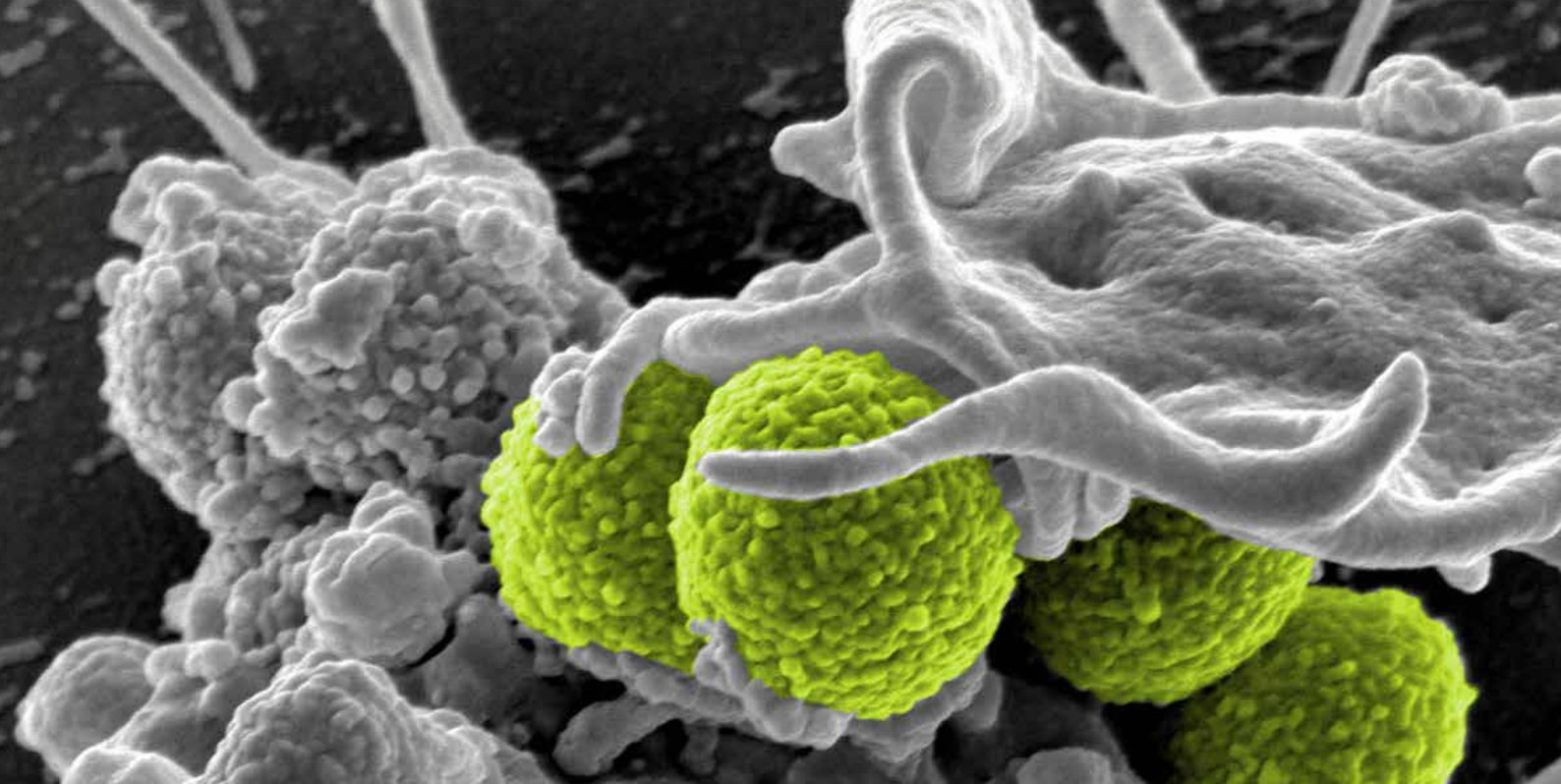
Conception graphique et mise en page

Audrey Ringler (conception graphique et mise en page) et Jane Muriithi (cartographie), ONU Environnement, Nairobi, Kenya

Impression

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





*Quatre staphylocoques dorés résistants à la méticilline enveloppés par un globule blanc humain
Crédit : Institut national américain des allergies et des maladies infectieuses*

Résistance aux antimicrobiens : examiner la dimension environnementale

Qu'est-ce que la résistance aux antimicrobiens ?

Selon l'Organisation mondiale de la santé, nous pourrions bientôt entrer dans une ère postantibiotique, où des infections bactériennes simples, auparavant guérissables, seront à nouveau mortelles et le recours à des soins médicaux courants nécessitant des traitements antibiotiques préventifs, tels que la pose d'une prothèse articulaire ou la chimiothérapie, ne sera plus possible¹. Le rapport O'Neill, commandé par le gouvernement britannique en 2014, estime que les infections résistantes aux antimicrobiens pourraient devenir la principale cause de décès dans le monde d'ici à 2050².

Les antibiotiques sont utilisés aux quatre coins du monde pour soigner et prévenir les infections bactériennes chez les êtres humains, les animaux et même les plantes. Ils sont en outre largement utilisés pour stimuler la croissance des animaux afin d'accroître la production de

viande, bien que cette pratique soit interdite dans l'Union européenne depuis 2006^{3,4}. Même si le lien entre l'utilisation abusive des antibiotiques à des fins médicales et agricoles et l'intensification de la résistance à ceux-ci est établi, le rôle du milieu naturel dans l'émergence et le développement de cette résistance a été relativement peu étudié.

La résistance aux antimicrobiens peut être intrinsèque ou acquise. Dans ce dernier cas, la résistance peut provenir de la mutation de l'ADN bactérien ou de l'acquisition de gènes de résistance au moyen d'un transfert de gènes horizontal, l'ADN passant d'une bactérie à une autre. Cette résistance acquise, qui entraîne l'échec des traitements anti-infectieux en milieu clinique et vétérinaire, est actuellement un sujet de préoccupation majeur.

De nombreux antibiotiques sont naturels, telle la pénicilline, présente à l'origine dans la moisissure du pain, mais beaucoup d'autres sont



synthétisés ou modifiés chimiquement à partir d'antibiotiques naturels pour en améliorer l'action et la stabilité⁵. Les antibiotiques sont une sous-catégorie d'antimicrobiens, des substances qui tuent les micro-organismes ou empêchent leur croissance. Ces deux termes sont souvent employés de manière interchangeable.

Il existe une concurrence entre micro-organismes, lesquels produisent des molécules antibiotiques pour freiner leur développement mutuel. Pour pouvoir survivre, les bactéries ont développé des mécanismes leur permettant de résister aux attaques de ces molécules antibiotiques. La recherche montre que l'antibiorésistance, ou résistance aux antibiotiques, y compris à certaines substances utilisées par la médecine moderne, existe depuis des millions d'années ; il semblerait donc que ce phénomène soit naturel, ancien et profondément ancré dans le génome commun des microbes⁶.

Sans intervention humaine, la sélection de la résistance existe déjà naturellement chez les populations microbiennes présentes dans le sol, dans l'eau et dans d'autres milieux. Toutefois, l'utilisation de centaines de milliers de tonnes d'antibiotiques par an, et le rejet dans l'environnement de résidus d'antibiotiques qui s'ensuit, changent radicalement l'ampleur des pressions de sélection responsables de l'augmentation des bactéries résistantes aux antibiotiques⁷. Une fois consommés, la plupart des antibiotiques sont excrétés sans avoir été métabolisés, en même temps que les bactéries résistantes. Ils sont alors rejetés dans les eaux usées ou même plus directement dans l'eau et le sol, et se mélangent aux bactéries environnementales. La présence d'autres polluants peut, directement ou indirectement, accentuer la pression de sélection favorisant l'antibiorésistance. La mesure dans laquelle l'environnement contribue à ce problème fait l'objet d'une étude approfondie, mais les réponses dépendent en partie du niveau de contamination de l'environnement et de la durée pendant laquelle les résidus antimicrobiens restent actifs.

Les bactéries présentes dans l'eau et le sol possèdent naturellement de très nombreux gènes de résistance. Des recherches ont révélé que des agents pathogènes initialement sensibles aux antibiotiques sont capables d'acquérir des gènes de résistance à partir de bactéries environnementales⁸⁻¹¹. La base génétique de l'antibiorésistance chez les bactéries et la manière dont cette résistance se propage du milieu environnemental au milieu clinique suscitent à présent un vif intérêt¹¹⁻¹³. L'exposition humaine aux bactéries environnementales et aux gènes de résistance aux antibiotiques passe par la consommation d'eau, de nourriture ou le contact direct avec l'environnement, ce qui pose la question de savoir dans quelle mesure la transmission des bactéries résistantes se produit dans le cadre de la chaîne alimentaire ou par contact direct avec l'environnement. Par exemple, des études ont révélé



Qu'est-ce qu'un antimicrobien ?

Toute substance d'origine naturelle, synthétique ou semi-synthétique capable de tuer des micro-organismes, tels que des bactéries, des virus, des protozoaires et des champignons, ou de ralentir leur croissance. Les substances antimicrobiennes sont utilisées sous forme de médicaments comme les antibiotiques, les antiviraux et les antifongiques, ou sous forme de produits chimiques comme les antiseptiques, les désinfectants et les stérilisants.

Qu'est-ce qu'un antibiotique ?

C'est une substance antimicrobienne qui, naturellement produite par des bactéries ou des champignons, est capable de tuer d'autres micro-organismes ou de ralentir leur croissance. De nombreux types d'antibiotiques sont utilisés comme médicaments pour prévenir et soigner des infections causées par des champignons et des bactéries pathogènes, ainsi que par certains parasites. La majorité des antibiotiques sont principalement utilisés contre les bactéries.

Les antibiotiques étant un type d'antimicrobiens, ces deux termes sont souvent employés de manière interchangeable.

Qu'est-ce que la résistance aux antimicrobiens ?

On parle de résistance aux antimicrobiens quand un micro-organisme devient capable de résister aux effets d'un agent antimicrobien et se multiplie en sa présence. Chaque année, dans le monde, près de 700 000 personnes meurent d'infections résistantes, les médicaments antimicrobiens disponibles ne parvenant plus à éliminer aussi efficacement les agents pathogènes qui en sont responsables.

Qu'est-ce que la sélection de la résistance ?

La sélection naturelle désigne le fait pour des organismes de s'adapter à leur milieu pour y survivre, s'y développer et s'y multiplier. Dans le cadre de la résistance aux antimicrobiens, elle se traduit par l'exercice d'une pression de sélection par les substances antimicrobiennes sur les microbes. Ainsi, ces derniers évoluent pour devenir résistants : les microbes qui résistent aux effets des antimicrobiens survivent et se reproduisent, tandis que ceux qui y sont sensibles sont éliminés ou croissent à une vitesse ralentie. L'usage excessif et l'abus d'antibiotiques augmentent la sélection de la résistance aux antibiotiques parmi les bactéries.

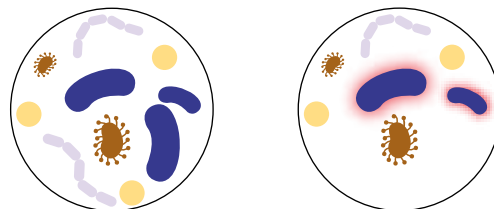
que, malgré d'importants investissements réalisés dans le traitement des eaux usées, on recense chaque année près de 6 millions de cas d'exposition à un type de bactérie *E. coli* résistant aux antibiotiques dans les eaux de baignade côtières du Royaume-Uni¹⁴. Il existe également des preuves de l'évolution de bactéries résistantes présentes chez des animaux destinés à la consommation transmises ensuite à l'être humain¹⁵.

Antibiotiques, co-sélection et bactéries résistantes dans l'environnement

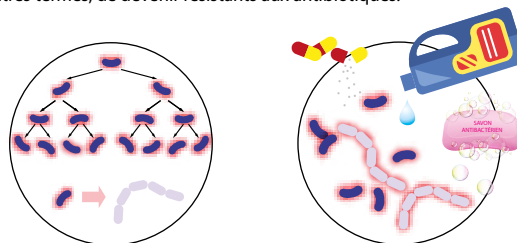
Le rejet en milieu naturel d'antibiotiques et d'autres composés antimicrobiens, tels que les désinfectants et les métaux lourds, est susceptible de déclencher la résistance des bactéries. Ces composés sont présents dans l'eau et dans le sol à différents degrés de concentration en fonction de la source et de leur comportement (vitesse de dégradation et adsorption)^{16,17}. Les eaux usées municipales contiennent de nombreux contaminants : des médicaments et des produits de toilette issus des ménages, des déchets hospitaliers possédant de fortes concentrations d'antibiotiques et de désinfectants, ainsi que des composés, comme les métaux lourds, issus d'activités industrielles. Certains sites de production pharmaceutique rejettent de très grandes quantités d'antibiotiques directement dans l'environnement, entraînant des concentrations équivalentes ou supérieures aux niveaux utilisés pour soigner les infections chez les êtres humains^{18,19}. Le niveau élevé de résistance observé près des lieux de déversement montre bien que le phénomène de sélection de la résistance aux antibiotiques se produit dans les environnements pollués²⁰. Cependant, les concentrations d'antibiotiques observées dans la plupart des effluents, des eaux de surface et des sols pourraient être 1 000 fois inférieures aux niveaux des effluents provenant de milieux cliniques, ou aux effluents bruts des milieux industriels¹⁶. Or, ce sont les contaminations présentant de faibles niveaux de concentration qui sont particulièrement importantes : la concentration est trop faible pour tuer les bactéries exposées, mais suffisante pour favoriser une résistance²¹. Il convient donc de déterminer à quel seuil les antibiotiques n'ont plus d'effet sélectif sur les communautés microbiennes. Lorsque la concentration d'antibiotiques est faible, il est possible que l'acquisition de la résistance dépende davantage du transfert de gènes à partir d'une autre bactérie, appelé transfert de gènes horizontal. Par conséquent, il est peu probable qu'une étude consistant en l'examen d'une seule espèce bactérienne en milieu gélosé puisse véritablement nous renseigner sur le développement de la résistance dans les communautés microbiennes complexes présentes dans le milieu naturel.

Le niveau de concentration d'une rivière dépend des stations d'épuration des eaux usées en amont ainsi que de la manière dont la population que ces stations desservent utilise les antibiotiques. Les stations d'épuration sont généralement conçues pour débarrasser les eaux usées des polluants ordinaires, tels que les nutriments, la matière organique, les matières en suspension et, dans une certaine mesure, les agents pathogènes, mais pas les antibiotiques²². Par ailleurs, les déchets agricoles tels que le fumier peuvent également contenir des concentrations d'antibiotiques du même ordre de grandeur que celles utilisées pour soigner les infections. Après adsorption aux particules du sol, certains antibiotiques sont neutralisés, mais d'autres restent actifs et exercent

Sélection naturelle et résistance aux antibiotiques



Dans l'univers microbien, il existe une concurrence entre les organismes, qui produisent des molécules antibiotiques pour freiner le développement d'autres organismes. Les organismes sensibles meurent. Cependant, on sait que les bactéries et les champignons ont développé des mécanismes de défense leur permettant de résister aux attaques des antibiotiques et de survivre ou, en d'autres termes, de devenir résistants aux antibiotiques.



Les gènes de résistance peuvent se transmettre à la génération suivante, et même d'une espèce de bactérie à une autre au moyen du transfert de gènes horizontal. L'utilisation excessive et abusive de médicaments antibiotiques ainsi qu'une exposition accrue aux substances antimicrobiennes dans l'environnement accroissent la sélection de la résistance aux antibiotiques chez les bactéries.

▶ Vidéo : Les antibiotiques et l'environnement : la crise silencieuse



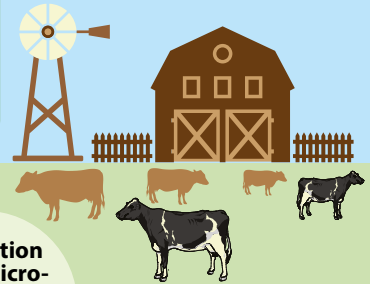
Lien de la vidéo (en anglais) : www.youtube.com/watch?v=WSiRKEUsPs

© McMaster University

La résistance aux antimicrobiens et l'environnement

L'environnement joue un rôle central dans l'antibiorésistance. Les bactéries présentes dans le sol, les cours d'eau et l'eau de mer sont susceptibles de développer une antibiorésistance au contact de bactéries résistantes, d'antibiotiques ou d'agents désinfectants issus des activités humaines. C'est ainsi que les hommes et les animaux d'élevage risquent ensuite d'être exposés à des bactéries plus résistantes présentes dans les aliments, l'eau et l'air.

La **consommation humaine d'antibiotiques** a bondi de 36 % dans les années 2000.



L'**utilisation d'antimicrobiens** dans les élevages augmentera de 67 % d'ici à 2030.

Dans les élevages intensifs, surtout dans les pays développés, les antibiotiques sont de plus en plus utilisés pour stimuler la croissance des animaux.

Jusqu'à **75 % des antibiotiques**

utilisés dans l'aquaculture pourraient finir dans le milieu environnant.

70% des antibiotiques sont consommés par des animaux.

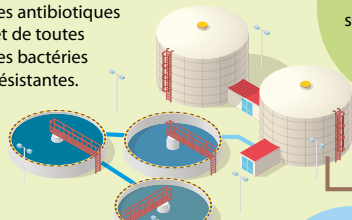
Le fumier contamine les eaux pluviales, les nappes phréatiques et les réseaux de drainage avec des antibiotiques.

Les antibiotiques peuvent être absorbés par les plantes et les cultures.



Les **principaux flux de déchets**, y compris les eaux usées, le fumier et le ruissellement des terres agricoles, contiennent des résidus d'antibiotiques et des bactéries antibiorésistantes.

Les stations d'épuration **ne peuvent pas débarrasser** les eaux usées de tous les antibiotiques et de toutes les bactéries résistantes.



Jusqu'à **80 % des antibiotiques consommés** sont excrétés dans les urines et les matières fécales.

30 % des antibiotiques sont consommés par les hommes.

Des **sources d'eau brute** et de l'**eau potable traitée** peuvent être contaminées par des bactéries antibiorésistantes.



Dans les effluents, les concentrations d'antimicrobiens sont souvent **trop faibles pour tuer** les bactéries qui s'y trouvent, mais suffisantes pour déclencher leur résistance aux antimicrobiens.

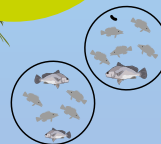
Un large éventail de **contaminants présents dans les eaux usées municipales et industrielles**

favorise la résistance des bactéries aux antimicrobiens.

Plus de **50 % des déchets solides municipaux** finissent dans des décharges, parfois sauvages. Ces déchets peuvent comprendre des médicaments non utilisés ou périmés.



Les **bactéries multirésistantes** sont très fréquentes dans les eaux marines et les sédiments à proximité des zones d'aquaculture et des effluents industriels et municipaux.



▶ Vidéo : La résistance bactérienne et ses effets sur la santé



<https://www.youtube.com/watch?v=eDhvh31vuV8>

Crédit photo : James Gathany

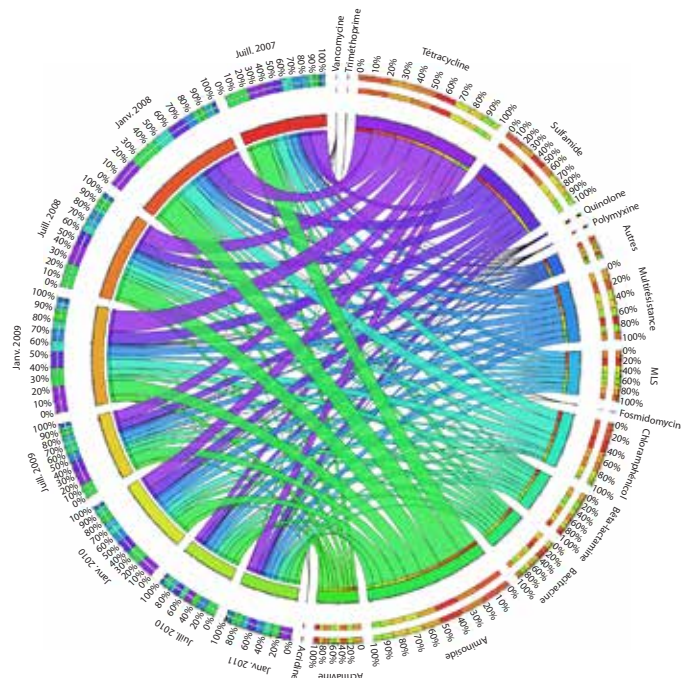
© Université d'Exeter

une pression de sélection sur les bactéries du sol²³. Il est donc essentiel d'obtenir des données spatiales et temporelles fiables sur l'exposition des communautés microbiennes aux résidus d'antimicrobiens dans les sols et l'eau afin de mieux comprendre l'ampleur du phénomène de sélection qui se produit dans les milieux naturels^{24,25}. Les choses se compliquent lorsque les résidus d'antibiotiques sont mélangés à d'autres polluants, avec lesquels ils peuvent se combiner pour générer des pressions de sélection plus fortes que celles des substances individuelles²⁶. De plus en plus de preuves témoignent de la sélection indirecte ou co-sélection de la résistance aux antibiotiques en présence de métaux lourds tels que l'argent, le cadmium, le cuivre, le mercure et le zinc, ainsi qu'avec des composés possédant des propriétés antimicrobiennes tels que les désinfectants et les biocides²⁶⁻³⁰. Or, les métaux lourds sont très répandus dans les environnements agricoles, industriels et urbains. Il est par conséquent probable que la résistance aux antimicrobiens augmente chez les bactéries exposées même en l'absence de pression de sélection antibiotique directe.

Comme les antibiotiques et les bactéries y résistant proviennent de la même source, on les trouve souvent ensemble. Les principaux flux de déchets, y compris les eaux usées, le fumier et le ruissellement des terres agricoles, contiennent également des bactéries résistantes. Il est probable que le déversement d'eaux usées non traitées contribue pour une large part à l'augmentation de l'antibiorésistance dans l'environnement, mais il s'agit d'un problème très difficile à résoudre. Même dans les pays qui ont largement investi dans le traitement des eaux usées et mis en place des stratégies de gestion pour réduire la pollution aquatique causée par l'agriculture, on observe encore d'importants écarts quant à la quantité de bactéries antibiorésistantes

dans les bassins versants des cours d'eau. Les recherches portant sur la capacité des processus de traitement des eaux usées à réduire la quantité de bactéries résistantes dans les effluents ont abouti à des résultats contradictoires : si certaines études ont en démontré l'efficacité, d'autres ont révélé une augmentation de la quantité de bactéries résistantes dans les effluents par rapport aux influents²². Selon ces dernières observations, les stations d'épuration pourraient donc être l'un des principaux endroits du transfert de gènes horizontal, en raison de la forte densité de bactéries et de la richesse en nutriments qui les caractérisent^{31,32}. Par conséquent, les eaux usées et les boues d'épuration constituent d'importants outils de surveillance permettant d'évaluer la quantité de bactéries antibiorésistantes et de gènes de résistance dans la population humaine^{33,34}.

Quantité de gènes de résistance aux antimicrobiens observés dans les boues activées de la station d'épuration des eaux usées de Shatin à Hong Kong, en Chine, entre 2007 et 2011



Avec l'aimable autorisation du Pr. Tong Zhang, université de Hong Kong

Voir également Yang et al. (2013)³³

Les lignes croisées illustrent la quantité de gènes de résistance observés dans huit échantillons de boues. Plus la ligne est épaisse, plus la classe de gènes de résistance est abondante. Par exemple, les gènes résistants à l'aminoside et à la tétracycline sont les types dominants détectés dans tous les échantillons.



Réduire les rejets d'antimicrobiens dans l'environnement

Les politiques réglementaires actuelles ont tardé à prendre en considération le rejet d'antibiotiques et de bactéries antibiotorésistantes à sa juste mesure. La prise de conscience croissante du risque de dégradation des organismes aquatiques que laissent planer les résidus d'antibiotiques a poussé l'Union européenne à placer trois substances antibiotiques sur une liste de vigilance relative aux polluants aquatiques émergents en 2015³⁵. Certains fabricants de médicaments ont également mis en place des initiatives volontaires visant à réduire la concentration d'antibiotiques dans les effluents²⁵. En septembre 2016, plusieurs grandes sociétés pharmaceutiques ont signé une feuille de route visant à lutter contre la résistance aux antimicrobiens, présentée aux Nations Unies et axée sur la gestion environnementale de la production d'antibiotiques³⁶.

Certains composés favorisant la co-sélection, comme le triclosan, utilisé dans de nombreux produits de consommation, ont été interdits ou limités dans plusieurs pays. L'Association des nations de l'Asie du Sud-Est a restreint la concentration maximale de triclosan autorisée dans les cosmétiques et les produits de toilette³⁷. En 2016, aux États-Unis, la Food and Drug Administration (Agence américaine des produits alimentaires et médicamenteux) a interdit la commercialisation de produits antibactériens en vente libre contenant du triclosan et 18 autres composés, certaines données suggérant qu'une exposition à long terme à ces principes actifs peut entraîner des risques pour la santé, tels qu'une résistance bactérienne ou des effets hormonaux³⁸.

Une plus grande réglementation des antibiotiques et des composés responsables de la co-sélection pourrait encourager l'élaboration de solutions d'atténuation et de réduction des risques financièrement abordables et alimenter le débat sur la responsabilité à l'égard des résidus d'antibiotiques et des bactéries résistantes qu'ils génèrent. Il est certain que les fabricants d'antibiotiques, les professionnels de santé qui les prescrivent, les agriculteurs et même les patients sont tous en partie responsables des effets nocifs des résidus d'antibiotiques rejetés dans l'environnement. Une évolution aussi significative de la manière dont nous luttons contre l'antibiorésistance, en particulier dans le cadre de l'approche « One Health » (« Un monde, une santé »), pourrait transformer les mesures incitatives visant à réduire l'utilisation d'antibiotiques et à améliorer les pratiques de gestion des déchets.

Il existe déjà de nombreuses stratégies d'atténuation qui visent à diminuer ou à éliminer les antibiotiques et les bactéries résistantes présents dans les flux de déchets rejetés dans la nature : le traitement secondaire et tertiaire des eaux usées ; la filtration sur membrane

Co-sélection de résistance aux antibiotiques, aux métaux et aux biocides



▶ Vidéo : Pourquoi la FDA a-t-elle interdit le savon antibactérien ?



Lien de la vidéo (en anglais) : www.youtube.com/watch?v=9dExiRwh-DQ
Crédit photo : Galushko Sergey/Shutterstock.com

© SciShow

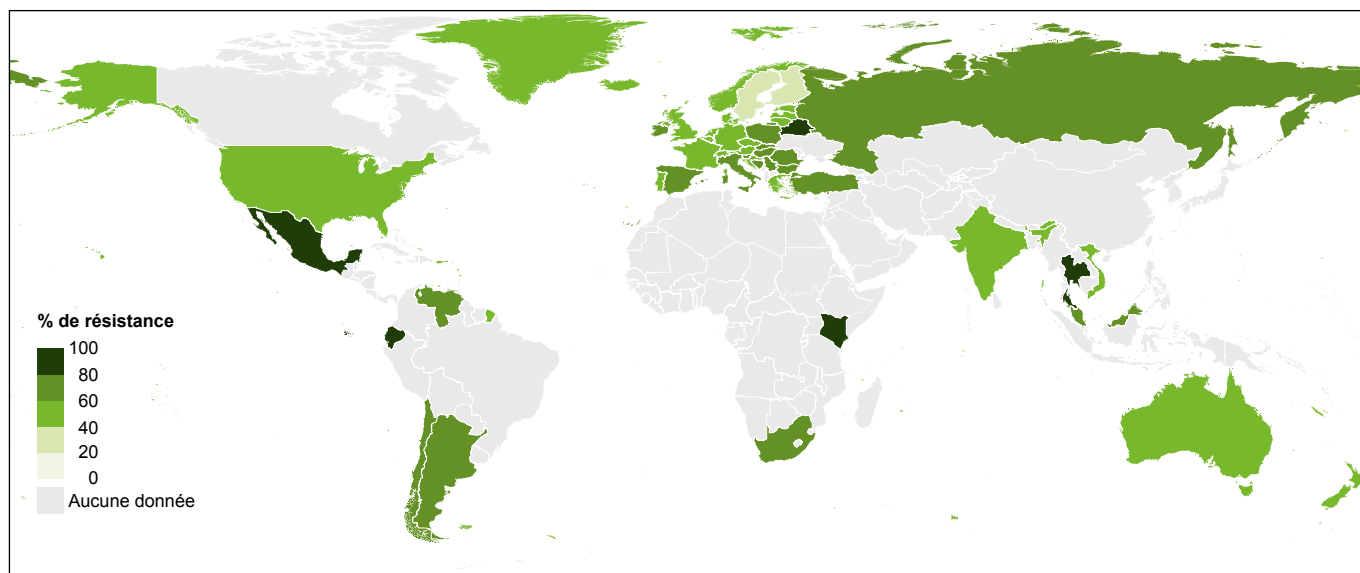
et l'ozonation, qui éliminent les antibiotiques et les bactéries ; ainsi que la désinfection aux UV et le traitement thermique, qui éliminent encore plus efficacement les bactéries viables. Toutes ces approches n'ont pas la même efficacité, et certaines d'entre elles peuvent avoir des conséquences imprévues, telles que la création de sous-produits toxiques. Il est également possible de traiter les déchets d'origine animale avant de les utiliser sur les terres agricoles et de recourir à des méthodes simples permettant de réduire la pollution de l'eau. Les obstacles à l'adoption de telles approches sont principalement financiers et sont liés à la capacité ou à la volonté des sociétés d'évoluer. Il est pourtant nécessaire et urgent de mieux appréhender les risques posés par la résistance aux antimicrobiens dans l'environnement et de mettre au point des technologies d'atténuation durables.

Certains ont affirmé que le problème était si complexe qu'il en devenait insondable, compte tenu de la probabilité des interactions entre un nombre inimaginable de bactéries possédant une capacité apparemment illimitée à transmettre leurs gènes, du mélange complexe de composés favorisant la sélection de la résistance, et de la diversité des mécanismes créant une résistance³⁹. Ce serait probablement

faux si nous possédions assez de données, mais avons-nous le temps d'attendre d'en avoir réuni suffisamment pour prendre des décisions ?

Nous savons que partout où il y a de l'activité humaine, des niveaux accrus d'antibiotiques et d'antibiorésistance émergent dans l'environnement. Nous savons qu'en laboratoire, certains antibiotiques sélectionnent l'antibiorésistance, y compris à des concentrations semblables à celles que l'on trouve dans la nature. Nous savons également que des gènes de résistance importants sur le plan clinique, récemment apparus chez des agents pathogènes, provenaient de bactéries issues du milieu naturel. Il existe déjà des données montrant que la transmission est susceptible de se produire dans le cadre de la chaîne alimentaire et en cas d'exposition aux environnements pollués. On exige souvent que les décisions prises se fondent sur des preuves, mais dans le cas d'un problème aussi complexe que l'antibiorésistance, combien nous en faut-il ? Il est tellement difficile, voire impossible, de réunir suffisamment de données du type de celles issues d'essais cliniques que nous risquons de retarder considérablement la réglementation de l'utilisation des antibiotiques et la mise en œuvre de stratégies d'atténuation.

Pourcentage d'isolats *E. coli* invasifs résistants aux aminopénicillines



Avec l'aimable autorisation du Center for Disease Dynamics, Economics & Policy (CDDEP) Pour consulter plus de cartes sur l'antibiorésistance, rendez-vous sur la page <http://resistancemap.cddep.org/AntibioticResistance.php>



Perspectives de recherche et activités visant à éclairer l'élaboration des politiques

De plus en plus d'agents pathogènes importants sur le plan clinique sont antibiorésistants, l'élevage s'intensifie en raison de la hausse de la demande et la croissance démographique ainsi que l'urbanisation rapide augmentent la pollution. Au vu de ces tendances, les processus qui favorisent l'accroissement de la résistance aux antibiotiques devraient se poursuivre pendant un certain temps encore, à moins de mettre en place une action concertée et coordonnée à l'échelle mondiale. Il faut espérer que ces tendances nous inciteront à mieux gérer le problème et à adopter des politiques qui tiennent compte du rôle essentiel joué par le milieu naturel.

Certaines mesures de précaution pourraient consister notamment à réduire globalement le déversement dans la nature d'antibiotiques et de composés favorisant la co-sélection de la résistance, en utilisant ces derniers de manière plus mesurée et plus judicieuse et en améliorant la gestion des eaux usées dans les lieux critiques que sont les hôpitaux, les sites de fabrication de médicaments, les stations d'épuration des eaux usées et les sources agricoles. D'autres précautions impliquent de cesser d'utiliser les antibiotiques pour favoriser la croissance des animaux d'élevage, de limiter l'utilisation de produits ménagers et de toilette contenant des substances antimicrobiennes, et d'encourager les innovations technologiques qui font en sorte que les antibiotiques nouvellement mis au point se décomposent rapidement après avoir agi.

Des politiques responsables doivent être étayées par des travaux de recherche fondamentale examinant d'une part la manière dont la contamination chimique du milieu naturel par les antimicrobiens et par les composés favorisant la co-sélection de la résistance contribue aux niveaux globaux de résistance aux antimicrobiens, et d'autre part l'évolution et la transmission de cette résistance. Par exemple, des études portant sur le devenir des résidus d'antibiotiques en contact avec le sol peuvent aider les organismes de réglementation à déterminer quels antibiotiques restent bioactifs (c'est-à-dire capables d'exercer une pression de sélection) et nécessitent donc une attention particulière²³. De même, le fait d'en savoir plus sur la capacité des antimicrobiens à sélectionner la résistance en milieu aquatique peut nous aider à mettre au point des mesures de réglementation et des stratégies de gestion des eaux usées plus efficaces, fondées sur les effets de la sélection plutôt que sur la concentration des effluents. Il est essentiel de diffuser plus largement les découvertes pour sensibiliser davantage le public ainsi que les responsables politiques et communautaires à cette question.

S'appuyer sur l'engagement citoyen pour surveiller la présence d'antimicrobiens dans l'environnement

Pour ralentir la résistance aux antimicrobiens, les scientifiques doivent comprendre comment, dans différents milieux, les bactéries entrent en contact avec les antimicrobiens et les composés favorisant la co-sélection de la résistance, et dans quelle mesure cette exposition favorise l'émergence et la propagation de la résistance. De nombreux obstacles, tels que le manque de temps, de ressources et de données, nous empêchent de répondre à ces questions fondamentales.

Il serait possible de recourir à la société civile pour compléter le travail des spécialistes scientifiques et techniques ; en outre, tenir compte de ses contributions permettrait de l'associer pleinement à la solution et de la sensibiliser à la question. Impliquer des parties prenantes issues de divers secteurs pourrait permettre de combler le déficit de données et d'apporter de nouveaux éclairages, ce qui pourrait aider les scientifiques à détecter les zones particulièrement exposées à la pollution aux antimicrobiens, à distinguer des tendances et à identifier des stratégies d'intervention.

Par exemple, des outils en ligne pourraient inciter les agriculteurs à saisir des données sur les types et quantités d'antibiotiques qu'ils utilisent, renseignant ainsi sur la manière dont les eaux usées contenant des résidus d'antibiotiques sont évacuées. Les utilisateurs intéressés pourraient entrer des données sur la façon dont ils se servent des antibiotiques, se défont des médicaments périmés ou recourent à des produits ménagers aux propriétés antimicrobiennes. Les collégiens et lycéens pourraient prélever des échantillons d'eau et de sol, voire des échantillons fécaux issus d'espèces animales de référence, pour les analyser dans le cadre de projets encadrés par des scientifiques^{40,41}. Enfin, l'organisation de marathons de programmation, couramment appelés hackathons, dans le cadre de campagnes de lutte contre la résistance aux antimicrobiens donnerait l'occasion aux programmeurs de contribuer à la mise au point de nouveaux outils, tels que des applications mobiles, permettant l'identification chimique et l'analyse statistique des niveaux de concentration et des tendances temporelles.

En cas d'échec thérapeutique à cause de l'antibiorésistance, le réflexe est d'augmenter la dose d'antibiotiques. Par conséquent, ces médicaments sont trop utilisés et de nouveaux antibiotiques sont constamment demandés en remplacement de ceux qui sont devenus inefficaces. Quand les médecins et les vétérinaires se trouvent face à des patients qui pourraient bénéficier d'un traitement antibiotique, la question de la résistance aux antimicrobiens dans la nature n'est pas leur priorité. Pourtant, il est nécessaire d'empêcher les antibiotiques viables, les composés favorisant la co-sélection de la résistance et les bactéries résistantes d'être rejetés en milieu naturel, où ils sont susceptibles de participer à l'émergence de nouveaux gènes de résistance. En l'absence de prévention, nous courons le risque direct et sérieux d'être exposés à des réservoirs naturels d'agents pathogènes résistants aux antimicrobiens.

Références bibliographiques

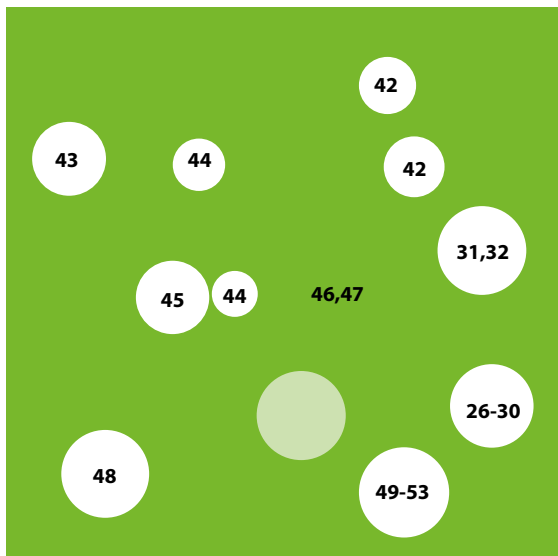
- Chan, M. (2011). World Health Day 2011: Combat drug resistance: no action today means no cure tomorrow. Statement by WHO Director-General, Dr Margaret Chan 6 April 2011. World Health Organization, Geneva. http://www.who.int/mediacentre/news/statements/2011/whd_20110407/en/
- O'Neill Commission (2014). *Review on Antimicrobial Resistance: Tackling a crisis for the health and wealth of nations*. Review on Antimicrobial Resistance, London. <https://amr-review.org/Publications.html>
- Angelakis, E., Merhej, V. and Raoult D. (2013) Related actions of probiotics and antibiotics on gut microbiota and weight modification. *The Lancet Infectious Diseases*, 13(10), 889-99. https://www.researchgate.net/publication/257134399_Related_actions_of_probiotics_and_antibiotics_on_gut_microbiota_and_weight_modification
- Cogliani, C., Goossens, H. and Greko, C. (2011). Restricting Antimicrobial Use in Food Animals: Lessons from Europe. *Microbe*, 6(6), 274–279. <https://louse.house.gov/sites/slaughter.house.gov/files/migrated/uploads/Cogliani%202011.pdf>
- O'Brien, J. and Wright, G.D. (2011). An ecological perspective of microbial secondary metabolism. *Current Opinion in Biotechnology*, 22(4), 552-558. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958166911000620>
- Bhullar, K., Waglchner, N., Pawlowski, A., Koteva, K., Banks, E.D., Johnston, M.D., Barton, H.A. and Wright, G.D. (2012). Antibiotic Resistance is Prevalent in an Isolated Cave Microbiome. *PLoS ONE*, 7(4), e34953. <http://journals.plos.org/plosone/article/file?id=10.1371/journal.pone.0034953&type=printable>
- Gaze, W.H., Zhang, L., Abdoulsam, N.A., Hawkey, P.M., Calvo-Bado, L., Royle, J., Brown, H., Davis, S., Kay, P., Boxall, A.B.A. and Wellington, E.M.H. (2011). Impacts of anthropogenic activity on the ecology of class 1 integrons and integron-associated genes in the environment. *The International Society for Microbial Ecology*, 5, 1253-1261. <https://www.nature.com/ismej/journal/v5/n8/full/ismej201115a.html>
- Humeniuk, C., Arlet, G., Gautier, V., Grimont, P., Labia, R. and Philippon, A. (2002). Beta-lactamases of *Kluyvera ascorbata*, probable progenitors of some plasmid-encoded CTX-M types. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 46(9), 3045-3049. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC127423/pdf/0710.pdf>
- Nordmann, P., Lartigue, M.F. and Poirel, L. (2008). Beta-lactam induction of ISEcp1B-mediated mobilization of the naturally occurring bla(CTX-M) beta-lactamase gene of *Kluyvera ascorbata*. *FEMS Microbiology Letter*, 288, 247-249. <https://academic.oup.com/femsle/article-pdf/288/2/247/1415383/288-2-247.pdf>
- Poirel, L., Rodriguez-Martinez, J.M., Mammari, H., Liard, A. and Nordmann, P. (2005). Origin of plasmid-mediated quinolone resistance determinant QnrA. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 49(8), 3523-3525. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1196254/pdf/0337-05.pdf>
- Wellington, E.M., Boxall, A.B., Cross, P., Feil, E.J., Gaze, W.H., Hawkey, P.M., Johnson-Rollings, A.S., Jones, D.L., Lee, N.M., Otten, W., Thomas, C.M. and Williams, A.P. (2013). The role of the natural environment in the emergence of antibiotic resistance in Gram-negative bacteria. *The Lancet Infectious Diseases*, 13(2), 155-165. [http://www.thelancet.com/pdfs/journals/laninf/PIIS1473-3099\(12\)70317-1.pdf](http://www.thelancet.com/pdfs/journals/laninf/PIIS1473-3099(12)70317-1.pdf)
- Ashbolt, N.J., Amezquita, A., Backhaus, T., Borriello, P., Brandt, K.K., Collignon, P., Coors, A., Finley, R., Gaze, W.H., Heberer, T., Lawrence, J.R., Larsson, D.G.J., McEwen, S.A., Ryan, J.J., Schönfeld, J., Silley, P., Snape, J.R., Van den Eede, C. and Topp, E. (2013). Human Health Risk Assessment (HHRA) for environmental development and transfer of antibiotic resistance. *Environmental Health Perspectives*, 121(9), 993-1001. <https://ehp.niehs.nih.gov/wp-content/uploads/121/9/ehp.1206316.pdf>
- Finley, R.L., Collignon, P., Larsson, D.G.J., McEwen, S.A., Li, X.Z., Gaze, W.H., Reid-Smith, R., Timinouni, M., Graham, D.W. and Topp, E. (2013). The scourge of antibiotic resistance: the important role of the environment. *Clinical Infectious Diseases*, 57(5), 704-710. <https://academic.oup.com/cid/article-pdf/57/5/704/885497/cit355.pdf>
- Leonard, A.F., Zhang, L., Balfour, A.J., Garside, R. and Gaze, W.H. (2015). Human recreational exposure to antibiotic resistant bacteria in coastal bathing waters. *Environment International*, 82, 92-100. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412015000409>
- Price, L.B., Stegger, M., Hasman, H., Aziz, M., Larsen, J., Andersen, P.S., Pearson, T., Waters, A.E., Foster, J.T., Schupp, J., Gillece, J., Driebe, E., Liu, C.M., Springer, B., Zdvoc, I., Battisti, A., Franco, A., Żmudzki, J., Schwarz, S., Butaye, P., Jouy, E., Pomba, C., Porrero, C., Ruimy, R., Smith, T.C., Robinson, A.D., Weese, J.S., Arriola, C.S., Yu, F., Laurent, F., Keim, P., Skov, R. and Aarestrup, F.M. (2012). *Staphylococcus aureus* CC398: Host adaptation and emergence of methicillin resistance in livestock. *mBio*, 3(1), e00305-e00311. <http://mbio.asm.org/content/3/1/e00305-11.full.pdf+html>
- Kummerer, K. (2009). Antibiotics in the aquatic environment – a review – part I. *Chemosphere*, 75(4), 417-434. https://www.researchgate.net/publication/284296697_Antibiotics_in_the_aquatic_environment_-_A_review
- Kummerer, K. (2009). Antibiotics in the aquatic environment – a review – part II. *Chemosphere*, 75(4), 435-441. https://www.researchgate.net/publication/23959090_Antibiotics_in_the_aquatic_environment_-_A_review_-_Part_II
- Larsson, D.G.J. (2010). Release of active pharmaceutical ingredients from manufacturing sites – need for new management strategies. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 6(1), 184-186. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ieam.20/epdf>
- Larsson, D.G.J. (2014). Pollution from drug manufacturing: review and perspectives. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 369, 20130571. <http://rspb.royalsocietypublishing.org/content/369/1656/20130571.full.pdf>
- Rutgersson C., Fick, J., Marathe, N., Kristiansson, E., Janzon, A., Angelin, M., Johansson, A., Shouche, Y., Flach, C.F. and Larsson, D.G. (2014).



- Fluoroquinolones and qnr genes in sediment, water, soil, and human fecal flora in an environment polluted by manufacturing discharges. *Environmental Science & Technology*, 48(14), 7825-7832.
21. Gullberg, E., Cao, S., Berg, O.G., Ilback, C., Sandegren, L., Hughes, D. and Andersson, D.I. (2011). Selection of resistant bacteria at very low antibiotic concentrations. *PLoS Pathogens*, 7(7), e1002158. <http://journals.plos.org/plospathogens/article/file?id=10.1371/journal.ppat.1002158&type=printable>
 22. Pruden, A., Larsson, D.G., Amezquita, A., Collignon, P., Brandt, K.K., Graham, D.W., Lazorchak, J.M., Suzuki, S., Silley, P., Snape, J.R., Topp, E., Zhang, T. and Zhu, Y.G. (2013). Management options for reducing the release of antibiotics and antibiotic resistance genes to the environment. *Environmental Health Perspectives*, 121(8), 878-885. <https://ehp.niehs.nih.gov/wp-content/uploads/121/8/ehp.1206446.pdf>
 23. Subbiah, M., Mitchell, S.M., Ullman, J.L. and Call, D.R. (2011). β -Lactams and Florfenicol Antibiotics Remain Bioactive in Soils while Ciprofloxacin, Neomycin, and Tetracycline Are Neutralized. *Applied and Environmental Microbiology*, 77(20), 7255-7260. <http://aem.asm.org/content/77/20/7255.full.pdf+html>
 24. Berendonk, T.U., Manaia, C.M., Merlin, C., Fatta-Kassinos, D., Cytryn, E., Walsh, F., Burgmann, H., Sorum, H., Norstrom, M., Pons, M., Kreuzinger, N., Huovinen, P., Stefani, S., Schwartz, T., Kisanadri, V., Baquero, F. and Martinez, J.L. (2015). Tackling antibiotic resistance: the environmental framework. *Nature Reviews Microbiology*, 13, 310-317. <https://www.nature.com/nrmicro/journal/v13/n5/full/nrmicro3439.html>
 25. Boxall, A.B.A., Rudd, M.A., Brooks, B.W., Caldwell, D.J., Choi, K., Hickmann, S., Innes, E., Ostapyk, K., Staveley, J.P., Verslycke, T., Ankley, G.T., Beazley, K.F., Belanger, S.E., Berninger, J.P., Carriquiriborde, P., Coors, A., DeLeo, P.C., Dyer, S.D., Ericson, J.F., Gagné, F., Giesy, J.P., Gouin, T., Hallstrom, L., Karlsson, M.V., Larsson, D.G.J., Lazorchak, J.M., Mastrocco, F., McLaughlin, A., McMaster, M.E., Meyerhoff, R.D., Moore, R., Parrott, J.L., Snape, J.R., Murray-Smith, R., Servos, M.R., Sibley, P.K., Straub, J.O., Szabo, N.D., Topp, E., Tetreault, G.R., Trudeau, V.L. and Van Der Kraak, G. (2012). Pharmaceuticals and personal care products in the environment: what are the big questions? *Environmental Health Perspectives*, 120(9), 1221-1229. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3440110/pdf/ehp.1104477.pdf>
 26. Gullberg E, Albrecht, L.M., Karlsson, C., Sandegren, L. and Andersson, D.I. (2014). Selection of a multidrug resistance plasmid by sublethal levels of antibiotics and heavy metals. *mBio*, 5(5), e01918-14. <http://mbio.asm.org/content/5/5/e01918-14.full.pdf+html>
 27. Baker-Austin, C., Wright, M.S., Stepanauskas, R., McArthur, J.V. (2006). Co-selection of antibiotic and metal resistance. *Trends in Microbiology*, 14(4), 176-182. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16537105>
 28. Gaze, W.H., Zhang, L., Abdouslam, N.A., Hawkey, P.M., Calvo-Bado, L., Royle, J., Brown, H., Davis, S., Kay, P., Boxall, A.B.A. and Wellington, E.M. (2011). Impacts of anthropogenic activity on the ecology of class 1 integrons and integron-associated genes in the environment. *The ISME Journal*, 5(8), 1253-1261. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21368907>
 29. Wales, A.D. and Davies, R.H. (2015). Co-Selection of Resistance to Antibiotics, Biocides and Heavy Metals, and Its Relevance to Foodborne Pathogens. *Antibiotics*, 4(4), 567-604. <http://www.mdpi.com/2079-6382/4/4/567/pdf>
 30. Seiler, C. and Berendonk, T.U. (2012). Heavy metal driven co-selection of antibiotic resistance in soil and water bodies impacted by agriculture and aquaculture. *Frontiers in Microbiology*, 3(399). <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fmicb.2012.00399/full>
 31. Stalder, T., Barraud, O., Casellas, M., Dagot, C. and Ploy, M.-C. (2012). Integron involvement in environmental spread of antibiotic resistance. *Frontiers in Microbiology*, 3(119). <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fmicb.2012.00119/full>
 32. Tennstedt, T., Szczepanowski, R., Braun, S., Pühler, A. and Schlüter, A. (2003). Occurrence of integron-associated resistance gene cassettes located on antibiotic resistance plasmids isolated from a wastewater treatment plant. *FEMS Microbiology Ecology*, 45(3), 239-252. <https://academic.oup.com/femsec/article-pdf/45/3/239/18091371/45-3-239.pdf>
 33. Yang, Y., Li, B., Ju, F. and Zhang, T. (2013). Exploring variation of antibiotic resistance genes in activated sludge over a four-year period through a metagenomic approach. *Environmental Science & Technology*, 47(18), 10197-10205. <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es4017365>
 34. Zhang, T. (2016). Antibiotics and resistance genes in wastewater treatment plants. *AMR Control*, 9 July 2016. <http://resistancecontrol.info/amr-in-food-water-and-the-environment/antibiotics-and-resistance-genes-in-wastewater-treatment-plants/>
 35. EU JRC (2016). *First Watch List for emerging water pollutants*. The Joint Research Centre of the European Union. <https://ec.europa.eu/jrc/en/news/first-watch-list-emerging-water-pollutants>
 36. IFPMA (2016). Leading Pharmaceutical Companies Present Industry Roadmap to Combat Antimicrobial Resistance. International Federation of Pharmaceutical Manufacturers & Association Press Release, 20 September 2016. <https://www.ifpma.org/resource-centre/leading-pharmaceutical-companies-present-industry-roadmap-to-combat-antimicrobial-resistance/>
 37. ASEAN (2016). Opinion on Triclosan in cosmetic products. The Association of Southeast Asian Nations http://aseancosmetics.org/uploads/UserFiles/Opinion%20on%20Triclosan%20Feb_%202016.pdf
 38. US-FDA. FDA issues final rule on safety and effectiveness of antibacterial soaps. United States Food and Drug Administration. <https://www.fda.gov/newsevents/newsroom/pressannouncements/ucm517478.htm>
 39. Smith, D.L., Dushoff, J. and Morris, J.G. (2005). Agricultural antibiotics and human health. *PLoS Medicine*, 2(8), e232. <http://journals.plos.org/plosmedicine/article?id=10.1371/journal.pmed.0020232>
 40. Macquarie University (2017). Citizen scientists tackling antibiotic resistance one possum poop at a time. *This Week*, 7 August 2017. Macquarie University, Sydney. <http://www.mq.edu.au/thisweek/2017/08/07/citizen-scientists-tackling-antibiotic-resistance-one-possum-poop-at-a-time>

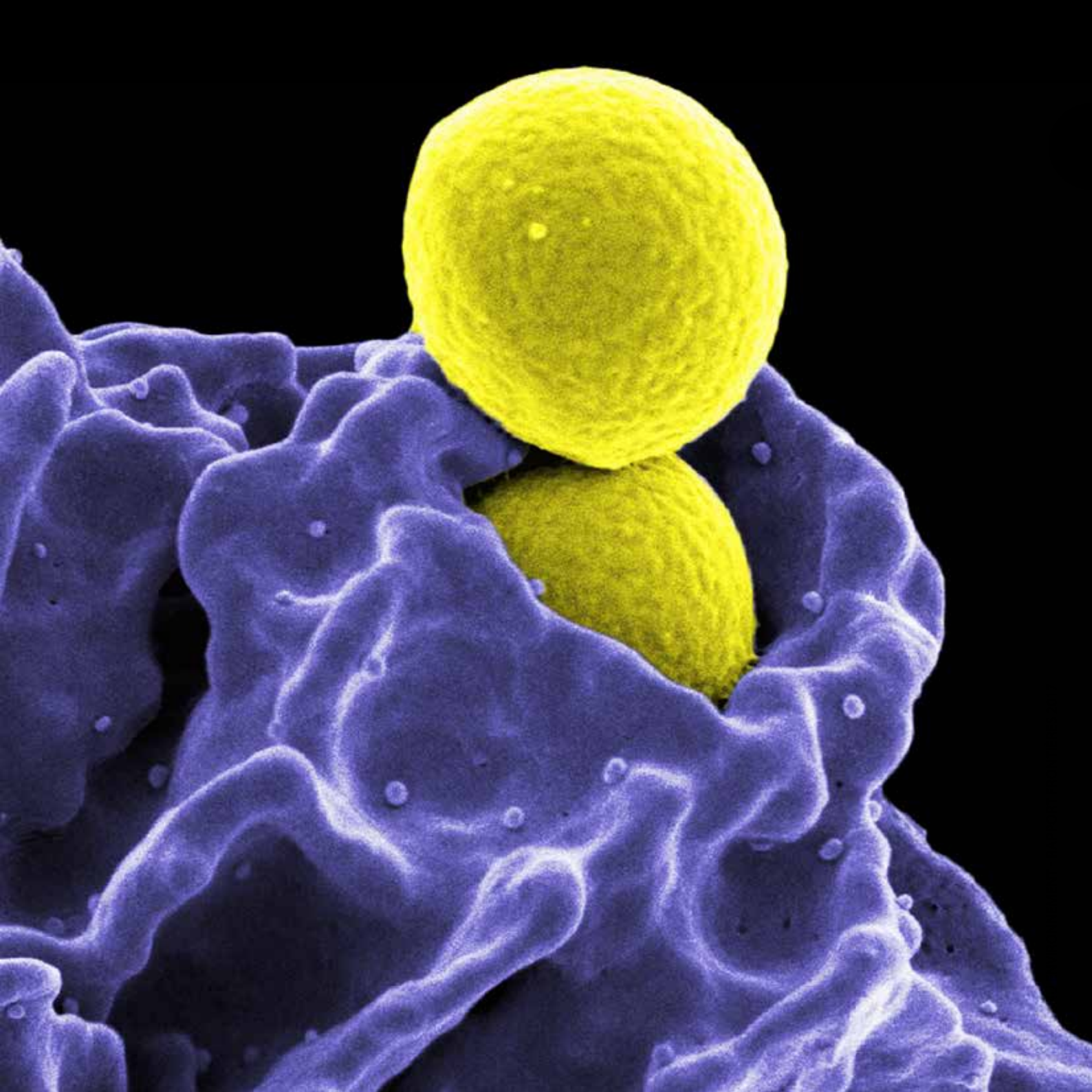
41. NSF (2017). RAISE: Neighborhood Environments as Socio-Techno-bio Systems. National Science Foundation's Awards website. https://www.nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD_ID=1744724&HistoricalAwards=false

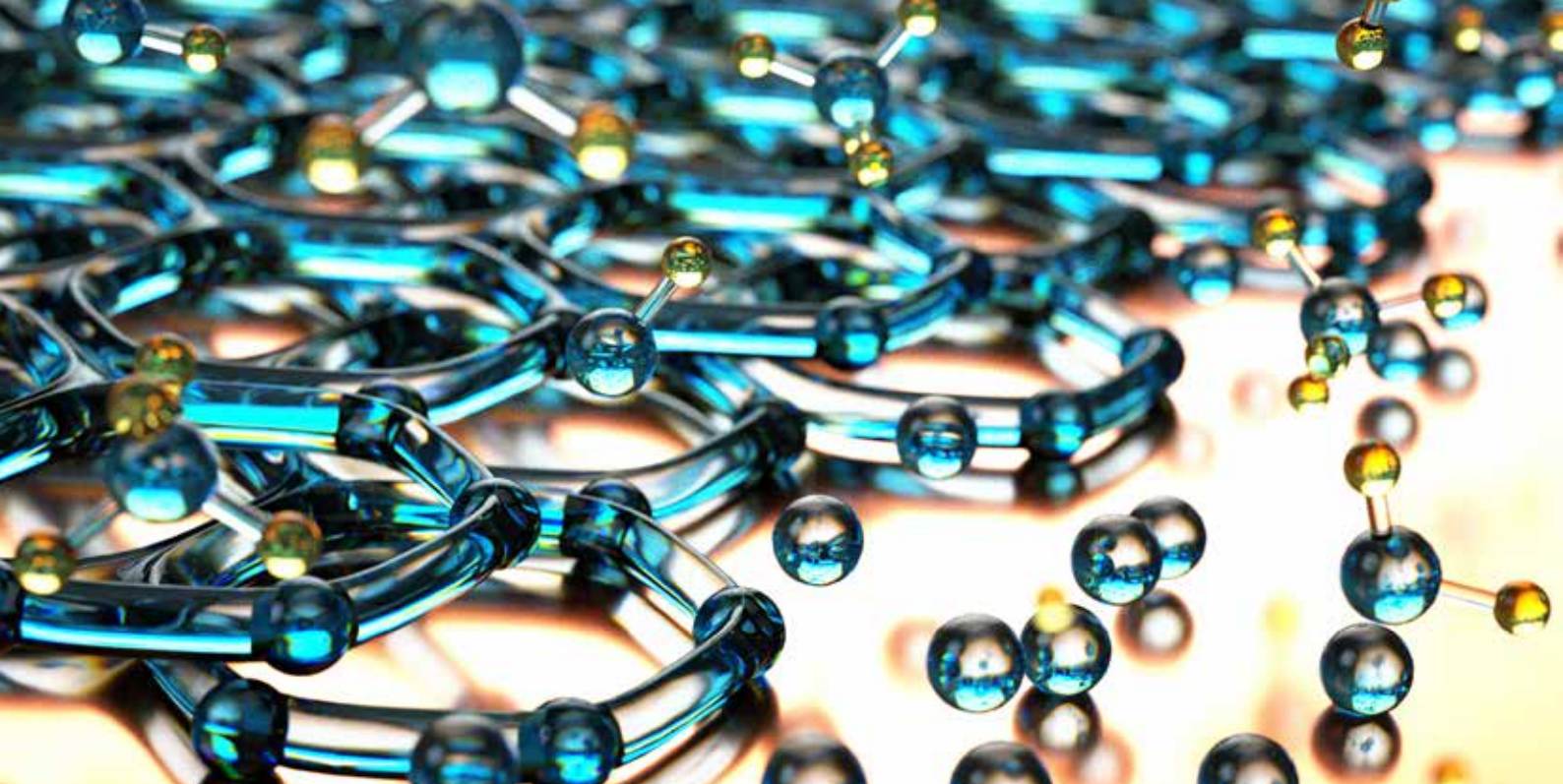
Références bibliographiques des illustrations



42. Van Boeckel, T.P., Brower, C., Gilbert, M., Grenfell, B.T., Levin, S.A., Robinson, T.P., Teillant, A. and Laxminarayan, R. (2015). Global trends in antimicrobial use in food animals. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(18), 5649–5654. <http://www.pnas.org/content/112/18/5649.abstract>
43. Grigorakis, K. and Rigos, G. (2011). Aquaculture effects on environmental and public welfare – The case of Mediterranean mariculture. *Chemosphere*, 85(6), 899-919. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653511008344?via%3Dihub>
44. O'Neill Commission (2015). *Antimicrobials in agriculture and the environment: Reducing unnecessary use and waste*. The Review on Antimicrobial Resistance, London. <https://amr-review.org/Publications.html>
45. Gotthwal, R. and Shashidhar, T. (2014). Antibiotic Pollution in the Environment: A Review. *Clean & Soil, Air, Water*, 42, 111. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/clen.201300989/abstract>
46. Bergeron, S., Boopathy, R., Nathaniel, R., Corbin, A. and LaFleur, G. (2015). Presence of antibiotic resistant bacteria and antibiotic resistance genes in raw source water and treated drinking water. *International*

- Biodeterioration & Biodegradation*, 102, 370-374. https://www.researchgate.net/publication/276075506_Presence_of_antibiotic_resistant_bacteria_and_antibiotic_resistance_genes_in_raw_source_water_and_treated_drinking_water
47. Jia, S., Shi, P., Hu, Q., Li, B., Zhang, T. and Zhang, X.X. (2015). Bacterial community shift drives antibiotic resistance promotion during drinking water chlorination. *Environmental Science & Technology*, 49(20), 12271-12279. https://www.researchgate.net/publication/282135668_Bacterial_Community_Shift_Drives_Antibiotic_Resistance_Promotion_during_Drinking_Water_Chlorination
48. Hoonweg, D. and Bhada-Tata, P. (2012). *What a Waste : A Global Review of Solid Waste Management*. Urban development series; Knowledge papers no. 15. World Bank, Washington, DC. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/17388>
49. Berglund, B. (2015). Environmental dissemination of antibiotic resistance genes and correlation to anthropogenic contamination with antibiotics. *Infection Ecology & Epidemiology*, 5, 28564. <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.3402/iee.v5.28564?needAccess=true>
50. Guyomard-Rabenirina, S., Dartron, C., Falord, M., Sadikalay, S., Ducat, C., Richard, V., Breurec, S., Gros, O. and Talarmin, A. (2017). Resistance to antimicrobial drugs in different surface waters and wastewaters of Guadeloupe. *PLoS ONE*, 12(3), e0173155. <http://journals.plos.org/plosone/article/file?id=10.1371/journal.pone.0173155&type=printable>
51. Maloo, A., Borade, S., Dhawde, R., Gajbhiye, S.N. and Dastager, S.G. (2014). Occurrence and distribution of multiple antibiotic-resistant bacteria of Enterobacteriaceae family in waters of Veraval coast, India. *Environmental and Experimental Biology*, 12, 43-50. http://drs.nio.org/drs/bitstream/handle/2264/4533/Environ_Exp_Biol_12_43.pdf?sequence=1
52. Shah, S.Q.A., Cabello, F.C., L'Abée-Lund, T.M., Tomova, A., Godfrey, H.P., Buschman, A.H. and Sorum, H. (2014). Antimicrobial resistance and antimicrobial resistance genes in marine bacteria from salmon aquaculture and non-aquaculture sites. *Environmental Microbiology*, 16(5), 1310-1320. https://www.researchgate.net/publication/260681099_Antimicrobial_resistance_and_antimicrobial_resistance_genes_in_marine_bacteria_from_salmon_aquaculture_and_non-aquaculture_sites
53. Zhao, J.Y. and Dang, H. (2012). Coastal Seawater Bacteria Harbor a Large Reservoir of Plasmid-Mediated Quinolone Resistance Determinants in Jiaozhou Bay, China. *Microbial Ecology*, 64, 187-199. https://www.researchgate.net/publication/221754196_Coastal_Seawater_Bacteria_Harbor_a_Large_Reservoir_of_Plasmid-Mediated_Quinolone_Resistance_Determinants_in_Jiaozhou_Bay_China





Crédit photo : Hinkle Group, reproduit sous licence CC BY-NC-ND 2.0

Nanomatériaux : appliquer le principe de précaution

Nanodimensions : de nouvelles découvertes sur des matériaux bien connus

En 2016, le prix Nobel de chimie a été décerné à Jean-Pierre Sauvage, Sir James Fraser Stoddart et Bernard Lucas Feringa pour les travaux qu'ils mènent depuis trente ans sur la conception et la synthèse de machines moléculaires, qui ont abouti à la création d'une « voiture » de quatre nanomètres de long, dont les quatre roues sont animées par des moteurs moléculaires¹. Les scientifiques continuent de repousser les limites et de développer de nouvelles technologies ; ils ont ainsi réussi à mettre au point des innovations qui dépassent les limites physiques et dont les applications dans la vie quotidienne sont incalculables. Les récents progrès accomplis dans les nanotechnologies et les nanosciences ont conduit à l'émergence de matériaux nanométriques dotés de propriétés physiques et chimiques susceptibles de transformer notre monde^{2,3,4}.

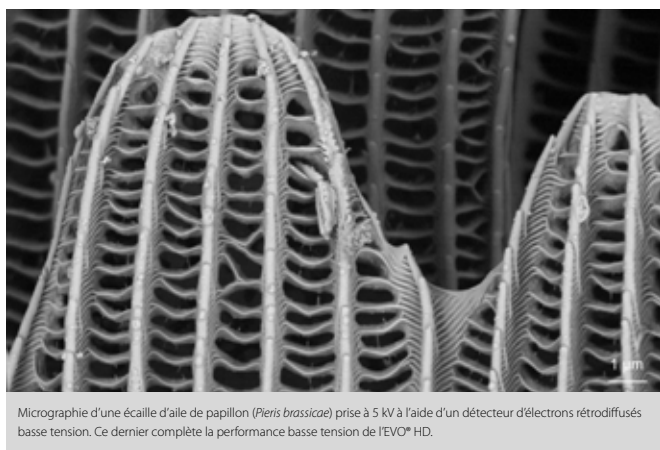
Les nanomatériaux sont composés de particules nanométriques dont au moins une dimension est inférieure à 100 nanomètres. Un nanomètre correspond à un milliardième de mètre : c'est près de 80 000 fois plus petit qu'un cheveu. Les nanomatériaux ne sont pas nouveaux et ne sont pas tous synthétiques ; ils existent naturellement et sont présents partout. La nouveauté, en revanche, réside dans notre capacité à les fabriquer à partir de matériaux communs dans un but fonctionnel.

Dans la nature, les nanomatériaux sont présents dans les squelettes des planctons et coraux marins, dans les becs et les plumes des oiseaux, dans les poils et la matrice osseuse des animaux, y compris de l'être humain, dans les toiles d'araignées, les ailes et les écailles, et même dans le papier, la soie et le coton. Il existe également des nanomatériaux naturels non organiques, comme certaines argiles, les cendres volcaniques, la suie, la poussière interstellaire et certains minéraux. Les nanomatériaux naturels découlent de processus chimiques, photochimiques, mécaniques, thermiques et biologiques^{5,6}.



Des études suggèrent que certaines méthodes de préparation utilisées dans la médecine traditionnelle, telle que la calcination, produisent accidentellement des nanomatériaux dotés de leurs caractéristiques particulières^{7,8}. Par ailleurs, des chercheurs examinent actuellement des armes médiévales, telles que des épées en acier de Damas, pour vérifier la théorie selon laquelle les techniques de forgeage et de recuit spécifiques et ritualisées reposaient en partie sur la production de nanomatériaux pour améliorer la solidité et la flexibilité de l'acier^{9,10}.

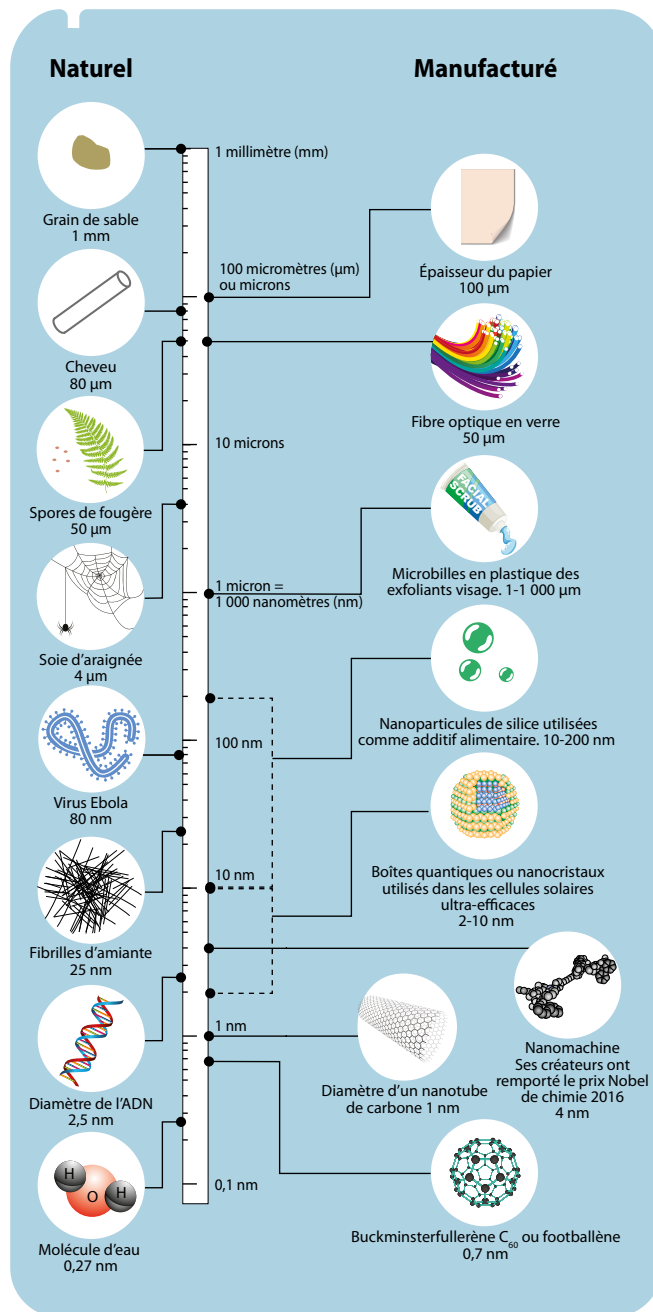
Dans le domaine industriel, les nanomatériaux sont délibérément conçus et synthétisés à des fins optiques, électroniques, mécaniques, médicales et enzymatiques spécifiques au moyen de différentes techniques de microfabrication. Aujourd'hui, les nanomatériaux sont largement utilisés dans de nombreux produits, comme les denrées alimentaires, les cosmétiques, les produits d'hygiène, les agents antimicrobiens, les désinfectants, les vêtements et les appareils électroniques. Parallèlement à l'effervescence suscitée par les possibilités que les nanomatériaux manufacturés pourraient offrir, des questions se posent quant à l'innocuité environnementale de ces derniers, à leur production et à leurs applications. Le déficit d'informations sur le potentiel et les éventuels effets des nanomatériaux est encore considérable. Bien que de nouveaux nanomatériaux ne cessent d'être conçus, nous n'en savons probablement pas assez sur leurs effets à long terme sur la santé ou l'environnement pour les utiliser sans prendre des mesures de protection accrues.



Micrographie d'une écaille d'aile de papillon (*Pieris brassicae*) prise à 5 kV à l'aide d'un détecteur d'électrons rétrodiffusés basse tension. Ce dernier complète la performance basse tension de l'EVO* HD.

Vue nanométrique d'une écaille d'aile de piéride du chou (*Pieris brassicae*)

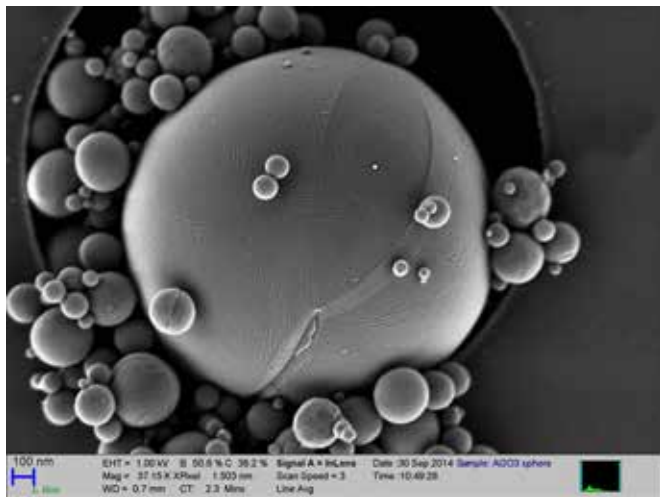
Crédit photo : ZEISS Microscopy, reproduit sous licence CC BY-NC-ND 2.0



Formes, applications et effets spécifiques

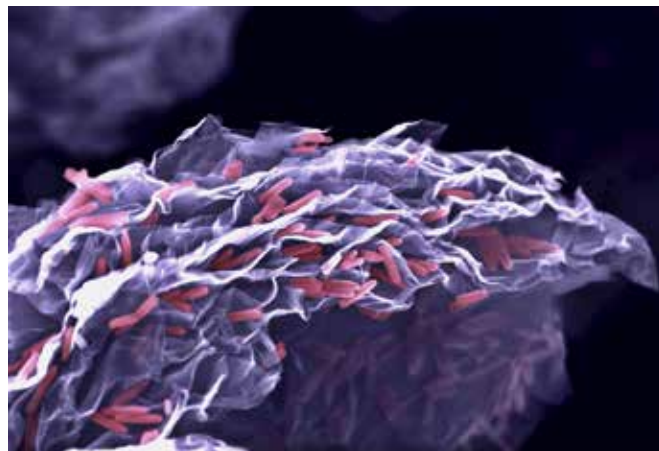
Dans *Les Aventures d'Alice au pays des merveilles* de Lewis Carroll, la jeune Alice boit une potion qui la rend minuscule. Grâce à sa nouvelle taille, elle parvient à entrer dans l'univers d'animaux et de personnages aux comportements extraordinaires, bien différents de leurs semblables de grande taille. À l'échelle nanométrique, les propriétés et comportements physiques, chimiques, optiques, magnétiques et électriques des matériaux sont radicalement différents de ceux de leurs homologues de plus grande taille, en raison de l'augmentation spectaculaire du rapport surface/volume et de l'apparition d'effets quantiques à mesure que la taille du matériau diminue. Créer une version nanométrique d'un matériau peut lui conférer des propriétés qu'il ne posséderait pas autrement. Par exemple, à l'état massif, l'or est diamagnétique (c'est-à-dire qu'il ne répond que très faiblement à un champ magnétique), mais les nanoparticules d'or possèdent des propriétés magnétiques inhabituelles¹¹.

Comme à l'état massif, des métaux tels que l'argent, le titane, le zinc et leurs oxydes sont utilisés sous forme nanométrique dans les crèmes solaires, les dentifrices, les cosmétiques, les produits alimentaires, les peintures et les vêtements¹². Grâce à ses propriétés antimicrobiennes, le nano-argent est largement employé dans de nombreux produits de consommation comme les vêtements de sport, les chaussures, les déodorants, les produits de toilette, la lessive et les machines à laver.



Nanosphères d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3)

Crédit photo : ZEISS Microscopy, reproduit sous licence CC BY-NC-ND 2.0



Nanotiges d'oxyde de fer (III) (Fe_2O_3), développées sur de l'oxyde de graphène réduit pour créer des supercondensateurs

Crédit photo : Dilek Ozg/Engineering at Cambridge, reproduit sous licence CC BY-NC-ND 2.0

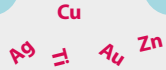
Les nanodiamants possédant des caractéristiques fonctionnelles grâce auxquelles ils peuvent traverser la barrière hémato-encéphalique, ils permettent d'administrer des médicaments de manière ciblée afin de traiter de nombreuses tumeurs cancéreuses^{13,14}. En raison de leur fluorescence et de leurs propriétés optiques et électrochimiques, les nanodiamants sont utilisés dans les techniques avancées de bio-imagerie ; ce sont en outre des matériaux prometteurs pour la transmission de signaux révélateurs de l'état des fonctions cérébrales^{15,16}.

Les nano-enzymes sont des nanomatériaux dotés de propriétés intrinsèques semblables à celles des enzymes, conçus à des fins de biodétection, de bio-imagerie, de diagnostic des tumeurs et de traitement¹⁷. Ils sont également utilisés dans les peintures marines antisalissure, ainsi qu'à des fins d'élimination des polluants et de surveillance de l'environnement.

Les nanomatériaux carbonés se présentent sous différentes tailles et formes. Le graphène est un feuillet constitué d'une seule épaisseur d'atomes de carbone. Les nanotubes de carbone sont essentiellement des feuillets de graphène roulés sur eux-mêmes, formant ainsi des cylindres creux sans raccord d'un diamètre de l'ordre du nanomètre¹⁸. Par ailleurs, le buckminsterfullerène, également appelé footballène, est une structure sphérique constituée de 60 atomes de carbone découverte en 1985, qui doit son nom à Richard Buckminster Fuller, inventeur du dôme géodésique.

Nanomatériaux

Qu'est-ce que c'est ?



Les **nanomatériaux** sont **présents à l'état naturel**, mais peuvent aussi être **fabriqués** en reproduisant à taille nanométrique des matériaux couramment utilisés comme le carbone, les oxydes métalliques et les métaux précieux.

À l'échelle nanométrique, les **propriétés et comportements** d'un matériau changent radicalement de ceux du même matériau à l'état massif. Ce changement est dû à l'augmentation du **rapport surface/volume** et aux **effets quantiques**.

Les **nanomatériaux** sont des matériaux formés de particules dont au moins une dimension externe mesure **moins de 100 nanomètres**. Un nanomètre est égal à un milliardième de mètre.

Marché mondial des nanomatériaux
20,7% de croissance annuelle
Deviendrait représenter **55 milliards d'USD** d'ici à 2022

Matériau à l'état massif Matériau nanométrique

À mesure que la taille du matériau diminue, son rapport surface/volume augmente, ce qui le rend plus réactif à son milieu environnant sur le plan chimique.

Les dimensions minuscules et le rapport surface/volume élevé qui confèrent aux nanomatériaux manufacturés leurs remarquables propriétés **modifient également la manière dont ils interagissent** avec les systèmes biologiques et s'accumulent dans ces derniers, à savoir l'environnement, les organismes vivants, les organes, les cellules, et même l'ADN.

Modifier les propriétés d'un matériau en le fabriquant à l'échelle nanométrique peut **accroître ses effets sur la santé et l'environnement**.

Par exemple, les nanotubes de carbone ont une apparence et un comportement similaire à ceux des fibres d'amiante. Grâce à leur structure longue et pointue, ils peuvent pénétrer les tissus et entraîner une inflammation et une fibrose, tout comme l'exposition à l'amiante. Le nano-argent peut causer des troubles du système immunitaire et de l'expression génétique.

Effets néfastes

Le **nano-argent** est présent dans de nombreux produits, comme les textiles, les jouets, les produits de toilette et de santé, les appareils médicaux et la nourriture, du fait de ses propriétés antimicrobiennes.

Les **nanodiamants** sont utilisés en imagerie biomédicale en raison de leurs propriétés luminescentes, de leur grande stabilité chimique et de leur biocompatibilité.

Pour tirer parti de toutes les possibilités des nanomatériaux manufacturés, nous devons aussi **anticiper leurs conséquences** ; dans le cas contraire, nous risquons de faire face à des dangers bien plus grands dans l'avenir.

Il est nécessaire d'établir des cadres réglementaires adaptés et itératifs qui **appliquent le principe de précaution** afin de réduire au maximum les risques et de protéger la santé humaine et l'environnement.

Les propriétés **mécaniques, magnétiques, électriques** et **optiques** uniques des nanomatériaux offrent d'innombrables applications dans différents domaines : pharmaceutique, biomédical, électronique et ingénierie des matériaux.

En raison de leurs propriétés magnétiques, les **nanoparticules d'oxyde de fer** présentent un formidable potentiel pour l'administration ciblée de médicaments dans le traitement du cancer, les techniques d'imagerie médicale et l'élimination de l'arsenic de l'eau.

Cette molécule semblable à un ballon de football, composée de 60 atomes de carbone et connue sous le nom de **buckminsterfullerène** (C₆₀) ou footballène, pourrait permettre de soigner la dégénérescence des os et du cartilage, ainsi que les troubles musculo-squelettiques et de la moelle osseuse.

Un **nanotube de carbone** est un feuillet constitué d'une couche unique d'atomes de carbones roulé sur lui-même pour former un cylindre continu. Il est 117 fois plus solide que l'acier à diamètre égal. C'est aussi un meilleur conducteur que le cuivre.

Les nanotubes de carbone sont fréquemment utilisés dans les batteries lithium-ion, les pales de turbines éoliennes légères et les câbles de transmission de données. Ils pourraient également être utilisés pour l'ingénierie et la régénération tissulaires, et comme marqueurs biologiques du cancer.

Applications

Les nanomatériaux manufacturés sont présents dans de **nombreux produits de consommation**, p. ex. denrées alimentaires, cosmétiques, désinfectants, ustensiles de cuisine, produits pour bébés, vêtements, tissus, appareils électroniques et électroménagers.

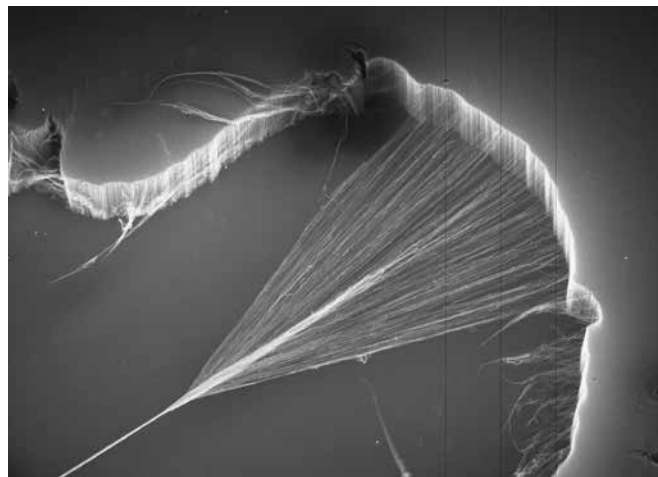
Le **graphène** est un feuillet d'atomes de carbone d'une épaisseur d'un atome. Il pourrait être utilisé pour l'administration de médicaments, le transport moléculaire, l'ingénierie tissulaire et la pose d'implants.

Les nanotubes de carbone possèdent des propriétés exceptionnelles. Ils sont plus solides que l'acier, sont de meilleurs conducteurs que le cuivre et ont une conductivité thermique plus élevée que les diamants. Ils sont fréquemment utilisés dans les batteries lithium-ion des ordinateurs portables et des téléphones mobiles, les pales de turbines éoliennes légères, les coques de bateaux, les câbles de transmission de données, les biocapteurs et les appareils médicaux¹⁹. La capacité de production commerciale mondiale de nanotubes de carbone dépasse à présent plusieurs milliers de tonnes par an.

À mesure que les nanomatériaux manufacturés remplacent les matériaux traditionnels dans les produits du quotidien, il est essentiel de déterminer leurs effets néfastes. Pour tirer parti de toutes les possibilités des nanomatériaux, nous devons aussi anticiper leurs conséquences sur la santé et l'environnement ; dans le cas contraire, nous risquons de faire face à des dangers bien plus grands dans l'avenir²⁰.


Modifier les propriétés d'un matériau en le fabriquant à l'échelle nanométrique peut accroître ses effets sur la santé et l'environnement. La toxicité du nano-argent, par exemple, peut entraîner de l'argyrie (une affection donnant à la peau une couleur bleu métallique permanente), une inflammation pulmonaire, une altération des fonctions organiques et des troubles du système immunitaire et de l'expression génétique^{12,21,22}. L'exposition aux nanoparticules d'argent peut créer une pression et ainsi provoquer des modifications génétiques chez les bactéries, ce qui peut contribuer au développement de gènes de résistance aux antimicrobiens^{12,23}. Les dioxydes de silicium et de titane peuvent, quant à eux, causer des inflammations pulmonaires²⁴.

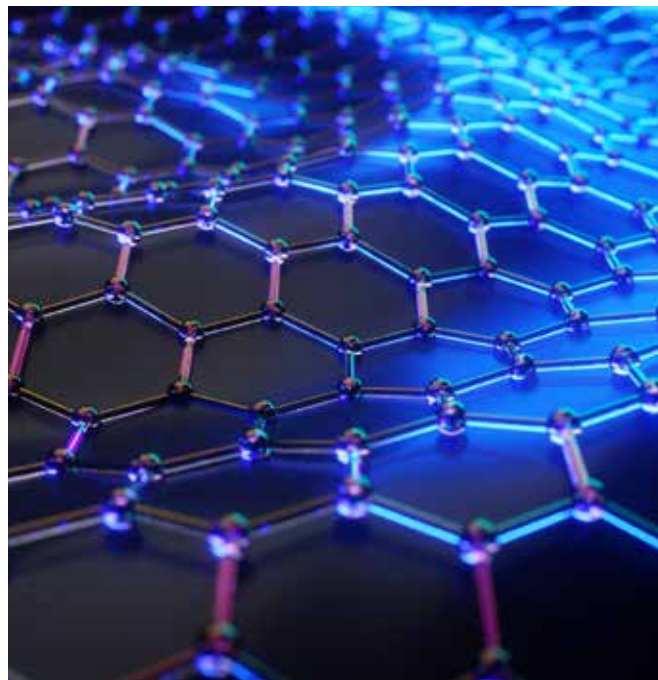
Parallèlement à la découverte permanente de nouvelles applications thérapeutiques et biomédicales pour les fullerènes, y compris les footballènes C_{60} , ces incroyables nanomatériaux font l'objet d'études visant à déterminer leurs effets possibles sur les cellules, l'expression génétique, la fonction immunitaire, le métabolisme et la fécondité²⁵. Par ailleurs, il a été démontré que les nanotubes et nanofibres de carbone pouvaient endommager les tissus cutanés, oculaires, pulmonaires et cérébraux, et s'accumuler dans le corps^{26,27}.



Tissage de nanotubes de carbone pour former un fil

Crédit photo : Organisation de recherche scientifique et industrielle du Commonwealth (CSIRO)

 Vidéo : Graphène – le matériau du futur



Lien de la vidéo (en anglais) : <https://www.youtube.com/watch?v=Tfo2xShvtj0>

Crédit photo : Olive Tree/Shutterstock.com

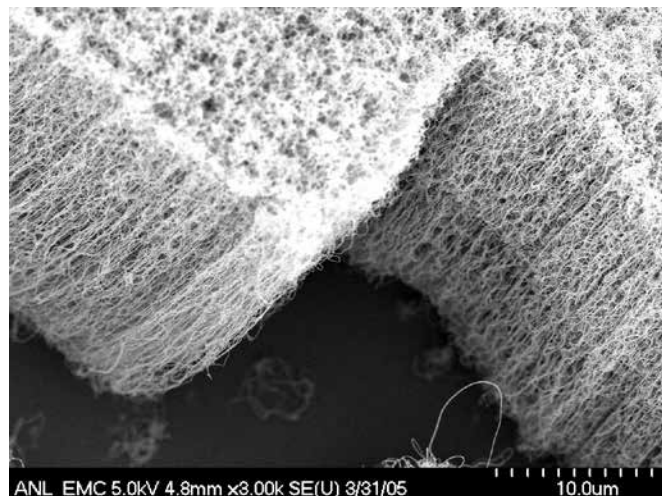
© DW Tomorrow Today



Exposition aux nanomatériaux manufacturés : risques pour la santé et l'environnement

Le marché mondial des nanotechnologies devrait enregistrer une croissance d'environ 18 % par an et représenter près de 174 milliards de dollars US d'ici à 2025²⁸. L'accroissement de la production et de l'utilisation des nanomatériaux manufacturés par différentes industries entraînera vraisemblablement leur rejet involontaire dans l'environnement au cours du cycle de vie du produit²⁹. Par exemple, le nano-argent utilisé dans les vêtements et les tissus est rejeté au cours du lavage ; les nanoparticules de dioxyde de titane contenues dans les peintures et les matériaux de construction finissent par se répandre dans l'air et l'eau sous l'effet du climat ; les nanotubes de carbone sont transportés dans l'air lors de la production ou s'échappent des batteries lithium-ion mises au rebut et atteignent les sols et les eaux souterraines^{19,30,31}.

Afin d'évaluer les risques éventuels pour la santé et l'environnement, il est indispensable d'en savoir plus sur l'exposition aux nanomatériaux manufacturés et les effets néfastes de ces derniers³². À l'heure actuelle, peu d'études expliquent le devenir des nanomatériaux manufacturés une fois qu'ils ont été libérés dans l'atmosphère, le sol, les sédiments, l'eau et le biote. Ainsi, on en sait peu sur leur comportement, leur concentration, leurs déplacements, leur répartition, leurs transformations, leur biodisponibilité, leur bioaccumulation dans les chaînes alimentaires et leurs interactions biochimiques avec les communautés biologiques^{29,33-36}.



Nanotubes de carbone alignés

Crédit photo : Junbing Yang/Argonne National Laboratory, reproduit sous licence CC BY-NC-SA 2.0

En revanche, de plus en plus de données et de preuves confirment la toxicité des nanomatériaux. Les résultats des études révèlent que les nanomatériaux peuvent avoir de nombreux effets néfastes sur la santé. Des études de toxicité comparatives portant sur des matériaux, des particules et des fibres familières comme l'amiante, les particules ultrafines et les fumées d'échappement diesel, possédant des formes et des caractéristiques chimiques semblables à celles des nanomatériaux, nous donnent des indications sur les risques éventuels pour la santé découlant de l'exposition aux nanomatériaux³⁷. En outre, ce que nous avons appris en manipulant ces substances dangereuses bien connues peut également nous aider à mieux anticiper les risques des nanomatériaux que nous comprenons moins.

Les nanotubes de carbone possèdent des caractéristiques semblables à celles des fibres d'amiante³⁸. Tous deux possèdent une forme d'aiguille et persistent dans l'organisme. Ils peuvent passer à travers les tissus pulmonaires et causer une inflammation³⁹. La preuve des risques de l'amiante pour la santé a été apportée dès 1898 par Lucy Deane, l'une des premières femmes chargées d'inspecter les usines au Royaume-Uni⁴⁰. Elle a signalé que la manipulation de l'amiante représentait un danger certain pour la santé des ouvriers en raison de cas avérés de blessures bronchiques et pulmonaires médicalement attribuées au travail de la personne atteinte.



Fibres d'amiante grossies 1 500 fois par microscopie électronique à balayage

Crédit photo : US Centers for Disease Control and Prevention/John Wheeler/Janice Haney Carr



Ouvrières allongées sur les matelas d'amiante qu'elles ont fabriqués dans une usine du Lancashire, Royaume-Uni, septembre 1918

Crédit photo : © Imperial War Museum (Q 28250)

Un documentaire télévisé diffusé en 1982 et intitulé *Alice, a Fight for Life* (Alice : un combat pour la vie) raconte l'histoire d'Alice Jefferson, une femme de 47 ans qui a développé un mésothéliome, une forme fatale de cancer, après avoir travaillé dans une usine d'amiante pendant quelques mois, au Royaume-Uni²⁰. Le cas d'Alice a eu des répercussions immédiates sur l'opinion publique britannique. Le gouvernement a réagi en adoptant une loi imposant l'obtention d'une autorisation pour travailler avec de l'amiante et abaissant les limites d'exposition. Un système d'étiquetage volontaire a rapidement été mis en place par la suite. La pression s'est intensifiée et les preuves scientifiques démontrant le lien entre les nombreux cas de mésothéliome et l'exposition à l'amiante se sont accumulées⁴¹.

Ce n'est qu'en 1999 que tous les types d'amiante ont été interdits au Royaume-Uni, soit 101 ans après les premières preuves de la toxicité de l'amiante et à la suite de milliers de victimes de l'asbestose ou de cancers associés. Aujourd'hui, les efforts se poursuivent pour réduire au maximum les risques courus par les ouvriers qui travaillent sur des chantiers de rénovation ou d'entretien de bâtiments contenant de l'amiante⁴².

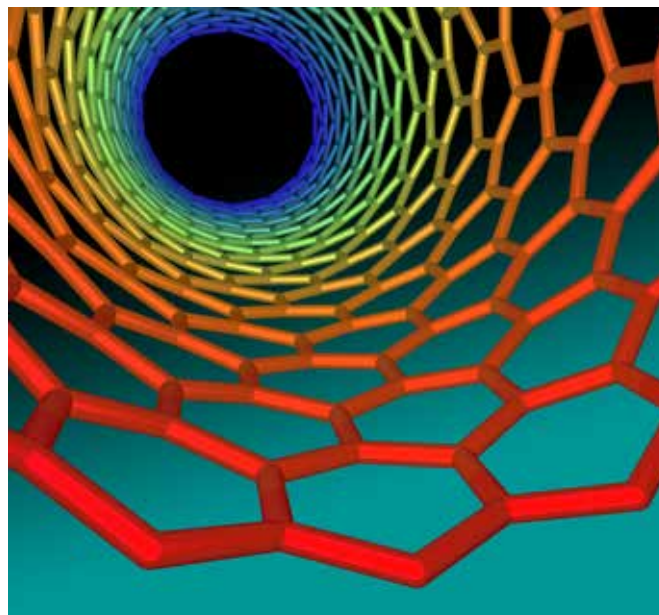
La question que nous devons nous poser est la suivante : quels enseignements pouvons-nous tirer d'un siècle de lutte à comprendre et à contrer les dangers mortels liés à l'exposition à l'amiante, afin de gérer au mieux les nanomatériaux et de garantir leur innocuité à l'avenir ?

Adopter des réglementations adéquates pour protéger la santé et l'environnement

Grâce à notre expérience de l'amiante et d'autres matériaux dangereux, nous savons que la liste des risques potentiels est longue. L'exposition de l'environnement aux nanomatériaux manufacturés est inévitable. Leurs effets néfastes et leur persistance pourraient avoir des conséquences non négligeables sur les organismes, les écosystèmes et les chaînes alimentaires^{32,35,43,44}. L'exposition orale, cutanée ou pulmonaire pourrait entraîner une inflammation et une fibrose, perturber le métabolisme et les fonctions organiques, et causer des dommages à l'ADN ainsi qu'une instabilité génétique^{22,26,45,46}.

Le développement industriel est bien plus rapide que la mise en place de réglementations. En l'absence de suivi à long terme et en raison du manque de données scientifiques sur les nombreux aspects liés à la toxicologie et à la toxicité des nanomatériaux, l'adoption de réglementations spécifiques est lente, bien que les signes témoignant de la dangerosité des nanomatériaux et des risques liés à l'exposition à ceux-ci soient de plus en plus nombreux⁴⁷.

▶ Vidéo : Les nanotubes de carbone sont-ils l'amiante de demain ?



Lien de la vidéo (en anglais) : <https://www.youtube.com/watch?v=6L7xXgWcbrQ> © Museum of Life and Science
Crédit photo : Geoff Hutchison, reproduit sous licence CC BY 2.0

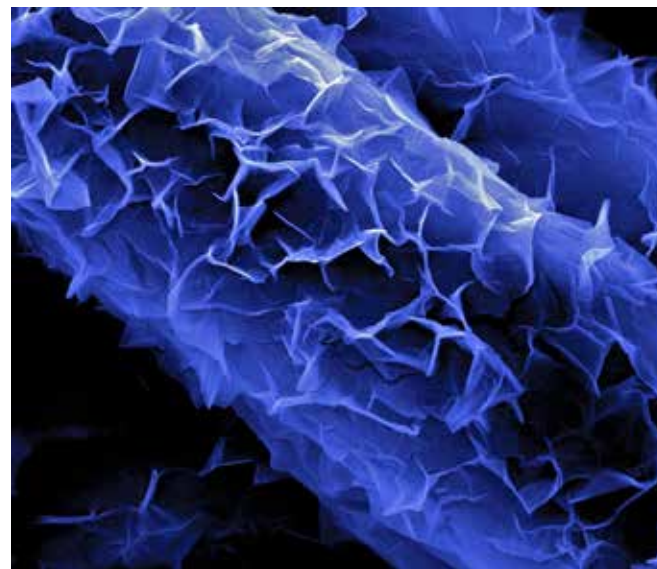


Comme dans le cas de l'amiante, les premières personnes exposées aux nanomatériaux sont celles qui les manipulent dans le cadre de leur travail. Les premières études menées à la fin des années 1990 et au début des années 2000 afin d'évaluer l'exposition professionnelle aux nanotubes de carbone ont ouvert la voie à d'autres enquêtes sur les lieux de travail. Par la suite, une norme ISO contenant des lignes directrices relatives à la caractérisation des expositions aux nanoaérosols au travail a été adoptée en 2007^{48,49}.

Des animaux exposés à des nanotubes et à des nanofibres de carbone dans le cadre d'études ont notamment développé des inflammations pulmonaires, des granulomes et des fibroses ; l'Institut national américain pour la sécurité et la santé au travail (National Institute for Occupational Safety and Health) a jugé ces conclusions assez significatives pour justifier des mesures visant à définir une limite d'exposition recommandée²². Par ailleurs, l'Organisation de coopération et de développement économiques a mis en place des programmes pluriannuels visant à générer des données toxicologiques sur toute une gamme de nanomatériaux, afin de modifier les lignes directrices existantes pour les essais à destination des fabricants⁵⁰.

Compte tenu de l'étendue des applications, les organismes de réglementation doivent s'appuyer sur les lois existantes en matière de produits chimiques, de médicaments, de cosmétiques, d'alimentation, de pollution, de déchets et d'étiquetage pour définir des dispositions concernant les nanomatériaux⁵¹. Cependant, il peut être difficile d'appliquer les cadres réglementaires existants aux nanomatériaux⁴⁷. Par exemple, le fait de réduire la taille d'un matériau n'implique pas nécessairement de revoir la législation ou les réglementations existantes si les matériaux à l'échelle nanométrique et à l'état massif sont composés de la même substance chimique. En outre, certains produits de consommation ne sont pas soumis à des exigences de sécurité et peuvent être commercialisés sans qu'aucun test n'ait été réalisé au préalable.

Dans l'Union européenne (UE), le règlement concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances (REACH) sert à protéger la santé humaine et l'environnement de toute substance chimique fabriquée et commercialisée dans l'UE. Les entreprises doivent d'abord enregistrer les substances chimiques qu'elles envisagent de fabriquer et de commercialiser. Elles doivent ensuite montrer, en s'appuyant sur les directives spécifiques du règlement REACH, comment les risques liés aux substances peuvent être gérés pour protéger la santé et l'environnement^{52,53}.



Nanofibres cœur-coquille hiérarchiques de graphène de carbone

Crédit photo : Ranjith Shanmugam/ZEISS Microscopy, reproduit sous licence CC BY-NC-ND 2.0

À l'échelle mondiale, les nanomatériaux sont l'une des questions émergentes abordées par l'Approche stratégique de la gestion internationale des produits chimiques (SAICM), administrée par l'ONU Environnement. Afin de garantir une bonne gestion des nanomatériaux manufacturés, ce cadre directeur accompagne les gouvernements et les parties prenantes internationales vers une simplification de l'échange d'informations sur les nanotechnologies et les nanomatériaux manufacturés et œuvre en faveur de l'établissement de directives juridiques et techniques applicables dans le monde entier⁵⁴.

Dans le domaine des nouvelles technologies, les organismes de réglementation font face à un ensemble de promesses, de risques et d'incertitudes⁵⁵. Afin d'accroître la production et l'utilisation des nanomatériaux manufacturés et d'intensifier la recherche dans ce secteur au niveau mondial, il est nécessaire d'adopter non seulement des politiques porteuses de transformations pour encourager l'innovation et les applications industrielles de chimie verte, mais surtout des cadres réglementaires adaptés et itératifs qui appliquent le principe de précaution pour garantir la sécurité et prévenir toute pollution. Le monde ne peut se permettre d'exploiter les possibilités prometteuses offertes par de nouveaux matériaux sans tenir compte des enseignements du passé concernant les risques et les dommages sur la santé et l'environnement.

Références bibliographiques

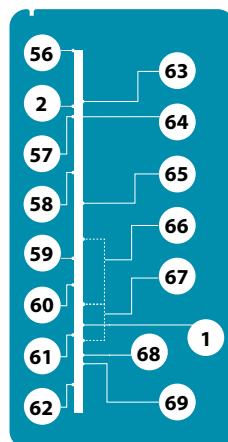
- Nobel Media AB (2016). *The Nobel Prize in Chemistry 2016 - Popular Information*. Nobel Prize website. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2016/popular.html
- UNEP (2007). *GEO Year Book: An Overview of Our Changing Environment*. United Nations Environment Programme, Nairobi. <http://staging.unep.org/yearbook/2007/>
- UNEP (2010). *UNEP Year Book: New Science and Developments in Our Changing Environment*. United Nations Environment Programme, Nairobi. <http://staging.unep.org/yearbook/2010/>
- UNEP (2013). *UNEP Year Book: Emerging Issues in Our Global Environment*. United Nations Environment Programme, Nairobi. <http://staging.unep.org/yearbook/2013/>
- Hochella Jr., M.F., Spencer, M.G. and Jones, K.L. (2015). Nanotechnology: nature's gift or scientists' brainchild? *Environmental Science: Nano*, 2, 114-119. <http://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2015/EN/C4EN00145A>
- Sharma, V.K., Filip, J., Zboril, R. and Varma, R.S. (2015). Natural inorganic nanoparticles – formation, fate and toxicity in the environment. *Chemical Society Reviews*, 44, 8410-8423. <http://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2015/CS/C5CS00236B>
- Pavani, T., Venkateswara Rao, K., Chakra, Ch. S. and Prabhu, Y.T. (2015). Ayurvedic synthesis of γ -Fe₂O₃ nanoparticles and its Characterization. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 5(1), 321-324. <http://inpressco.com/wp-content/uploads/2015/02/Paper57321-324.pdf>
- Sumithra, M., Raghavendra, Rao, P., Nagaratnam, A. and Aparna, Y. (2015). Characterization of SnO₂ Nanoparticles in the Traditionally Prepared Ayurvedic Medicine. *Materials Today: Proceeding*, 2(9), Part A., 4636-4639. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785315009074>
- Reibold, M., Paufler, P., Levin, A.A., Kochmann, W., Pätzke, N. and Meyer, D.C. (2006). Materials: Carbon nanotubes in an ancient Damascus sabre. *Nature*, 444(7117), 286. <https://www.nature.com/nature/journal/v444/n7117/pdf/444286a.pdf>
- Sanderson, K. (2006). Sharpest cut from nanotube sword. *Nature News*, 15 November 2006. <http://www.nature.com/news/2006/061113/full/news061113-11.html>
- JASRI (2012). Clarifying the hidden magnetism of gold (Au). Press Release, 23 January 2012. Japan Synchrotron Radiation Research Institute, Kouto. http://www.spring8.or.jp/en/news_publications/press_release/2012/120123_2/
- SCENIHR (2013). *Opinion on Nanosilver: safety, health and environmental effects and role in antimicrobial resistance*. The Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks of the European Union, Luxembourg. http://ec.europa.eu/health/scientific_committees/emerging/docs/scenihr_o_039.pdf
- Mochalin, V.N., Shenderova, O., Ho, D. and Gogotsi, Y. (2011). The properties and applications of nanodiamonds. *Nature Nanotechnology*, 7, 11-23. <https://www.nature.com/nnano/journal/v7/n1/pdf/nnano.2011.209.pdf>
- Xi, G., Robinson, E., Mania-Farnell, B., Vanin, E.F., Shim, K.W., Takao, T., Allender, E.V., Mayanil, C.S., Soares, M.B., Ho, D. and Tomita, T. (2014). Convection-enhanced delivery of nanodiamond drug delivery platforms for intracranial tumor treatment. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, 10(2),381-391. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23916888>
- Bačáková, L., Brož, A., Lišková, J., Staňková, L., Potocký, S. and Kromka, A. (2016). The Application of Nanodiamond in Biotechnology and Tissue Engineering. In *Diamond and Carbon Composites and Nanocomposites*, M. Aliofkhae (ed.). InTech, Rijeka. <https://www.intechopen.com/download/pdf/51099>
- Waddington, D.E.J., Sarracanie, M., Zhang, H., Salameh, N., Glenn, D.R., Rej, E., Gaebel, T., Boele, T., Walsworth, R.L., Reilly, D.J. and Rosen, M.S. (2017). Nanodiamond-enhanced MRI via in situ hyperpolarization. *Nature Communications*, 15118. http://walsworth.physics.harvard.edu/publications/2017_Waddington_NatureComm.pdf
- Gao, L., and Yan, X. (2016). Nanozymes: an emerging field bridging nanotechnology and biology. *Science China: Life Science*, 59, 400–402. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs11427-016-5044-3.pdf>
- Aqel, A., El-Nour, K.M.M.A., Ammar, R.A.A. and Al-Warthan, A. (2010). Carbon nanotubes, science and technology part (I) structure, synthesis and characterisation. *Arabian Journal of Chemistry*, 5, 1–23. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878535210001747>
- De Volder, M.F.L., Tawfick, S. H., Baughman, R. H. and Hart, A. J. (2013). Carbon nanotubes: Present and future commercial applications. *Science*, 339(6119), 535-539. <http://science.sciencemag.org/content/339/6119/535/tab-pdf>
- EEA (2001). *Late lessons from early warnings: the precautionary principle 1896-2000*. EEA Report No. 22. European Environment Agency, Copenhagen. https://www.eea.europa.eu/publications/environmental_issue_report_2001_22/Issue_Report_No_22.pdf
- De Jong, W.H., Van Der Ven, L.T.M., Sleijffers, A., Park, M.V.D.Z, Jansen, E.H.J.M., Van Loveren, H. and Vandebriel, R.J. (2013). Systemic and immunotoxicity of silver nanoparticles in an intravenous 28 days repeated dose toxicity study in rats. *Biomaterials*, 34, 8333-8343. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142961213007631>
- Johnston, H.J., Hutchison, G., Christensen, F.M., Peters, S., Hankin, S. and Stone, V. (2010). A review of the in vivo and in vitro toxicity of silver and gold particulates: Particle attributes and biological mechanisms responsible for the observed toxicity. *Critical Reviews in Toxicology*, 40(4), 328-346. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3109/10408440903453074?journalCode=itxc20>



23. Graves Jr, J.L., Tajkarimi, M., Cunningham, Q., Campbell, A., Nonga, H., Harrison, S.H. and Barrick, J.E. (2015). Rapid evolution of silver nanoparticles resistance in *Escherichia coli*. *Frontiers in Genetics*, 6(42), 1-13. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4330922/pdf/fgene-06-00042.pdf>
24. Weir, A., Westerhoff, P., Fabricius, L., Hristovski, K. and von Goetz, N. (2012). Titanium dioxide nanoparticles in food and personal care products. *Environmental Science and Technology*, 46(4):2242-2250. <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es204168d>
25. Aschberger, K., Johnston, H.J., Stone, V., Aitken, R.J., Tran, C.L., Hankin, S.M., Peters, S.A. and Christensen, F.M. (2010). Review of fullerene toxicity and exposure--appraisal of a human health risk assessment, based on open literature. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 58, 455-473. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20800639>
26. NIOSH (2013). *Occupational Exposure to Carbon Nanotubes and Nanofibers*. Current Intelligence Bulletin 65. The Centers for Disease Control/The National Institute for Occupational Safety and Health, Atlanta. <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2013-145/pdfs/2013-145.pdf>
27. Oberdörster, E. (2004). Manufactured Nanomaterials (Fullerenes, C₆₀) Induce Oxidative Stress in the Brain of Juvenile Largemouth Bass. *Environmental Health Perspectives*, 112(10), 1058-1062. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1247377/pdf/ehp0112-001058.pdf>
28. Business Wire (2016). Global Nanotechnology Market Worth USD 173.95 Billion by 2025 - Analysis, Technologies & Forecasts Report 2016-2025 - Key Vendors: Acusphere, Glonatech, Isotron - Research and Markets. *Business Wire*, 28 September 2016. <http://www.businesswire.com/news/home/20160928005566/en/Global-Nanotechnology-Market-Worth-USD-173.95-Billion>
29. Lowry, G.V., Bernhardt, E.S., Dionysiou, D.D., Pedersen, J.A., Wiesner, M.R. and Xing, B. (2010). Environmental Occurrences, Behavior, Fate, and Ecological Effects of Nanomaterials: An Introduction to the Special Series. *Journal of Environmental Quality*, 39, 1867-1874. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21284284>
30. Geranio, L., Heuberger, M. and Nowack, B. (2009). The behavior of silver nanotextiles during washing. *Environmental Science & Technology*, 43(21), 8113-8118. <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es9018332>
31. Shandilya, N., Le Bihan, O., Bressot, C. and Morgeneyer, M. (2015). Emission of Titanium Dioxide Nanoparticles from Building Materials to the Environment by Wear and Weather. *Environmental Science & Technology*, 49, 2163-2170. <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es504710p>
32. Gottschalk, F. and Nowack, B. (2011). The release of engineered nanomaterials to the environment. *Journal of Environmental Monitoring*, 13, 1145-1155. https://www.researchgate.net/profile/Bernd_Nowack/publication/50349175_The_release_of_engineered_nanomaterials_to_the_environment/links/54c75fc30cf238bb7d0a7d1a/The-release-of-engineered-nanomaterials-to-the-environment.pdf
33. Batley, G.E., Kirby, J.K. and McLaughlin, M.J. (2012). Fate and risks of nanomaterials in aquatic and terrestrial environments. *Accounts of Chemical Research*, 46(3), 854-862. https://www.researchgate.net/publication/228113803_Fate_and_Risks_of_Nanomaterials_in_Aquatic_and_Terrestrial_Environments
34. Gardea-Torresdey, J.L., Rico, C.M. and White, J.C. (2014). Trophic Transfer, Transformation, and Impact of Engineered Nanomaterials in Terrestrial Environments. *Environmental Science & Technology*, 48(5), 2526-2540. <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es4050665>
35. Garner, K.L. and Keller, A.A. (2014). Emerging patterns for engineered nanomaterials in the environment: a review of fate and toxicity studies. *Journal of Nanoparticle Research*, 16, 2503. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs11051-014-2503-2.pdf>
36. Peijnenburg, W. J. G. M.; Baalousha, M.; Chen, J.; Chaudry, Q.; Von der kammer, F.; Kuhlbusch, T. A. J.; Lead, J.; Nickel, C.; Quik, J. T. K.; Renker, M.; Wang, Z.; Koelmans, A. A. A Review of the Properties and Processes Determining the Fate of Engineered Nanomaterials in the Aquatic Environment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45, 2084-2134. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10643389.2015.1010430>
37. Xia, T., Li, N. and Nel, A.E. (2009). Potential Health Impact of Nanoparticles. *The Annual Review of Public Health*. 30, 137-50. <http://annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev.publhealth.031308.100155>
38. Poland, C.A., Duffin, R., Kinloch, I., Maynard, A., Wallace, W.A., Seaton, A., Stone, V., Brown, S., Macnee, W. and Donaldson K. (2008). Carbon nanotubes introduced into the abdominal cavity of mice show asbestos-like pathogenicity in a pilot study. *Nature Nanotechnology*, 3, 423-428. <http://www.nature.com/nnano/journal/v3/n7/pdf/nnano.2008.111.pdf>
39. Nagai, H. and Toyokuni, S. (2012). Differences and similarities between carbon nanotubes and asbestos fibers during mesothelial carcinogenesis: Shedding light on fiber entry mechanism. *Cancer Science*, 103(8), 1378-1390. https://www.researchgate.net/publication/224924547_Differences_and_similarities_between_carbon_nanotubes_and_asbestos_fibers_during_mesothelial_carcinogenesis_Shedding_light_on_fiber_entry_mechanism
40. Deane, L. (1898). *Report on the health of workers in asbestos and other dusty trades*. In HM Chief Inspector of Factories and Workshops, 1899, Annual Report for 1898, 171-172.
41. Peto, J., Hodgson, J.T., Matthews, F.E. and Jones, J.R. (1995). Continuing increase in mesothelioma mortality in Britain. *The Lancet*, 345(8949), 535-539. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/7776771>
42. HSE (2017). Asbestos health and safety. The Health and Safety Executive website. <http://www.hse.gov.uk/asbestos/index.htm>
43. Delay, M. and Frimmel, F.H. (2012). Nanoparticles in aquatic systems. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 402(2), 583-592. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs00216-011-5443-z.pdf>

44. Du, J., Wang, S., You, H. and Zhao, X. (2013). Understanding the toxicity of carbon nanotubes in the environment is crucial to the control of nanomaterials in producing and processing and the assessment of health risk for human: A review. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 36, 451-462. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/labs/articles/23770455/>
45. Schulte, P.A., Roth, G., Hodson, L.L., Murashov, V., Hoover, M.D., Zumwalde, R., Kuempel, E.D., Geraci, C.L., Stefaniak, A.B., Castranova, V. and Howard, J. (2016). Taking stock of the occupational safety and health challenges of nanotechnology: 2000–2015. *Journal of Nanoparticle Research*, 18, 1–21. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5007006/pdf/nihms812231.pdf>
46. Trouiller, B., Reliene, R., Westbrook, A., Solaimani, P. and Schiestl, R.H. (2009). Titanium dioxide nanoparticles induce DNA damage and genetic instability in vivo in mice. *Cancer Research*, 69(22), 8784-8789. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19887611>
47. Seaton, A., Tran, L., Aitken, R. and Donaldson, K. (2010). Nanoparticles, human health hazard and regulation. *Journal of The Royal Society Interface*, 7, S119-S129. http://rsif.royalsocietypublishing.org/content/7/Suppl_1/S119.long
48. Kuhlbusch, T.A.J., Asbach, C., Fissan, H., Göhler, D. and Stintz, M. (2011). Nanoparticle exposure at nanotechnology workplaces: A review. *Particle and Fibre Toxicology*, 8(22), 1-18. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3162892/pdf/1743-8977-8-22.pdf>
49. ISO (2007). ISO/TR 27628:2007 Workplace atmospheres - Ultrafine, nanoparticle and nano-structured aerosols - Inhalation exposure characterization and assessment. International Organization for Standardization, Geneva. <https://www.iso.org/standard/44243.html>
50. OECD (2016). *Single walled carbon nanotubes (SWCNTs): Summary of the dossier*. OECD Environment, Health and Safety Publications – Series on the safety of manufactured nanomaterials No.70. The Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris. [http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=env/jm/mono\(2016\)22&doclanguage=en](http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=env/jm/mono(2016)22&doclanguage=en)
51. Charitidis, C.A., Trompeta, A.F., Vlachou, N. and Markakis, V. (2016). Risk management of engineered nanomaterials in EU-The case of carbon nanotubes and carbon nanofibers: A review. *Transactions of the Materials Research Society of Japan*, 41(1), 1-11. https://www.jstage.jst.go.jp/article/tmrsj/41/1/41_1/_pdf
52. OECD (2016). *Single walled carbon nanotubes (SWCNTs): Summary of the dossier*. OECD Environment, Health and Safety Publications – Series on the safety of manufactured nanomaterials No.70. The Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris. [http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=env/jm/mono\(2016\)22&doclanguage=en](http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=env/jm/mono(2016)22&doclanguage=en)
53. OECD (2017). Alternative testing strategies in risk assessment of manufactured nanomaterials: current state of knowledge and research needs to advance their use. Series on the Safety of Manufactured Nanomaterials No. 80. The Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris. [http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV/JM/MONO\(2016\)63&doclanguage=en](http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV/JM/MONO(2016)63&doclanguage=en)
54. UN Environment (2017). Strategic Approach to International Chemicals Management website. UN Environment, Geneva. <http://www.saicm.org/>
55. Hamburg, M.A. (2012). FDA's approach to regulation of products of nanotechnology. *Science*, 336(6079), 299-300. <http://science.sciencemag.org/content/336/6079/299>

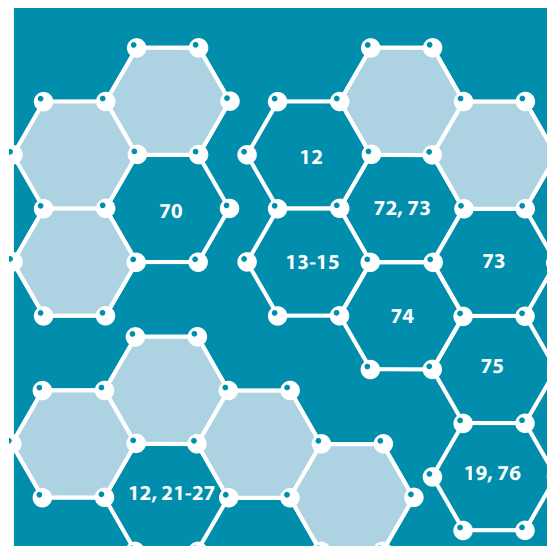
Références bibliographiques des illustrations



56. Alden, A. (2017). All About Sediment Grain Size. *ThoughtCo*, 5 June 2017. <https://www.thoughtco.com/all-about-sediment-grain-size-1441194>
57. Walker, W.F., Yatskievych, G., Mickel, J.T., and Wagner, W. (2016). Fern. *Encyclopædia Britannica*, 18 October 2016. <https://www.britannica.com/plant/fern/Shape>
58. Du, N., Liu, X.Y., Narayanan, J., Li, L., Lek, M., Lim, M. and Li, Q. (2006). Design of Superior Spider Silk: From Nanostructure to Mechanical Properties. *Biophysical Journal*, 91(12), 4528-4535. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000634950672164658>
59. Aleksandrowicz, P., Marzi, A., Biedenkopf, N., Beimforde, N., Becker, S., Hoenen, T., Feldmann, H. and Schnittler, H.J. (2011). Ebola virus enters host cells by macropinocytosis and clathrin-mediated endocytosis. *Journal of Infectious Diseases*, Supplement 3, S957-S967. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21987776>



60. WHO (2000). *Air quality guidelines for Europe—Second edition*. WHO Regional Publication, European Series No. 91. World Health Organization, Copenhagen. http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/74732/E71922.pdf
61. Nano.gov (2017). Size of the nanoscale. United States National Nanotechnology Initiative. <https://www.nano.gov/nanotech-101/what/nano-size>
62. D'Arrigo, J.S. (1978). Screening of membrane surface charges by divalent cations: an atomic representation. *American Journal of Physiology*, 235(3), C109-117. <http://bionumbers.hms.harvard.edu/bionumber.aspx?id=103723&ver=0>
63. Yes Paper (2017). Paper glossary. Yes Paper. <http://www.yes-paper.com/index.php?yespaper=yespaper-paper-glossary>
64. FOA (2015). Guide to fiber optics and premises cabling. The Fiber Optic Association. <http://www.thefoa.org/tech/ref/basic/fiber.html>
65. UNEP (2015). Plastic in cosmetics: Are we polluting the environment through our personal care? United Nations Environment Programme, Nairobi. http://apps.unep.org/redirect.php?file=/publications/pmtdocuments/-Plastic_in_cosmetics_Are_we_polluting_the_environment_through_our_personal_care_-2015Plas.pdf
66. Athinarayanan, J., Periasamy, V.S., Alsaif, M.A., Al-Warthan, A.A. and Alshatwi, A.A. (2014). Presence of nanosilica (E551) in commercial food products: TNF-mediated oxidative stress and altered cell cycle progression in human lung fibroblast cells. *Cell Biology and Toxicology*, 30, 89-100. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10565-014-9271-8.pdf>
67. Webb, B. (2006). Quantum dots. <http://ion.chem.usu.edu/~tapaskar/Britt-Quantum%20Dots.pdf>
68. Khan, I., Saeed, K. and Khan, I. (2017). Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry* (in press). <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878535217300990>
69. Locke, W. (1996). Buckminsterfullerene, C₆₀. <http://www.chm.bris.ac.uk/motm/buckyball/c60a.htm>
70. Allied Market Research (2016). Nanomaterials Market by Type (Carbon Nanotubes, Fullerenes, Graphene, Nano Titanium Dioxide, Nano Zinc Oxide, Nano Silicon Dioxide, Nano Copper Oxide, Nano Cobalt Oxide, Nano Iron Oxide, Nano Manganese Oxide, Nano Zirconium Oxide, Nano Silver, Nano Gold, Nano Nickel, Quantum Dots, Dendrimers, Nanoclay, Nanocellulose) and End-user - Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2014-2022. Allied Market Research website. <https://www.alliedmarketresearch.com/nano-materials-market>
71. Nicomel, N.R., Leus, K., Folens, K., Van Der Voort, P. and Laing, G.D. (2016). Technologies for Arsenic Removal from Water: Current Status and Future Perspectives. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(62), 1-24. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4730453/pdf/ijerph-13-00062.pdf>
72. Wu, W., Wu, Z., Yu, T., Jiang, C. and Kim, W.S. (2015). Recent progress on magnetic iron oxide nanoparticles: synthesis, surface functional strategies and biomedical applications. *Science and Technology of Advanced Materials*, 16, 023501. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1468-6996/16/2/023501/pdf>
73. Kostarelos, K. and Novoselov, K.S. (2014). Graphene devices for life. *Nature Nanotechnology*, 9, 744-745. <http://www.nature.com/nnano/journal/v9/n10/full/nnano.2014.224.html>
74. Liu, Q., Cui, Q., Li, X.J. and Jin, L. (2014). The applications of buckminsterfullerene C₆₀ and derivatives in orthopaedic research. *Connective Tissue Research*, 55(2), 71-79. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4124742/pdf/nihms608096.pdf>
75. Chang, C.C., Hsu, I.K., Aykol, M., Hung, W.H., Chen, C.C. and Cronin, S.B. (2010). A new lower limit for the ultimate breaking strain of carbon nanotubes. *ACS Nano*, 4(9), 5095-5100. <https://pdfs.semanticscholar.org/d072/eaf8c9c9c1730bb211346ac2d1902da369fe.pdf>
76. Eatemadi, A., Daraee, H., Karimkhanloo, H., Kouhi, M., Zarghami, N., Akbarzadeh, A., Abasi, M., Hanifehpour, Y. and Joo, S.W. (2014). Carbon nanotubes: properties, synthesis, purification, and medical applications. *Nanoscale Research Letters*, 9(393), 1-13. <https://neuraldevelopment.biomedcentral.com/track/pdf/10.1186/1556-276X-9-393?site=neuraldevelopment.biomedcentral.com>





Crédit photo : Brent Barnes/Shutterstock.com

Aires marines protégées : pour garantir le développement durable

La santé des océans se détériore en raison de la surexploitation des ressources

Cela fait trop longtemps que de trop nombreuses activités humaines exercent une pression excessive sur les océans. Aujourd'hui, ces derniers font face à un ensemble complexe d'impacts environnementaux, sociaux et économiques. La surpêche et l'exploitation d'autres ressources, l'aménagement du littoral, la pollution et le tourisme endommagent des habitats naturels essentiels et réduisent les populations d'espèces marines à une vitesse folle. Cette dégradation, étayée par la recherche, s'intensifie en raison du changement climatique, à cause de la hausse des températures et de l'acidification résultant de l'absorption du dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère par les océans.

Depuis 1985, la moitié des récifs coralliens du monde a disparu¹. Rien qu'en 2016, une portion de plus de 600 kilomètres de la Grande Barrière de corail a été sévèrement endommagée par le blanchissement des coraux². Sur les 600 stocks halieutiques, ou sous-populations de poissons, surveillés par des organismes de recherche internationaux, 31 % font actuellement l'objet d'une pêche non durable, principalement dans le cadre d'activités illégales, non déclarées ou non régulées, et 58 % sont pleinement exploités³. La population des réserves halieutiques a diminué de 49 % entre 1970 et 2012, avant de se stabiliser pendant une brève période. Aujourd'hui, elle décline de nouveau⁴. Pour résumer, nous exploitons les ressources des océans plus vite que les écosystèmes marins ne peuvent les renouveler. C'est un scénario destructif familier : quand trop de ressources en ont été extraites, les écosystèmes, affaiblis, se remettent plus lentement. Quand nous voulons en prélever davantage, la quantité de ressources disponible est plus faible, ce qui rend leur extraction plus difficile. Nous redoublons alors d'efforts et causons encore plus de dégâts. En fin de compte, les ressources sont épuisées et les espèces, éteintes.

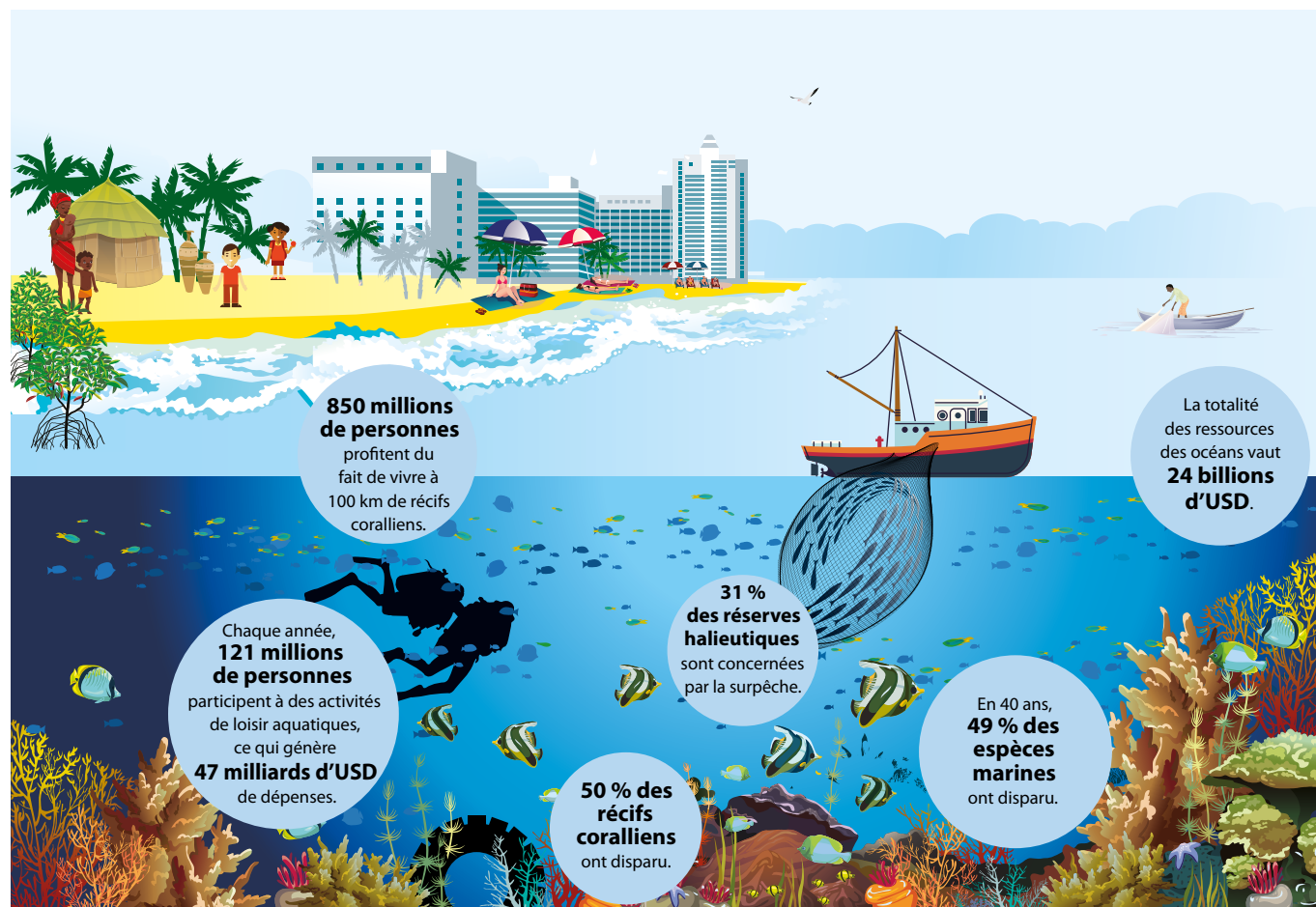


Il s'agit d'un schéma d'autodestruction sociétale. L'être humain dépend des effets bénéfiques des océans pour sa santé, son bien-être et sa réussite économique. Les océans fournissent le poisson qui constitue la principale source de protéines de près de trois milliards de personnes³. Une étude a révélé que nos océans valent au moins 24 billions de dollars US¹. Si les océans étaient un pays, ils représenteraient la septième économie du monde.

Les aires marines protégées sont l'un des meilleurs moyens de préserver ou de restaurer les écosystèmes côtiers et océaniques, en particulier quand elles s'inscrivent dans un système de gestion plus

large⁵⁻¹⁰. Ainsi, la protection des espèces, des habitats et des fonctions des écosystèmes apporte des bienfaits écologiques. L'implication des parties prenantes dans la planification et le partage équitable des bénéfices génère des avantages sociaux. Enfin, des bienfaits économiques découlent de l'utilisation durable, sur le long terme, des ressources naturelles et des revenus tirés du tourisme. L'effet combiné de ces actions pourrait appuyer un grand nombre des 17 objectifs de développement durable définis dans le Programme de développement durable à l'horizon 2030, y compris la réduction de la pauvreté, l'amélioration de la sécurité alimentaire et la lutte contre le changement climatique.

Valeurs des océans et des côtes en jeu



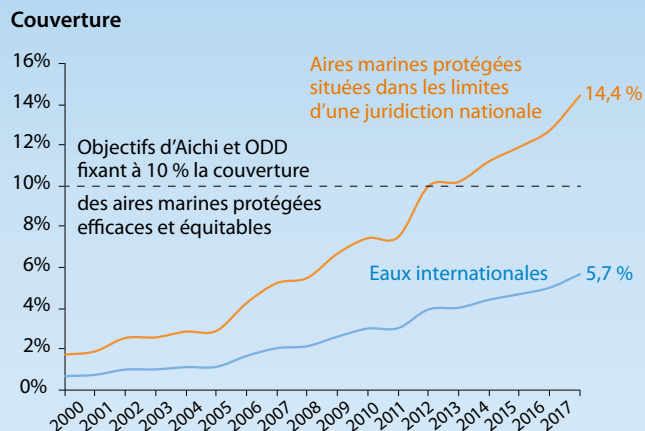
L'essor des aires marines protégées

La plupart des pays s'accordent aujourd'hui sur le fait que nous devons protéger au moins 10 % des zones marines et côtières d'ici à 2020¹¹. C'est l'un des objectifs d'Aichi pour la biodiversité et l'une des cibles du Programme de développement durable à l'horizon 2030^{11,12}.

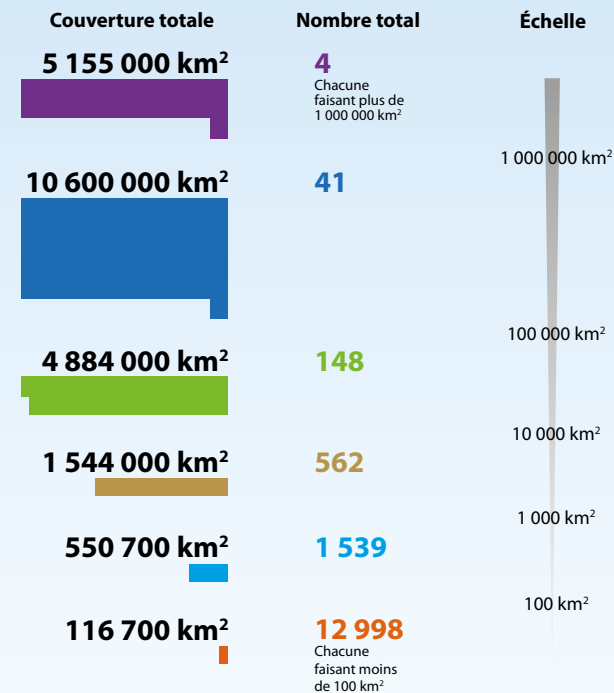
Le nombre de zones protégées a déjà augmenté de 25 % au cours des 15 dernières années¹³. En juillet 2017, les aires marines protégées s'élevaient à 15 292, couvrant 5,7 % de l'ensemble des océans mondiaux. Environ 14,4 % des zones marines et côtières situées dans les limites d'une juridiction nationale sont déclarées protégées¹³. Ce chiffre suggère que l'objectif fixé pour 2020 est atteint pour les espaces maritimes nationaux, mais la réalité est un peu plus complexe parce que la zone physique couverte ne concerne qu'une partie de l'engagement. On estime de plus en plus qu'il ne suffit pas de créer des aires protégées et qu'il faut désormais s'assurer de leur efficacité^{14,15}. Certaines données suggèrent que les capacités de gouvernance actuelles ne seraient peut-être pas suffisantes pour atteindre efficacement les objectifs sociaux et économiques fixés, ni les cibles liées à la préservation de la biodiversité¹⁶. Aujourd'hui, 45 des 15 292 zones déclarées protégées représentent plus de 72 % de la surface marine totale protégée¹³. Si ces zones étendues sont indispensables pour la protection des écosystèmes marins isolés et intacts, leur taille et leur éloignement suscitent des interrogations quant à l'efficacité des stratégies de gouvernance dont elles font l'objet et aux possibilités limitées de partage des bénéfices¹⁴. Les aires marines protégées doivent réellement préserver la diversité biologique et garantir un partage *équitable* des coûts et des bénéfices associés. L'accent doit être mis à la fois sur la qualité et sur la quantité.

Cependant, la question de l'efficacité ne concerne pas uniquement les aires marines protégées très étendues. Dans le cadre d'une nouvelle étude d'ONU Environnement intitulée « Enabling Effective and Equitable Marine Protected Areas: Guidance on combining governance approaches » (Des aires marines protégées efficaces et équitables : recommandations sur la combinaison de plusieurs stratégies de gouvernance), la gouvernance de 34 aires protégées situées dans des zones maritimes nationales a été analysée¹⁶. Un peu plus de la moitié d'entre elles ont été déclarées moyennement efficaces, certains problèmes liés aux effets des activités humaines ayant été entièrement résolus, d'autres partiellement. Les autres aires ont été déclarées peu efficaces, certains effets étant totalement ignorés ou traités de manière inadéquate. D'autres études ont révélé qu'environ 40 % des aires marines protégées souffraient de graves insuffisances, entraînant une gouvernance faible et inefficace¹⁷.

Récentes évolutions en matière de couverture mondiale des aires marines protégées



Répartition par taille



Données de juillet 2017

Source des données : Centre mondial de surveillance de la conservation de la nature (CMS) de l'ONU Environnement





Une meilleure gouvernance renforce l'efficacité des aires marines protégées

Pour garantir l'efficacité des aires marines protégées, une gouvernance solide est nécessaire afin d'infléchir le comportement humain et d'atténuer ses effets sur les écosystèmes. L'approche doit être inclusive et promouvoir l'adoption de méthodes de gestion qui montrent aux communautés d'usagers les avantages sociaux, économiques et environnementaux qu'elles peuvent en tirer.


Les mers sont des systèmes écologiques complexes et appuient des systèmes sociaux et économiques qui le sont tout autant ; optimiser l'efficacité des aires protégées peut donc requérir des ressources considérables. Les difficultés sont généralement liées au manque de connaissances, de volonté politique, d'appui communautaire et d'investissement financier. Trop souvent, les aires marines protégées sont vues comme une source de dépense immédiate à court terme, au lieu d'être considérées comme un investissement à long terme apportant des bénéfices sociaux, économiques et environnementaux substantiels. Les enjeux sont différents pour chaque aire marine protégée, mais les personnes utilisant les ressources des océans seront moins enclines à enfreindre les règles et les lois si elles participent aux discussions et à la prise de décisions.

Les débats sur la protection des mers cherchent à déterminer la meilleure manière ou, tout du moins, la façon adéquate d'améliorer la gouvernance. Ils mettent l'accent sur trois approches, mais chacune a ses inconvénients. La gouvernance descendante est axée sur les règles imposées par les pouvoirs publics, mais elle peut ne pas inclure suffisamment les communautés locales et diminuer de ce fait la coopération. La gouvernance ascendante est articulée autour de restrictions décidées à l'échelle locale auxquelles se plie la population. Les moyens juridiques ne sont néanmoins pas toujours suffisants pour contraindre les nouveaux utilisateurs. Enfin, la gouvernance axée sur le marché se concentre sur les initiatives économiques qui produisent des gains financiers, comme le fait d'accorder aux communautés locales des droits fonciers ou de leur fournir des moyens de subsistance alternatifs. En perturbant la coopération locale et en entraînant d'autres dommages environnementaux, cette approche peut nuire aux objectifs de conservation.


Les études menées sur l'efficacité des aires marines protégées montrent que l'adoption d'une seule approche de gouvernance engendre des faiblesses qui peuvent compromettre les objectifs de protection de l'environnement. Au contraire, il convient de mettre en place une approche intégrée qui s'appuie à la fois sur les pouvoirs publics, les communautés locales et le marché^{16,18}. L'importance relative de chacun de ces acteurs dépend du comportement à modifier et du contexte environnemental, social, économique et politique global.



Objectif d'Aichi 11
D'ici à 2020, au moins 10 % des zones marines et côtières, y compris les zones qui sont particulièrement importantes pour la diversité biologique et les services fournis par les écosystèmes, sont conservées au moyen de réseaux écologiquement représentatifs et bien reliés d'aires protégées gérées efficacement et équitablement et d'autres mesures de conservation efficaces par zone, et intégrées dans l'ensemble du paysage marin.



OBJECTIFS DE DÉVELOPPEMENT DURABLE



Cible 14.2
D'ici à 2020, gérer et protéger durablement les écosystèmes marins et côtiers, notamment en renforçant leur résilience, afin d'éviter les graves conséquences de leur dégradation et prendre des mesures en faveur de leur restauration.

Cible 14.5
D'ici à 2020, préserver au moins 10 % des zones marines et côtières, conformément au droit national et international et compte tenu des meilleures informations scientifiques disponibles.

► Vidéo : Comment choisir les réserves marines



Lien de la vidéo (en anglais) : <https://www.openchannels.org/videos/how-choose-marine-reserves>
© Hugh Possingham/Jennifer McGowan, université du Queensland

La combinaison des approches de gouvernance dans la pratique

Île de Chumbe, Tanzanie



Aire marine protégée privée :

- Principalement financée par l'écotourisme
- Nombre élevé d'employés par touriste pour créer davantage d'emplois ; 95 % du personnel est tanzanien
- Étroite collaboration avec le ministère tanzanien de la Pêche pour assurer l'application de sanctions, avec le soutien des gardiens, pêcheurs et policiers locaux

Bluefields Bay, Jamaïque



Aire marine protégée gérée par la communauté :

- Toutes les communautés locales concernées participent aux discussions et à la prise de décisions
- Vise l'indépendance financière pour assurer son maintien et soutenir la communauté locale
- Le gouvernement finance des patrouilles pour faire appliquer les réglementations, qui sont appuyées par la législation nationale
- Des organisations internationales et locales s'occupent de la gestion financière et opérationnelle et fournissent des ressources qualifiées chargées de la formation et de l'éducation

Parc marin de la Grande Barrière de corail, Australie



Aire protégée à usages multiples :

- Étroite collaboration entre l'administration fédérale et celle de l'État
- Système de répartition par zones pour un partage équitable des bénéfices produits par les services écosystémiques
- Plus de 70 000 personnes travaillent dans le tourisme ; ce secteur génère un revenu de 5 milliards de dollars AU chaque année
- Collaboration avec les communautés autochtones afin de veiller à ce que leurs moyens de subsistance, cultures et traditions soient protégés, par exemple les droits relatifs à la pêche

Chaque aire protégée est unique, mais certains facteurs communs peuvent intensifier les problèmes de gouvernance, y compris l'augmentation de la demande de poisson à l'échelle mondiale, qui conduit à l'intensification de la pêche commerciale ; la pauvreté locale, qui incite la population à pêcher pour subvenir à ses besoins ; la pression exercée par l'essor du tourisme, qui pousse au développement des infrastructures et à l'ouverture de l'accès maritime à des fins récréatives et, enfin, la migration économique depuis l'intérieur des terres, où la pauvreté est plus grande, vers le littoral, dans l'espoir de trouver du travail ou d'un meilleur niveau de vie^{16,18}.

Tous ces facteurs sont susceptibles de nuire aux objectifs de conservation. Il est évident que la définition des objectifs au cours du processus de délimitation d'une aire marine protégée permet de comprendre les prérequis à satisfaire en vue de résoudre les conflits et de favoriser l'efficacité de l'aire protégée. Un cadre de gouvernance peut être défini pour appuyer l'élaboration et la mise en œuvre de mesures visant à atténuer certains comportements humains spécifiques ; il doit inclure des stratégies financières et des mécanismes

de mise en application afin de soutenir l'ensemble des objectifs de l'aire protégée. Parallèlement, il doit permettre un partage équitable des coûts et des bénéfices tout en préservant la biodiversité.

Des études de cas portant sur des aires marines protégées montrent comment la combinaison de plusieurs approches de gouvernance peut permettre de gagner en efficacité. En Australie, le Parc marin de la Grande Barrière de corail allie gouvernance descendante et collaboration avec les communautés autochtones locales pour protéger les moyens de subsistance, cultures et traditions de ces dernières. En Tanzanie, le parc corallien de l'île de Chumbe est une zone protégée privée centrée sur l'écotourisme ; la collaboration étroite établie avec le gouvernement assure l'application de sanctions, avec le soutien des gardiens, des pêcheurs et des policiers locaux. En Jamaïque, la zone protégée de Bluefields Bay est gérée par la communauté, mais le gouvernement finance des patrouilles afin de faire appliquer la réglementation appuyée par la législation nationale. Dans chacun des cas, des techniques issues de différentes approches ont été adoptées pour épouser les besoins et les conditions sur place^{16,18}.

Gouvernance des aires marines protégées

L'efficacité des aires marines protégées est optimale lorsque celles-ci sont administrées au moyen d'une combinaison d'approches de gouvernance...

Gouvernance descendante

L'implication des pouvoirs publics est nécessaire à la mise en place de lois et de règles visant à protéger la biodiversité et les ressources naturelles de la destruction et des dégradations que leur infligent leurs utilisateurs.

Gouvernance ascendante

La réussite du dispositif repose sur la participation des communautés locales aux décisions, ainsi que sur la mobilisation des connaissances locales. Ce type de gouvernance favorise l'appropriation des mesures prises, la responsabilité et l'autonomisation.

Gouvernance axée sur le marché

Les marchés jouent un rôle important à l'égard des incitations économiques, de la compatibilité des moyens de subsistance alternatifs et de la viabilité financière. Donner une valeur économique à la biodiversité contribue à promouvoir des décisions équilibrées.

Qu'est-ce qu'une aire marine protégée ?

Il existe toute une variété d'aires marines protégées. Si leurs définitions et classifications peuvent différer, elles sont généralement délimitées pour protéger ou gérer la biodiversité marine et côtière, les écosystèmes ou les ressources. Il en existe dans les zones côtières comme au large des océans, à la fois dans des régions tropicales, tempérées et polaires. L'administration de ces zones peut varier relativement aux niveaux de réglementation et de protection, ainsi qu'aux modes de gestion.

... pour mettre un terme aux conflits, réduire l'impact des activités et

... pour garantir un partage équitable des coûts et des bénéfices.



Répression



Gestion et législation

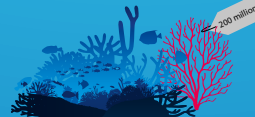


Recherche et suivi

Partage des bénéfices entre les utilisateurs, locaux ou non, des ressources naturelles



Aliments et moyens de subsistance garantis



Partage des bénéfices des écosystèmes en bonne santé

Perspectives d'avenir : utiliser les aires protégées pour appuyer le développement durable

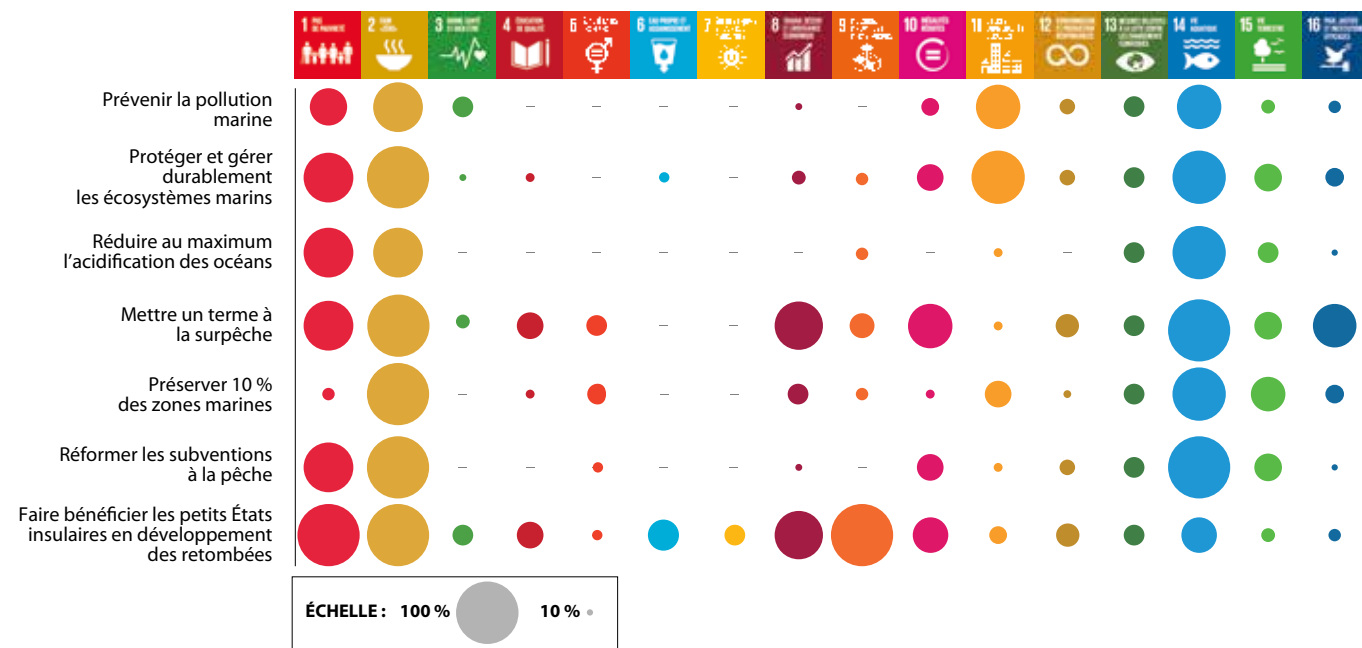
Les possibilités offertes par la protection des mers sont aussi vastes que l'océan. Toutefois, un changement de paradigme est nécessaire pour mettre l'accent aussi bien sur la qualité que sur la quantité des aires protégées, et pour en reconnaître non seulement les coûts, mais aussi les bénéfices. La protection des mers peut aller de pair avec des retombées économiques et sociales positives si les aires protégées sont administrées d'une manière qui tient pleinement compte du milieu environnant.

Un scénario économique estime qu'un réseau d'aires protégées couvrant 10 à 30 % des océans pourrait certes coûter de 45 à 228 milliards de dollars US, mais également générer des avantages sociaux et économiques considérables grâce aux bénéfices des services écosystémiques (protection du littoral, pêche, tourisme, loisirs et stockage du carbone), de l'ordre de 622 à 1 145 milliards de dollars US entre 2015 et 2050¹⁹. De tels bénéfices pourraient être entre 3 et 20 fois

supérieurs aux coûts. Cela pourrait également rendre les activités de pêche plus productives et plus durables, réduire la baisse des réserves halieutiques mondiales et favoriser le tourisme et d'autres activités économiques²⁰. Par exemple, des études suggèrent que l'augmentation de la diversité biologique d'une aire protégée peut générer des revenus jusqu'à 36 fois plus importants avec le tourisme qu'avec la pêche²¹. En outre, l'analyse coûts-avantages suggère que l'agrandissement des aires marines protégées permettrait de réaliser des économies d'échelle au niveau des coûts de création et de fonctionnement¹⁹.

Toutefois, comme dans le cadre plus large de la gouvernance marine, il n'existe pas de solution unique : chaque scénario doit être envisagé individuellement. Comme expliqué précédemment, certaines données indiquent que les aires marines protégées étendues peuvent être moins bien gérées et moins efficaces^{15,17,18}. Par ailleurs, il semble que le retour sur investissement diminue à mesure que la taille de l'aire protégée augmente, bien que cela dépende du niveau de diversité biologique de chaque aire¹⁹. Il serait nécessaire de réaliser une analyse coûts-avantages sur chaque site pour prendre la mesure des conséquences

Retombées positives de la réalisation des cibles de l'objectif de développement durable 14 : vie aquatique



Source : adapté de Singh et al. (2017)²²



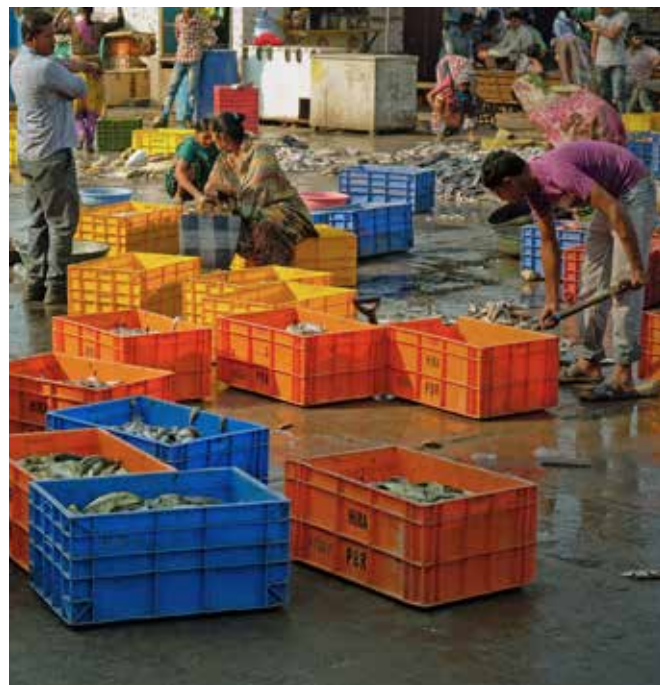
sociales, économiques et environnementales. Chacune d'entre elles devrait prouver la capacité de l'aire à réduire efficacement l'impact sur les ressources et les écosystèmes marins tout en favorisant le partage équitable des bénéfices.

En 2016, l'appel à l'action de Rome et la déclaration de consensus des scientifiques qui s'en suivit ont permis d'établir une feuille de route pour promouvoir des aires marines protégées efficaces et équitables, qui définit des actions et des objectifs clairs^{23,24}. En juin 2017, la Conférence des Nations Unies sur les océans s'est appuyée sur cette base, reconnaissant le besoin d'allier la préservation de la biodiversité et son utilisation durable, en définissant des rôles clairs pour les individus et en partageant équitablement les coûts et les avantages²⁵.

Les efforts déployés pour garantir la bonne santé des océans et des côtes peuvent apporter un bon retour sur investissement en termes de développement durable plus large. Une récente étude a mis en lumière les nombreuses retombées positives que pourrait offrir la réalisation des différentes cibles de l'objectif de développement durable 14 relatif aux océans en vue de mener à bien le Programme de développement durable à l'horizon 2030²².

Il s'agit là d'une occasion idéale de renforcer nos efforts de maintien de la santé de nos océans et continuer ainsi à en tirer parti. Dans ce contexte, il est plus que jamais indispensable que les pays s'efforcent de regarder au-delà de la simple réalisation de cibles relatives aux aires marines protégées visant la meilleure couverture, afin de pouvoir utiliser ces dernières pour instaurer un développement durable.

▶ Vidéo : Économie et politiques relatives à la pêche – Aires marines protégées



Lien de la vidéo (en anglais) : www.youtube.com/watch?v=n6_JLZnQe6Y
Crédit photo : pjpix/Shutterstock.com

© Conservation Strategy Fund



Crédit photo : CHEN WS/Shutterstock.com

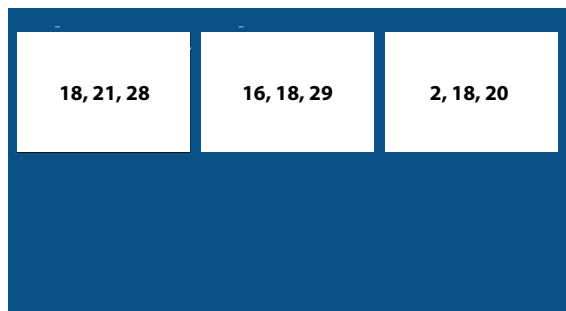
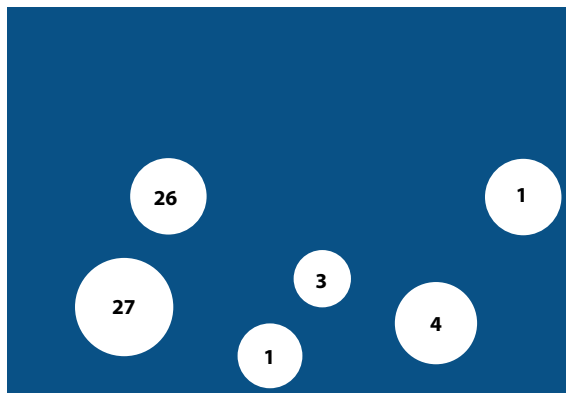
Références bibliographiques

1. Hoegh-Guldberg, O. *et al.* (2015). Reviving the Oceans Economy: the case for action – 2015. WWF International, Gland. <https://www.worldwildlife.org/publications/reviving-the-oceans-economy-the-case-for-action-2015>
2. Coralcoe (2017). Life and death after Great Barrier Reef bleaching. ARC Centre of Excellence for Coral Reef Studies website. <https://www.coralcoe.org.au/media-releases/life-and-death-after-great-barrier-reef-bleaching>
3. FAO (2016). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2016: Contributing to food security and nutrition for all*. The Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. <http://www.fao.org/3/a-i5555e.pdf>
4. WWF (2015). *Living Blue Planet Report: Species, habitats and human well-being*. WWF International, Gland. <https://www.worldwildlife.org/publications/living-blue-planet-report-2015>
5. Ballantine, W.J. and Langlois, T.J. (2008). Marine reserves: the need for systems. In: Davenport J. *et al.* (eds) *Challenges to Marine Ecosystems. Developments in Hydrobiology, vol 202*. Springer, Dordrecht. https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-1-4020-8808-7_3
6. Guidetti, P. (2006). Marine reserves reestablish lost predatory interactions and cause community changes in rocky reefs. *Ecological Applications*, 16, 963–976. [http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1890/1051-0761\(2006\)016%5B0963:MRRLP%5D2.0.CO;2/epdf](http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1890/1051-0761(2006)016%5B0963:MRRLP%5D2.0.CO;2/epdf)
7. Leleu, K., Remy-Zephir, B., Grace, R. and Costello, M.J. (2012). Mapping habitats in a marine reserve showed how a 30-year trophic cascade altered ecosystem structure. *Biological Conservation*, 155, 193–201. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0006320712002443>
8. Moland, E., Olsen, E.M., Knutsen, H., Garrigou, P., Espeland, S.H., Kleiven, A.R., Andre, C. and Knutsen, J.A. (2013). Lobster and cod benefit from small-scale northern marine protected areas: inference from an empirical before-after control-impact study. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 280, 20122679. <http://rspb.royalsocietypublishing.org/content/280/1754/20122679.full.pdf>
9. Mumby, P.J. and Harborne, A.R. (2010). Marine reserves enhance the recovery of corals on Caribbean reefs. *PLoS One*, 5, e8657. <http://journals.plos.org/plosone/article/file?id=10.1371/journal.pone.0008657&type=printable>
10. Pita, C., Pierce, G.J., Theodossiou, I. and Macpherson, K. (2011). An overview of commercial fishers' attitudes towards marine protected areas. *Hydrobiologia*, 670, 289–306. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs10750-011-0665-9.pdf>
11. CBD (2017). Aichi Biodiversity Targets website. Convention on Biological Diversity, Montreal. <https://www.cbd.int/sp/targets/>
12. United Nations (2017). Sustainable Development Goal 14 website. Sustainable Development Knowledge Platform. United Nations, New York. <https://sustainabledevelopment.un.org/sdg14>
13. UNEP-WCMC (2017). The World Database on Protected Areas dataset. United Nations Environment Programme – World Conservation Monitoring Centre, Cambridge. <http://www.protectedplanet.net/c/world-database-on-protected-areas>
14. Jones P.J.S. and De Santo, E.M. (2016). Viewpoint – Is the race for remote, very large marine protected areas (VLMPPAs) taking us down the wrong track? *Marine Policy*, 73, 231–234. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308597X1630481X?via%3Dihub>
15. Watson, J.E.M., Dudley, N., Segan, D.B. and Hockings, M. (2014). The performance and potential of protected areas. *Nature*, 15, 67–73. <https://www.nature.com/nature/journal/v515/n7525/pdf/nature13947.pdf>
16. UNEP (2017). Enabling effective and equitable marine protected areas: guidance on combining governance approaches. United Nations Environment, Nairobi.
17. Leverington, F., Costa, K.L., Pavese, H., Lisle, A. and Hockings, M. (2010). A Global Analysis of Protected Area Management Effectiveness. *Environmental Management*, 46(5), 685–698. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs00267-010-9564-5.pdf>
18. Jones, P.J.S. (2014). *Governing Marine Protected Areas: Resilience through diversity*. Routledge, London.
19. Brander, L., Baulcomb, C., van der Lelij, J.A.C., Eppink, F., McVittie, A., Nijsten, L. and van Beukering, P. (2015). The benefits to people of expanding Marine Protected Areas. IVM Institute for Environmental Studies Report R-15/05. http://assets.wfn.nl/downloads/mpa_rapport_volledig.pdf
20. Balmford, A., Gravestock, P., Hockley, N., McClean, C.J. and Roberts, C.M. (2004). The worldwide costs of marine protected areas. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(26), 9694–9697. <http://www.pnas.org/content/101/26/9694.full.pdf>
21. Sala E., Costello, C., Parme, J.D.B. and Sumaila, R.U. (2016). Fish Banks: An economic model to scale marine conservation. *Marine Policy*, 73, 154–161. https://www.researchgate.net/publication/306420445_Fish_banks_An_economic_model_to_scale_marine_conservation
22. The 10x20 Initiative (2016). *Rome Call to Action*. Conference on Marine Protected Areas: An Urgent Imperative A Dialogue Between Scientists and Policymakers, Ministry of Foreign Affairs and International Cooperation, Rome, 7–9 March 2016. http://www.italyun.esteri.it/rappresentanza_onu/resource/resource/2016/03/rome_conference_cta_final.pdf
23. The 10x20 Initiative (2016). *Scientists' Consensus Statement on Marine Protected Areas (MPAs): Characteristics, Governance, and Sustainable Financing*. Conference on Marine Protected Areas: An Urgent Imperative A Dialogue Between Scientists and Policymakers, Ministry of Foreign Affairs and International Cooperation, Rome, 7–9 March 2016. http://www.italyun.esteri.it/rappresentanza_onu/resource/resource/2016/03/scientists_consensus_statement_on_marine_protected_areas.pdf



24. United Nations (2017). Report of the United Nations Conference to Support the Implementation of Sustainable Development Goal 14: Conserve and sustainably use the oceans, seas and marine resources for sustainable Development. A/CONF.230/14. United Nations, New York. https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/15662FINAL_15_June_2017_Report_Goal_14.pdf
25. Singh, G., Cisneros-Montemayor, A., Cheung, W. and Ota, Y. (2017). *Oceans and the Sustainable Development Goals: Co-benefits, Climate Change & Social Equity*. The Nippon Foundation and University of British Columbia Nereus Program, Vancouver. <http://www.nereusprogram.org/wp-content/uploads/2017/05/SDG-Report-2017-online-version-compressed.pdf>
26. Burke, L., Reytar, K., Spalding, M. and Perry, A. (2011). *Reefs At Risk Revisited*. World Resources Institute, Washington DC. <http://www.wri.org/publication/reefs-risk-revisited>
27. Cisneros-Montemayor, A.M. and Sumaila, U.R. (2010). A global estimate of benefits from ecosystembased marine recreation: Potential impacts and implications for management. *Journal of Bioeconomics*, 12, 245-268. https://www.researchgate.net/publication/227346912_A_global_estimate_of_benefits_from_ecosystem-based_marine_recreation_Potential_impacts_and_implications_for_management
28. Nordlund, L.M., Kloiber, U., Carter, E. and Riedmiller, S. (2013). Chumbe Island Coral Park–governance analysis. *Marine Policy*, 41, 110-117. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpol.2012.12.018>
29. Thorpe, C. (2011). Governance analysis of Bluefields Bay Special Fisheries Conservation Area, Jamaica. MSc Thesis, University College London. <https://www.ucl.ac.uk/mpag/docs/Bluefields.pdf>

Références bibliographiques des illustrations





*Tempête de sable passant au-dessus de la mission conjointe de l'Union africaine et des Nations Unies au Darfour du Nord (El Fasher, Soudan).
Crédit photo : MINUAD/Adrian Dragnea*

Tempêtes de sable et de poussière : maîtriser un phénomène mondial

L'invasion du sable et de la poussière

En 2010, les autorités chinoises ont émis une alerte à la pollution de niveau 5 en raison de l'arrivée sur Beijing d'une violente tempête de sable partie de Mongolie et de Chine septentrionale, couvrant une zone de 810 000 kilomètres carrés et menaçant 250 millions de personnes¹. En mai 2016, une série de très fortes tempêtes de sable s'est abattue sur le comté de Rigan, dans le sud-est de l'Iran, ensevelissant 16 villages et causant des pertes estimées à 9 millions de dollars US². Quelques mois plus tard, d'épais nuages de sable et de poussière ont envahi Abu Dhabi, réduisant la visibilité dans la ville à 500 mètres et augmentant le nombre de patients asthmatiques hospitalisés de 20 %^{3,4}. Ces phénomènes ne sont que quelques exemples des menaces et dégâts causés récemment par les tempêtes de sable et de poussière dans toutes les régions du monde. On en dénombre de nombreux autres tout au long de l'histoire de l'humanité⁵.

Les tempêtes de sable et de poussière se forment lorsque des vents turbulents violents érodent les sols arides et semi-arides et soulèvent des particules de sédiments et de sable. Les tempêtes de sable se déplacent relativement près du sol. La distance parcourue par chaque particule dépend de sa taille et de la vitesse du vent. Les tempêtes de poussière soulèvent de grandes quantités de fines particules de sédiments et d'argile dans les couches plus élevées de l'atmosphère⁶.

Ces tempêtes peuvent parcourir des milliers de kilomètres à travers les océans et les continents, entraînant d'autres polluants et déposant des particules loin de leur sol d'origine. Les vents dispersent la poussière du Sahara – la principale source de la planète – vers le continent américain à l'ouest, l'Europe au nord et la Chine à l'est⁶. Le sable issu des régions d'Asie centrale et de Chine peut atteindre la péninsule coréenne, le Japon, les îles du Pacifique, l'Amérique du Nord, et aller même au-delà.

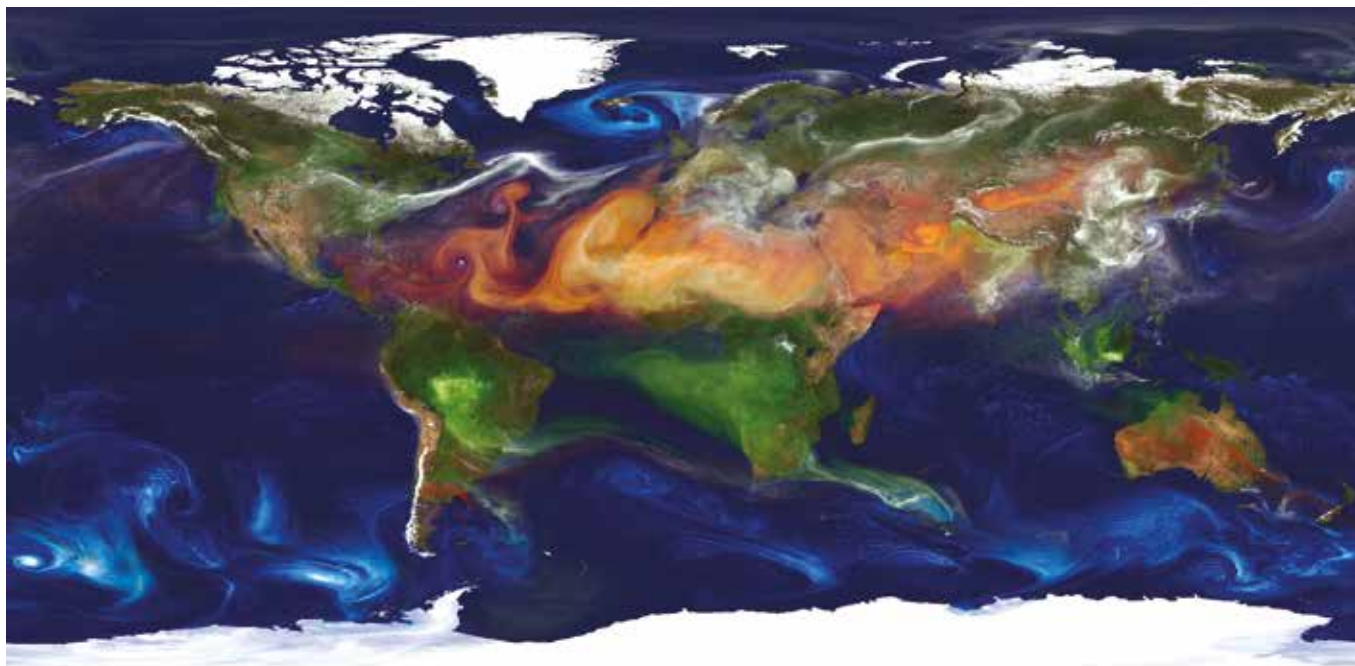


Une étude de cas réalisée en 2003 a déterminé que d'importantes quantités de poussière provenaient d'un panache parti de Chine en 1990 et ayant atteint les Alpes – parcourant ainsi plus de 20 000 kilomètres vers l'est en l'espace de deux semaines⁷. La poussière joue un rôle crucial dans les processus biogéochimiques de l'ensemble du système terrestre. Elle constitue l'une des matières premières des vastes étendues de loess⁸. Les dépôts de poussières minérales apportent des nutriments, tels que le fer et d'autres oligoéléments, aux écosystèmes terrestres et marins, stimulant ainsi la productivité primaire et la croissance du phytoplancton⁹. Par ailleurs, la poussière du Sahara est un engrais naturel pour la forêt tropicale amazonienne, de par ses apports en phosphore qui compensent les pertes dues à l'écoulement fluvial¹⁰. De la même manière, les forêts humides d'Hawaï reçoivent des nutriments par le biais des concentrations de poussières venues d'Asie centrale¹¹. En revanche, les poussières provenant d'Afrique et d'Asie sont susceptibles d'endommager les récifs coralliens des Caraïbes¹².

La poussière peut aussi s'avérer néfaste pour les animaux et les êtres humains, en particulier dans les régions arides et semi-arides. Chez les êtres humains, l'inhalation de particules fines peut déclencher

et aggraver l'asthme, la bronchite, l'emphysème et la silicose¹³. Les poussières fines peuvent également transporter divers polluants, spores, bactéries, champignons et allergènes. La poussière provoque fréquemment des infections oculaires, des irritations de la peau et des fièvres de la vallée. Dans les pays du Sahel, les fortes concentrations de poussières provenant du Sahara sont étroitement liées aux épidémies de méningite¹⁴. L'exposition chronique aux fines particules de poussière entraîne des décès prématurés dus à des maladies respiratoires et cardiovasculaires, des cancers du poumon et des infections aiguës des voies respiratoires inférieures¹⁵.

Les tempêtes de poussière causent également des dommages socio-économiques¹⁶⁻¹⁹. Parmi les coûts à court terme figurent les maladies et le décès du bétail, la destruction des cultures, la dégradation des bâtiments et autres infrastructures, l'arrêt des transports et l'enlèvement coûteux de plusieurs tonnes de résidus. Les pertes économiques imputables à une seule tempête peuvent s'élever à des centaines de millions de dollars. Les coûts à long terme comprennent l'érosion des sols, la pollution des écosystèmes, les problèmes de santé chroniques invalidants et la désertification.



Modélisation des aérosols dans le monde réalisée à l'aide d'une simulation GEOS 5 avec une résolution de 10 kilomètres. Les émissions de poussière sont représentées en brun/rouge.

Crédit photo : William Putman, NASA/Goddard Space Flight Center

Rôle de la nature, de la mauvaise gestion des terres et du changement climatique

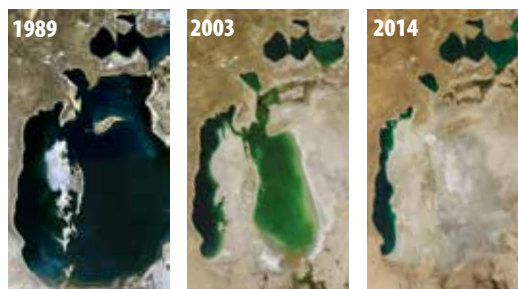
La récurrence des soulèvements de poussière varie considérablement sur différentes échelles de temps (saison, année, décennie, plusieurs décennies)²⁰. Une étude réalisée en 2012 visant à comparer des données recueillies par satellite entre 2003 et 2009 et des analyses similaires de données antérieures a montré qu'au cours des trois dernières décennies, des changements majeurs avaient été observés en Australie, en Asie centrale et sur les hautes plaines des États-Unis. Sur cette même période, la fréquence des tempêtes de poussière balayant l'Afrique du Nord, le Moyen-Orient et l'Amérique du Sud est restée stable^{21,22}. Des études plus poussées révèlent que ces régions sont régulièrement touchées par d'importants mouvements de poussière, tels que des tempêtes ou des nuages, d'origine naturelle ou anthropique²¹⁻²³.

Les causes anthropiques sont responsables d'environ 25 % des émissions de poussière à l'échelle mondiale. Elles sont le fait, d'une part, du changement d'utilisation des terres, notamment d'une extraction excessive de l'eau et d'un détournement de cette dernière à des fins d'irrigation, qui assèchent les étendues d'eau, et d'autre part, de la déforestation et des pratiques agricoles non viables qui exposent les sols à l'érosion éolienne. Il s'agit là de différentes formes de dégradation des terres. Dans les zones arides, le labour trop fréquent et trop profond des terres agricoles et l'élimination des résidus de récolte laissent les sols exposés. La suppression des haies et des andains pour faciliter l'utilisation d'équipements plus volumineux participe également à l'érosion éolienne. Par ailleurs, le surpâturage réduit la couverture des sols. Sur un sol dénudé, le vent soulève les particules fines contenant une grande partie des nutriments et des matières organiques contenues dans la terre. Les simulations réalisées par modélisation indiquent que depuis 1900, les émissions de poussière ont augmenté de 25 à 50 % à l'échelle mondiale sous l'effet conjoint de l'occupation des sols et du changement climatique²⁴.

Dans toutes les régions exposées aux tempêtes de poussière, la corrélation entre les activités anthropiques et l'augmentation des concentrations des poussières atmosphériques est visible, voire tangible. Le lac (asséché) d'Owens, en Californie, qui constitue aujourd'hui une source de poussière, a commencé à se tarir à la suite des détournements d'eau dus à la mise en service de l'aqueduc de Los Angeles, en 1913²⁵. La Patagonie, située dans la moitié sud de l'Argentine, est devenue une source majeure de poussière d'origine anthropique causée par les pratiques d'élevage non durables et la désertification qui en découle²⁶. En Asie du Sud, le bassin indo-gangétique forme une importante source de poussière résultant des activités agricoles intensives²⁷. En Australie, le défrichement et les besoins en eau liés à l'agriculture ont perturbé le régime hydrologique et conduit à un accroissement considérable des concentrations de poussière²⁷. De même, on assiste depuis 1970 à

Disparition progressive de la mer d'Aral entre 2000 et 2013

En raison de décennies de détournement de l'eau pratiqué à grande échelle, la mer d'Aral s'est asséchée pour devenir une source active de poussière.



Crédits photo
 1989 – Global Land Cover Facility de l'université de Maryland
 2003 – Jacques Desloîtres, NASA/Goddard Space Flight Center
 2014 – Jesse Allen, NASA Earth Observatory

l'assèchement rapide du lac Balkhach (Kazakhstan) après la construction d'un barrage en amont du fleuve Ili.

Les décennies de détournement de l'eau, pratiqué à grande échelle sur les principaux fleuves de la région – le Syr Darya et l'Amu Darya – pour alimenter les imposants projets d'irrigation, ont fini par réduire le débit fluvial se déversant dans la mer d'Aral, entraînant une aridification et une désertification dans toute la région²⁸. Les vastes étendues du bassin de la mer d'Aral se sont transformées en poussières toxiques chargées en résidus persistants d'engrais et de pesticides chimiques, dont l'utilisation est interdite depuis des dizaines d'années²⁹.

Le changement climatique anthropique est un facteur important de génération de poussière, en sus des quantités produites naturellement ou par la mauvaise gestion des terres. De nombreuses régions actuellement marquées par des concentrations importantes de poussière vont probablement s'assécher davantage et contribuer ainsi à l'augmentation des poussières atmosphériques. Parmi elles figurent les régions méditerranéennes d'Afrique et d'Europe, le Sahara septentrional, l'Asie occidentale, l'Asie centrale, le sud-ouest des États-Unis et le sud de l'Australie^{30,31}. À son tour, la concentration plus importante de poussière dans l'atmosphère peut avoir une incidence sur le système climatique. Elle peut bouleverser l'équilibre radiatif de la Terre, aggravant ainsi les sécheresses dans les zones arides³². À l'inverse, la poussière pourrait augmenter les précipitations dans certaines régions en ensemençant les nuages³³.

Les tempêtes de sable et de poussière sont ainsi liées à plusieurs questions environnementales et de développement qui dépassent les frontières nationales, régionales et continentales. Dans les régions où elles se forment, le changement climatique anthropique viendra exacerber les effets produits par les décennies de gestion non viable des terres et des ressources hydriques. Toutefois, cette menace peut être diminuée grâce à l'adoption de mesures rapides et efficaces.

Sources et impacts des tempêtes de sable et de poussière

Les changements d'utilisation des terres tels que l'agriculture, le détournement de l'eau et la déforestation sont responsables de **25 % des émissions de poussière au niveau mondial.**

Depuis 1900 les émissions de poussière **ont augmenté de 25 à 50 %** à cause des activités humaines.

Les tempêtes de sable et de poussière sont fréquentes dans les **régions arides et semi-arides.**

À mesure que le **climat change**, la variabilité accrue et l'augmentation des phénomènes extrêmes aggrave la dangerosité des tempêtes de poussière.

Les **initiatives de restauration de l'environnement** contribuent à diminuer la fréquence et la gravité des tempêtes de poussière au niveau local.

Les tempêtes de sable et de poussière transportent des **particules de tailles très variées.**

Les tempêtes de sable et de poussière se forment quand des vents turbulents et violents érodent les sols arides et soulèvent des particules de sable et de sédiments.

Quand elles sont inhalées, les particules inférieures à **10 microns** (un centième de millimètre) peuvent entraîner des problèmes cardiaques et pulmonaires.

Les **régions arides** risquent de s'assécher davantage, et les tempêtes de poussière d'y être plus fréquentes. Cette tendance concerne notamment les **régions méditerranéennes d'Europe et d'Afrique, le nord du Sahara, l'Asie de l'Ouest et du centre, le sud-ouest des États-Unis et le sud de l'Australie.**

Lors de tempêtes de poussière, la concentration de poussière atteint **100 à 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$**

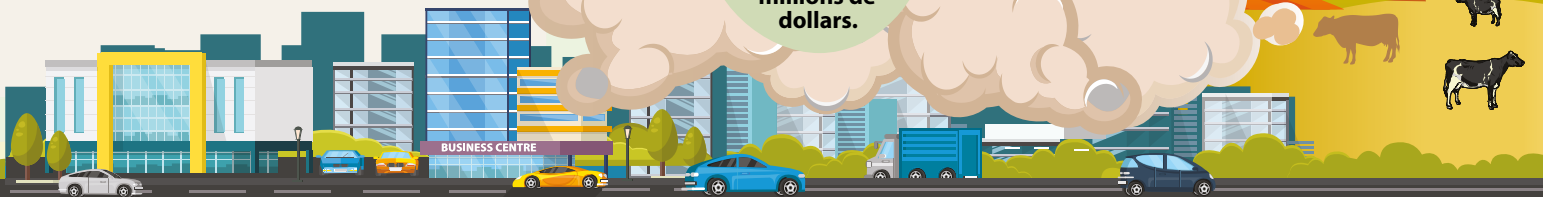
Les tempêtes de poussière peuvent transporter divers **polluants, spores, champignons, bactéries et allergènes.**
La poussière issue du Sahara peut causer des épidémies de méningite dans le Sahel.

Une tempête de poussière qui a traversé le nord-ouest de la Chine en 1993 a tué près de **120 000 animaux d'élevage**, détruit **373 333 hectares de cultures** et comblé plus de 2 000 km de fossés d'irrigation.

Les tempêtes de poussière abîment les cultures, tuent le bétail et érodent les sols fertiles.

Pour l'OMS, la qualité de l'air est bonne lorsque la concentration de particules fines ne dépasse pas **50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$**


Les pertes économiques imputables à une seule tempête de poussière peuvent atteindre des **centaines de millions de dollars.**



Limiter les dommages en œuvrant à plus petite échelle

À court et moyen terme, les efforts déployés en vue d'atténuer les menaces des tempêtes de sable et de poussière doivent se concentrer sur la mise en place de stratégies de protection³⁴. Les systèmes d'alerte rapide et les procédures de réduction des catastrophes sont évidemment des ingrédients essentiels de la préparation et les programmes régionaux sont actuellement modifiés pour améliorer ces services. Les mesures prises pour faire face en temps réel aux tempêtes de sable et de poussière comprennent la diffusion de conseils aux services publics, la fermeture des écoles, des aéroports, des voies ferrées et des routes, et la mise en place de services d'urgence hospitaliers.

La préparation à ce type de catastrophes passe d'abord par la sensibilisation du public aux risques qu'elles entraînent, par le biais de l'enseignement scolaire, des médias et réseaux sociaux et des télécommunications. D'autres mesures de préparation consistent notamment à adopter des mécanismes de protection physique efficaces des biens de valeur, tels que planter ou ériger des barrières en amont des zones peuplées et des principales infrastructures afin de favoriser le dépôt de poussière à l'extérieur de ces zones. Certaines mesures consistent à construire des routes rectilignes et à supprimer les obstacles permettent de détourner les vents dominants et leur charge des sites devant être protégés.

 Vidéo : l'ambitieuse initiative africaine de la Grande muraille verte



Lien de la vidéo (en anglais) : https://www.youtube.com/watch?v=jL_nRHg-0I4
Crédit photo : travail du sol au Sénégal par IFPRI/Milo Mitchell, reproduit sous licence CC BY-NC-ND 2.0

© TIME



Panache de poussière se déplaçant de l'Afrique du Nord vers l'Europe et l'océan Atlantique, 21 février 2017

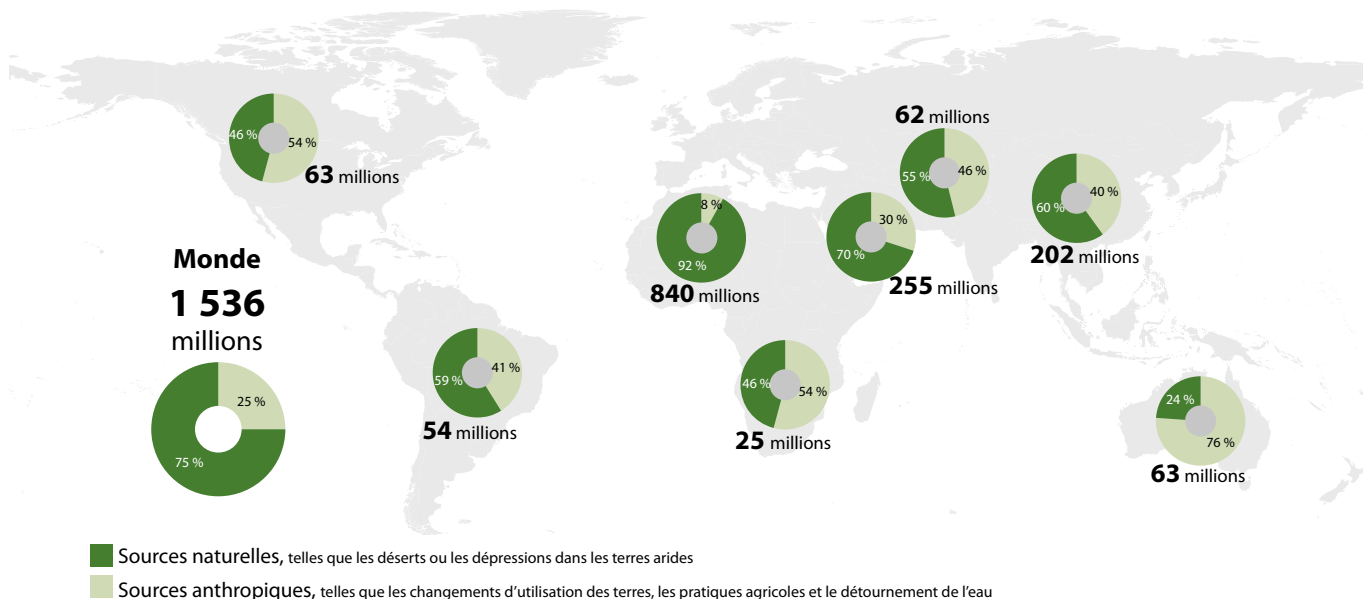
Crédit photo : image de la NASA par Jeff Schmaltz, LANCE/EOSDIS Rapid Response

À moyen et à long terme, les mesures d'atténuation de la menace que représentent les tempêtes de sable et de poussière doivent privilégier les stratégies préventives promouvant une gestion durable des terres et des ressources hydriques sur tous les types de terrains, y compris les terres cultivées, les pâturages, les déserts et les zones urbaines. De telles stratégies doivent être associées aux mesures d'adaptation et d'atténuation du changement climatique, ainsi qu'aux actions de préservation de la biodiversité. Ces mécanismes intégrés essentiels sont actuellement insuffisants dans de nombreuses régions vulnérables³⁴.

Le projet écologique de la Grande muraille verte de Chine est une initiative intégrée lancée en 1978 en vue d'enrayer l'érosion effrénée des sols. Cette dernière a en effet envenimé les problèmes existants liés aux inondations et aux tempêtes de poussière couvrant de larges étendues, dues à des décennies d'exploitation non durable des ressources naturelles. Les résultats de recherche et les enseignements tirés des expériences passées suggèrent que l'établissement de liens entre les méthodes ayant porté leurs fruits à l'échelle locale et communautaire – y compris l'exploitation d'espèces végétales locales déjà adaptées aux contextes spécifiques – et le déploiement de ces méthodes à plus grande échelle sont une approche efficace³⁵. Ces informations soulignent à nouveau l'importance de promouvoir les services écosystémiques, tels que la production alimentaire, le stockage du carbone, la rétention de l'eau et des sols, l'atténuation des inondations et la création d'habitats pour la biodiversité permettant de préserver le capital naturel, ainsi que la prévention des tempêtes de sable et de poussière³⁶. Les observations sur les efforts déployés dans le cadre du projet de la Grande muraille verte de Chine font ressortir une amélioration considérable de l'indice de végétation des zones adjacentes au projet et



Sources d'émissions de poussière (tonnes/an)



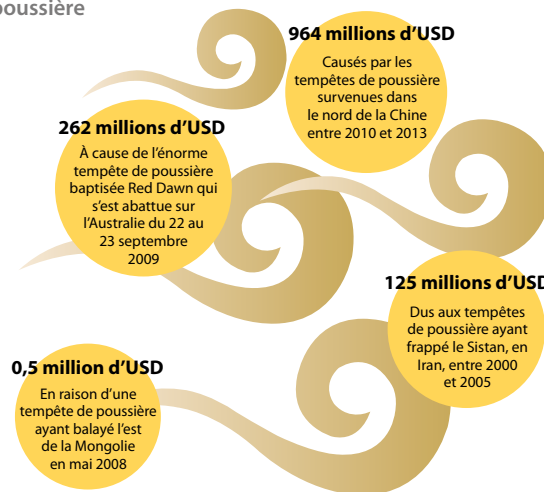
Source des données : Ginoux et al. (2012)²²

concluent que ces efforts ont permis de réduire efficacement l'intensité des tempêtes de poussière, même en tenant compte des effets du changement climatique et des pressions d'ordre anthropique^{37,38}. Dans le désert de Kubuqi, en Mongolie-Intérieure, les investissements communautaires publics et privés réalisés pour planter des espèces locales d'arbres, d'arbustes et de graminées sur plus de 5 000 kilomètres carrés de terres désertiques ont permis de réduire la fréquence des tempêtes de poussière, ainsi que leurs dommages sur les habitations et les infrastructures³⁹.

En Afrique, l'initiative de la Grande muraille verte pour le Sahara et le Sahel enregistre également de bons résultats en œuvrant à l'échelle locale et communautaire⁴⁰. L'initiative est passée d'une perspective visant exclusivement la plantation d'arbres à une vision de développement durable beaucoup plus large. Ainsi, au Sénégal, l'initiative a commencé par planter plus de 270 kilomètres carrés d'arbres indigènes ne nécessitant aucun arrosage. Par la suite, d'autres espèces de végétaux et d'animaux sont réapparues et ont contribué à restaurer l'écosystème. Des communautés implantées en Mauritanie, au Tchad, au Niger, en Éthiopie et au Nigéria développent une culture maraîchère commerciale le long des zones arides, offrant ainsi aux jeunes populations un travail et une raison de renoncer à la migration. Là aussi, ces projets basent leur réussite sur la sélection rigoureuse d'espèces végétales bien adaptées aux conditions

locales, dont les besoins correspondent aux ressources en eau disponibles et qui sont connues des membres des communautés locales, qui seront à terme responsables de la restauration et de la préservation du paysage⁴¹.

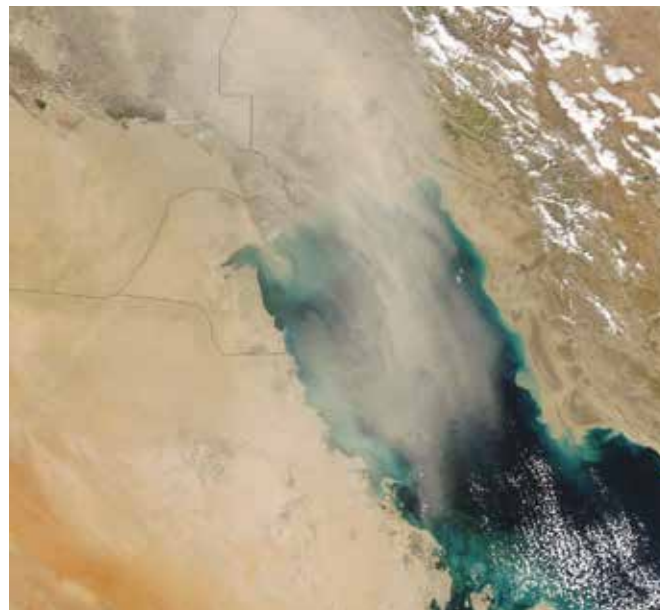
Pertes économiques imputables aux tempêtes de sable et de poussière



Un soutien multilatéral pour réduire les dégâts dus aux tempêtes de sable et de poussière

Les stratégies intégrées relatives aux menaces de tempête de sable et de poussière reflètent les mesures recommandées pour contenir la dégradation des terres, la perte de la biodiversité terrestre et le changement climatique, conformément aux trois Conventions de Rio : la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification, la Convention des Nations Unies sur la diversité biologique et la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. Avec le soutien de la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification, l'Asie occidentale et l'Asie du Nord-Est ont élaboré des plans d'action régionaux pour faire face aux tempêtes de sable et de poussière ; celui de l'Asie du Nord-Est est aujourd'hui pleinement opérationnel⁴².

Chaque Convention de Rio soutient les efforts de gestion des terres et des ressources en eau en partenariat avec les institutions et organismes multilatéraux compétents. Le consensus international sur ces questions est visible dans les objectifs de développement durable, en particulier les objectifs 1, 2, 5, 13 et 15, qui traitent de l'intégrité et de la gestion des terres et des ressources hydriques, et plus précisément la cible 15.3 : « D'ici à 2030, lutter contre la désertification, restaurer les terres et



Tempête de sable au-dessus du golfe Persique, 19 février 2017

Crédit photo : image de la NASA par Jeff Schmaltz, LANCE/EOSDIS Rapid Response

▶ Vidéo : Lutter contre la désertification : des nomades chinois œuvrent à la transformation d'un désert en oasis



Lien de la vidéo (en anglais) : <https://www.youtube.com/watch?v=gjTXPurYYJ0>
Crédit photo : lutter contre la désertification à Ningxia (Chine), par Bert van Dijk, reproduit sous licence CC BY-NC-SA 2.0

© CCTV English

sols dégradés, notamment les terres touchées par la désertification, la sécheresse et les inondations, et s'efforcer de parvenir à un monde sans dégradation des terres. » Les plans d'action, accords et cadres régionaux, tels que le Plan directeur régional pour la prévention et le contrôle des tempêtes de sable et de poussière en Asie du Nord-Est, et les plans d'action nationaux, comme ceux requis par la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification, définissent également des politiques d'atténuation des menaces de tempêtes de sable et de poussière.

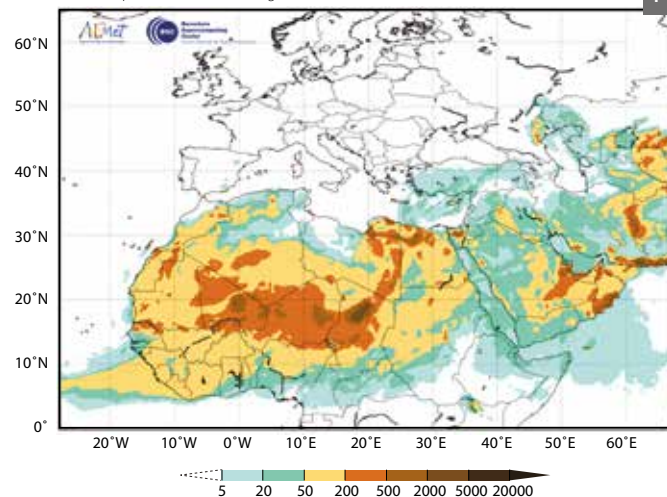
L'Organisation météorologique mondiale (OMM) a créé le Système d'alerte, d'avis et d'évaluation concernant les tempêtes de sable et de poussière dans le but d'améliorer la capacité des pays à fournir des prévisions, des observations, des informations et des connaissances précoces et fiables aux usagers⁴³. Ce système génère des prévisions mondiales et régionales des tempêtes de poussière et dispose de centres régionaux pour le continent américain, l'Asie, et l'Afrique du Nord, le Moyen-Orient et l'Europe⁴⁴.

Les efforts intégrés de gestion des terres et des ressources en eau concernent également les activités agricoles, et l'Organisation

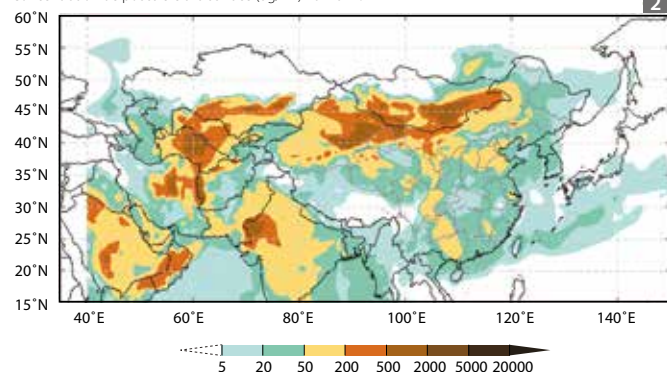


Prévisions en ligne des concentrations de poussière réalisées par les centres régionaux du Système d'alerte, d'avis et d'évaluation concernant les tempêtes de sable et de poussière de l'Organisation météorologique mondiale

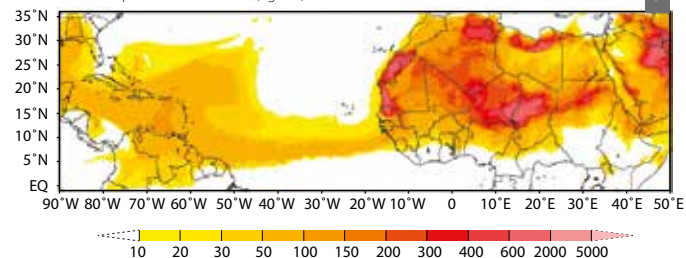
Concentration de poussière à la surface (ug/m³) 18 mai 2017



Concentration de poussière à la surface (ug/m³) 18 mai 2017



Concentration de poussière à la surface (ug/m³) 21 mai 2017



des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture encourage l'agriculture de conservation pour faire face aux menaces dans les régions arides. En 1992, un réseau appelé le Panorama mondial des approches et technologies de conservation (WOCAT) a débuté la collecte d'informations sur l'agriculture de conservation et les pratiques de gestion durable des terres auprès de spécialistes. En 2014, le réseau a été officiellement constitué en consortium et reconnu par la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification comme la source de données conseillée concernant les bonnes pratiques. En 2017, le WOCAT recensait plus de 2 000 utilisateurs inscrits, plus de 60 institutions participantes et près de 30 initiatives nationales et régionales⁴⁵.

L'agriculture est à l'origine d'environ 70 % des prélèvements d'eau douce⁴⁶. L'agriculture de conservation promeut également les pratiques d'utilisation de l'eau permettant d'éviter les pénuries et la désertification et de réduire la formation de tempêtes de sable et de poussière. Le 2030 Water Resources Group a rassemblé des études de cas réalisées dans le monde entier sur les solutions pratiques, reproductibles et actuellement disponibles en matière de gestion de l'eau. Celles-ci ont été compilées dans un catalogue en ligne intitulé « Managing Water Use in Scarce Environments » (Gérer l'utilisation de l'eau dans les environnements disposant de ressources limitées) ayant pour but d'inciter les politiques et les décideurs à avoir recours à ces solutions et à agir⁴⁷. Nombre d'entre elles présentent un intérêt manifeste pour la réduction des tempêtes de sable et de poussière.

Enfin, l'intégration et la coordination internationales des recherches doivent être améliorées pour : i) lever les fortes incertitudes quant à l'effet de la poussière sur les processus biogéochimiques mondiaux et les systèmes climatiques ; ii) améliorer les méthodes de suivi, de prévision et d'alerte rapide ; iii) évaluer les conséquences économiques et les coûts des tempêtes de sable et de poussière et des mesures d'atténuation correspondantes ; et iv) renforcer l'efficacité des mesures avant, pendant et après les interventions.

1 Afrique du Nord, Moyen-Orient et Europe centrale
<https://sds-was.aemet.es/>

2 Centre asiatique du Système d'alerte, d'avis et d'évaluation concernant les tempêtes de sable et de poussière de l'OMM
http://eng.nmc.cn/sds_was.asian_rc/

3 Centre régional panaméricain
<http://sds-was.cimh.edu.bb/>

Références bibliographiques

- BBC (2010). China sandstorm leaves Beijing shrouded in orange dust. *BBC*, 20 March 2010. <http://news.bbc.co.uk/2/hi/asia-pacific/8577806.stm>
- Tehran Times (2016). Sand storm buries 16 villages in southeastern Iran. *Tehran Times*, 18 May 2016. <http://www.tehrantimes.com/news/402617/Sand-storm-buries-16-villages-in-southeastern-Iran>
- Emirates 24/7 News (2016). NCMS warns of active winds, low visibility. *Emirates 24/7 News*, 4 August 2016. <http://www.emirates247.com/news/emirates/ncms-warns-of-active-winds-low-visibility-2016-08-04-1.637979>
- The National (2016). Asthma attacks on the rise in UAE as winds whip up sand and dust. *The National*, 19 July 2016. <http://inbusiness.ae/2016/07/19/asthma-attacks-on-the-rise-in-uae-as-winds-whip-up-sand-and-dust>
- McLeman, R., Dupre, J., Berrang Ford, L., Ford, J., Gajewski, K. and Marchildon, G. (2014). What We Learned from the Dust Bowl: Lessons in Science, Policy, and Adaptation. *Population and Environment*, 35, 417–440. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24829518>
- Goudie, A.S. and Middleton, N.J. (2006). *Desert Dust in the Global System*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- Grousset, F.E., Ginoux, P. and Bory, A. (2003). Case study of a Chinese dust plume reaching the French Alps. *Geophysical Research Letters*, 30(6), 1277. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2002GL016833/full>
- Pye, K. (1987). *Aeolian dust and dust deposits*. Academic Press, London
- Wang, F., Zhao, X., Gerlein-Safdi, C., Mu, Y., Wang, D. and Lu, Q. (2017). Global sources, emissions, transport and deposition of dust and sand and their effects on the climate and environment: a review. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 11, 13. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11783-017-0904-z>
- Yu, H., Chin, M., Yuan, T., Bian, H., Remer, L.A., Prospero, J.M., Omar, A., Winker, D., Yang, Y., Zhang, Y., Zhang, Z. and Zhao, C. (2015). The fertilizing role of African dust in the Amazon rainforest: A first multiyear assessment based on data from Cloud–Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations. *Geophysical Research Letters*, 42, 1984–1991. https://www.researchgate.net/publication/272754426_The_Fertilizing_Role_of_African_Dust_in_the_Amazon_Rainforest_A_First_Multiyear_Assessment_Based_on_CALIPSO_Lidar_Observations
- Chadwick, O.A., Derry, L.A., Vitousek, P.M., Huebert, B.J. and Hedin, L.O. (1999). Changing sources of nutrients during four million years of ecosystem development. *Nature*, 397, 491–497. <https://www.nature.com/nature/journal/v397/n6719/pdf/397491a0.pdf>
- Garrison, V.H., Shinn, E.A., Foreman, W.T., Griffin, D.W., Holmes, C.W., Kellogg, C.A., Majewski, M.S., Richardson, L.L., Ritchie, K.B. and Smith, G.W. (2003). African and Asian dust: from desert soils to coral reefs. *BioScience*, 53, 469–480. <https://academic.oup.com/bioscience/article/53/5/469/241414/African-and-Asian-Dust-From-Desert-Soils-to-Coral>
- Derbyshire, E. (2007). Natural minerogenic dust and human health. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 36, 73–77. https://www.wou.edu/las/physci/taylor/g473/med_geo/derbyshire_2007.pdf
- García-Pando, C.P., Stanton, M.C., Diggle, P.J., Trzaska, S., Miller, R.L., Perlwitz, J.P., Baldasano, J.M., Cuevas, E., Ceccato, P., Yaka, P. and Thomson, M.C. (2014). Soil dust aerosols and wind as predictors of seasonal meningitis incidence in Niger. *Environmental Health Perspectives*, 122(7), 679–686. <https://ehp.niehs.nih.gov/wp-content/uploads/122/7/ehp.1306640.pdf>
- WHO (2013). *Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP Project*. World Health Organization Regional Office for Europe, Copenhagen. http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0020/182432/e96762-final.pdf
- Tozer, P. and Leys, J. (2013). Dust storms – what do they really cost? *The Rangeland Journal*, 35, 131–142. <http://www.publish.csiro.au/rj/pdf/RJ12085>
- Miri, A., Ahmadi, H., Ekhtesasi, M.R., Panjehkeh, N. and Ghanbari, A. (2009). Environmental and socio-economic impacts of dust storms in Sistan Region, Iran. *International Journal of Environmental Studies*, 66(3), 343–355. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207230902720170?journalCode=genv20>
- Almasi, A., Mousavi, A.R., Bakhshi, S. and Namdari, F. (2014). Dust storms and environmental health impacts. *Journal of Middle East Applied Science and Technology*, 8, 353–356. https://www.researchgate.net/publication/271211840_Dust_storms_and_environmental_health_impacts
- Stefanski, R. and Sivakumar, M.V.K. (2009). Impacts of Sand and Dust Storms on Agriculture and Potential Agricultural Applications of a SDSWS. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 7(1), 012016. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1307/7/1/012016/pdf>
- Shao, Y., Klose, M. and Wyrwoll, K.H. (2013). Recent global dust trend and connections to climate forcing. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118, 1–12. https://www.researchgate.net/publication/263182073_Recent_global_dust_trend_and_connections_to_climate_forcing_GLOBAL_DUST_TREND
- Prospero, J.M., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S.E. and Gill, T.E. (2002). Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product. *Reviews of Geophysics*, 40, 2–31. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2000RG000095/full>
- Ginoux, P., Prospero, J.M., Gill, T.E., Hsu, N.C. and Zhao, M. (2012). Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol products. *Reviews of Geophysics*, 50. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2012RG000388/epdf>

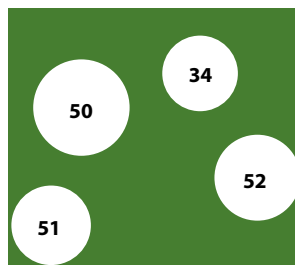
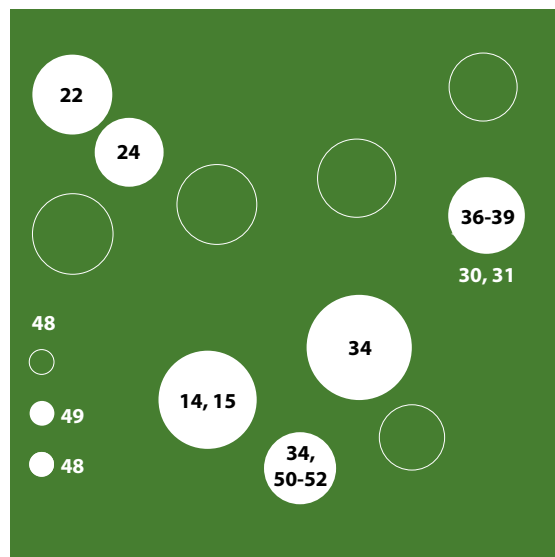


23. Stanelle, T., Bey, I., Raddatz, T., Reick, C. and Tegen, I. (2014). Anthropogenically induced changes in twentieth century mineral dust burden and the associated impact on radiative forcing. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119, 526–546. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2014JD022062/epdf>
24. Mahowald, N.M., Kloster, S., Engelstaedter, S., Moore, J.K., Mukhopadhyay, S., McConnell, J.R., Albani, S., Doney, S.C., Bhattacharya, A., Curran, M.A.J. and Flanner, M.G. (2010). Observed 20th century desert dust variability: impact on climate and biogeochemistry. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 10875–10893. https://www.mpimet.mpg.de/fileadmin/staff/klostersilvia/Mahowald_et_al_ACPD_2010.pdf
25. Gill, T.E. (1996). Eolian sediments generated by anthropogenic disturbance of playas: Human impacts on the geomorphic system and geomorphic impacts on the human system. *Geomorphology*, 17, 207–228. https://www.researchgate.net/publication/222233193_Eolian_sediments_generated_by_anthropogenic_disturbance_of_playas_Human_impacts_on_the_geomorphic_system_and_geomorphic_impacts_on_the_human_system
26. McConnell, J.R., Aristarain, A.J., Banta, J.R., Edwards, P.R. and Simões, J.C. (2007). 20th-Century doubling in dust archived in an Antarctic Peninsula ice core parallels climate change and desertification in South America. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(14), 5743–5748. <http://www.pnas.org/content/104/14/5743.full.pdf>
27. Marx, S.K., Kamber, B.S., McGowan, H.A. and Denholm, J. (2011). Holocene dust deposition rates in Australia's Murray-Darling Basin record the interplay between aridity and the position of the mid-latitude westerlies. *Quaternary Science Reviews*, 30(23), 3290–3305. https://www.researchgate.net/publication/232391398_Holocene_dust_deposition_rates_in_Australia's_Murray-Darling_Basin_record_the_interplay_between_aridity_and_the_position_of_the_mid-latitude_westerlies
28. Groll, M., Opp, C. and Aslanov, I. (2012). Spatial and temporal distribution of the dust deposition in Central Asia – results from a long term monitoring program. *Aeolian Research*, 9, 49–62. https://www.researchgate.net/publication/257708671_Spatial_and_temporal_distribution_of_the_dust_deposition_in_Central_Asia_-_results_from_a_long_term_monitoring_program
29. Ataniyazova, O.A. (2003). *Health and ecological consequences of the Aral Sea crisis*. In the 3rd World Water Forum, Regional Cooperation in Shared Water Resources in Central Asia, Kyoto, March 18 2003, Panel III: Environmental Issues in the Aral Sea Basin. http://www.caee.utexas.edu/prof/mckinney/ce385d/papers/ataniyazova_wwf3.pdf
30. Christensen, J.H., Hewitson, B., Busiuc, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., Jones, R., Kolli, R.K., Kwon, W.-T., Laprise, R., Magaña Rueda, V., Mearns, L., Menéndez, C.G., Räisänen, J., Rinke, A., Sarr, A. and Whetton, P. (2007). Regional Climate Projections. In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. <https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter11.pdf>
31. 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. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_TS_FINAL.pdf
32. Han, Y., Dai, X., Fang, X., Chen, Y. and Kang, F. (2008). Dust aerosols: a possible accelerant for an increasingly arid climate in North China. *Journal of Arid Environments*, 72(8), 1476–1489. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140196308000372>
33. Twohy, C. H., Kreidenweis, S. M., Eidhammer, T., Browell, E. V., Heymsfield, A. J., Bansemir, A. R., Anderson, B. E., Chen, G., Ismail, S., DeMott, P. J. and Van den Heever, S. C. (2009). Saharan dust particles nucleate droplets in eastern Atlantic clouds. *Geophysical Research Letters*, 36, L01807. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2008GL035846/epdf>
34. UNEP, WMO and UNCCD (2016). *Global Assessment of Sand and Dust Storms*. United Nations Environment Programme, Nairobi. https://uneplive.unep.org/media/docs/assessments/global_assessment_of_sand_and_dust_storms.pdf
35. Xu, J. (2011). China's new forests aren't as green as they seem: impressive reports of increased forest cover mask a focus on non-native tree crops that could damage the ecosystem. *Nature*, 477(7365), 371–372. <http://www.nature.com/news/2011/110921/full/477371a.html>
36. Ouyang, Z., Zheng, H., Xiao, Y., Polasky, S., Liu, J., Xu, W., Wang, Q., Zhang, L., Xiao, Y., Rao, E. and Jiang, L. (2016). Improvements in ecosystem services from investments in natural capital. *Science*, 352(6292), 1455–1459. http://csis.msu.edu/sites/csis.msu.edu/files/Ecosystems_China_2016.pdf
37. Tan, M. and Li, X. (2015). Does the Green Great Wall effectively decrease dust storm intensity in China? A study based on NOAA NDVI and weather station data. *Land Use Policy*, 43, 42–47. https://www.researchgate.net/publication/268692474_Does_the_Green_Great_Wall_effectively_decrease_dust_storm_intensity_in_China_A_study_based_on_NOAA_NDVI_and_weather_station_data
38. Viña, A., McConnell, W.J., Yang, H., Xu, Z. and Liu, J. (2016). Effects of conservation policy on China's forest recovery. *Science advances*, 2(3), e1500965. <http://advances.sciencemag.org/content/2/3/e1500965.full>
39. UNEP (2015). Review of the Kubuqi Ecological Restoration Project: A Desert Green Economy Pilot Initiative. United Nations Environment Programme, Nairobi. http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8652/-Review_of_the_Kubuqi_Ecological_Restoration_Project_A_Desert_Green_Economy_Pilot_Initiative-2015Review_of_the_Kubuqi_Ecological_Restoration_Project..pdf?sequence=2&isAllowed=1

40. UNCCD (2017). Great Green Wall. United Nations Convention to Combat Desertification Secretariat, Bonn. <http://www.greatgreenwall.org/great-green-wall/>
41. Sacande, M. and Berrahmouni, N. (2016). Community participation and ecological criteria for selecting species and restoring natural capital with native species in the Sahel. *Restoration Ecology*, 24(4), 479-488. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/rec.12337/abstract>
42. UNCCD (2005). *A Master Plan for Regional Cooperation for the Prevention and Control of Dust and Sandstorms*. The Regional Master Plan for the Prevention and Control of Dust and Sandstorms in North East Asia Volume 1. United Nations Convention to Combat Desertification Secretariat, Bonn. http://www.unccd.int/Lists/SiteDocumentLibrary/Publications/dustsandstorms_northeastasia.pdf
43. WMO (2015). *Sand and Dust Storm Warning Advisory and Assessment System (SDS-WAS): Science and Implementation Plan 2015-2020*. World Weather Research Programme Report 2015-5. World Meteorological Organization, Geneva. https://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/Final_WWRP_2015_5_SDS_IP.pdf
44. WMO (2017). Sand and Dust Storm Warnings website. World Meteorological Organization, Geneva. <https://public.wmo.int/en/our-mandate/focus-areas/environment/sand-and-dust-storm/sand-and-dust-storm-warnings>
45. WOCAT SLM (2017). The Global Database on Sustainable Land Management of the World Overview of Conservation Approaches and Technologies website. University of Bern, Berne. <https://qcat.wocat.net/en/wocat/>
46. FAO (2016). AQUASTAT website. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. http://www.fao.org/nr/water/aquastat/water_use/index.stm
47. 2030 WRG (2015). The 2030 Water Resources Group website. <https://www.waterscarcitysolutions.org/#>

Références bibliographiques des illustrations

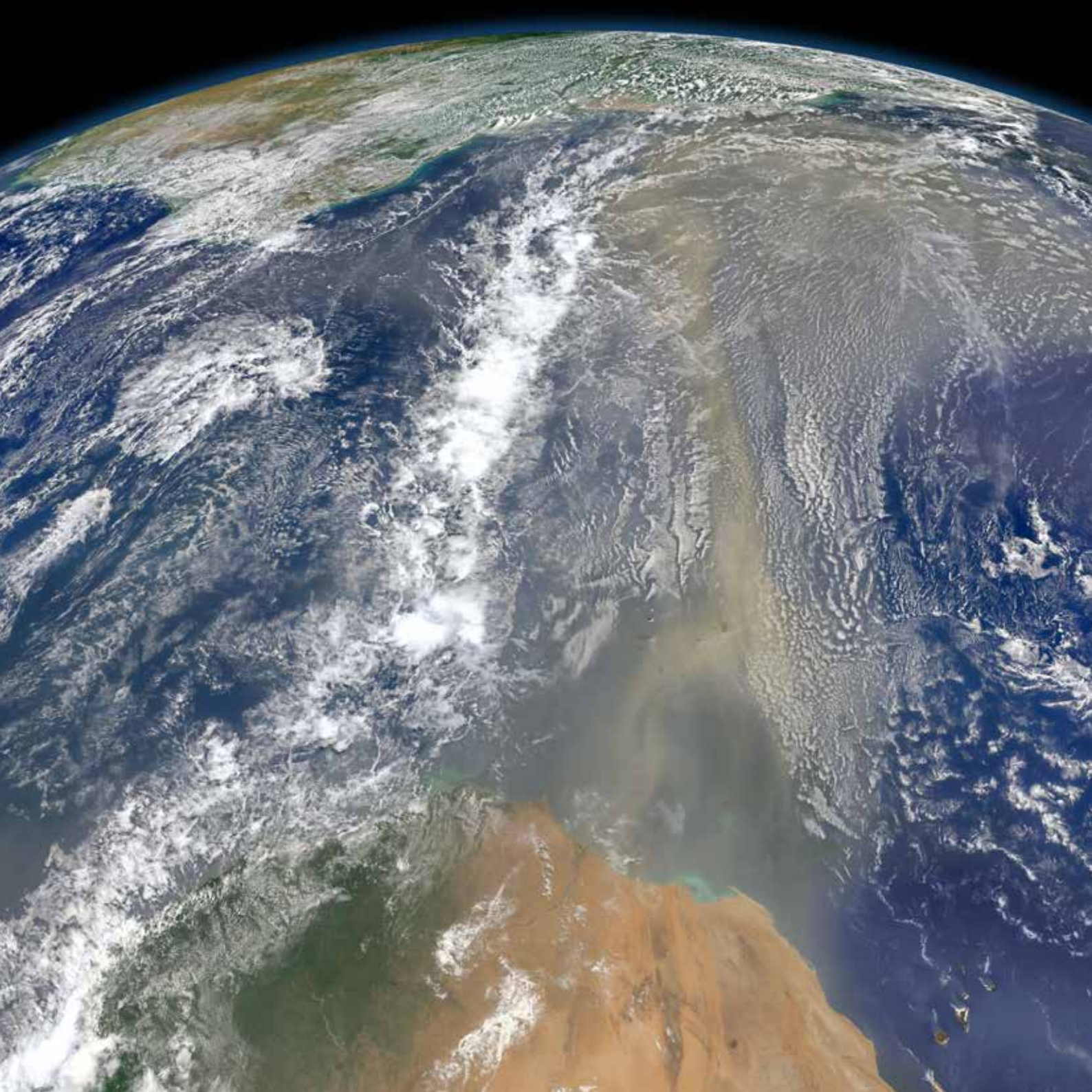
48. WHO (2006). *WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide - Global update 2005*. Summary of risk assessment. World Health Organization, Geneva. http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/69477/1/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_eng.pdf
49. Financial Tribune (2017). Dust Storms Slam Khuzestan Again. *Financial Tribune*, 29 January 2017. <https://financialtribune.com/articles/environment/58374/dust-storms-slam-khuzestan-again>
50. Tozer, P. and Leys, J. (2013). Dust storms - what do they really cost? *The Rangeland Journal*, 35, 131-142. <http://www.publish.csiro.au/rj/pdf/RJ12085>



51. Jugder, D., Shinoda, M., Sugimoto, N., Matsui, I., Nishikawa, M., Park, S-U., Chun, Y-S. and Park, M-S. (2011). Spatial and temporal variations of dust concentrations in the Gobi Desert of Mongolia. *Global and Planetary Change*, 78, 14-22. https://www.researchgate.net/publication/241100103_Spatial_and_temporal_variations_of_dust_concentrations_in_the_Gobi_Desert_of_Mongolia
52. Miri, A., Ahmadi, H., Ekhtesasi, M.R., Panjehkeh, N. and Ghanbari, A. (2009). Environmental and socio-economic impacts of dust storms in Sistan Region, Iran. *International Journal of Environmental Studies*, 66, 343-355. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207230902720170?journalCode=genv20>

Panache de poussière se déplaçant de l'Afrique de l'Ouest vers le bassin de l'Amazonie et le golfe du Mexique, 25 juin 2014. Pas moins de 40 millions de tonnes de poussière du Sahara se déposent chaque année dans le bassin de l'Amazonie. ►

Crédit photo : Norman Kuring/NASA Ocean Color Group





Quartier informel d'Enkanini, Cap-Occidental, Afrique du Sud
Crédit photo : MrNovel / Shutterstock

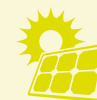
Énergie solaire : favoriser l'accès à l'électricité des quartiers non raccordés

La population urbaine non raccordée au réseau

L'accès à l'électricité est indispensable pour garantir un développement durable et nécessaire aux activités domestiques essentielles¹. À l'inverse, le manque d'électricité peut entraver la productivité, limiter les possibilités de création de revenus et affecter la capacité des populations à améliorer leurs conditions de vie. Près de 1,1 milliard de personnes dans le monde sont encore privées d'accès à l'électricité et un milliard sont reliées à des réseaux électriques instables et peu fiables^{2,3}. Bien que des progrès considérables aient été enregistrés ces dernières années en matière d'électrification dans des pays comme l'Inde et le Nigéria, les prévisions réalisées portent à croire que près de 780 millions de personnes pourraient encore être coupées du réseau en 2030². Des approches nouvelles et durables de distribution d'électricité qui transcendent les normes établies doivent être adoptées, surtout si nous voulons atteindre l'objectif de développement durable visant

à garantir l'accès de tous à des services énergétiques fiables et modernes, à un coût abordable, d'ici 2030.

Les zones rurales sont celles qui ont le plus besoin de solutions énergétiques hors réseau, mais le problème de l'accès à l'électricité rencontré par les résidents des zones urbaines doit aussi être pris en compte. Aujourd'hui, environ 48 % de la population des pays en développement réside dans les villes et ce pourcentage pourrait atteindre 63 % d'ici 2050⁴. Près d'un quart de la population urbaine vit dans différentes formes de quartiers informels et cette proportion est beaucoup plus élevée dans les villes d'Afrique, d'Asie et d'Amérique latine à forte croissance. La demande croissante d'infrastructures et de services – logements adéquats, approvisionnement en eau salubre et assainissement, et sources d'énergie fiables et financièrement abordables, telles que l'électricité – a tendance à excéder la capacité des villes à répondre aux besoins de tous leurs habitants.



La fourniture de services essentiels dans les quartiers informels urbains constitue un défi de taille qui varie en fonction des critères d'éligibilité fixés par les autorités municipales pour bénéficier des services urbains formels. Concernant l'accès à l'électricité, les difficultés rencontrées ont trait aux droits fonciers, à la reconnaissance par les autorités de l'occupation légale des terres, à la frilosité des parties prenantes à s'engager, au prix des services, au retour sur investissement enregistré par le fournisseur d'électricité et à la distance de raccordement au réseau existant et aux autres infrastructures nécessaires⁵.

L'absence de possession officielle de la propriété sur laquelle est implantée une cabane ou une maison peut empêcher ses habitants de prétendre à un raccordement officiel aux services locaux ou nationaux d'électricité⁶. Les fournisseurs d'électricité s'inquiètent de la rentabilité des services fournis à ces communautés : leur première préoccupation porte sur le taux élevé de défaut de paiement et la seconde sur la faible consommation d'électricité. Toutes deux sont liées aux revenus faibles et aléatoires des membres de ces communautés^{5,6}.

Le risque d'incendie est l'une des principales menaces au sein des quartiers informels en raison des fortes densités de population, de la grande promiscuité des structures et des habitations et de l'utilisation fréquente de lampes à pétrole ou à paraffine, de bougies et d'autres sources d'énergie à flamme nue^{7,8}. Ce risque élevé et la pollution de

l'air intérieur qui en découle devraient convaincre différentes parties prenantes d'installer l'électricité dans les quartiers informels⁹⁻¹¹. Cependant, une fois quelques habitations raccordées au réseau, les connexions électriques illégales et surchargées se multiplient, entraînant d'importants risques de sécurité pour ces zones, le plus souvent sous forme d'incendie, mais aussi d'électrocution. Les études réalisées en Afrique du Sud montrent que dans certains quartiers informels, plus de 30 % de la population utilise un branchement illégal comme principale source d'électricité⁵.

Un raccordement officiel au réseau peut tout de même signifier une source d'énergie non fiable. Dans certains pays en développement, des ménages raccordés depuis longtemps au réseau s'adaptent aux coupures régulières de courant en prévoyant de pomper de l'eau et de recharger les batteries pendant les heures où l'alimentation électrique est la plus fiable¹². Les pays développés connaissent eux aussi des pannes de courant, qui peuvent être totales en cas de fortes tempêtes par exemple, mais aussi périodiques, également appelées délestage par rotation, lorsque d'autres phénomènes extrêmes, tels que des vagues de chaleur, exercent des contraintes sur l'approvisionnement¹³. Trop souvent, les ménages des pays développés et en développement investissent dans de petits générateurs diesel comme approvisionnement d'appoint. Ces derniers polluent en émettant des gaz à effet de serre et des gaz polluants toxiques, et produisent un bruit désagréable^{12,13}.



La Terre vue de nuit, 2016

Credit photo : NASA Earth Observatory/NOAA NGDC

L'évolution de l'énergie solaire photovoltaïque

Pendant des décennies, les organisations multilatérales, gouvernementales et non gouvernementales ont encouragé l'installation de systèmes photovoltaïques décentralisés dans les zones rurales difficiles d'accès, en particulier pour fournir de l'énergie aux services publics, tels que l'éclairage des écoles et des centres de santé, et garantir le fonctionnement des systèmes d'échange d'informations et de communication et des dispositifs de pompage communautaires, ainsi que la réfrigération des vaccins^{14,15}. Aujourd'hui, ils sont utilisés comme alternative au raccordement au réseau électrique dans tous les pays en développement dans lesquels le gouvernement et le secteur privé ne peuvent pas répondre aux attentes relatives au développement et à l'entretien d'un réseau électrique, y compris dans les quartiers informels urbains¹⁴.

Au cours des dernières années, nous avons assisté à un essor de la popularité des petits systèmes à énergie solaire décentralisés dans les communautés à faible revenu d'Afrique et d'Asie, où réside pas moins de 95 % de la population non raccordée au réseau¹⁶⁻¹⁸. Ces systèmes vont de la lampe solaire autonome composée d'un panneau solaire intégré, d'une batterie et d'une ampoule à diode électroluminescente (DEL), à la petite installation solaire, ou système pico-photovoltaïque, dotée d'un panneau solaire, d'au moins une ampoule à DEL et d'une batterie avec prises de chargement USB pour téléphones mobiles, voire pour un appareil peut gourmand en énergie³. Les prix varient de 10 dollars US pour une lampe solaire à 50 dollars US pour un système pico-photovoltaïque.

Ces dispositifs d'éclairage solaire relativement abordables offrent un meilleur retour sur investissement, notamment au regard de leur longue durée de vie, par rapport aux frais récurrents engendrés par le pétrole lampant ou la paraffine pour les lampes, les piles sèches pour les lampes de poche, ou les bougies^{3,19}. Les installations solaires à usage domestique plus puissantes offrent des fonctionnalités similaires et peuvent alimenter plusieurs lampes et des appareils ménagers relativement plus importants et fonctionnant en courant continu, comme une radio, un ventilateur, un téléviseur, voire un réfrigérateur.

En Afrique subsaharienne, la majorité des ménages non raccordés au réseau électrique consacrent environ 10 à 30 % de leur revenu à l'achat de pétrole lampant. Pour les populations pauvres d'Afrique subsaharienne et d'Asie, ces dépenses équivalent à 15,7 milliards de dollars US par an^{20,21}. Remplacer les lampes à pétrole par des lampes solaires pourrait ainsi permettre aux ménages de réaliser des économies considérables sur toute la durée de vie du dispositif d'éclairage solaire et de réduire sensiblement l'utilisation de flammes nues avec les lampes et bougies, limitant par conséquent l'exposition à la pollution de l'air intérieur et le risque d'incendie dans les quartiers informels^{11,21-23}.

Ces systèmes pico-photovoltaïques et installations solaires à usage domestique présentent des avantages pour un nombre toujours plus important de ménages non raccordés au réseau.

On constate une baisse constante du prix des différents composants photovoltaïques et de rapides avancées technologiques en la matière. En effet, le coût des cellules solaires en silicium cristallin a chuté de 85 % entre 2008 et 2016 grâce à une meilleure efficacité de fabrication et à de plus grandes économies d'échelle²¹.

Les progrès enregistrés en matière de technologie DEL ont permis d'améliorer le rendement des dispositifs – une plus forte lumière est émise pour chaque unité d'énergie consommée. Les batteries au plomb très polluantes deviennent obsolètes et sont aujourd'hui remplacées par des batteries lithium-ion plus performantes qui offrent une meilleure capacité de stockage d'énergie, une plus longue durée de vie et un rechargement plus rapide et plus efficace²⁴. Bien que les batteries restent l'élément le plus coûteux d'une installation solaire à usage domestique, le prix des batteries lithium-ion a chuté de près de 65 % en l'espace de cinq ans et devrait baisser encore davantage du fait de leur utilisation généralisée dans les ordinateurs portables et d'autres appareils²¹.

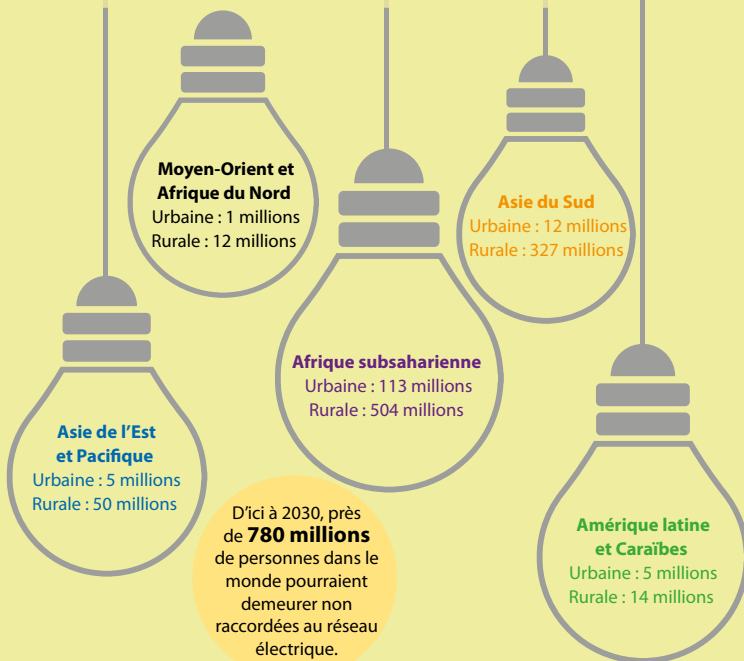


Lampes à pétrole à mèche faites de boîtes de conserve recyclées

Avec l'aimable autorisation d'Evan Mills

L'énergie solaire hors réseau

La population non raccordée au réseau électrique



Dispositifs d'énergie solaire photovoltaïque

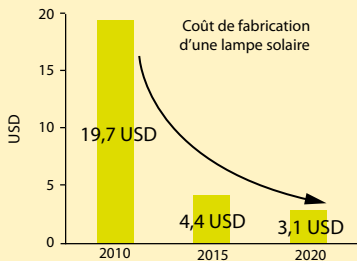
Ces systèmes solaires photovoltaïques sont variés : il peut s'agir aussi bien de **lampes solaires**, de petites installations solaires ou de systèmes **pico-photovoltaïques** pouvant alimenter au moins une ampoule, que d'**installations solaires à usage domestique** possédant une batterie de plus grande capacité pouvant alimenter plusieurs éclairages à LED et des appareils ménagers en courant continu.

Les **systèmes solaires photo-voltaïques** sont de plus en plus répandus parmi les populations des régions rurales et urbaines non raccordées au réseau électrique, en particulier en Afrique et en Asie du Sud.

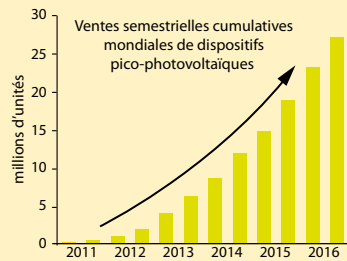
Chaque année, les populations non raccordées d'Afrique et d'Asie du Sud dépensent respectivement environ **14,4 milliards d'USD** et **6,6 milliards d'USD** en lampes, pétrole lampant, lampes torches à piles et bougies.

Les lampes solaires et les systèmes pico-photovoltaïques remplacent les **systèmes d'éclairage traditionnels peu performants**.

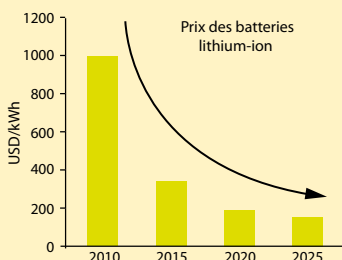
Les prix baissent



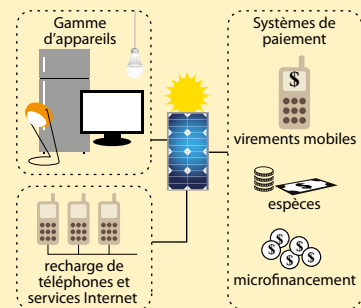
Les ventes augmentent



Les coûts des batteries baissent



Différents modèles commerciaux



Défis et opportunités

Des **politiques bien conçues** ainsi qu'une vision claire concernant les énergies renouvelables, associées à des **technologies avancées** et à l'**innovation du marché**, pourraient encourager les communautés actuellement non raccordées au réseau électrique à rester sur la **voie d'une énergie propre et durable**.

Les **déchets électroniques** produits par les dispositifs solaires devraient augmenter de manière exponentielle au cours des prochaines décennies. Si ce constat signifie que la gestion des appareils usagés devra être respectueuse de l'environnement, il est aussi synonyme de possibilités commerciales pour le **secteur du recyclage**.

Les dispositifs solaires hors réseau pourraient créer des **centaines de milliers d'emplois** sur toute la chaîne de valeur.

L'ONU Environnement estime que la transition vers des systèmes d'éclairage hors réseau performants devrait créer **30 fois plus d'emplois** que le système actuel reposant sur les combustibles.

Des stratégies innovantes de commercialisation du solaire hors réseau

L'une des clés de l'introduction de l'électricité solaire sur le marché des quartiers informels est la création de modèles commerciaux innovants^{16,25,26}. Bien que le prix de détail des systèmes pico-photovoltaïques et des installations solaires à usage domestique soit abordable pour certains, la tranche de population non raccordée au réseau percevant les plus faibles revenus ne peut pas faire face au coût initial d'achat de l'équipement. De nombreuses petites entreprises et start-up proposent donc des mécanismes d'aide au financement pour aider les consommateurs à dépasser l'obstacle que constituent les coûts initiaux, dans l'idée d'atteindre à terme la rentabilité grâce aux volumes élevés du marché^{16,17,19}.

Plusieurs de ces mécanismes prévoient des échéances égales aux faibles montants payés initialement pour le pétrole lampant. Dans le cas des programmes de paiement à la carte, les clients versent un petit montant initial, puis effectuent des paiements réguliers sur une base quotidienne, hebdomadaire ou mensuelle. En l'absence de paiement, le système est automatiquement désactivé. Au terme des échéances, le client devient propriétaire de l'installation. Ce type de programme est souvent utilisé en association avec les services de paiement mobile existants, déjà bien implantés dans certaines régions, à l'instar de plusieurs zones d'Afrique subsaharienne^{17,27}.

En Inde, près d'un tiers de la population urbaine vit dans des quartiers informels²⁸. Une étude menée sur les quartiers informels de Delhi a estimé le revenu mensuel moyen de ses habitants à seulement 105 dollars US (6 676 INR) par personne dont 90 % est dépensé²⁹. La plupart des entreprises proposent des mécanismes d'aide au financement adaptés aux familles les plus marginalisées, qui sont en fait des migrants ruraux venus habiter dans les quartiers informels des villes indiennes à forte croissance.

Sans adresse officielle et avec moins de dix ans d'installation dans ces lieux, les familles ne peuvent pas prétendre aux services de financement traditionnels. Certaines entreprises emploient des hommes et des femmes issus de ces communautés pour faire du porte-à-porte dans les quartiers informels et proposer des produits avec des modalités de paiement abordables³⁰. Les clients peuvent acheter une lampe solaire grâce à un plan de paiement de 5 à 8 semaines. D'autres entreprises sont allées encore plus loin en développant des relations commerciales avec les institutions de microfinancement en vue d'élargir les possibilités de financement pour les clients aux revenus les plus faibles³¹.

En Afrique du Sud, malgré les programmes de logement et d'électrification mis en place après l'apartheid, près d'un quart de la population vit dans des quartiers informels, sans électricité³². Un projet de développement

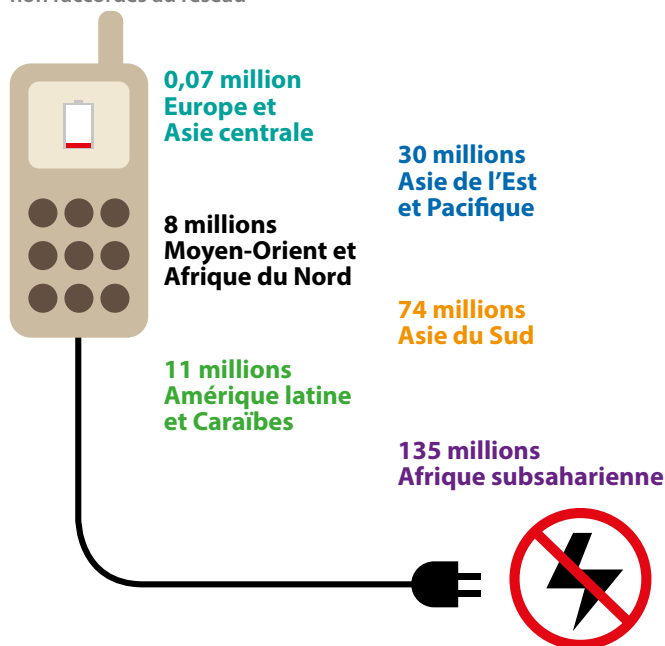
 Vidéo : Pourquoi l'énergie solaire se développe-t-elle aussi vite en Afrique ?



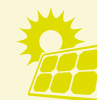
Lien de la vidéo (en anglais) : <https://www.youtube.com/watch?v=tkvbZ0ADmz0>
Crédit photo : Gabriela Gemio Beltrán

© The Economist

Estimation du nombre d'abonnés au réseau de téléphonie mobile non raccordés au réseau



Source des données : Nique (2013)³²



durable dirigé par l'université de Stellenbosch a œuvré à améliorer les conditions de vie des 4 500 habitants d'Enkanini, un quartier informel non raccordé au réseau électrique et situé dans la province du Cap-Occidental³³⁻³⁵. En s'appuyant sur des technologies à haut rendement énergétique, les interventions mises en œuvre consistaient à réorienter les habitations pour optimiser leur potentiel bioclimatique, à améliorer l'isolation des constructions et à développer la collecte d'eau.

Le projet a mis en place un fournisseur d'énergie solaire hors réseau fournissant ses services aux habitants du quartier, avec pour objectif de créer un modèle de franchise pour les autres quartiers informels non raccordés au réseau. Des installations solaires à usage domestique – un panneau solaire, deux lampes DEL d'intérieur, un téléviseur, une lanterne d'extérieur et des dispositifs de recharge de téléphones – sont mises à la disposition des résidents moyennant la rémunération de ces services à l'acte. Les clients payent des frais d'installation de 14 dollars US (200 ZAR) puis des frais de location mensuels de 11 dollars US (150 ZAR)³³.

Une entreprise créée dans le cadre du projet emploie des habitants du quartier et se charge de l'installation et de l'entretien du système. Depuis, ce modèle commercial a été adopté par certaines autorités municipales et appliqué à d'autres quartiers informels d'Afrique du Sud³⁶⁻³⁸.

Les kiosques solaires sont un autre modèle commercial innovant unique qui utilise l'énergie solaire pour offrir des services en dehors de leur foyer

 Vidéo : En forte demande : les kiosques solaires au Rwanda



Lien de la vidéo (en anglais) : <https://www.youtube.com/watch?v=OpukLasOnSo>
Avec l'aimable autorisation de Henri Nyakarundi/African Renewable Energy Distributor

© DW English

Fréquence et durée des pannes de courant du réseau électrique
(seules les régions au-dessus de la moyenne mondiale sont représentées)

Nombre de coupures de courant par mois

Moyenne mondiale



Afrique subsaharienne



Moyen-Orient et Afrique du Nord



Asie de l'Est



Durée moyenne de chaque coupure (en heures)



Source des données : enquêtes menées par la Banque mondiale auprès des entreprises (Enterprise Surveys), <http://www.entreprisesurveys.org>

aux habitants des communautés n'ayant pas accès au réseau électrique. Un petit kiosque solaire mobile est équipé de quelques panneaux solaires et d'une batterie lithium-ion pouvant recharger simultanément entre 10 et 80 téléphones mobiles. Certains offrent même un service Wi-Fi^{39,40}. Les kiosques solaires de plus grande taille sont fixes et leur toit est doté de panneaux solaires⁴¹. À l'image d'une épicerie, ils proposent toute une gamme de produits, tels que des dispositifs solaires, des téléphones mobiles, des consommables, des médicaments, ainsi que des services Internet et de rechargement de téléphones mobiles. Une multitude de kiosques solaires se répandent en Afrique, où 135 millions d'abonnés aux services de téléphonie mobile n'ont pas accès à l'électricité à leur domicile⁴².

Poursuivre le développement des énergies renouvelables

L'acquisition d'un système pico-photovoltaïque par une famille n'est que le premier pas pour sortir de la pauvreté énergétique. Un petit système peut tout d'abord s'avérer suffisant pour fournir de l'électricité à une habitation des zones rurales, périurbaines ou urbaines, mais avec l'augmentation de leur pouvoir d'achat et la baisse du prix des installations, les ménages souhaiteront accroître leur capacité énergétique. Cette augmentation des besoins ouvre de nombreuses opportunités pour poursuivre le développement de l'énergie solaire, plutôt que de se tourner vers le réseau électrique alimenté par le charbon et le pétrole. En 2016, près de 80 % de l'électricité produite en Afrique et 60 % de l'électricité produite en Asie du Sud provenait de sources de combustibles fossiles^{43,44}.

Pour continuer sur la voie du développement durable et renforcer les solutions d'énergie renouvelable, il convient de se pencher sur certains facteurs qui exercent une influence notable sur l'expansion du marché de l'énergie solaire. Parmi eux figurent l'adoption de normes de qualité, la sensibilisation des consommateurs, le soutien financier, la gestion des déchets électroniques et la réorientation des politiques gouvernementales^{17,25}.

Dans de nombreux pays en développement, les dispositifs solaires sont disponibles depuis des années, voire des décennies, mais étaient bien souvent de piètre qualité et d'une durée de vie limitée. Le choix des habitants de continuer à utiliser une installation solaire autonome peut dépendre de l'idée qu'ils ont aujourd'hui des produits disponibles

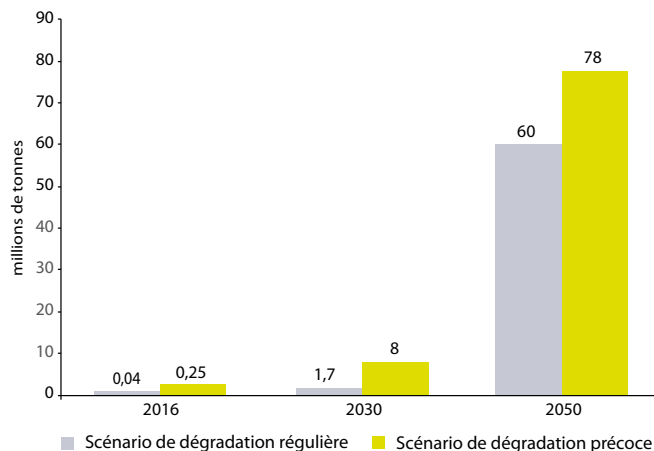
 Vidéo : L'énergie solaire en Afrique d'ici 2030



Lien de la vidéo (en anglais) : <https://www.youtube.com/watch?v=Bb8Su6OeWYw>
Crédit photo : MrNovel/Shutterstock.com

© CGTN Africa

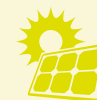
Aperçu des prévisions mondiales concernant les déchets de panneaux photovoltaïques, 2016-2050



Source : adaptée de l'IRENA et de l'AIIE PVPS (2016)⁴⁷

sur le marché. Des expériences négatives avec des produits génériques de mauvaise qualité peuvent entraver la réceptivité des consommateurs potentiels d'aujourd'hui et de demain. Deux stratégies concomitantes peuvent contribuer à pallier ce problème : la première consiste à établir des normes de qualité plus élevées pour les produits eux-mêmes et à prévoir des garanties de reprise et de recyclage par les prestataires de services. La seconde stratégie vise à sensibiliser les consommateurs à la meilleure qualité généralisée des produits, des services fournis pour chaque transaction et des modalités de paiement élargies et facilitées²⁵.

Un manque de fonds de roulement de la part des entreprises, particulièrement celles proposant des mécanismes d'aide au financement au consommateur final, peut également limiter le développement du marché. Des programmes de soutien peuvent être élaborés pour outrepasser ces problèmes et les modèles commerciaux déjà mis en place offrent un bon exemple des possibilités existantes^{5,16,17,25}. La future demande d'installations solaires à usage domestique de plus grande capacité participera également à étendre les marchés actuels et à renforcer les intérêts commerciaux et les investissements des investisseurs privés, des banques de développement et des donateurs. En 2016, pas moins de 60 millions de dollars US ont été investis dans deux entreprises africaines proposant des installations solaires à usage domestique de plus grande envergure et plus coûteuses que les traditionnels opérateurs offrant des programmes de paiement à la carte⁴⁵. Il est probable que ces entreprises chercheront à créer un nouveau marché à destination des consommateurs au revenu plus élevé qui pourraient déjà être raccordés à un réseau électrique non fiable.



Un autre défi concerne les déchets électroniques générés par le volume croissant de produits utilisés. Bien que les batteries lithium-ion soient considérées comme moins toxiques que celles au plomb, elles présentent tout de même un risque de pollution pour l'environnement étant donné la multitude de produits chimiques qu'elles contiennent⁴⁶. Actuellement, rares sont les fabricants à fournir des pièces de rechange ou à recycler les batteries en fin de vie^{47,48}. Les panneaux solaires en silicium cristallin suscitent également des préoccupations, car ils contiennent eux aussi des substances toxiques, telles que du cadmium et du plomb. Permettre aux consommateurs d'échanger leurs biens de consommation contre des produits plus performants grâce à des programmes de reprise garantirait la viabilité des marchés du recyclage et réduirait le risque de contamination. Il convient par ailleurs de souligner l'absence éventuelle de réglementation relative à la gestion des déchets électroniques spécifiques aux panneaux solaires dans de nombreux pays où l'utilisation des petites installations solaires s'est répandue⁴⁷.

Concernant les interventions du gouvernement, les difficultés portent notamment sur les incertitudes quant aux choix politiques futurs relatifs à l'électrification hors réseau pouvant être faits dans le cadre des stratégies nationales, régionales et municipales, et de leur mise en œuvre. En outre, de nombreux pays subventionnent depuis longtemps les achats de pétrole lampant par les habitants pour dissiper les mécontentements à l'encontre des gouvernements qui ne tiennent pas leurs promesses en matière de réseau électrique. Tandis que certaines recommandations encouragent l'élimination des subventions pour le pétrole lampant, une autre piste consisterait à permettre aux habitants non raccordés au réseau d'utiliser ces subventions pour financer l'acquisition d'installations solaires. La question reste toutefois de savoir si le versement des subventions doit se poursuivre une fois ces installations entièrement payées. Par ailleurs, les entreprises d'approvisionnement en électricité hors réseau suggèrent de supprimer les barrières fiscales et les obstacles à l'importation, tels que les droits de douane élevés et la taxe sur la valeur ajoutée applicable aux dispositifs solaires, qui peuvent augmenter considérablement le prix des produits^{19,25}.

Enfin, des difficultés se posent quant au développement des capacités, outre la sensibilisation du public. En effet, les entreprises et les communautés doivent disposer d'une main-d'œuvre compétente et qualifiée pour soutenir le développement du secteur. Des formations et des programmes d'apprentissage, destinés en particulier aux membres de la communauté locale qui composera le marché, doivent être proposés^{3,25}. Dans un avenir proche, les systèmes hors réseau créeront des centaines de milliers d'emplois tout au long de la chaîne de valeur, et pourraient permettre aux personnes se formant à l'installation et à l'entretien des installations solaires à usage domestique de plus grande taille de sortir de la pauvreté^{25,49}. Une étude réalisée en Afrique

de l'Ouest par l'ONU Environnement estime que la transition vers des systèmes d'éclairage hors réseau performants devrait créer 30 fois plus d'emplois que l'éclairage à combustible n'en crée actuellement⁵⁰. Avec des politiques et des réglementations adaptées sur les énergies renouvelables et une vision claire des possibilités futures, les équipements solaires proposés aujourd'hui pourraient demeurer la solution énergétique privilégiée par les communautés rurales et urbaines non raccordées au réseau électrique. Ils participeraient alors largement à la réalisation des objectifs de développement durable visant à garantir l'accès de tous à des services énergétiques fiables et modernes, à un coût abordable, d'ici 2030, et à éliminer la pauvreté.

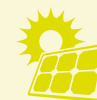


Femme formée par le Barefoot College à l'installation, la réparation et l'entretien des installations solaires pour sa maison, au Rajasthan (Inde).

Crédit photo : Knut-Erik Helle, reproduit sous licence CC BY-NC-ND 2.0

Références bibliographiques

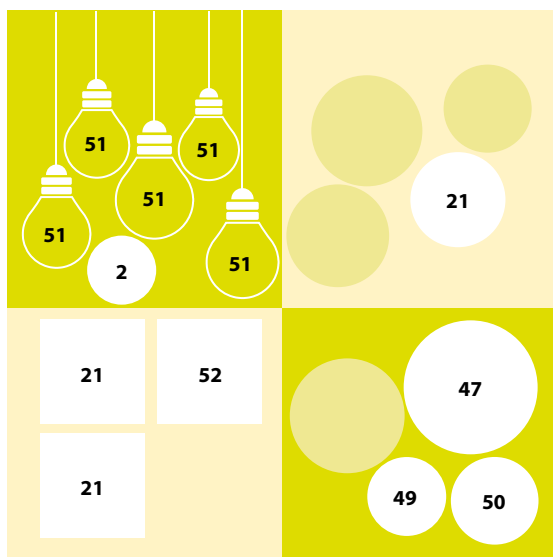
1. GEA (2012). *Global Energy Assessment – Toward a Sustainable Future*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, and the International Institute for Applied Systems Analysis, Luxembourg, Austria. http://www.iiasa.ac.at/web/home/research/Flagship-Projects/Global-Energy-Assessment/Global_Energy_Assessment_FullReport.pdf
2. International Energy Agency and the World Bank (2015). *Sustainable energy for all 2015—Progress toward sustainable energy*. The World Bank, Washington DC. <http://www.se4all.org/sites/default/files/GTF-2105-Full-Report.pdf>
3. UNEP (2015). *Developing effective off-grid lighting policy: Guidance note for governments in Africa*. United Nations Environment Programme, Nairobi. <http://www.enlighten-initiative.org/portals/0/documents/Resources/publications/OFG-publication-may-BDef.pdf>
4. UNDESA (2014). *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights*. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, New York. <https://esa.un.org/unpd/wup/publications/files/wup2014-highlights.pdf>
5. Gaunt, T., Salida, M., Macfarlane, R., Maboda, S., Reddy, Y. and Borchers, M. (2012). *Informal Electrification in South Africa: Experience, Opportunities and Challenges*. Sustainable Energy Africa, Cape Town. http://www.cityenergy.org.za/uploads/resource_116.pdf
6. Reddy, Y. and Wolpe, P. (2015). *Tackling urban energy poverty in South Africa*. Sustainable Energy Africa, Cape Town. <http://www.sustainable.org.za/uploads/files/file72.pdf>
7. Kazerooni, Y., Gyedu, A., Burnham, G., Nwomeh, B., Charles, A., Mishra, B., Kuah, S.S., Kushner, A.L., Stewart, B.T. (2015). Fires in refugee and displaced persons settlements: The current situation and opportunities to improve fire prevention and control. *Burns*, 42, 1036-1046. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305417915003861>
8. Kimemeia, D.K., Vermaak, C., Pachauri, S. and Rhodes, B. (2014). Burns, scalds and poisonings from household energy use in South Africa: Are the energy poor at greater risk? *Energy for Sustainable Development*, 18, 1-8. https://www.researchgate.net/publication/259519739_Burns_scalds_and_poisonings_from_household_energy_use_in_South_Africa_Are_the_energy_poor_at_greater_risk
9. Jacobson, A., Bond, T.C., Lam, N.L. and Hultman, N. (2013). *Black carbon and kerosene lighting: An opportunity for rapid action on climate change and clean energy for development*. Global Economy and Development Policy Paper 2013-03. The Brookings Institution, Washington DC https://www.brookings.edu/wp-content/uploads/2016/06/04_climate_change_clean_energy_development_hultman.pdf
10. Lam, N.L., Smith, K.R., Gauthier, A. and Bates, M.N. (2012). Kerosene: A review of household uses and their hazards in low-and middle income countries. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B, Critical Reviews*, 15(6), 396–432. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3664014/pdf/nihms447641.pdf>
11. Mills, E. (2016). Identifying and reducing the health and safety impacts of fuel-based lighting. *Energy for Sustainable Development*, 30, 30-59. https://www.researchgate.net/publication/290975529_Identifying_and_reducing_the_health_and_safety_impacts_of_fuel-based_lighting
12. Mukwaya, P.I. (2016). Urban Adaptation to Energy Insecurity in Uganda. *Current Urban Studies*, 4, 69-84. https://file.scirp.org/pdf/CUS_2016032414011321.pdf
13. Ghanem, D.A., Mander, S. and Gough, C., 2016. "I think we need to get a better generator": Household resilience to disruption to power supply during storm events. *Energy Policy*, 92, pp.171-180.
14. Frame, D., Tembo, K., Dolan, M.J., Strachan, S.M. and Ault, G.W. (2011). A community based approach for sustainable off-grid PV systems in developing countries. In The Electrification of Transportation and the Grid of the Future, the report of the 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, Detroit, MI, United States, 24-28 July 2011. https://www.strath.ac.uk/media/departments/eee/cred/Conference_Paper.pdf
15. UNDP (2004). *Solar Photovoltaics in Africa: Experiences with financing and delivery models-Lesson for the future*. Monitoring and evaluation report series, Issue 2. United Nations Development Programme, New York and Global Environment Facility, Washington DC. http://www.undp.org/content/undp/en/home/librarypage/environment-energy/sustainable_energy/solar_photovoltaicsinafricaexperienceswithfinancinganddeliverymo.html
16. Nygaard, I., Hansen, U.E. and Larsen, T.H. (2016). The emerging market for pico-scale solar PV systems in Sub-Saharan Africa: From donor-supported niches toward market-based rural electrification. UNEP DTU Partnership, Copenhagen.
17. REN21 (2016). *Renewables 2016 Global Status Report*. REN21 Secretariat, Paris. <http://www.ren21.net/GSR-2016-Report-Full-report-EN>
18. UN-HABITAT (2016). *Urbanization and Development: Emerging Futures*. World Cities Report 2016. United Nations Human Settlements Programme, Nairobi. <https://unhabitat.org/wp-content/uploads/2014/03/WCR-%20Full-Report-2016.pdf>
19. Lysen, E.H. (2013). *Pico Solar PV Systems for Remote Homes: A new generation of small PV systems for lighting and communication*. Report IEA-PVPS T9-12: 2012. International Energy Agency, Paris. http://iea-pvps.org/index.php?id=299&elD=dam_frontend_push&docID=1433
20. SolarAid (2013). *Facts about kerosene, solar and SolarAid*. SolarAid factsheet. <https://www.solar-aid.org/assets/Uploads/Publications/Facts-about-kerosene-solar-and-SolarAid.pdf>
21. BNEF and Lighting Global (2016). *Off-grid solar market trends report 2016*. Bloomberg New Energy Finance, New York and Lighting Global, Washington DC. https://data.bloomberglp.com/bnef/sites/4/2016/03/20160303_BNEF_WorldBankIFC_Off-GridSolarReport_.pdf



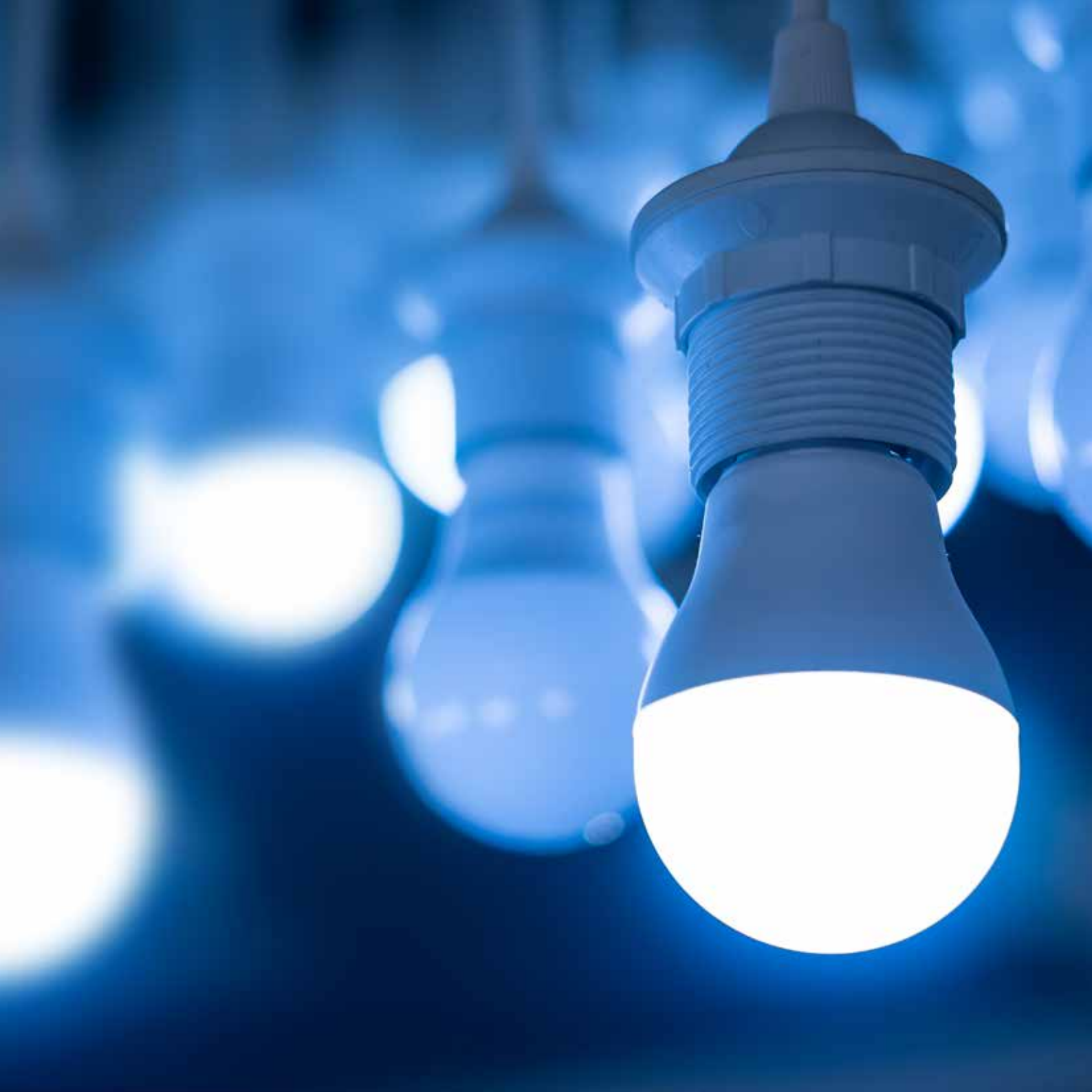
22. UN-HABITAT (2009). Promoting Energy Access for the urban poor in Africa: Approaches and Challenges in Slum Electrification. United Nations Human Settlements Programme, Nairobi. http://mirror.unhabitat.org/downloads/docs/8292_16690_GENUS%20AFRICA.EGM%20Final%20Report.pdf
23. UN-HABITAT (2012). Enhanced Energy Access for Urban Poor Practice Casebook. United Nations Human Settlements Programme, Nairobi. http://www.avsi-usa.org/uploads/6/7/4/2/67429199/avsi___coelba3.pdf
24. Phadke, A.A., Jacobson, A., Park, W.Y., Lee, G.R., Alstone, P. and Khare, A. (2015). Powering a Home with Just 25 Watts of Solar PV. Super-Efficient Appliances Can Enable Expanded Off-Grid Energy Service Using Small Solar Power Systems. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley.
25. Diecker, J., Wheeldon, S., and Scott, A. (2016) Accelerating access to electricity in Africa with off-grid solar: Policies to expand the market for solar household solutions. Overseas Development Institute, London UK.
26. McKibben, B. (2017) The Race to Solar Power Africa. *The New Yorker*, 26 June 2017. <http://www.newyorker.com/magazine/2017/06/26/the-race-to-solar-power-africa>
27. IEA and World Bank (2015). Sustainable Energy for All 2015 – Progress Toward Sustainable Energy. World Bank, Washington, DC. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/22148>
28. Corrigan, G. and Di Battista, A. (2015). 19 charts that explain India's economic challenge. World Economic Forum website. <https://www.weforum.org/agenda/2015/11/19-charts-that-explain-indias-economic-challenge/>
29. PRIA (2014). Government led exclusion of the urban poor: A greater contribution though a lesser recipient. Delhi Study Report 2014. The Society for Participatory Research in Asia, Delhi. https://terraurban.files.wordpress.com/2014/01/delhi-study_april-2014.pdf
30. Pollinate Energy (2017). Pollinate Energy website. <https://pollinateenergy.org/>
31. Davidsen, A., Pallassana, K., Singh, J., Shiv, J., Walker, P., Parrish, S. and Sitsabeshan, S. (2015). The business case for off-grid energy in India. The Climate Group. <https://www.theclimategroup.org/sites/default/files/archive/files/The-business-case-for-offgrid-energy-in-India.pdf>
32. Department of Energy (2012). A survey of energy-related behaviour and perceptions in South Africa: The residential sector. Department of Energy, Government of the Republic of South Africa. <http://www.energy.gov.za/files/media/Pub/Survey%20of%20Energy%20related%20behaviour%20and%20perception%20in%20SA%20-%20Residential%20Sector%20-%202012.pdf>
33. Lemaire, X. and Kerr, D. (2014). The iShack Project in Enkanini, Stellenbosch, South Africa. Supporting Africa Municipalities in Sustainable Energy Transitions (SAMSET) website. <https://samsetproject.wordpress.com/2014/12/20/the-ishack-project-in-enkanini-stellenbosch-south-africa/>
34. SM and CORC (2012). Enkanini (Kayamandi) household enumeration report. Stellenbosch Municipality and Community Organisation Resource Centre. <http://sasdialliance.org.za/wp-content/uploads/docs/reports/Enumerations/Enkanini%20Final%20Report.pdf>
35. Wilde, S. (2015). iShack delivers power (and television) to the people. Mail & Guardian, 13 March 2015. <https://mg.co.za/article/2015-03-13-ishack-delivers-power-and-television-to-the-people>
36. Kovacic, Z., Smit, S., Musango, J.K., Brent, A.C. and Giampietro, M. (2016). Probing uncertainty levels of electrification in informal urban settlements: A case from South Africa. *Habitat International*, 56, 212-221. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0197397515302356>
37. Lemaire, X. and Kerr, D. (2016). Informal Settlements – Electrification and Urban Services. SAMSET Policy Brief. UCL Energy Institute, London.
38. Murugan, S. (2013). Solar energy lights up Ekurhuleni's informal settlements. Vuk'uzenzele, June 2013. <http://www.vukuzenzele.gov.za/solar-energy-lights-ekurhuleni-s-informal-settlements>
39. ARED (2017). Our solutions. African Renewable Energy Distributor. <http://www.a-r-e-d.com/>
40. Juabar (2017). Our design process. Juabar Design. <http://juabar.com/>
41. SOLARKIOSK (2017). One Solution—Various Purposes. SOLARKIOSK. <http://solarkiosk.eu/product/>
42. Nique, M. (2013). Sizing the opportunity of mobile to support energy and water access. GSMA, London. https://www.gsma.com/mobilefordevelopment/wp-content/uploads/2013/12/Sizing-the-Opportunity-of-Mobile_Nov-2013.pdf
43. UNEP (2017). Atlas of Africa Energy Resources. United Nations Environment Programme, Nairobi. <http://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/20476>
44. Shukla, A.K., Sudhakar, K. and Baredar, P. (2016). Renewable energy resources in South Asian countries: Challenges, policy and recommendations. *Resource-Efficient Technologies*, 1-5. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405653716302299>
45. Bloomberg New Energy Finance (2017). 1Q 2017 Off-grid and mini-grid market outlook. Climatescope 2016 website. <http://global-climatescope.org/en/off-grid-quarterly/q1-2017/>
46. Wang, X. (2014). Managing end-of-life lithium-ion batteries: An environmental and economic assessment. Thesis, Rochester Institute of Technology, New York. <http://scholarworks.rit.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=9337&context=theses>
47. IRENA and IEA-PVPS (2016), "End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels," International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems. http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf

48. Industry Opinion on Lifecycle and Recycling (2014). The Global Off-Grid Lighting Association, Utrecht, https://www.gogla.org/sites/default/files/recource_docs/gogla-industry-opinion-on-lifecycle-and-recycling1.pdf
49. Mills, E., 2016. Job creation and energy savings through a transition to modern off-grid lighting. *Energy for Sustainable Development*, 33, pp.155-166.
50. UNEP (2014). Light and livelihood: A bright outlook for employment in the transition from fuel-based lighting to electrical alternatives. United Nations Environment Programme, Nairobi. http://www.ecreee.org/sites/default/files/light_and_livelihood_-_a_bright_outlook_for_employment.pdf

Références bibliographiques des illustrations



51. World Bank (2017). World Development Indicators. The World Bank, Washington DC. <http://databank.worldbank.org/data/>
52. GOGLA (2017). *Global off-grid solar market report July-December 2016: Semi-annual sales and impact data*. Global Off-Grid Lighting Association, Utrecht. https://www.gogla.org/sites/default/files/recource_docs/final_sales-and-impact-report_h22016_full_public.pdf





*Des milliers de personnes déplacées en raison d'inondations et de conflits près de Jowhar (Somalie) en 2013.
Crédit : UN Photo/Tobin Jones*

Déplacements environnementaux : la mobilité humaine à l'ère de l'anthropocène

Qu'est-ce que le déplacement environnemental ?

Nous vivons actuellement une période de mobilité sans précédent : libre circulation des idées, des biens, de l'argent et, de plus en plus, des personnes. Deux cent cinquante millions de personnes vivent et travaillent en dehors de leur pays de naissance. Par ailleurs, 750 millions de personnes se déplacent dans leur propre pays¹.

Notre nouveau paysage démographique se caractérise par une mobilité humaine rapide et étendue et une population mondiale qui devrait dépasser les 9 milliards de personnes d'ici le milieu du siècle. La migration est un facteur de développement et de progrès extrêmement important qui ouvre des portes aux individus et aux familles, diffuse des idées et rapproche les populations. Toutefois, cette problématique est également source de discorde sur le plan politique.

Notre époque est aussi marquée par un changement environnemental sans précédent. L'activité anthropique a si profondément remodelé notre planète que les scientifiques parlent du début d'une nouvelle ère géologique baptisée « l'Anthropocène ».

Les changements environnementaux et la dégradation de l'environnement – désertification, déforestation, dégradation des terres, changement climatique et pénurie d'eau – redessinent entièrement la carte du monde. La dégradation de l'environnement détermine les lieux d'habitation possibles et les modes de vie des populations. Elle met en péril des vies humaines et détruit les moyens de subsistance, en particulier des plus pauvres et des plus vulnérables, poussant ainsi les populations à se déplacer et à migrer.

En parallèle, les conflits armés intensifient les flux de populations fuyant les violences, à la fois au sein des pays (déplacements internes)



et au-delà des frontières (réfugiés). L'analyse des guerres civiles survenues ces 70 dernières années a montré que pas moins de 40 % des conflits étaient liés à l'utilisation ou au contrôle contestés des ressources naturelles, telles que les terres, l'eau, les minéraux ou le pétrole². À la fin de l'année 2016, on recensait plus de 65 millions de réfugiés ou de personnes déplacées – un record depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale – et 128 millions de personnes nécessitaient une aide humanitaire^{3,4}.

Les problèmes environnementaux ont toujours joué un rôle dans les mouvements de population, et ce, depuis les premières migrations en provenance du continent africain. Bien qu'ils aient toujours été variés et complexes, il est important de reconnaître que, certes, la dégradation de l'environnement a eu tendance, du moins par le passé, à favoriser les déplacements, mais que d'autres facteurs de vulnérabilité, tels que la pauvreté et l'absence de perspectives, ont souvent été des moteurs clés. Aujourd'hui, le degré de dégradation environnementale et la facilité à se déplacer créent ensemble un effet de mouvement d'une ampleur inédite⁵.

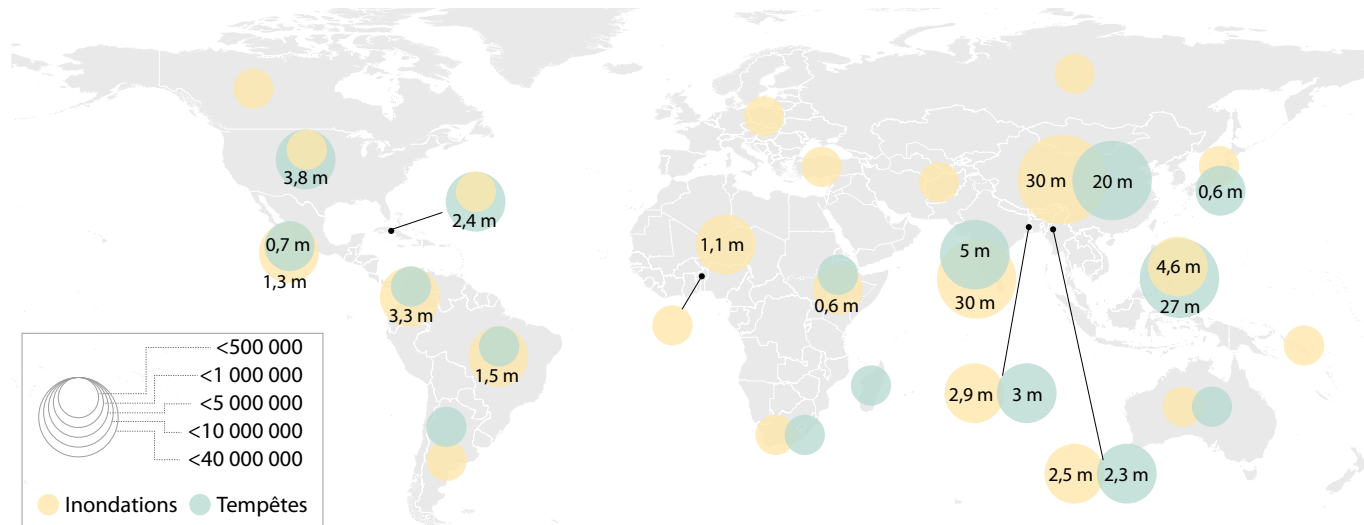
La croissance démographique s'accompagne d'une augmentation du nombre de personnes vivant dans les zones reculées ou écologiquement vulnérables⁶. Chaque année, 26,4 millions de

personnes en moyenne sont contraintes de quitter leur foyer en raison de catastrophes naturelles⁷, soit une personne par seconde. Mais nous ne devons pas nous laisser anesthésier par les statistiques. Derrière chaque chiffre se cache un drame personnel – une vie complètement chamboulée, des opportunités perdues, une éducation sacrifiée.

Les évolutions croisées du changement climatique, de la croissance démographique, de la hausse de la consommation, des vastes projets d'infrastructure et de la dégradation de l'environnement pourraient multiplier à l'avenir le nombre de personnes déplacées. Cette probabilité est d'autant plus forte si ces tendances se dessinent en l'absence d'interventions adaptées des gouvernements et de la communauté internationale visant à renforcer la résilience des pays et des communautés à ces changements. Le chiffre le plus fréquemment cité prévoit pas moins de 200 millions de personnes déplacées pour des raisons environnementales d'ici 2050⁸.

En d'autres termes, dans un monde comptant neuf milliards d'individus, une personne sur 45 aura été contrainte de quitter son foyer pour des raisons environnementales et des territoires insulaires de faible altitude entiers devront peut-être être abandonnés. Faire face à de tels déplacements pourrait constituer le principal défi environnemental du XXI^e siècle.

Nombre de personnes déplacées par des inondations et des tempêtes dans quelques pays, entre 2008 et 2016



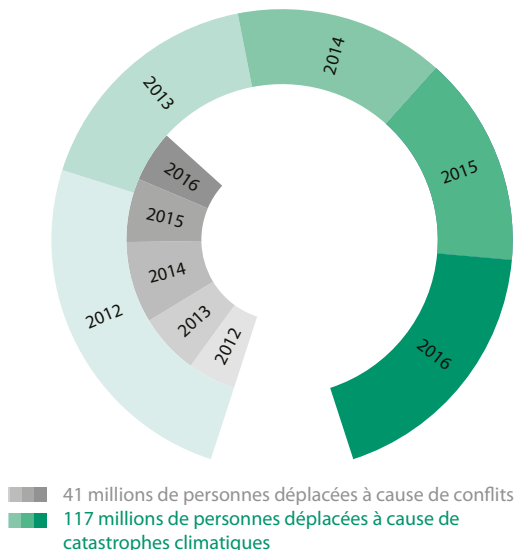
Source des données : Observatoire des situations de déplacement interne, www.internal-displacement.org/database

Comprendre les déplacements environnementaux

Bien que la question de la migration irrégulière ait gagné en importance ces dernières années du fait de la « crise migratoire » en Europe, il ne s'agit nullement d'une problématique exclusivement européenne. Tout comme les migrations surviennent dans le monde entier, les déplacements environnementaux peuvent toucher n'importe quelle région de la planète.

Les modélisations réalisées prévoient par exemple une multiplication des déplacements dans la région Asie-Pacifique avec l'aggravation des effets du changement climatique^{10,11}. Les zones côtières, les larges deltas et les petites îles sont vulnérables face à l'élévation du niveau de la mer et particulièrement exposés aux cyclones. Le petit État insulaire pacifique de Tuvalu, qui culmine à seulement cinq mètres au-dessus du niveau de la mer, est susceptible de devoir être évacué entièrement dans les 50 prochaines années, et les Maldives dans les 30 prochaines années. Plusieurs États commencent déjà à préparer une éventuelle réinstallation d'une partie ou de la totalité de leur population : en 2014, le président Anote Tong de la République de Kiribati a acquis des terres aux Fidji en guise de police d'assurance face à l'élévation du niveau de la mer¹².

Nombre de personnes déplacées par les conflits et les catastrophes climatiques entre 2012 et 2016



Source des données : Observatoire des situations de déplacement interne, www.internal-displacement.org/database

Dans le même temps, le continent africain recense plus de pays touchés par les déplacements humains que tout autre continent ou région. En 2015, sur ce même continent, plus de 15 millions de personnes avaient été déplacées à l'intérieur de leur propre pays pour diverses raisons, y compris pour des raisons environnementales¹³. Plus de la moitié des États fragiles de la planète se concentrent en Afrique subsaharienne et le continent est particulièrement exposé au risque de sécheresse, qui accroît la possibilité de pénuries alimentaires^{13,14}.



Les étiquettes ont leur importance

L'appellation des personnes déplacées en raison des dégradations de l'environnement ou du changement climatique est un sujet très controversé. En effet, doivent-ils être désignés par le terme « réfugiés environnementaux », « migrants environnementaux » ou « déplacés environnementaux » ? Il ne s'agit pas seulement d'une question sémantique. La définition qui sera généralement acceptée aura un réel impact sur les obligations de la communauté internationale, en vertu du droit humanitaire et des droits des personnes déplacées.

Après la Seconde Guerre mondiale, les décideurs internationaux ont jugé que le terme « réfugié » devait être réservé à « toute personne qui, craignant avec raison d'être persécutée du fait de sa race, de sa religion, de sa nationalité, de son appartenance à un certain groupe social ou de ses opinions politiques, se trouve hors du pays dont elle a la nationalité et qui ne peut ou, du fait de cette crainte, ne veut se réclamer de la protection de ce pays »⁸.

Les militants ont utilisé la formulation de « réfugié environnemental » pour rendre compte de l'urgence du problème. Toutefois, l'utilisation du terme « réfugié » pour décrire les personnes fuyant des pressions environnementales est inexacte du point de vue du droit international. La majorité de ceux contraints par les changements environnementaux de quitter leur foyer resteront probablement à l'intérieur de leurs propres frontières, mais n'auront peut-être aucune possibilité de retour dans les zones inondées par l'élévation du niveau de la mer⁹.

L'absence de définition adéquate fait que les mouvements de populations liés à l'environnement sont souvent invisibles, en particulier lorsque les déplacements s'étalent sur de longues durées. Aucune institution internationale n'a été chargée de collecter des données sur leur nombre et encore moins de leur fournir des services de base. Incapables de justifier de persécutions politiques dans leur pays d'origine, ces personnes passent à travers les mailles du droit international humanitaire. Le présent rapport utilise le terme « déplacements environnementaux », tout en reconnaissant que ce terme n'est pas universellement admis, mais dans l'espoir qu'il communique une idée raisonnablement exacte du phénomène croissant des déplacements forcés de population causés par la dégradation de l'environnement et le changement climatique.

Déplacement environnemental

Dégradation des terres, désertification et sécheresse

La Somalie est en proie à un grave épisode de sécheresse et d'insécurité alimentaire ayant déjà entraîné le **déplacement de 761 000 personnes** depuis novembre 2016.

Les **sécheresses** devraient s'intensifier, devenir plus fréquentes et se prolonger en raison du changement climatique.

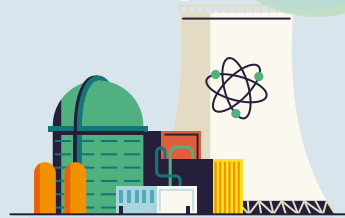
La restauration écologique des terres sur plus de 50 000 km² au Burkina Faso, au Mali et au Niger contribue à **faire revenir les populations**.

50 % des terres agricoles d'Amérique latine seront touchées par la désertification d'ici à 2050.

Les terres arides s'assèchent et deviennent moins fertiles en raison de l'utilisation non durable des terres et de l'eau d'une part et du changement climatique d'autre part. Un tiers de la population mondiale vit sur des terres arides.

Accidents industriels

En 1986, la catastrophe nucléaire de Tchernobyl a entraîné **l'évacuation et la réinstallation d'au moins 330 000 personnes**.



150 000 personnes ont dû être déplacées à cause de **fuites radioactives** émanant de la centrale nucléaire de Fukushima, au Japon. Le retour et la réinstallation de ces personnes restent incertains.

De graves accidents industriels peuvent polluer de vastes espaces et contraindre les habitants à abandonner leur logement et à se réinstaller ailleurs. Les conséquences à long terme de ces accidents sur les plans sanitaire, social, économique et environnemental peuvent compliquer leur retour définitif.

Catastrophes naturelles



Le GIEC prévoit des **pluies extrêmes** fréquentes provoquant des glissements de terrain en Amérique du Nord et centrale, en Afrique de l'Est, en Asie de l'Ouest, de l'Est, du Sud et du Sud-Est, en Australie et dans de nombreuses îles du Pacifique.

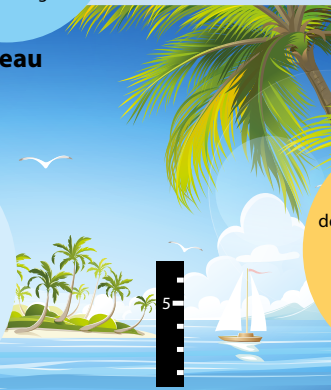
117 millions de personnes ont été déplacées en raison de catastrophes climatiques entre 2012 et 2016.

Le changement climatique influe sur la probabilité, la fréquence et l'intensité des phénomènes climatiques extrêmes. Ces derniers peuvent rendre des régions inhabitables et entraîner le déplacement temporaire ou permanent des populations.

La vitesse des vents des **cyclones tropicaux** augmente et ces derniers sont susceptibles de causer de graves dégâts.

Montée du niveau de la mer

Dans les îles Salomon, cinq îles **recouvertes de végétation ont disparu ces dernières décennies** en raison de la montée du niveau de la mer. Les communautés se sont réinstallées sur une île volcanique de plus haute altitude.



Une étude des mouvements migratoires menée dans des pays en développement entre 1970 et 2000 suggère que les populations quittent les terres arides marginales et les zones exposées au risque de sécheresse pour rejoindre les littoraux **sujets aux inondations et aux cyclones**.

aux inondations, aux ondes de tempête, à la transformation du littoral et à l'intrusion d'eau salée.

La plupart des mégapoles mondiales se trouvent sur des littoraux et de larges deltas, dont dépendent les moyens de subsistance de millions de personnes. La montée du niveau de la mer rend les villes côtières de basse altitude et les petites îles vulnérables

Revendications de ressources naturelles et conflits liés à leur contrôle

Au cours des 70 dernières années, au moins **40 % de l'ensemble des conflits** survenus à l'intérieur de frontières nationales étaient liés aux ressources naturelles.

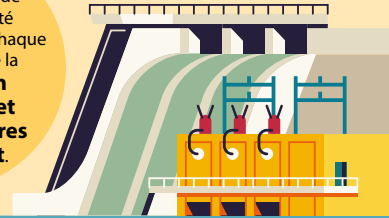


Les rivalités pour le contrôle de ressources naturelles de plus en plus rares – terres, eau, bois, pétrole, minéraux – peuvent susciter des tensions et provoquer des conflits entre les usagers. Bien souvent, ces tensions font planer le risque de violents conflits et de déplacements forcés à grande échelle.

La **confiscation** des terres est de plus en plus courante en Amérique latine à cause de l'extraction minière, de l'exploitation forestière et de l'établissement de plantations.

Projets d'infrastructure

Dans les années 1980, 10 millions de personnes ont été déplacées de force chaque année à cause de la **construction de barrages et d'infrastructures de transport**.



Les grands projets d'infrastructures tels que les barrages et les routes peuvent engendrer un déplacement massif. Par ailleurs, l'acquisition de terres à grande échelle dans les pays en développement dans le cadre de projets d'infrastructures et agro-industriels, que l'on qualifie souvent d'accaparement de terres, risque d'être une cause importante de déplacements dans l'avenir.

On estime que la construction sur le fleuve Yangzi Jiang, en Chine, du **barrage des Trois-Gorges**, qui a duré 17 ans, a entraîné le **déplacement de 1,3 million de personnes**. Un grand nombre d'entre elles ont encore du mal à se réinstaller ailleurs.

L'Amérique du Nord subit elle aussi les effets des déplacements environnementaux. En 2016, les habitants de l'Isle de Jean Charles, en Louisiane, ont été les premiers « migrants climatiques » des États-Unis à recevoir une subvention fédérale pour leur réinstallation. Cette subvention de 48 millions de dollars US provenait de l'enveloppe de 1 milliard de dollars US débloquée en janvier 2016 par le Secrétariat américain au logement et au développement urbain pour aider les communautés de 13 États fédéraux à s'adapter au changement climatique en construisant des barrages, des systèmes de drainage et des digues plus solides¹⁵.

Cependant, la situation est plus complexe qu'elle n'y paraît. Les groupes les plus vulnérables manquent souvent de moyens ou de relations pour se déplacer et peuvent être pris au piège dans une zone. D'autres groupes de population, tels que les éleveurs, basent leur stratégie de subsistance sur la migration saisonnière. Dans le même temps, la réinstallation planifiée des populations face à un risque spécifique, tel que la dégradation des terres à grande échelle, peut servir de valve de décompression et alléger la pression exercée sur les écosystèmes fragilisés, mais aussi, dans les faits, « exporter » l'empreinte écologique de ces populations dans d'autres régions¹⁶.

Par ailleurs, il est important de noter que les déplacements eux-mêmes peuvent avoir une incidence environnementale et dégrader les écosystèmes, prolongeant ainsi l'urgence humanitaire ou détériorant les relations avec les communautés d'accueil. L'urbanisation informelle ou les camps de réfugiés désorganisés peuvent accentuer la pression exercée sur les ressources foncières, hydriques, énergétiques et alimentaires déjà limitées. De telles situations sont susceptibles de porter

atteinte aux services écosystémiques, d'entraîner des risques sanitaires dus à l'élimination inadéquate des déchets et de placer les personnes déplacées en concurrence directe avec les communautés locales^{17,18}.

Des solutions institutionnelles

La problématique des déplacements environnementaux a progressé dans les priorités politiques, attirant l'attention des décideurs, du milieu universitaire et des acteurs humanitaires. En 2011, le Government Office for Science du Royaume-Uni a publié les résultats du projet Foresight, une étude portant sur l'incidence des changements environnementaux mondiaux sur les mouvements de populations. Ce projet, d'une durée de deux ans, a impliqué pas moins de 350 éminents experts et parties prenantes de plus de 30 pays, spécialisés dans des domaines allant de la démographie au développement économique, en passant par l'écologie¹⁶. Le projet Foresight a mis en lumière des effets inattendus, en particulier les avantages de la migration, et a démontré l'importance de bien planifier l'adaptation *in situ* lorsqu'elle est possible, d'organiser la délocalisation depuis les zones menacées et d'établir des bonnes pratiques de réinstallation au sein des communautés d'accueil.

Parallèlement à la réalisation du projet Foresight par le Royaume-Uni, les gouvernements de Norvège et de Suisse ont défendu l'adoption de principes guidant les interventions mises en place pour faire face aux défis complexes des déplacements de population dans le contexte du changement climatique et d'autres risques environnementaux¹⁹. Cette campagne a donné naissance à l'initiative Nansen, rebaptisée par la suite « Plateforme sur les déplacements liés aux catastrophes ». Le but de cette plateforme est d'établir un consensus sur les droits et la protection des personnes réfugiées en raison des catastrophes et du changement climatique²⁰. L'Organisation internationale pour les migrations se penche sur la question depuis le début des années 2000 et a créé une division spécialement dédiée à la migration et au changement climatique²¹. En 2016, l'université de Liège (Belgique) a officiellement établi The Hugo Observatory, la première division universitaire spécialisée dans la migration environnementale²².

Les questions relatives à la migration et aux déplacements ont été progressivement intégrées aux accords internationaux de 2015 qui définissent dans une large mesure le cadre de développement pour les 15 prochaines années. Les objectifs de développement durable prévoient de « faciliter la migration et la mobilité de façon ordonnée, sûre, régulière et responsable », dans le cadre de l'objectif 10 de réduction des inégalités²³. Le Cadre de Sendai pour la réduction des risques de catastrophe constitue un cadre international visant à réduire les risques de catastrophe, à limiter les pertes en termes de vies humaines et de moyens de subsistance, à préserver l'état de

Vidéo : Foresight – Migration et changements environnementaux planétaires



Lien de la vidéo (en anglais) : <https://www.youtube.com/watch?v=zt0UJU0aAVg>

Crédit photo : des milliers de personnes déplacées en raison d'inondations à Cap-Haïtien (Haïti), UN Photo/Logan Abassi

© GO-Science



santé des populations et à diminuer considérablement le nombre de personnes déplacées dans le monde d'ici 2030²⁴. Les questions de migration ont été expressément intégrées à l'Accord de Paris sur les changements climatiques avec la création d'une équipe spéciale par le Mécanisme international de Varsovie relatif aux pertes et préjudices liés aux incidences des changements climatiques, chargée d'élaborer des approches de prévention, d'atténuation et de gestion des déplacements liés au changement climatique²⁵.

L'Assemblée générale des Nations Unies de 2016 a organisé une réunion de haut niveau pour faire émerger un consensus international autour du défi croissant que constituent les migrations internationales et les flux toujours plus importants de réfugiés. La réunion a débouché sur l'adoption de la Déclaration de New York pour les réfugiés et les migrants²⁶. Cette dernière intègre deux appendices : la première est un cadre d'action global pour les réfugiés. La seconde présente une feuille de route vers un pacte mondial pour des migrations sûres, ordonnées et régulières, qui sera présenté lors d'une conférence intergouvernementale sur les migrations en 2018, en vue de son adoption²⁷.

Vidéo : Comment le changement climatique impacte-t-il les déplacements humains ?

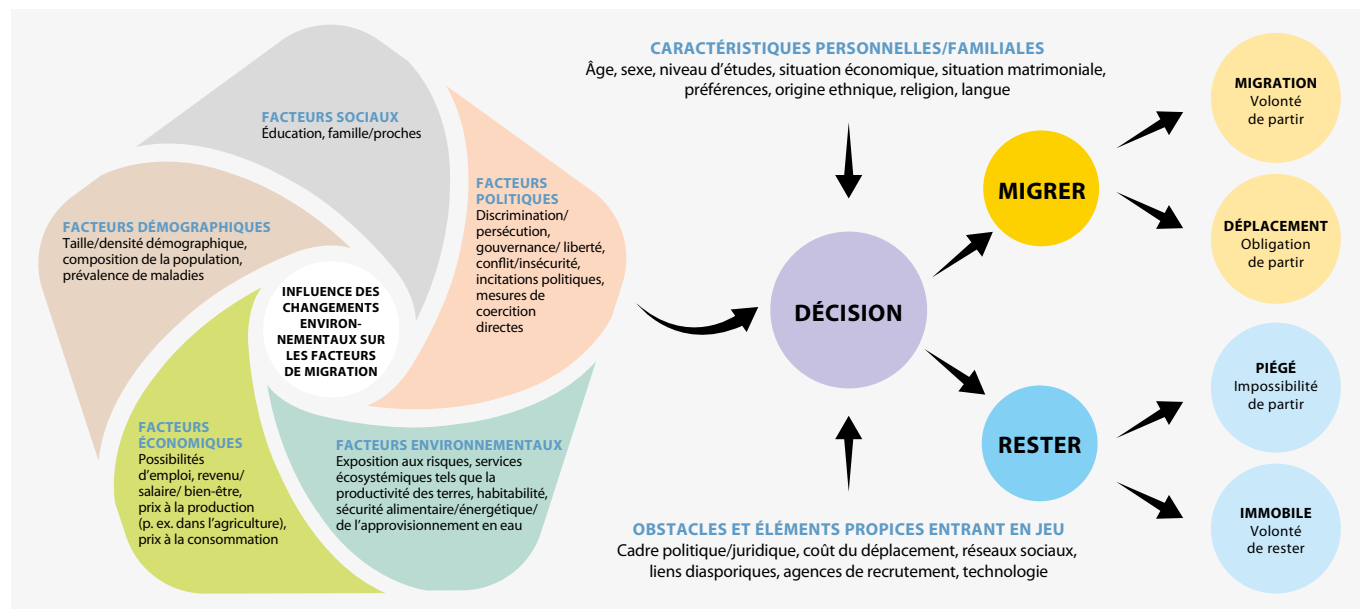


Lien de la vidéo (en anglais) : <https://www.youtube.com/watch?v=a2nTq675o3U>
 Crédit photo : Grand Dessalines (Haïti) après le passage de l'ouragan Tomas, UN Photo/UNICEF/Marco Dormino, reproduit sous licence CC BY-NC-ND 2.0

© HCR

Changement environnemental et moteurs de la migration

La décision de migrer ou de rester repose en grande partie sur divers facteurs. Les changements environnementaux planétaires compliquent encore davantage les interactions entre ces facteurs et peuvent modifier la prise de décision.



Source : adapté du cadre conceptuel regroupant les facteurs de la migration et de l'influence du changement environnemental, adopté par le projet Foresight du gouvernement britannique¹⁶

Faire face aux déplacements environnementaux

La dégradation et la mauvaise gestion environnementales sont étroitement liées aux facteurs politiques, économiques et sociaux responsables des déplacements. Il est crucial que nous comprenions ces facteurs complexes et que nous les combattions. Par ailleurs, si nous ne réduisons pas la vulnérabilité environnementale à long terme, les grands flux annuels de personnes déplacées pourraient bien devenir notre nouvelle norme.

Les défenseurs de l'environnement ont un rôle important à jouer dans : (i) la sensibilisation aux facteurs écologiques des déplacements ; (ii) le renforcement de la résilience des communautés et des pays aux chocs et changements environnementaux ; et (iii) la planification de la réinstallation des communautés susceptibles d'être déplacées en raison de changements environnementaux inévitables.

En définitive, les déplacements ne représentent pas seulement un défi sur le plan politique. Comme le montre l'exemple des marais de Mésopotamie, il est important de les considérer comme un défi environnemental. Même dans le cas d'un scénario de changement

▶ Vidéo : Ces Américains pourraient devenir des « réfugiés climatiques ».



Lien de la vidéo (en anglais) : <https://www.youtube.com/watch?v=TicvZPYuFg>
Crédit photo : Shishmare (Alaska), réserve nationale de Bering Land Bridge,
reproduit sous licence CC BY 2.0

© CNN

climatique modéré, l'ampleur des futurs déplacements possibles nécessite l'action conjointe des acteurs travaillant dans les domaines de l'environnement, des interventions humanitaires et des déplacements pour renforcer la résilience des populations dans un monde en pleine mutation.



Redonner vie aux marais de Mésopotamie

Dans les années 1950, les marais de Mésopotamie (Al-Ahwar) du sud de l'Iraq formaient un vaste territoire qui abritait un demi-million de personnes, connues sous le nom de Ma'dan ou « Arabes des marais ». Ces populations vivaient dans des maisons de roseau dans des villages isolés et subvenaient à leurs besoins grâce à la pêche, à la culture du riz et à l'élevage de buffles d'eau.

Dès les années 1970, les marais de Mésopotamie ont été dévastés par la construction d'un barrage en amont, par l'agriculture, l'exploration pétrolière, les opérations militaires et, plus particulièrement, par l'assèchement délibéré des marais par Saddam Hussein en représailles aux soulèvements de 1991 contre son régime. En 2003, 90 % des marais avaient disparu et seuls 20 000 Ma'dan y vivaient toujours. On estime que 100 000 Ma'dan ont fui vers des camps de réfugiés en Iran et 100 000 autres ont été déplacés en Iraq.

En 2001, l'ONU Environnement a tiré la sonnette d'alarme quant à la disparition des marais, plaçant cette région du monde sur le devant de la scène internationale. À la fin de la guerre en Iraq en 2003, l'ONU Environnement a lancé un projet visant à restaurer les marais, en renforçant la capacité des décideurs, en faisant la démonstration de technologies respectueuses de l'environnement et en surveillant l'état des marais. En 2009, un projet conjoint a été lancé avec l'UNESCO pour soutenir l'inscription des marais de Mésopotamie sur la Liste du patrimoine mondial. Il prévoyait l'élaboration d'un plan de gestion représentatif des caractéristiques historiques, culturelles, environnementales, hydrologiques et socio-économiques uniques de la région.

Depuis 2003, les marais commencent à se restaurer, bien que les sécheresses, la construction d'un barrage en amont et les conflits continus entravent ce processus. Des dizaines de milliers de Ma'dan retournent aujourd'hui sur leurs terres ancestrales. En juillet 2016, avec le soutien de l'ONU Environnement, les marais de Mésopotamie ont été le premier site du Moyen-Orient à être inscrit à la fois au patrimoine mondial culturel et naturel.

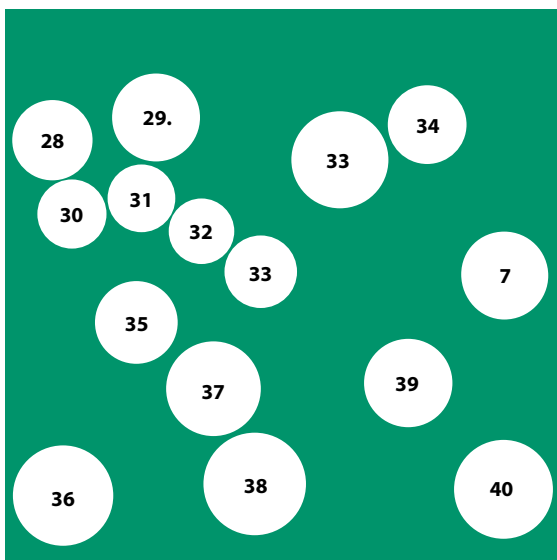


Références bibliographiques

1. World Bank Group (2016). *Migration and Remittances Factbook 2016, Third Edition*. World Bank, Washington DC. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/237432>
2. UNEP (2009). *From Conflict to Peacebuilding: the role of natural resources and the environment*. United Nations Environment Programme, Geneva. http://postconflict.unep.ch/publications/pcdmb_policy_01.pdf
3. UNHCR (2017). *Global trends: Forced displacement in 2016*. The United Nations High Commissioner for Refugees, Geneva. <http://www.unhcr.org/5943e8a34>
4. UN-OCHA (2016). *Global humanitarian overview 2017*. United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs, New York. https://www.unocha.org/sites/unocha/files/GHO_2017.pdf
5. Ionesco, D., Mokhnacheva, D. and Gemenne, F. (2017). *The Atlas of Environmental Migration*. Earthscan, London.
6. Huppert, H.E. and Sparks, S.J. (2006). Extreme natural hazards: population growth, globalization and environmental change. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 364, 1875-1888. <http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/364/1845/1875.full.pdf>
7. IDMC (2016). *Global Estimates 2015: People displaced by disasters*. Internal Displacement Monitoring Centre, Geneva. <http://www.internal-displacement.org/assets/library/Media/201507-globalEstimates-2015/20150713-global-estimates-2015-en-v1.pdf>
8. UNGA (1951). *Final Act and Convention Relating to the Status of Refugees*. United Nations Conference of Plenipotentiaries on the Status of Refugees and Stateless Persons, Geneva, 2-25 July 1951. United Nations General Assembly, Geneva. <http://www.unhcr.org/protection/travaux/40a8a7394/final-act-united-nations-conference-plenipotentiaries-status-refugees-stateless.html>
9. Davenport, C. and Robertson, C. (2016). Resettling the First American 'Climate Refugees'. *The New York Times*, 3 May 2016. <https://www.nytimes.com/2016/05/03/us/resettling-the-first-american-climate-refugees.html>
10. Cruz, R.V., Harasawa, H., Lal, M., Wu, S., Anokhin, Y., Punsalma, B., Honda, Y., Jafari, M., Li, C. and Huu Ninh, N. (2007). Asia. In *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge. http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg2/en/ch10.html
11. Hijjoka, Y., Lin, E., Pereira, J.J., Corlett, R.T., Cui, X., Insarov, G.E., Lasco, R.D., Lindgren, E. and Surjan, A. (2014). Asia. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L.White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/WGIIAR5-Chap24_FINAL.pdf
12. Caramel, L. (2015). Besieged by the rising tides of climate change, Kiribati buys land in Fiji. *The guardian*, 1 July 2014. <https://www.theguardian.com/environment/2014/jul/01/kiribati-climate-change-fiji-vanua-levu>
13. IOM (2009). *Migration, Environment and Climate Change: Assessing the Evidence*. International Organization for Migration, Geneva. http://publications.iom.int/system/files/pdf/migration_and_environment.pdf
14. Niang, I., Ruppel, O.C., Abdrabo, M.A., Essel, A., Lennard, C., Padgham, J. and Urquhart, P. (2014). Africa. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L.White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1199-1265. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/WGIIAR5-Chap22_FINAL.pdf
15. State of Louisiana (2016). LA receives \$92 million from U.S. Dept. of Housing and Urban Development for coastal communities, disaster resilience. State of Louisiana Press Release, 25 January 2016. <http://www.doa.la.gov/OCDDRU/NewsItems/Louisiana%20Receives%20NDRC%20Award.pdf>
16. Government Office for Science (2011). Foresight: Migration and Global Environmental Change: Future Challenges and Opportunities. Final Project Report. The United Kingdom Government Office for Science, London. https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/287717/11-1116-migration-and-global-environmental-change.pdf
17. Berry, L. (2008). *The impact of environmental degradation on refugee-host relations: a case study from Tanzania*. Research Paper no. 151. The United Nations High Commissioner for Refugees, Geneva. <http://www.unhcr.org/47a315c72.pdf>
18. Xu, X., Tan, Y. and Yang, G. (2013). Environmental impact assessments of the Three Gorges Project in China: Issues and interventions. *Earth-Science Reviews*, 124, 115-125. <https://www.researchgate.net/publication/260725538>
19. Kälin, W. (2008). *Guiding principles on internal displacement: Annotations*. Studies in Transnational Legal Policy No. 38. The American Society of International Law, Washington DC. https://www.brookings.edu/wp-content/uploads/2016/06/spring_guiding_principles.pdf
20. Disaster Displacement (2017). Platform on Disaster Displacement website. <http://disasterdisplacement.org/>
21. IOM (2017). *Migration and Climate Change*. International Organization for Migration website. <https://www.iom.int/migration-and-climate-change>
22. University of Liège (2016). The Hugo Observatory website. <http://labos.ulg.ac.be/hugo/about/>
23. UN (2017). *Sustainable Development Goal 10: Reduce inequality within and among countries*. Sustainable development knowledge platform. <https://sustainabledevelopment.un.org/sdg10>

24. UNISDR (2015). *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction, Geneva. http://www.unisdr.org/files/43291_sendaiframeworkfordrren.pdf
25. UNFCCC (2015). *Adoption of the Paris Agreement*. The 21st session of the Conference of the Parties of the UNFCCC document, FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1. <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>
26. UNGA (2016). *New York Declaration for Refugees and Migrants*. Resolution adopted by the United Nations General Assembly on 19 September 2016, UNGA A/RES/71/1. United Nations, New York. http://www.un.org/en/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/71/1
27. UNGA (2017). *Modalities for the intergovernmental negotiations of the global compact for safe, orderly and regular migration*. Final draft of the resolution. United Nations, New York. <http://www.un.org/pga/71/wp-content/uploads/sites/40/2015/08/Global-compact-for-safe-orderly-and-regular-migration-1.pdf>

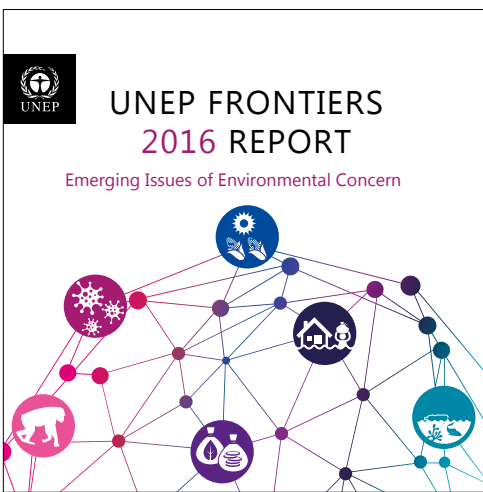
Références bibliographiques des illustrations



28. ReliefWeb (2017). *Horn of Africa: Humanitarian Impacts of Drought – Issue 1 (as of 18 July 2017)*. The United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs. http://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/HOA_drought_updates_snapshot_18July2017.pdf
29. UNCCD (2014). *Desertification: The invisible frontline*. The Secretariat of United Nations Convention to Combat Desertification, Bonn. http://www.droughtmanagement.info/literature/UNCCD_desertification_the_invisible_frontline_2014.pdf
30. 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.
31. IFAD (2010). Desertification pamphlet. International Fund for Agricultural Development, Rome. <https://www.ifad.org/documents/10180/77105e91-6f72-44ff-aa87-eedb57d730ba>
32. IDMC (2017). Internal Displacement Monitoring Centre database. <http://www.internal-displacement.org/database/>
33. Christensen, J.H., Krishna Kumar, K., Aldrian, E., An, S.-I., Cavalcanti, I.F.A., de Castro, M., Dong, W., Goswami, P., Hall, A., Kanyanga, J.K., Kitoh, A., Kossin, J., Lau, N.-C., Renwick, J., Stephenson, D.B., Xie, S.-P. and Zhou, T. (2013). Climate Phenomena and their Relevance for Future Regional Climate Change. 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.
34. UNEP (2009). *From Conflict to Peacebuilding: the role of natural resources and the environment*. United Nations Environment Programme, Geneva. http://postconflict.unep.ch/publications/pcdmb_policy_01.pdf
35. IAEA (2006). Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-economic Impacts and Recommendations to the Governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine. The Chernobyl Forum: 2003–2005, Second revised version. International Atomic Energy Agency, Vienna. <https://www.iaea.org/sites/default/files/chernobyl.pdf>
36. Normile, D. (2016). Five years after the meltdown, is it safe to live near Fukushima? *Science News*, 2 March 2016. <http://www.sciencemag.org/news/2016/03/five-years-after-meltdown-it-safe-live-near-fukushima>
37. Albert, S., Leon, J.X., Grinham, A.R., Church, J.A., Gibbes, B.R. and Woodroffe, C.D. (2016). Interactions between sea-level rise and wave exposure on reef island dynamics in the Solomon Islands. *Environmental Research Letters*, 11(5), p.054011. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/5/054011/pdf>
38. De Sherbinin, A., Levy, M., Adamo, S., MacManus, K., Yetman, G., Mara, V., Razafindrazay, L., Goodrich, B., Srebotnjak, T., Aichele, C. and Pistolesi, L. (2012). Migration and risk: net migration in marginal ecosystems and hazardous areas. *Environmental Research Letters*, 7, 045602. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/7/4/045602/pdf>
39. Cernea, M.M. (1995). Understanding and Preventing Impoverishment from Displacement: Reflections on the State of Knowledge. *Journal of Refugee Studies*, 8(3), 245-264.
40. Xu, X., Tan, Y. and Yang, G. (2013). Environmental impact assessments of the Three Gorges Project in China: Issues and interventions. *Earth-Science Reviews*, 124, 115-125. <https://www.researchgate.net/publication/260725538>





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





**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

