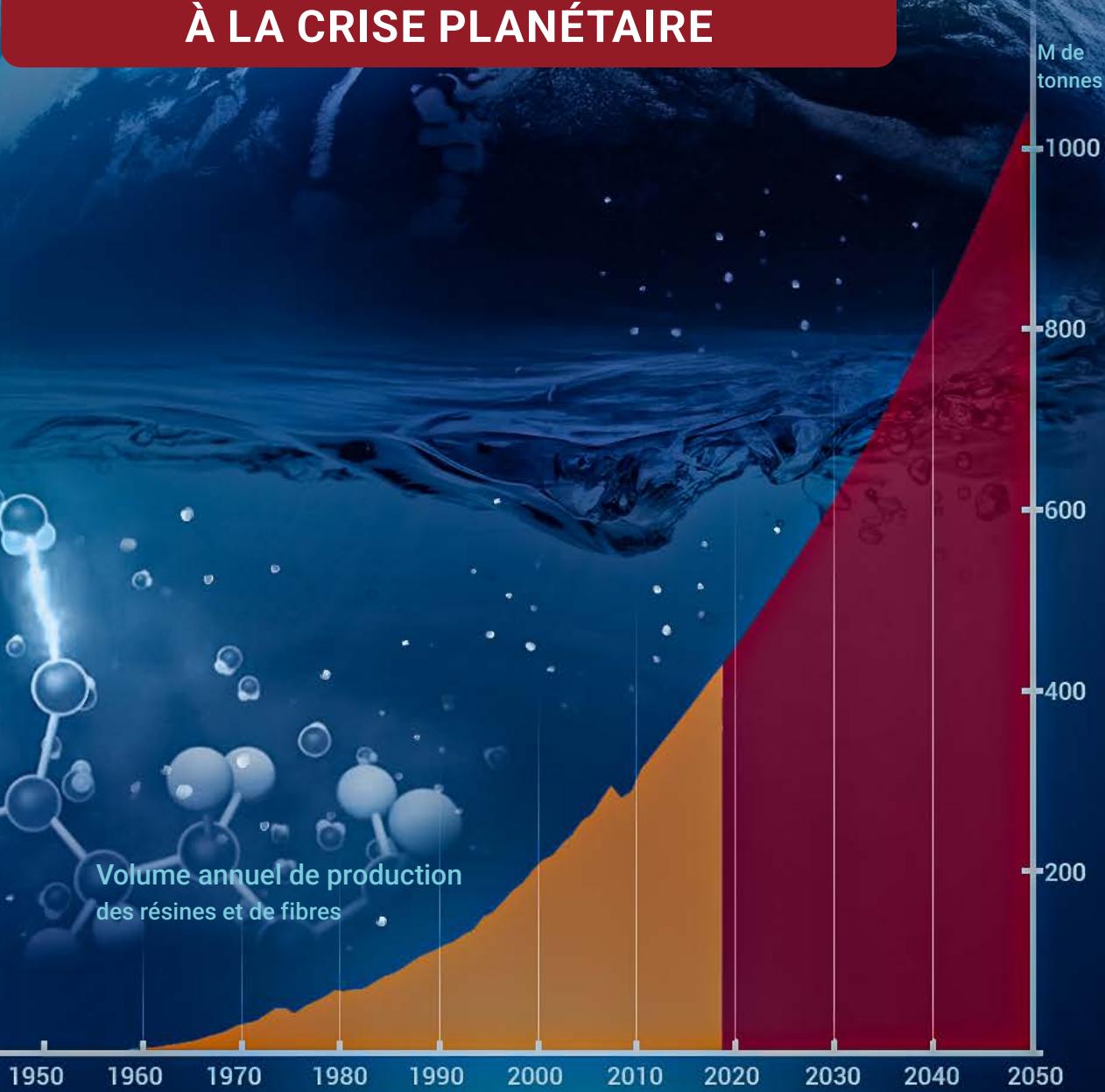


RAPPORT

LES NANOPLASTIQUES DANS LA BIOSPHÈRE

DE L'IMPACT MOLÉCULAIRE
À LA CRISE PLANÉTAIRE



RAPPORT

LES NANOPLASTIQUES DANS LA BIOSPHÈRE

DE L'IMPACT MOLÉCULAIRE
À LA CRISE PLANÉTAIRE

AUTEURS



Mouvement public international « ALLATRA »

REVUE INSTITUTIONNELLE Collaboration académique



UNIVERSIDAD
CATÓLICA
BOLIVIANA

Université Catholique Bolivienne « San Pablo » - UCB
Faculté d'Ingénierie Environnementale et de Recherche



DICYT

Departamento de Investigación,
Ciencia y Tecnología - UAJMS.

Université Autonome Juan Misael Saracho - UAJMS
Département de Recherche, Science et Technologie

COLLABORATEUR SCIENTIFIQUE



**CREATIVE
SOCIETY**

Le Projet International « Société Créatrice »

TABLE DES MATIÈRES

Résumé.....	5
Conséquences de la pollution plastique : les micro- et nanoplastiques (MNPs) comme nouveau facteur de crise planétaire.....	7
Estimations quantitatives et tendances de la production mondiale de déchets plastiques.....	7
Le Grand Vortex de déchets du Pacifique.....	12
Processus de formation des particules de micro- et nanoplastiques.....	12
Dispersion des MNPs dans l'environnement.....	18
Conséquences environnementales et climatiques de la pollution par les micro- et nanoplastiques.....	23
Comment les MNPs perturbent les écosystèmes au niveau moléculaire.....	23
Impact des micro- et nanoplastiques sur le climat.....	46
Impact des micro- et nanoplastiques sur la santé humaine.....	71
Les micro- et nanoplastiques comme nouveaux facteurs de risque dans les épidémies du XXI ^e siècle.....	71
Mécanismes moléculaires de la toxicité des MNPs : dommages à l'ADN, aux mitochondries et aux membranes cellulaires.....	72
Rôle des MNPs dans le vieillissement prématûr et le développement du cancer.....	84
Déstabilisation du système hormonal sous l'influence des MNPs.....	87
Charge électrostatique des nanoplastiques comme facteur clé de leur toxicité accrue pour l'organisme humain.....	93
Effets systémiques des MNPs sur les organes humains et les systèmes fonctionnels.....	100
Dommages au système respiratoire causés par l'inhalation de MNPs.....	101
Neurotoxicité des MNPs : atteintes du système nerveux central et périphérique.....	102
Rôle des MNPs dans la pathogénèse des maladies cardiovasculaires.....	114
Dysfonctionnements gastro-intestinaux dû à l'exposition aux MNPs.....	116
Impact des MNPs sur le système immunitaire.....	117
Propriétés oncogènes des MNPs : mécanismes de mutation et progression métastatique.....	120
Effets des MNPs sur le métabolisme du calcium et la structure osseuse.....	121
Troubles reproductifs associés à l'exposition aux MNPs : infertilité et dysfonction érectile.....	122
Pénétration des MNP à travers la barrière placentaire et impact sur le fœtus en développement.....	126
Conséquences de l'exposition aux MNPs et lien avec les malformations congénitales.....	130
Conclusions et perspectives : est-il possible de réduire l'impact des MNPs sur la santé humaine ?.....	133
Analyse des stratégies actuelles de réduction de la pollution plastique.....	134
Technologies d'élimination des gros déchets plastiques dans les écosystèmes aquatiques.....	134
Méthodes actuelles de dépollution des micro- et nanoplastiques.....	139
Approche de la communauté scientifique ALLATRA pour lutter contre l'épidémie de micro- et nanoplastiques.....	142
Technologies des générateurs d'eau atmosphérique (GEA) pour la dépollution des océans des MNPs....	142
Approche scientifique innovante pour réduire la toxicité des micro- et nanoplastiques.....	148
Le facteur X : rôle des micro- et nanoplastiques dans la dynamique des catastrophes naturelles.....	151
Conclusions : les nanoplastiques, un défi qu'on ne peut ignorer.....	171
Références.....	173

RÉSUMÉ

« Si la Terre tenait un journal, le dernier siècle serait écrit à l'encre noire sous le titre : L'Ère du plastique ». Des particules microscopiques infiltrant les cellules des organismes vivants aux gigantesques nappes de déchets dérivant dans les océans, les plastiques sont désormais gravés dans les archives géologiques de la planète. Mais à quel prix ?

Chaque année, plus de 400 millions de tonnes de déchets plastiques sont produites dans le monde, dont environ 11 millions de tonnes se déversent dans les océans. À ce jour, plus de 200 millions de tonnes se sont accumulées dans les milieux marins. Des analyses d'échantillons d'eaux de surface révèlent que la masse de plastique y dépasse désormais celle du zooplancton d'un facteur six. Si la tendance actuelle se poursuit, d'ici 2050, la masse totale des plastiques présents dans les océans dépassera celle de l'ensemble des poissons.

Bien que les plastiques mettent des centaines, voire des milliers d'années à se décomposer, ils se fragmentent sous l'effet des vagues, de l'eau salée et du rayonnement ultraviolet en particules minuscules appelées microplastiques et nanoplastiques. Ces particules peuvent parcourir des milliers de kilomètres, transportées par les aérosols marins et les précipitations, franchissant les frontières, les continents et les océans. Elles s'accumulent dans les forêts et se retrouvent dans notre alimentation et notre eau potable. Des microplastiques ont été détectés jusque dans les zones les plus reculées de la planète, de la fosse des Mariannes jusqu'au sommet de l'Everest.

Ce rapport propose une évaluation analytique approfondie de l'impact de la pollution plastique sur l'environnement, la santé humaine et la résilience des systèmes vitaux de nos sociétés. Il examine le comportement des micro- et nanoplastiques porteurs de charges électrostatiques et de composés chimiques toxiques, ainsi que leurs effets sur les écosystèmes. Une attention particulière est accordée à leur rôle dans l'acidification des océans, la déstabilisation des chaînes alimentaires et les menaces pour la biodiversité. Le rapport avance l'hypothèse que les micro- et nanoplastiques pourraient modifier certaines propriétés physico-chimiques de l'eau, ce qui contribuerait à un réchauffement accéléré des océans et à l'aggravation des catastrophes naturelles.

L'un des enjeux les plus urgents et les plus préoccupants abordés dans ce rapport est l'impact des micro- et nanoplastiques (MNPs) sur la santé humaine. En raison de leur taille extrêmement réduite, ces particules peuvent franchir les barrières biologiques, provoquant un stress oxydatif, des dommages à l'ADN, des réactions inflammatoires et des dysfonctionnements cellulaires. Le rapport souligne une corrélation possible entre l'exposition aux MNPs et l'augmentation de la prévalence des maladies neurodégénératives et neuropsychiatriques. Il montre que l'exposition aux MNPs durant les périodes prénatale et postnatale peut altérer les fonctions cognitives et la santé mentale des enfants, constituant ainsi une menace grave pour les générations futures.

L'incidence croissante des maladies liées aux MNPs dégrade déjà la qualité de vie, en particulier dans les régions fortement exposées à la pollution plastique.

Le rapport identifie des zones géographiques actuellement soumises à des risques accrus, ainsi que d'autres qui demeurent pour l'instant relativement épargnées. Si la situation continue de se détériorer et qu'aucune mesure de protection efficace n'est mise en place, des populations pourraient être contraintes de migrer à la recherche de conditions de vie plus sûres. Cela risquerait d'entraîner des vagues de migrations incontrôlées, accentuant les tensions sociales, mettant sous pression les infrastructures urbaines et déstabilisant les économies.

Ainsi, le défi environnemental que représente la pollution plastique évoluera progressivement en un enjeu macroéconomique et géopolitique.

Le rapport insiste sur la nécessité urgente de traiter la pollution aux MNPs, en proposant une nouvelle perspective sur leur répartition, leurs impacts et leurs effets. Son originalité réside dans une approche interdisciplinaire qui intègre des données physiques, chimiques et biologiques sur la pollution plastique. Cette approche rend le rapport pertinent pour les scientifiques de nombreux domaines, engagés dans la recherche de solutions durables en vue d'un avenir plus sûr pour la planète et pour l'humanité.

CONSÉQUENCES DE LA POLLUTION PLASTIQUE : LES MICRO- ET NANOPLASTIQUES (MNPS) COMME NOUVEAU FACTEUR DE CRISE PLANÉTAIRE

Les plastiques sont devenus une composante indissociable de la vie moderne. Emballages et ustensiles, vêtements et chaussures, produits d'hygiène et dispositifs médicaux, moyens de transport et de communication – la plupart des objets du quotidien sont fabriqués à partir de plastique. Toutefois, les plastiques n'existent pas uniquement sous forme d'objets visibles à l'œil nu : ils se dégradent également en particules microscopiques appelées microplastiques et nanoplastiques. Les microplastiques sont définis comme des particules de moins de 5 mm, souvent visibles à l'œil nu. Les nanoplastiques, en revanche, mesurent moins d'un micromètre (soit un millionième de mètre) et sont pour la plupart invisibles, même au microscope standard.

Les matériaux plastiques existent sous de nombreuses formes, mais tous sont constitués de polymères – des substances naturelles ou synthétiques composées de longues chaînes moléculaires. Les polymères possèdent des propriétés chimiques uniques qui leur confèrent une grande durabilité et une résistance exceptionnelle à la dégradation dans l'environnement.

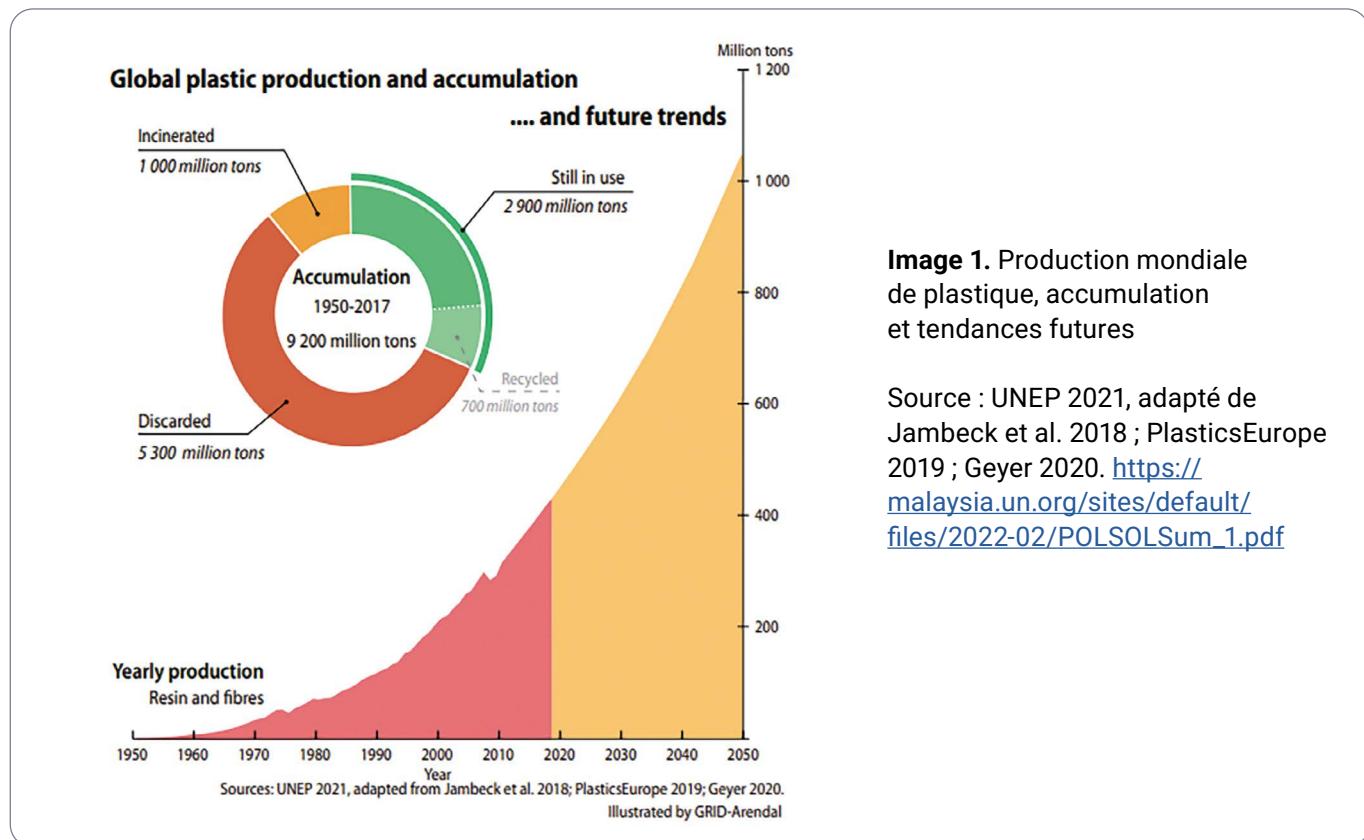
Ainsi, grâce à leur durabilité, leur polyvalence et leur faible coût de production, les plastiques sont devenus le matériau de prédilection pour la fabrication de masse, en particulier pour les objets à usage unique.¹ Toutefois, une mauvaise gestion des déchets plastiques a fait de ces matériaux les polluants les plus abondants de la planète en termes de volume.

Estimations quantitatives et tendances de la production mondiale de déchets plastiques

Depuis les années 1950, environ 9 200 millions de tonnes de plastique ont été produites dans le monde. Parmi celles-ci, environ 2 900 millions de tonnes sont encore utilisées aujourd'hui, dont 2 700 millions de tonnes de plastique vierge et environ 200 millions de tonnes de matériaux recyclés. Environ 5 300 millions de tonnes ont été enfouies dans des décharges, tandis que 1 000 millions de tonnes ont été incinérées. De plus, entre 1 750 et 2 500 millions de tonnes sont considérées comme « mal gérées », c'est-à-dire susceptibles d'avoir pénétré l'environnement par des voies non contrôlées (Image 1).

¹Karlsruhe Institute of Technology. Blind spots in the monitoring of plastic waste https://www.kit.edu/kit/english/pi_2022_097_blind-spots-in-the-monitoring-of-plastic-waste.php

À ce jour, près de 640 millions de tonnes d'additifs chimiques ont été incorporés dans les produits plastiques.² D'après le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE),³ plus de 400 millions de tonnes de déchets plastiques sont désormais produites chaque année à l'échelle mondiale.



Seuls environ 9 % des déchets plastiques sont recyclés, 19 % sont incinérés, et le reste demeure dans l'environnement, notamment dans les décharges et les océans (Image 2).⁴

La répartition des méthodes d'élimination	Monde, 2023
Recyclé	9%
Incinéré	19%
Mal géré	22%
Enfoui	49%

Image 2. Déchets plastiques annuels par méthode de traitement, Monde, 2000 à 2023
 Source : Our World in Data <https://ourworldindata.org/grapher/plastic-fate>

Chaque année, environ 11 millions de tonnes de plastique se déversent dans les océans du monde,⁵ ce qui équivaut à plus d'un camion poubelle de plastique déversé dans l'océan chaque minute.

²Schmidt, C. et al. A multidisciplinary perspective on the role of plastic pollution in the triple planetary crisis. Environment International 193, 109059 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.109059>

³United Nations Environment Programme (UNEP) Beat plastic pollution <https://www.unep.org/interactives/beat-plastic-pollution> (Accessed: 1 May 2025)

⁴How Much of the World's Plastic Waste Actually Gets Recycled? <https://www.visualcapitalist.com/how-much-plastic-gets-recycled>

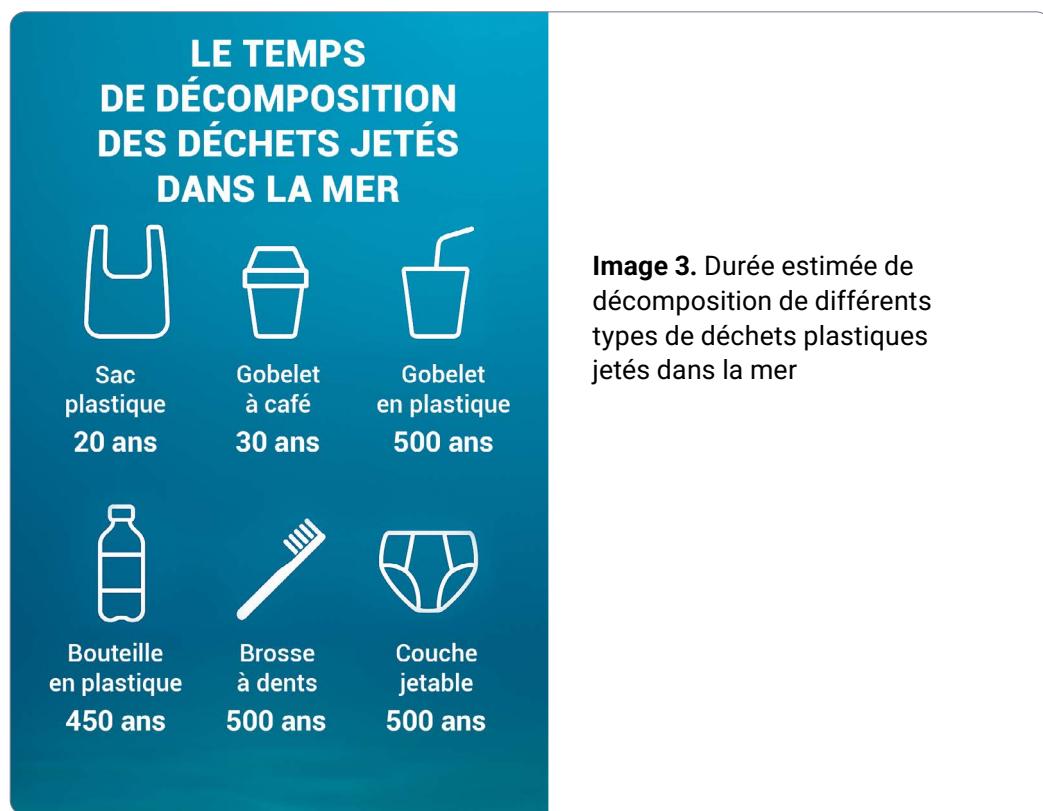
⁵Jenna R. Jambeck et al., Plastic waste inputs from land into the ocean. Science 347, 768-771 (2015). <https://doi.org/10.1126/science.1260352>

Actuellement, plus de 200 millions de tonnes de déchets plastiques de grande taille (macroplastiques) et environ 35 540 tonnes de microplastiques se sont accumulées dans les océans.⁶ Les estimations du volume annuel de déchets plastiques provenant de sources terrestres et entrant dans les écosystèmes aquatiques varient en fonction des méthodes d'analyse utilisées. Dans un scénario classique (« Business As Usual » — BAU), sans intervention, ces volumes pourraient presque tripler — passant de 9 à 14 millions de tonnes en 2016, à 23 à 37 millions de tonnes par an d'ici 2040.

Une autre méthode d'analyse prévoit un quasi-doublement de la quantité de plastique atteignant les océans — de 19 à 23 millions de tonnes en 2016 à 53 millions de tonnes d'ici 2030.⁷

Comme l'indiquent les recherches, si les tendances actuelles se poursuivent, d'ici 2050, les océans contiendront jusqu'à 12 000 millions de tonnes de plastique,⁸ soit une quantité comparable à la biomasse totale des poissons marins, estimée à environ 10 000 millions de tonnes.⁹

Selon le type, les plastiques mettent entre 100 et 1 000 ans à se décomposer (Image 3). Dans les environnements marins, en particulier dans les profondeurs sombres et froides de l'océan, leur dégradation est encore plus lente.¹⁰



⁶Eriksen, M. et al. Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea. PLoS ONE 9, e111913 (2014). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913>

⁷United Nations Environment Programme (2021). From Pollution to Solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution. Nairobi. <https://www.unep.org/resources/pollution-solution-global-assessment-marine-litter-and-plastic-pollution>

⁸Geyer, R., Jambeck, J. R. & Law, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. Sci. Adv. 3, e1700782 (2017). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>

⁹Irigoin, X. et al. Large mesopelagic fishes biomass and trophic efficiency in the open ocean. Nat Commun 5, 3271 (2014). <https://doi.org/10.1038/ncomms4271>

¹⁰Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C. & Barlaz, M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. Phil. Trans. R. Soc. B 364, 1985–1998 (2009). <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>

À l'exception de la part qui a été incinérée, pratiquement tous les plastiques ayant été introduits dans l'environnement existent encore aujourd'hui, soit sous forme d'objets intacts, soit sous forme de fragments.¹¹ Ces déchets ne disparaissent pas et continuent de s'accumuler. La situation est comparable à une benne à ordures que l'on remplirait en permanence sans jamais la vider. Se demander à quoi ressemblerait cette benne après un mois permet de saisir l'ampleur du problème de l'accumulation mondiale des déchets plastiques.

Le Grand Vortex de déchets du Pacifique

Les déchets plastiques accumulés dans l'eau des océans et flottant à leur surface sont capturés par les courants marins et entraînés vers les gyres océaniques centraux, formant d'immenses amas appelés « vortex de déchets ».

Le Grand Vortex de déchets du Pacifique représente la plus grande concentration de plastiques sur la planète, et il connaît une croissance continue (Image 4). Ce vortex de déchets s'étend sur une vaste zone entre l'Amérique du Nord et le Japon. Les observations indiquent qu'en 2018, sa superficie était d'environ 618 000 milles carrés,¹² bien que cette valeur soit sujette à des variations dues aux courants océaniques et à la variabilité saisonnière.

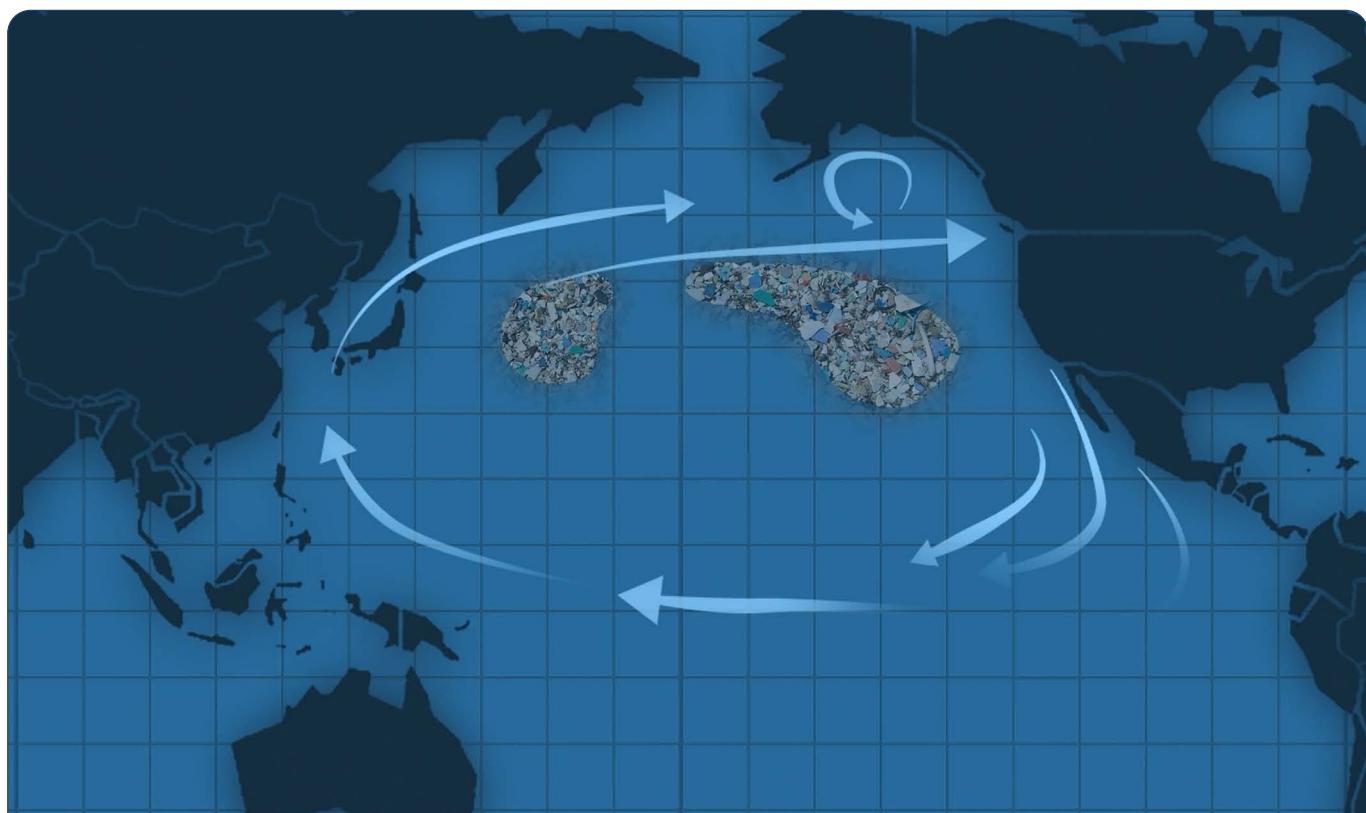


Image 4. Schéma de l'accumulation de plastique dans l'océan Pacifique

¹¹Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C. & Barlaz, M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Phil. Trans. R. Soc. B* 364, 1985–1998 (2009). <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>

¹²Lebreton, L., Slat, B., Ferrari, F. et al. Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. *Sci Rep* 8, 4666 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22939-w>

Les études montrent que jusqu'à 80 %¹³ du contenu des vortex de déchets est constitué de plastiques.¹⁴ Le vortex contient au moins 80 000 tonnes de déchets plastiques.¹⁵ Pourtant, cela ne représente que la partie visible du problème. On estime qu'environ 94 % du plastique présent dans l'océan coule au fond marin,¹⁶ où d'énormes quantités de déchets peuvent rester dissimulées et continuer à s'accumuler.

L'étendue exacte du Grand Vortex de déchets du Pacifique demeure inconnue, en partie parce que le gyre subtropical du Pacifique Nord est si vaste qu'il échappe à une cartographie scientifique complète avec les technologies actuelles.

Dynamique de l'accumulation du plastique dans l'océan

Les mesures instrumentales montrent une augmentation exponentielle de la taille du Grand Vortex de déchets du Pacifique. Entre 2015 et 2022, la masse moyenne des déchets plastiques dans cette zone a été multipliée par cinq.¹⁷ Ce qui inquiète tout particulièrement, c'est l'augmentation par un facteur dix du nombre de petits fragments plastiques au cours de la même période, signe d'une dégradation rapide des déchets plastiques de grande taille.

Le Grand Vortex de déchets du Pacifique a, de fait, formé un « septième continent » sur Terre. Toutefois, il est important de souligner que ce phénomène n'est pas unique. À ce jour, les scientifiques ont identifié cinq grandes zones d'accumulation de déchets dans les océans du globe¹⁸ : deux dans l'Atlantique, deux dans le Pacifique, et une dans l'océan Indien (Image 5).¹⁹

¹³Derraik, J. G. B. The pollution of the marine environment by plastic debris: a review. *Marine Pollution Bulletin* 44, 842–852 (2002). [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00220-5](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00220-5)

¹⁴Morishige, C., Donohue, M. J., Flint, E., Swenson, C. & Woolaway, C. Factors affecting marine debris deposition at French Frigate Shoals, Northwestern Hawaiian Islands Marine National Monument, 1990–2006. *Marine Pollution Bulletin* 54, 1162–1169 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.04.014>

¹⁵Lebreton, L., Slat, B., Ferrari, F. et al. Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. *Sci Rep* 8, 4666 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22939-w>

¹⁶Eunomia. Plastics in the Marine Environment. <https://eunomia.eco/reports/plastics-in-the-marine-environment>

¹⁷Lebreton, L. et al. Seven years into the North Pacific garbage patch: legacy plastic fragments rising disproportionately faster than larger floating objects. *Environ. Res. Lett.* 19, 124054 (2024). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad78ed>

¹⁸Van Sebille, E., England, M. H. & Froyland, G. Origin, dynamics and evolution of ocean garbage patches from observed surface drifters. *Environ. Res. Lett.* 7, 044040 (2012). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044040>

¹⁹Garbage Patches. Marine Debris Program. NOAA <https://marinedebris.noaa.gov/discover-marine-debris/garbage-patches>

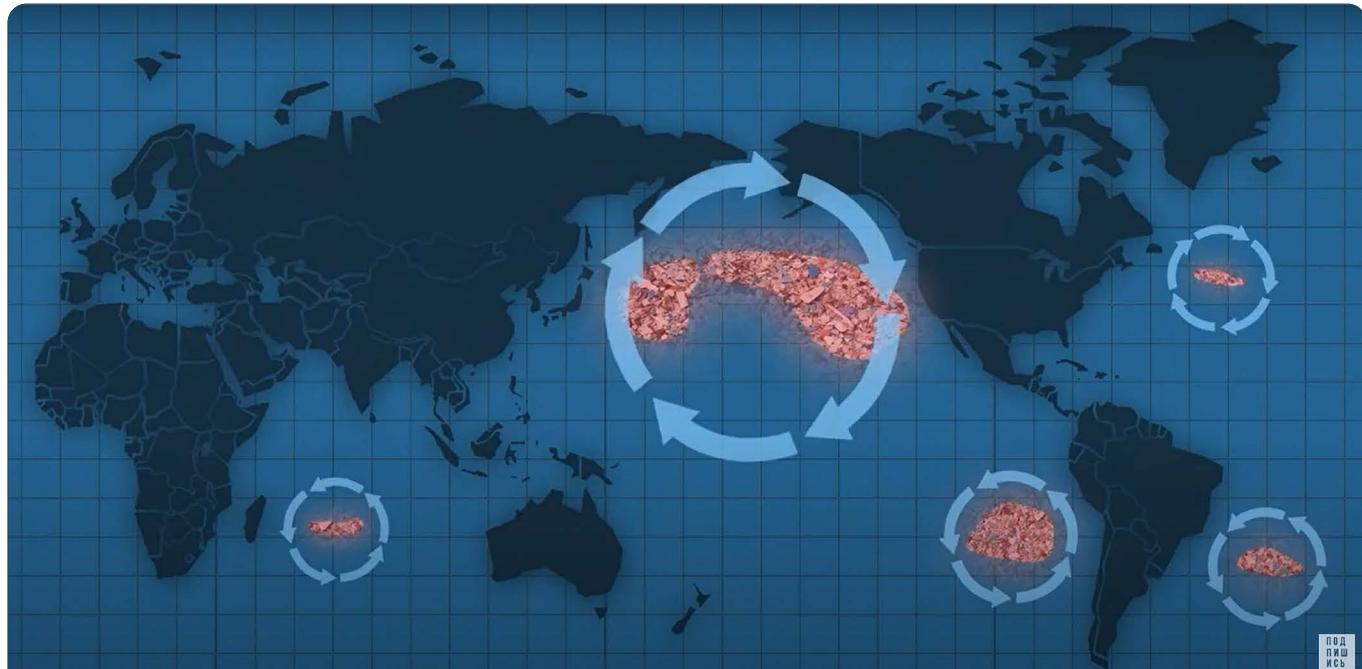


Image 5. Représentation schématique des cinq principaux vortex de déchets dans les océans du monde : deux dans l'Atlantique, deux dans le Pacifique, et une dans l'océan Indien. Des millions de tonnes de plastiques et d'autres déchets d'origine humaine circulent dans les océans. Ces vortex de déchets croissent à un rythme alarmant

Processus de formation des particules de micro- et nanoplastiques

Les déchets plastiques sont hautement résistants à la biodégradation. Toutefois, sous l'effet des vagues, de l'eau salée et de la lumière du soleil, ils se fragmentent progressivement en particules plus petites – micro- et nanoplastiques,²⁰ souvent invisibles à l'œil nu. Ces particules conservent leur structure polymère,²¹ et le processus de dégradation se poursuit jusqu'à l'échelle nanométrique (Images 6 et 7). Ainsi, en contournant les mécanismes naturels de dégradation, les déchets plastiques deviennent un élément permanent des écosystèmes de la planète.

De plus, les micro- et nanoplastiques contiennent des substances chimiques dangereuses ajoutées lors de la fabrication des plastiques.

66

« Nous savons aujourd'hui que les plastiques contiennent environ 16 000 substances chimiques. Parmi elles, plus de 4 200 sont connues pour être persistantes dans l'environnement, s'accumuler dans les organismes vivants, se transporter sur de longues distances, ou présenter un danger potentiel », a déclaré Annika Jahnke, chercheuse et chimiste environnementale au Centre Helmholtz pour la Recherche Environnementale (UFZ).²²

²⁰Yu, R.-S. & Singh, S. Microplastic Pollution: Threats and Impacts on Global Marine Ecosystems. *Sustainability* 15, 13252 (2023). <https://doi.org/10.3390/su151713252>

²¹Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C. & Barlaz, M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Phil. Trans. R. Soc. B* 364, 1985–1998 (2009). <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>

²²Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ. Environmental Impacts of Plastics: Moving beyond the perspective on waste. https://www.ufz.de/index.php?en=36336&webc_pm=44/2024

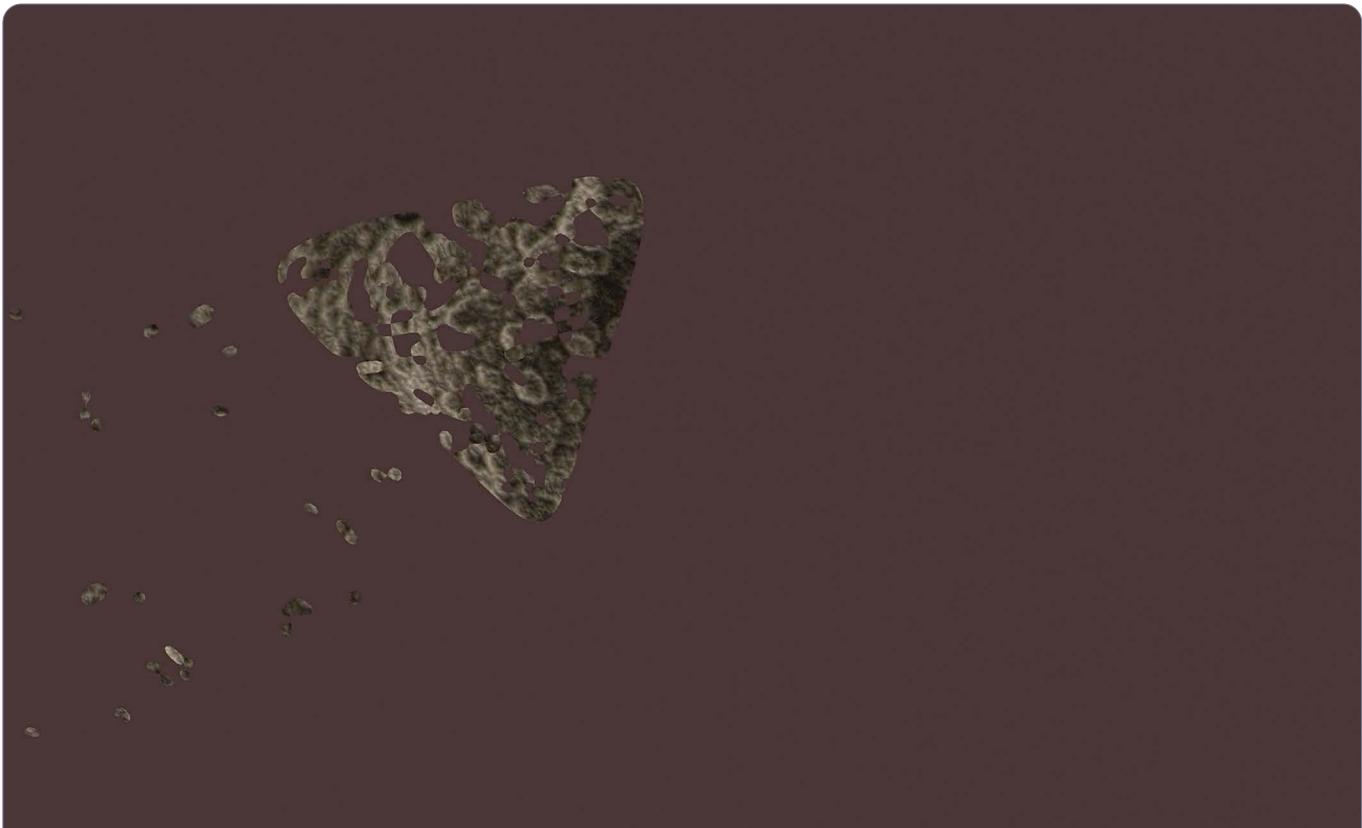


Image 6. Fragmentation des particules plastiques en nanoparticules tout en conservant leur structure polymérique

(a)

Image 7. Microscopie électronique en transmission de nanoplastiques de polyéthylène d'intérêt environnemental, dégradés par UV, issus de microplastiques vieillissants prélevés dans l'océan Atlantique Nord

Source : Gigault, J. et al.
Current opinion:
What is a nanoplastic?
Environmental Pollution
235, 1030–1034 (2018).
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.024>

A transmission electron micrograph (TEM) showing a cluster of dark, irregularly shaped nanoplastics against a light gray background. A scale bar at the bottom left indicates 100 nm. The image is labeled '(a)' in the top left corner.

Dispersion des micro- et nanoplastiques dans l'océan

Les plus fortes concentrations de plastiques se trouvent dans les régions des vortex de déchets. Ces décharges océaniques fonctionnent comme des usines à ciel ouvert, où des micro- et nanoplastiques sont générés en continu. À l'image d'un virus se propageant dans l'organisme par la circulation sanguine, les microplastiques sont transportés par les courants marins à travers l'ensemble des océans du globe, ce qui souligne l'ampleur mondiale de ce problème.

Malgré les difficultés techniques liées à la détection des microplastiques, qui compliquent leur quantification précise dans les océans, les modèles théoriques permettent d'en estimer l'ampleur.

Des microplastiques sont retrouvés dans presque tous les échantillons d'eau de mer, tandis que, dans certaines zones, leurs concentrations dépassent de plusieurs dizaines de fois la moyenne mondiale.

Les gyres océaniques contribuent à la dispersion généralisée des microplastiques, jusque dans des régions reculées comme l'Arctique. Des études sur des carottes de glace ont révélé que les niveaux de pollution microplastique dans l'océan Arctique sont 100 fois supérieurs à ceux observés au nord de l'Écosse ou dans le gyre subtropical du Pacifique Nord.²³ Ces résultats soulignent à la fois la gravité et la dimension transfrontalière du problème.

La majorité des études mondiales sur la pollution plastique des milieux marins se concentrent sur la couche de surface de l'océan. Selon les estimations, en 2019, cette couche contenait entre 82 et 358 trillions de particules plastiques.²⁴

Cependant, de plus en plus d'éléments indiquent que, dans les zones abyssales ainsi que dans les sédiments des fonds marins, le nombre de particules microplastiques pourrait atteindre des trillions incalculables.²⁵

Les plastiques légers ont tendance à flotter, tandis que les plastiques plus denses ou colonisés par des organismes marins coulent vers le fond.²⁶ On estime qu'environ 50 % des déchets plastiques urbains sont plus denses que l'eau de mer, ce qui leur permet de se déposer rapidement. Une fois qu'ils ont atteint le fond marin, ils sont transportés par les courants profonds et s'accumulent dans les fosses et les dépressions océaniques. Des microplastiques ont même été retrouvés au fond de la fosse des Mariannes — le point le plus profond connu de l'océan (Images 8 et 9).²⁷

²³Obbard, R. W. et al. Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic Sea ice. *Earth's Future* 2, 315–320 (2014).
<https://doi.org/10.1002/2014EF000240>

²⁴Eriksen, M. et al. A growing plastic smog, now estimated to be over 170 trillion plastic particles afloat in the world's oceans—Urgent solutions required. *PLoS ONE* 18, e0281596 (2023). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281596>

²⁵Eunomia. Plastics in the Marine Environment. <https://eunomia.eco/reports/plastics-in-the-marine-environment>

²⁶Lusher, A. (2015). Microplastics in the Marine Environment: Distribution, Interactions and Effects. In: Bergmann, M., Gutow, L., Klages, M. (eds) *Marine Anthropogenic Litter*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_10

²⁷Peng, X. et al. Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean. *Geochem. Persp. Let.* 9, 1–5 (2018).
<https://doi.org/10.7185/geochemlet.1829>

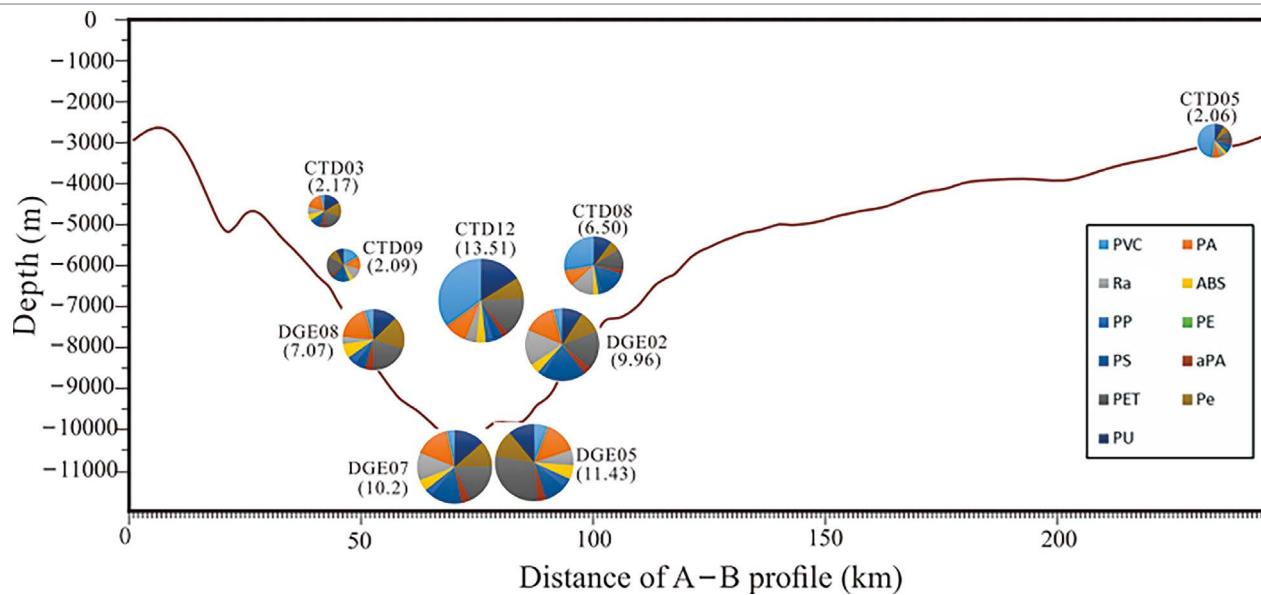


Image 8. Profil des concentrations et compositions de microplastiques dans des échantillons d'eau prélevés dans la fosse des Mariannes. Les diagrammes circulaires représentent les compositions des microplastiques, et les nombres entre parenthèses indiquent les concentrations en microplastiques, exprimées en particules par litre. PVC – polychlorure de vinyle ; PA – polyamide ; Ra – viscose ; ABS – acrylonitrile-butadiène-styrène ; PP – polypropylène ; PE – polyéthylène ; PS – polystyrène ; aPA – polyamide aromatique ; PET – polyéthylène téréphthalate ; Pe – polyester ; PU – polyuréthane. L'axe X correspond à la ligne transversale allant du point A (12° N, $142,5^{\circ}$ E) au point B ($9,8^{\circ}$ N, $141,43^{\circ}$ E).

Source : Peng, X. et al. *Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean*. *Geochem. Persp. Let.* 9, 1–5 (2018). <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1829>

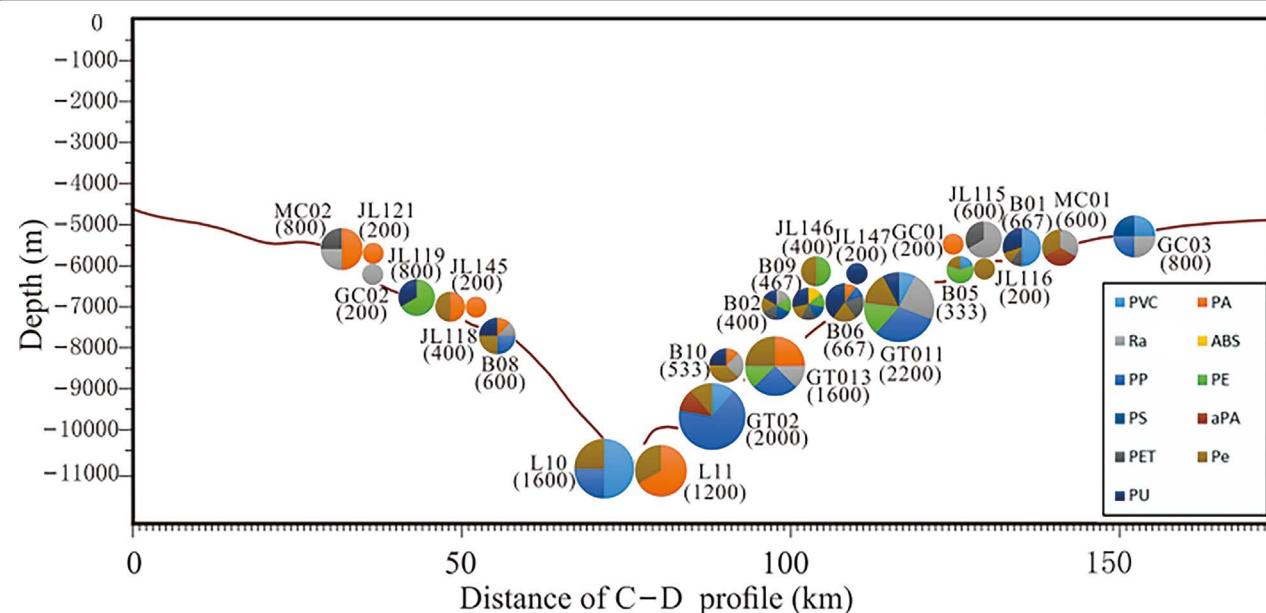


Image 9. Profil des concentrations et compositions de microplastiques dans des échantillons de sédiments prélevés dans la fosse des Mariannes. Les diagrammes circulaires représentent la composition des microplastiques, et les nombres entre parenthèses indiquent les concentrations en microplastiques, exprimées en particules par litre. PVC – polychlorure de vinyle ; PA – polyamide ; Ra – viscose ; ABS – acrylonitrile-butadiène-styrène ; PP – polypropylène ; PE – polyéthylène ; PS – polystyrène ; aPA – polyamide aromatique ; PET – polyéthylène téréphthalate ; Pe – polyester ; PU – polyuréthane. L'axe X correspond à la ligne transversale allant du point C (12° N, $141,9^{\circ}$ E) au point D ($10,5^{\circ}$ N, $141,3^{\circ}$ E).

Source : Peng, X. et al. *Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean*. *Geochem. Persp. Let.* 9, 1–5 (2018). <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1829>

En réalité, le principal site d'accumulation des microplastiques n'est pas la surface de l'océan, mais le fond marin des grandes profondeurs. Progressivement, l'ensemble du plancher océanique se retrouve recouvert d'une couche de plastiques. Toutefois, les données disponibles sur la pollution microplastique dans l'océan sont probablement sous-estimées, et la situation réelle pourrait être considérablement plus grave. « **Tout le monde n'a pas accès à des instruments sophistiqués et coûteux, ni aux outils d'échantillonnage nécessaires** », explique Melanie Bergmann, biologiste à l'Institut Alfred Wegener en Allemagne. Elle précise que jusqu'à 80 à 90 % des particules microplastiques marines pourraient échapper aux techniques d'échantillonnage classiques, car elles sont trop petites pour être détectées (Image 12).²⁸

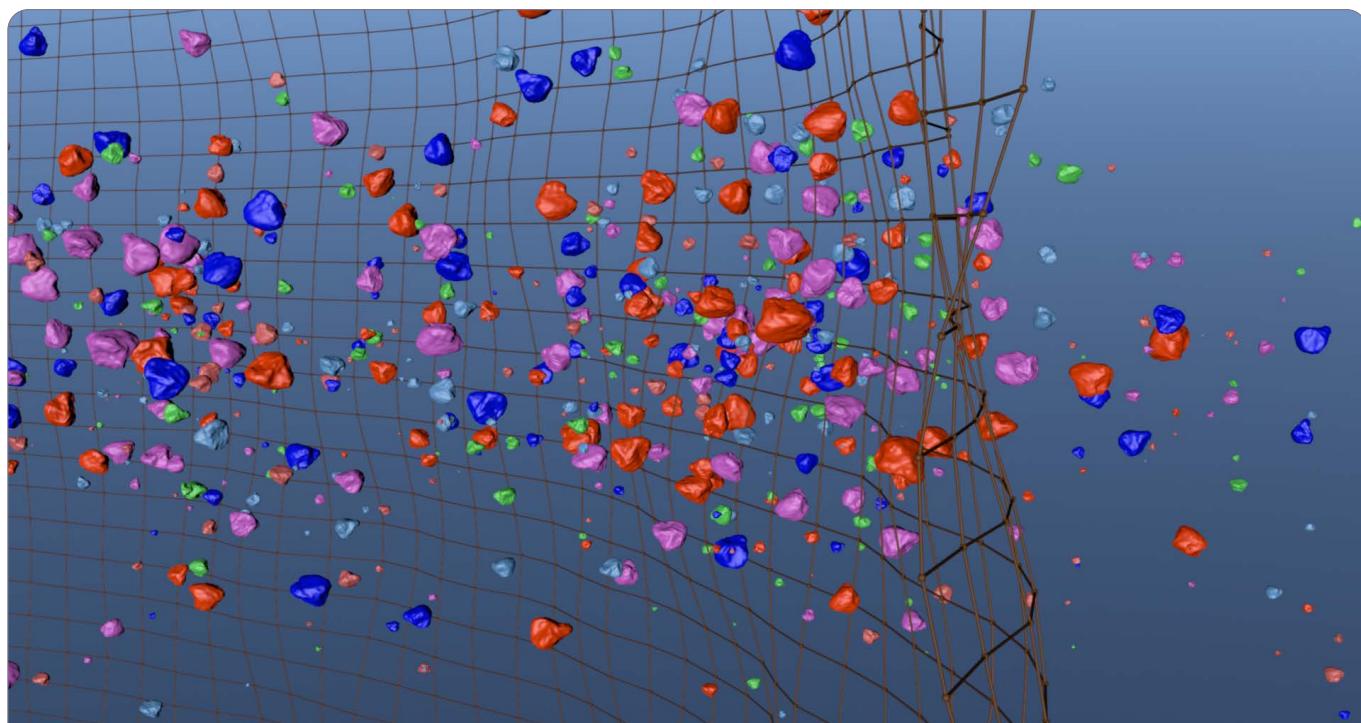


Image 10. Représentation schématique des méthodes analytiques imparfaites de capture des micro- et nanoplastiques

²⁸Microplastics pose risk to ocean plankton, climate, other key Earth systems. Mongabay. <https://news.mongabay.com/2023/10/microplastics-pose-risk-to-ocean-plankton-climate-other-key-earth-systems>

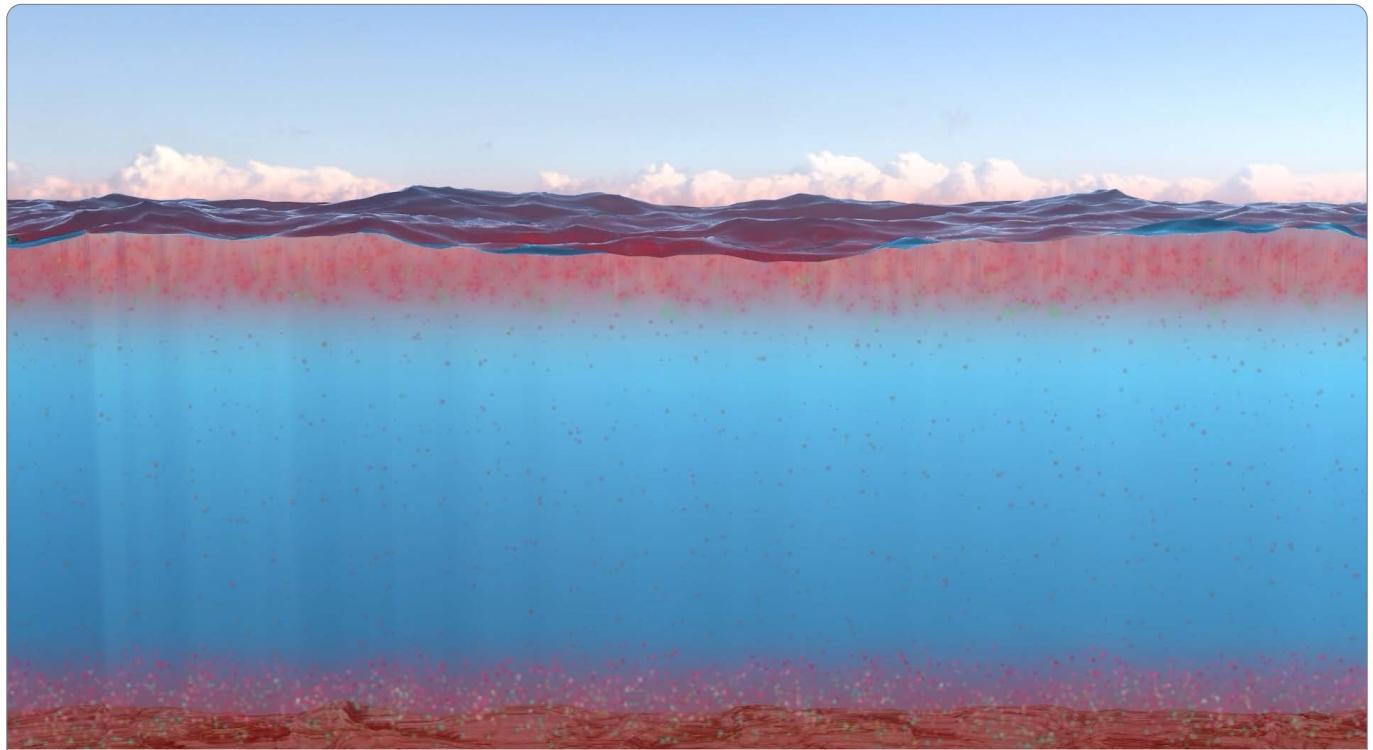


Image 11. Représentation schématique de la pollution par les micro- et nanoplastiques des couches de surface et de fond

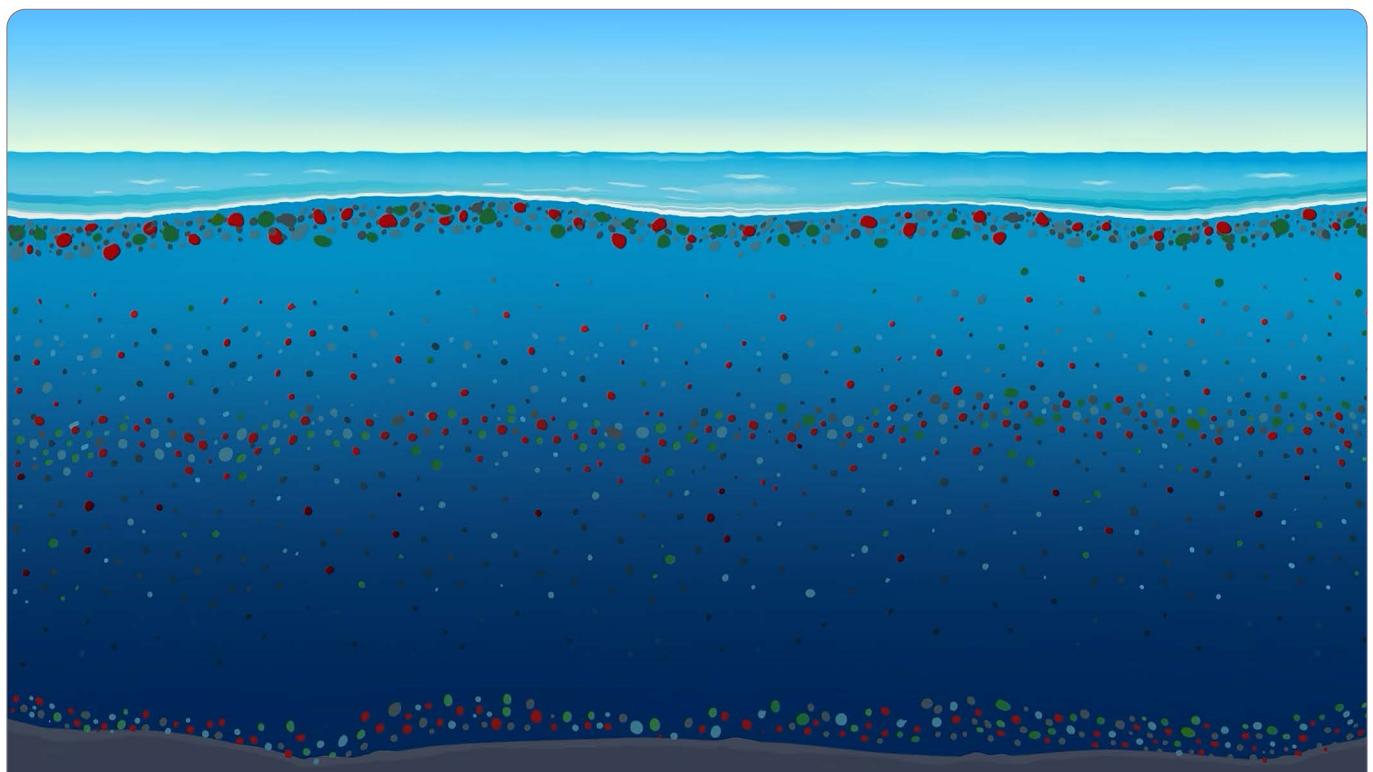


Image 12. Représentation schématique de la localisation des micro- et nanoplastiques dans les couches de surface, de fond et de la thermocline

Outre la pollution des couches de surface et de fond (Image 11), les concentrations de micro- et nanoplastiques augmentent de manière significative dans la zone de thermocline²⁹ (Image 12) – une couche d'eau caractérisée par un changement brutal de température. Le fort gradient de densité présent dans cette zone entraîne le piégeage prolongé des particules plastiques. On peut visualiser l'océan comme un gâteau en couches, où chaque couche possède une température et une densité distinctes, et où les microplastiques s'accumulent aux frontières entre ces couches.

Par ailleurs, les microplastiques sont également dispersés dans l'océan par l'intermédiaire d'organismes vivants qui les ingèrent, les digèrent partiellement, puis les excrètent.³⁰

Dispersion des MNPs dans l'environnement

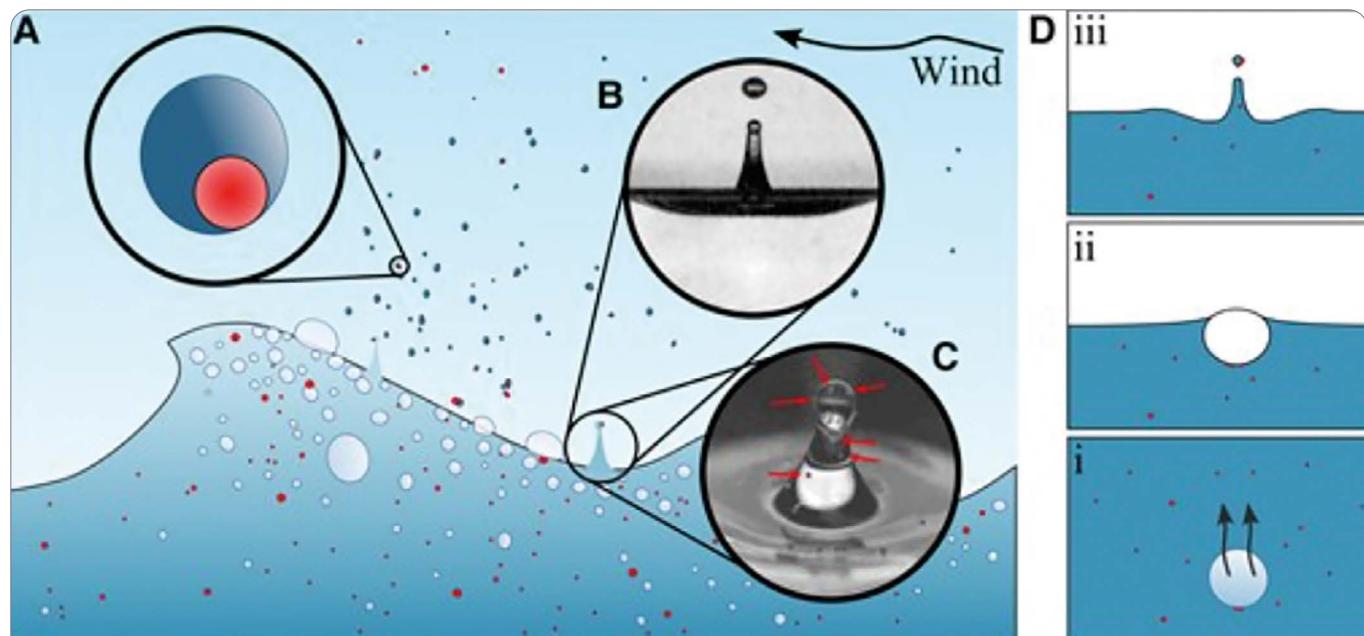


Image 13. Schéma des processus responsables de l'éjection de microplastiques hors de l'océan

A) Les microplastiques (en rouge / couleur plus foncée) présents dans l'océan sont transportés dans l'atmosphère par les gouttelettes issues des embruns marins. B) L'éclatement des bulles produit de petites gouttelettes ou aérosols, tels que des jet drops (gouttes de jet). C) Les microplastiques contenus dans le liquide peuvent être entraînés dans ces jet drops. Les flèches indiquent des fragments de microplastiques de 100 µm. Les gouttelettes formées peuvent être emportées par le vent et ainsi transporter des microplastiques dans l'atmosphère. Le liquide finit par s'évaporer, laissant les fragments de plastique en suspension. D) Les processus physiques responsables de l'éjection de microplastiques lors de l'éclatement des bulles commencent par la capture des particules au fur et à mesure que la bulle remonte D_i). Arrivée à la surface D_{ii}), la bulle adopte éventuellement une forme d'équilibre qui, lors de son éclatement, concentre les ondes capillaires à sa base, formant des jet drops D_{iii}) qui emportent les microplastiques.

Source : Shaw, D. B., Li, Q., Nunes, J. K. & Deike, L. *Ocean emission of microplastic*. PNAS Nexus 2, pgad296 (2023). <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad296>

²⁹Tikhonova, D. A., Karetnikov, S. G., Ivanova, E. V. & Shalunova, E. P. The Vertical Distribution of Microplastics in the Water Column of Lake Ladoga. *Water Resour* 51, 146–153 (2024). <https://doi.org/10.1134/S009780782370063X>

³⁰Dawson, A. L. et al. Turning microplastics into nanoplastics through digestive fragmentation by Antarctic krill. *Nat Commun* 9, 1001 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03465-9>

Lorsque l'eau s'évapore,³¹ les microplastiques s'élèvent dans l'atmosphère depuis la surface de l'océan.³² En outre, une combinaison d'embruns, de vents et de vagues génère des bulles d'air dans l'eau, lesquelles contiennent des microplastiques. Lors de l'éclatement de ces bulles, les particules sont projetées dans l'atmosphère (Image 13). Chaque année, environ 136 000 tonnes de microplastiques³³ sont transportées vers les zones côtières par les seuls vents marins. Jusqu'à 25 millions de tonnes métriques de micro- et nanoplastiques sont ainsi transportées chaque année sur des milliers de kilomètres par les vents marins, les embruns, la neige et le brouillard, franchissant pays, continents et océans.

66

« L'air est un milieu bien plus dynamique que l'eau. Par conséquent, les micro- et nanoplastiques peuvent atteindre beaucoup plus rapidement les régions les plus reculées et encore largement préservées de notre planète », explique la coauterice Dr Melanie Bergmann de l'Institut Alfred Wegener (AWI). Une fois présents dans ces zones, les particules peuvent affecter le climat local de surface ainsi que la santé des écosystèmes.³⁴

Les microplastiques ont été détectés dans de nombreux environnements – depuis la surface des océans jusqu'aux sédiments des grands fonds, des terres agricoles jusqu'aux plus hauts sommets montagneux, ainsi que dans la glace marine, les lacs et les rivières. Ils ont été identifiés chez 1 300 espèces aquatiques et terrestres, allant des invertébrés à la base des chaînes alimentaires jusqu'aux grands prédateurs, avec des preuves d'impact à tous les niveaux d'organisation biologique – de la cellule à l'écosystème. Les microplastiques sont omniprésents dans notre alimentation, notre eau potable et l'air que nous respirons (voir image 14). Ils ont été retrouvés dans de nombreux tissus et organes humains, et les premiers indices de leurs effets potentiels³⁵ commencent à émerger.

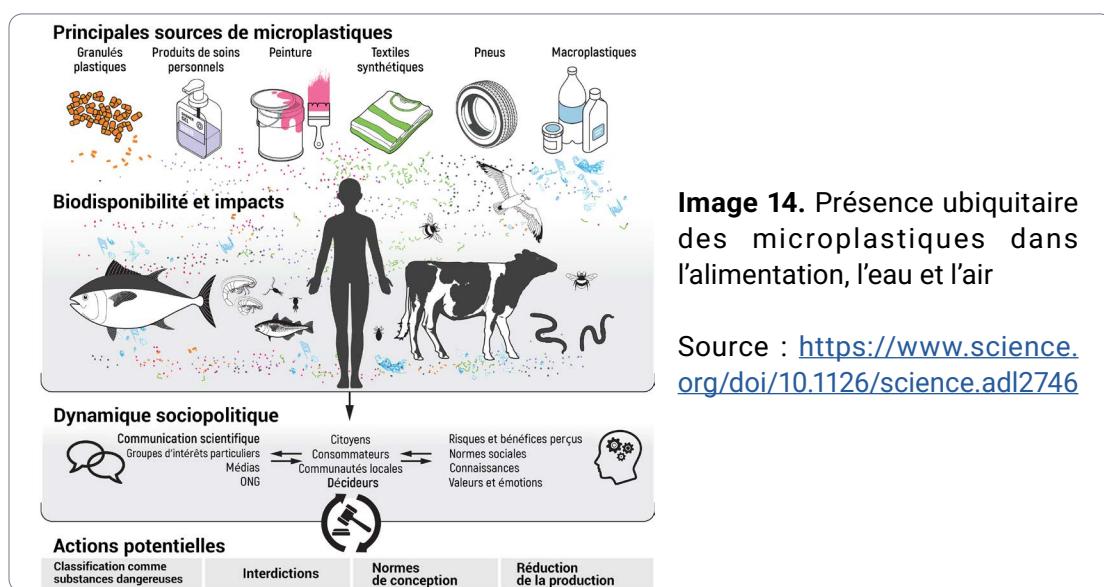


Image 14. Présence ubiquitaire des microplastiques dans l'alimentation, l'eau et l'air

Source : <https://www.science.org/doi/10.1126/science.adl2746>

³¹Shaw, D. B., Li, Q., Nunes, J. K. & Deike, L. Ocean emission of microplastic. PNAS Nexus 2, pgad296 (2023). <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad296>

³²Deike, L., Reichl, B. G. & Paulot, F. A Mechanistic Sea Spray Generation Function Based on the Sea State and the Physics of Bubble Bursting. AGU Advances 3, e2022AV000750 (2022). <https://doi.org/10.1029/2022AV000750>

³³Allen, S. et al. Examination of the ocean as a source for atmospheric microplastics. PLoS ONE 15, e0232746 (2020). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232746>

³⁴Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research. Micro- and nanoplastic from the atmosphere is polluting the ocean.

<https://www.awi.de/en/about-us/service/press/single-view/mikro-und-nanoplastik-aus-der-atmosphaere-belastet-meere.html>

³⁵Thompson, R. C. et al. Twenty years of microplastic pollution research—what have we learned? Science 386, eadl2746 (2024).

<https://doi.org/10.1126/science.adl2746>

Ainsi, le déplacement des microplastiques vers des régions éloignées, voire polaires, pourrait s'expliquer par une combinaison de voies atmosphériques et marines. Il est donc essentiel de comprendre les interactions entre l'atmosphère et l'océan afin de déterminer quelles tailles de particules sont transportées et en quelles quantités.

Par exemple, un groupe de chercheurs a récemment découvert des granulés plastiques à surface hydrophile (attirant l'eau)³⁶ dans des nuages au sommet de montagnes au Japon. Ils ont ensuite analysé ces échantillons et conclu que les nuages plus bas et plus denses contiennent une plus grande quantité de microplastiques. La présence de polymères jouant le rôle de noyaux de condensation joue un rôle clé dans la formation rapide des nuages, ce qui pourrait à terme influencer le climat global.³⁶

Les particules plastiques présentes dans les nuages retiennent davantage d'eau, ce qui retarde les précipitations. Lorsque la pluie survient, elle devient alors plus intense, car une plus grande quantité d'eau s'est accumulée dans les nuages. De plus, les microplastiques exposés aux rayons ultraviolets et à l'eau filtrée des nuages présentent une surface plus rugueuse, ce qui favorise l'accumulation de plomb, de mercure et de groupes oxygénés³⁷ à leur surface.

L'atmosphère transporte principalement de petites particules de microplastiques, ce qui en fait une voie de transport beaucoup plus rapide, susceptible de provoquer des dépôts importants dans une grande diversité d'écosystèmes. Les données scientifiques indiquent que les forêts agissent comme des barrières naturelles contre les microplastiques transportés par le vent. Les feuilles, les branches et les troncs capturent les particules microplastiques qui se déposent à leur surface. Ainsi, les particules transportées par le vent et les précipitations ont tendance à rester piégées dans la végétation ou à se déposer au sol.

Le flux d'air limité sous la canopée dense des forêts favorise une accumulation durable de ces particules dans les zones boisées. Les feuilles de la canopée constituent un réservoir à long terme pour les microplastiques en suspension dans l'air.³⁸ Des études ont montré que, de l'automne 2017 à l'été 2019, plus de 1 000 tonnes de particules plastiques sont tombées avec les précipitations sur 11 parcs nationaux et réserves naturelles de l'ouest des États-Unis. Cette quantité suffirait à produire 120 millions de bouteilles en plastique.³⁹ Une situation similaire est observée dans d'autres régions du monde. Par exemple, les forêts de *Quercus serrata* au Japon, couvrant une superficie d'environ 32 500 km², capturent chaque année environ 420 trillions de particules microplastiques en suspension dans l'air⁴⁰ dans leurs canopées.⁴⁰

³⁶Wang, Y., Okochi, H., Tani, Y. et al. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation. *Environ Chem Lett* 21, 3055–3062 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x>

³⁷Busse, H. L., Ariyasena, D. D., Orris, J. & Freedman, M. A. Pristine and Aged Microplastics Can Nucleate Ice through Immersion Freezing. *ACS EST Air* 1, 1579–1588 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsestaair.4c00146>

³⁸Sunaga, N., Okochi, H., Niida, Y. et al. Alkaline extraction yields a higher number of microplastics in forest canopy leaves: implication for microplastic storage. *Environ Chem Lett* 22, 1599–1606 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01725-3>

³⁹Brahney, J., Hallerud, M., Heim, E., Hahnberger, M. & Sukumaran, S. Plastic rain in protected areas of the United States. *Science* 368, 1257–1260 (2020). <https://doi.org/10.1126/science.aaz5819>

⁴⁰Sunaga, N., Okochi, H., Niida, Y. & Miyazaki, A. Alkaline extraction yields a higher number of microplastics in forest canopy leaves: implication for microplastic storage. *Environ Chem Lett* 22, 1599–1606 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01725-3>

Contrairement aux forêts, les villes présentent une meilleure déposition des micro- et nanoplastiques, en raison d'une meilleure ventilation et de la présence de particules plus lourdes issues des gaz d'échappement des véhicules et du smog industriel. Aujourd'hui, l'air des forêts est plus saturé en nanoplastiques que celui des mégapoles.

Le monde a changé ! Désormais, lorsque les gens se baignent dans l'océan, broncent sur une plage, courent le long d'un littoral ou dans un parc, ou encore se promènent en forêt pour leur santé, ils exposent en réalité leur corps à une contamination supplémentaire par les microplastiques. Des microplastiques provenant d'Afrique et d'Amérique du Nord ont été retrouvés dans des lieux reculés et en apparence préservés, comme les Pyrénées françaises. Cela témoigne de la distribution mondiale des microplastiques, transportés sur de grandes distances par les courants aériens et les précipitations.

Les micro- et nanoplastiques pénètrent dans les milieux aquatiques urbains par le ruissellement des eaux pluviales, les rejets industriels et les eaux de pluie qui captent les particules présentes dans l'atmosphère. Par exemple, un seul lavage de tissus synthétiques peut libérer jusqu'à 1,5 million de particules microplastiques dans les eaux usées.⁴¹ Une fois dans les égouts, ces particules finissent par rejoindre les rivières et les océans, où elles sont ingérées par les poissons et d'autres organismes aquatiques. En analysant les déchets retrouvés dans les rivières et les paysages environnants, des chercheurs ont estimé que seulement dix systèmes fluviaux transportent entre 88 % et 95 % des plastiques déversés par les fleuves dans l'océan.⁴²

Dans une autre étude, des chercheurs ont réévalué les hypothèses généralement admises sur les plastiques transportés par les rivières et ont conclu que la quantité réelle de déchets plastiques présents dans les cours d'eau pourrait être supérieure de 90 % à ce que l'on pensait auparavant.⁴³

Le plastique est également présent dans la plupart des grands lacs du monde. En réalité, la densité de déchets plastiques dans les lacs pourrait même dépasser celle des plus grands vortex de déchets océaniques, et même les lacs situés dans des zones vierges contiennent des quantités significatives de résidus plastiques. Cela a été confirmé par une vaste étude internationale dirigée par Barbara Leoni et Veronica Nava de l'Université de Milano-Bicocca.⁴⁴ Selon le rapport 2021 du Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE), des microplastiques ont été retrouvés dans tous les plans d'eau douce étudiés, y compris les rivières, les lacs et les réservoirs.⁴⁵ Par exemple, des chercheurs ont découvert que près de 10 000 tonnes (ou 22 millions de livres) de déchets plastiques pénètrent chaque année dans les Grands Lacs depuis les États-Unis et le Canada.⁴⁶

⁴¹De Falco, F., Di Pace, E., Cocca, M. & Avella, M. The contribution of washing processes of synthetic clothes to microplastic pollution. *Sci Rep* 9, 6633 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43023-x>

⁴²Schmidt, C., Krauth, T. & Wagner, S. Export of Plastic Debris by Rivers into the Sea. *Environ. Sci. Technol.* 51, 12246–12253 (2017). <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b02368>

⁴³Valero, D., Belay, B. S., Moreno-Rodenas, A., Kramer, M. & Franca, M. J. The key role of surface tension in the transport and quantification of plastic pollution in rivers. *Water Research* 226, 119078 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119078>

⁴⁴Nava, V., Chandra, S., Aherne, J. et al. Plastic debris in lakes and reservoirs. *Nature* 619, 317–322 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06168-4>

⁴⁵United Nations Environment Programme. Monitoring Plastics in Rivers and Lakes: Guidelines for the Harmonization of Methodologies. (2020) <https://www.unep.org/resources/report/monitoring-plastics-rivers-and-lakes-guidelines-harmonization-methodologies>

⁴⁶Hoffman, M. J. & Hittinger, E. Inventory and transport of plastic debris in the Laurentian Great Lakes. *Marine Pollution Bulletin* 115, 273–281 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.11.061>

En fin de compte, les microplastiques reviennent aux êtres humains par la consommation de poissons et de fruits de mer.

Des scientifiques italiens ont également découvert que les fruits et légumes contiennent des millions de particules microplastiques. Des concentrations élevées ont été relevées dans les pommes, les poires, les carottes, les pommes de terre, la laitue et le brocoli. Il est à noter que les fruits contiennent 2 à 3 fois plus de particules microplastiques que les légumes, allant de 52 000 particules par gramme dans la laitue à 223 000 particules par gramme dans les pommes.⁴⁷

Une étude a révélé que 81 % des 159 échantillons d'eau du robinet prélevés dans le monde contiennent des microplastiques.⁴⁸ D'autres recherches confirment ces résultats, ayant également détecté des particules microplastiques dans l'eau minérale en bouteille. Fait intéressant, le nombre de particules était à peu près le même dans les bouteilles en verre et en polyéthylène téréphthalate (PET), avec des concentrations atteignant 6 292 particules par litre.^{49, 50, 51}

Des chercheurs de l'Université de Newcastle, en Australie, ont mené une étude⁵² afin d'estimer la quantité de plastiques consommée par un individu moyen. Les résultats ont montré qu'une personne ingère environ 250 grammes de plastique par an, soit l'équivalent de 50 sacs plastiques.⁵³

⁴⁷Oliveri Conti, G. et al. Micro- and nano-plastics in edible fruit and vegetables. The first diet risks assessment for the general population. *Environmental Research* 187, 109677 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109677>

⁴⁸Kosuth, M., Mason, S. A. & Wattenberg, E. V. Anthropogenic contamination of tap water, beer, and sea salt. *PLoS ONE* 13, e0194970 (2018). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194970>

⁴⁹Schymanski, D., Goldbeck, C., Humpf, H.-U. & Fürst, P. Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy: Release of plastic particles from different packaging into mineral water. *Water Research* 129, 154–162 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.11.011>

⁵⁰Oßmann, B. E. et al. Small-sized microplastics and pigmented particles in bottled mineral water. *Water Research* 141, 307–316 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.027>

⁵¹Winiarska, E., Jutel, M. & Zemelka-Wiaczek, M. The potential impact of nano- and microplastics on human health: Understanding human health risks. *Environmental Research* 251, 118535 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118535>

⁵²University of Newcastle. Plastic ingestion by people could be equating to a credit card a week.

<https://www.newcastle.edu.au/newsroom/featured/plastic-ingestion-by-people-could-be-equating-to-a-credit-card-a-week>

⁵³Senathirajah, K. et al. Estimation of the mass of microplastics ingested – A pivotal first step towards human health risk assessment. *Journal of Hazardous Materials* 404, 124004 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124004>

CONSÉQUENCES ENVIRONNEMENTALES ET CLIMATIQUES DE LA POLLUTION PAR LES MICRO- ET NANOPLASTIQUES

Comment les MNPs perturbent les écosystèmes au niveau moléculaire

Les déchets plastiques se retrouvent partout – des océans et des rivières jusqu’aux sols, à l’air, et même aux glaciers.⁵⁴ Des observations à long terme confirment que, contrairement à la matière organique végétale ou animale, le plastique ne subit pas de décomposition naturelle active. Il persiste dans l’environnement sans participer aux cycles naturels de biodégradation.⁵⁵ Conçu pour résister à la dégradation, le plastique est devenu un élément permanent de l’écosystème mondial. Ce qui était autrefois salué comme une avancée technologique est désormais une source majeure de perturbation environnementale.

Plus de 13 000 substances chimiques sont utilisées dans la production des plastiques. Parmi elles, plus de 3 200 – dont des monomères, des additifs et des auxiliaires de traitement – sont potentiellement dangereuses en raison de leurs propriétés toxiques.⁵⁶

Impact des MNPs sur les propriétés des sols et la dégradation des écosystèmes

Des études montrent que la pollution microplastique dans les écosystèmes terrestres, en particulier dans les sols agricoles, pourrait dépasser de 4 à 23 fois les niveaux observés dans les environnements océaniques,⁵⁷ ce qui indique une accumulation plastique significative dans les sols. Le plastique pénètre dans les sols par divers vecteurs, notamment les stations d’épuration, les pratiques de paillage, les dépôts atmosphériques et les produits de consommation courants. L’usage généralisé d’articles plastiques à usage unique est étroitement lié à une contamination grave des sols par les microplastiques (MPs) et les nanoplastiques (NPs). Divers facteurs, tant naturels qu’anthropiques, permettent⁵⁸ à ces minuscules particules plastiques d’infiltrer les couches du sol, perturbant des processus environnementaux essentiels.⁵⁹

Les observations confirment les effets nocifs des microplastiques sur les écosystèmes, affectant la structure et le fonctionnement des micro-organismes, des plantes et des sols (Image 15).

⁵⁴Hale, R. C., Seeley, M. E., La Guardia, M. J., Mai, L. & Zeng, E. Y. A Global Perspective on Microplastics. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 125, e2018JC014719 (2020). <https://doi.org/10.1029/2018JC014719>

⁵⁵Huang, S. et al. Plastic Waste Management Strategies and Their Environmental Aspects: A Scientometric Analysis and Comprehensive Review. *IJERPH* 19, 4556 (2022). <https://doi.org/10.3390/ijerph19084556>

⁵⁶United Nations Environment Programme. Chemicals in Plastics - A Technical Report (2023).

<https://www.unep.org/resources/report/chemicals-plastics-technical-report> (Accessed May 1, 2025)

⁵⁷Yu, H., Zhang, Y., Tan, W. & Zhang, Z. Microplastics as an Emerging Environmental Pollutant in Agricultural Soils: Effects on Ecosystems and Human Health. *Front. Environ. Sci.* 10, 855292 (2022). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.855292>

⁵⁸Rillig, M. C., Ingraffia, R. & De Souza Machado, A. A. Microplastic Incorporation into Soil in Agroecosystems. *Front. Plant Sci.* 8, 1805 (2017). <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01805>

⁵⁹Shafea, L. et al. Microplastics in agroecosystems: A review of effects on soil biota and key soil functions. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 186, 5–22 (2023). <https://doi.org/10.1002/jpln.202200136>

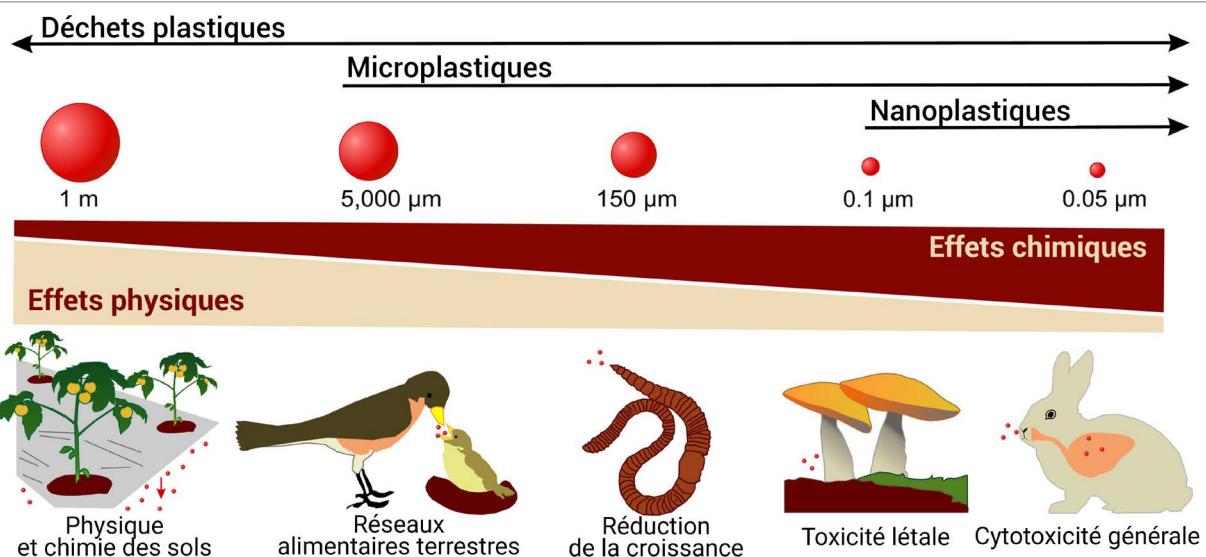
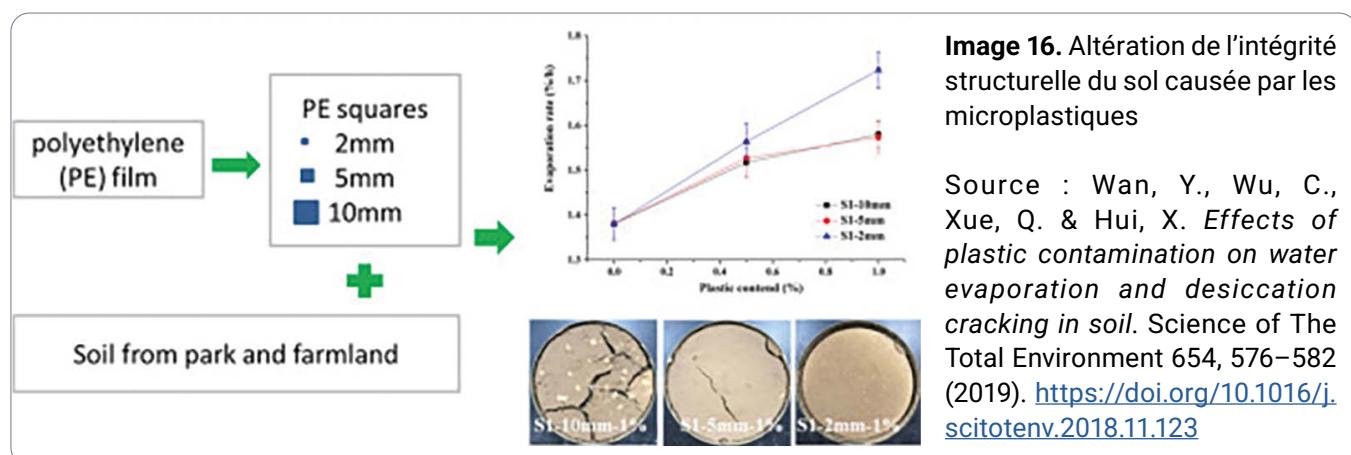


Image 15. Les microplastiques comme déclencheurs d'effets physiques et chimiques combinés

Biogéochimie des sols liée aux pratiques de paillage agricole (Steinmetz et al., 2016), ingestion par des oiseaux terrestres et continentaux (Gil-Delgado et al., 2017 ; Holland et al., 2016 ; Zhao et al., 2016), réduction de la croissance des vers de terre (Lwanga et al., 2016), toxicité létale pour les champignons (Miyazaki et al., 2014, 2015 ; Nomura et al., 2016), inflammation pulmonaire chez les mammifères (Hamoir et al., 2003 ; Oberdörster, 2000 ; Schmid & Stoeger, 2016) et large cytotoxicité des nanoplastiques (Forte et al., 2016 ; Kato et al., 2003).

Source : de Souza Machado, A. A., Kloas, W., Zarfl, C., Hempel, S. & Rillig, M. C. *Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems*. Global Change Biology 24, 1405–1416 (2018). <https://doi.org/10.1111/gcb.14020>

Des recherches menées par l'Académie Chinoise des Sciences ont révélé que la présence de particules de film plastique de tailles variées dans le sol augmente considérablement le taux d'évaporation de l'eau. L'effet est particulièrement marqué avec l'ajout de particules de 2 millimètres. Des fragments plastiques plus grands (5 à 10 mm) provoquent des fissures dans le sol, compromettant son intégrité structurelle. Ces résultats suggèrent que la pollution plastique perturbe le cycle de l'eau dans les sols, ce qui pourrait aggraver les pénuries d'eau dans les sols et affecter le transport vertical des polluants⁶⁰ (Images 16 et 17).



⁶⁰Wan, Y., Wu, C., Xue, Q. & Hui, X. Effects of plastic contamination on water evaporation and desiccation cracking in soil. *Science of The Total Environment* 654, 576–582 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.123>

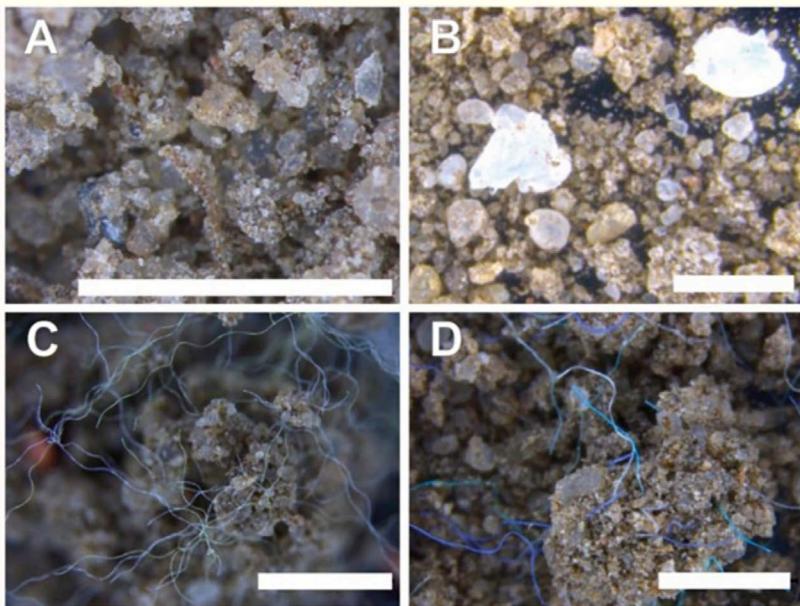


Image 17. Intégration des particules microplastiques dans l'environnement biophysique du sol

La structure du sol témoin (A) ne se distinguait pas visuellement au stéréomicroscope de celle du sol contaminé par des billes de polyamide (SI S1D). Les fragments de polyéthylène (B), les fibres de polyester (C) ou de polyacrylique (D) ont donné lieu à des caractéristiques visuellement apparentes du sol. La barre blanche dans chaque panneau représente une taille de 1 mm.

Source : De Souza Machado, A. A. et al. *Impacts of Microplastics on the Soil Biophysical Environment*. Environ. Sci. Technol. 52, 9656–9665 (2018). <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02212>

Des études confirment également les effets néfastes des plastiques sur le biote du sol – une communauté diversifiée comprenant des micro-organismes (tels que les bactéries et les champignons) et la faune (animaux microscopiques et macroscopiques). Ces organismes interagissent entre eux, avec les racines des plantes, ainsi qu'avec l'environnement alentour pour former des chaînes alimentaires du sol (Image 18), essentielles au cycle des nutriments et à la santé des plantes.

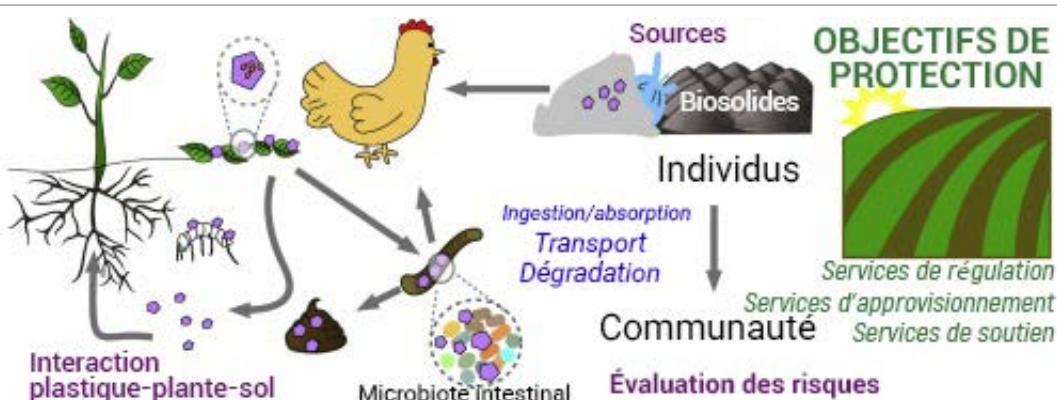


Image 18. Représentation schématique de la formation de la chaîne alimentaire du sol

Source : Ng, E.-L. et al. *An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems*. Science of The Total Environment 627, 1377–1388 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.341>

Divers types de biote terrestre servent d'indicateurs biologiques de la pollution microplastique. Tous les échantillons analysés contenaient des particules de microplastiques ainsi que des éléments potentiellement toxiques (Sb, As, Fe, Al, Se, Zn) à des concentrations variables, ce qui indique⁶¹ la toxicité potentielle des microplastiques.⁶²

Des recherches ont montré que les billes de polystyrène peuvent être ingérées par le nématode terrestre *Caenorhabditis elegans* (Image 19), ce qui suggère également que les particules de polystyrène peuvent s'accumuler dans la chaîne alimentaire du sol.⁶³

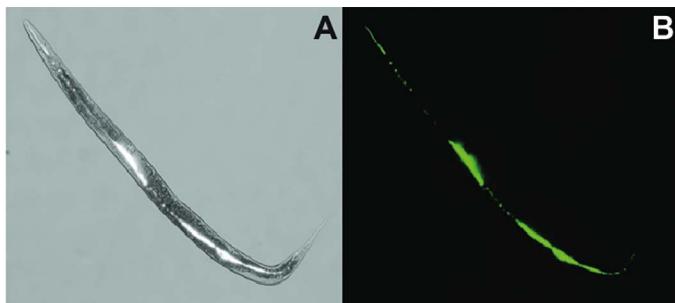


Image 19. Images en champ clair (A) et en fluorescence (B) d'un ver adulte *Caenorhabditis elegans* ayant accumulé des microsphères fluorescentes jaune-vert de 0,5 µm pendant 15 minutes à 20 °C. Les photographies ont été prises à un grossissement de ×100.

Source : Kiyama, Y., Miyahara, K. & Ohshima, Y. *Active uptake of artificial particles in the nematode Caenorhabditis elegans*. Journal of Experimental Biology 215, 1178–1183 (2012). <https://doi.org/10.1242/jeb.067199>

Le biote du sol est bien plus que le « moteur biologique de la Terre » : c'est un système multifonctionnel dont dépendent tous les écosystèmes terrestres. Son rôle dans le maintien de la vie sur notre planète est comparable à celui des océans et de l'atmosphère, comme le confirment les recherches en pédologie, en écologie et en climatologie. Toute perturbation due à une toxicité peut donc affecter de nombreux processus essentiels au sein du sol et de sa chaîne alimentaire, entraînant un déséquilibre écologique.⁶⁴

Les données indiquent que les microplastiques peuvent rapidement s'adsorber à la surface du sol en raison de leur petite taille, de leur surface spécifique élevée, de leur forte hydrophobie et de leur résistance à la biodégradation.⁶⁵ Ces propriétés facilitent leur absorption et leur accumulation dans les organismes, ce qui constitue une menace potentielle pour la santé humaine. Ce processus ne se limite pas à la couche pédologique : il s'étend également aux plantes, au sein desquelles les microplastiques continuent à exercer des effets néfastes.

Les MNPs dans les produits alimentaires

Les polluants d'origine anthropique peuvent avoir un impact considérable sur les écosystèmes, notamment lorsqu'ils pénètrent dans les systèmes végétaux. Il a été confirmé que les microplastiques sont absorbés et transportés vers différentes parties des plantes.

⁶¹Ng, E.-L. et al. An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems. Science of The Total Environment 627, 1377–1388 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.341>

⁶²Al Malki, J. S., Hussien, N. A., Tantawy, E. M., Khattab, Y. & Mohammadein, A. Terrestrial Biota as Bioindicators for Microplastics and Potentially Toxic Elements. Coatings 11, 1152 (2021). <https://doi.org/10.3390/coatings11101152>

⁶³Kiyama, Y., Miyahara, K. & Ohshima, Y. Active uptake of artificial particles in the nematode *Caenorhabditis elegans*. Journal of Experimental Biology 215, 1178–1183 (2012). <https://doi.org/10.1242/jeb.067199>

⁶⁴Al Malki, J. S., Hussien, N. A., Tantawy, E. M., Khattab, Y. & Mohammadein, A. Terrestrial Biota as Bioindicators for Microplastics and Potentially Toxic Elements. Coatings 11, 1152 (2021). <https://doi.org/10.3390/coatings11101152>

⁶⁵Sajjad, M. et al. Microplastics in the soil environment: A critical review. Environmental Technology & Innovation 27, 102408 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102408>

Les recherches montrent que les microplastiques s'accumulent dans les systèmes végétaux par divers mécanismes, exerçant des effets néfastes sur la végétation, les cultures agricoles et les produits alimentaires.

En raison de leur taille extrêmement réduite, les nanoplastiques peuvent pénétrer directement dans les tissus végétaux.⁶⁶ Les plantes absorbent les nanoplastiques à partir du milieu nutritif, après quoi ils sont transportés vers les parties aériennes par le xylème – le système vasculaire chargé d'acheminer l'eau et les nutriments des racines vers les tiges et les feuilles.

Les microplastiques qui se déposent sur les feuilles peuvent entrer par les stomates, puis descendre jusqu'aux racines via les faisceaux vasculaires. Les microplastiques comme les nanoplastiques ont des effets toxiques sur les processus physiologiques et l'activité enzymatique des plantes agricoles (Image 20).⁶⁷

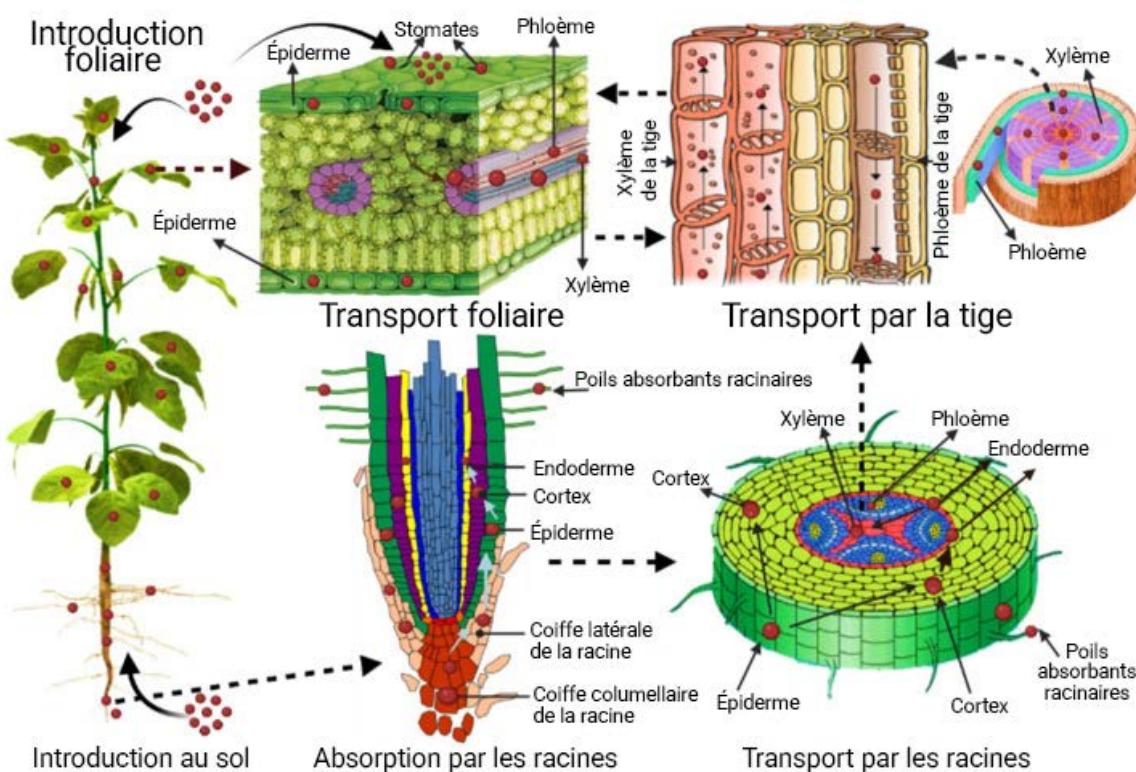


Image 20. Mécanismes d'absorption des micro- et nanoplastiques chez les plantes

Mécanisme d'absorption des plastiques par les plantes via l'application au sol, par absorption racinaire, transport du système racinaire à la tige, puis de la tige vers les feuilles et les fruits. L'application foliaire montre la pénétration du plastique par les stomates des feuilles et son transfert ultérieur vers d'autres parties de la plante. La flèche pleine indique la disponibilité du plastique pour la plante ; la flèche en pointillés indique son transport à l'intérieur de la plante.

Source : Azeem, I. et al. *Uptake and Accumulation of Nano/Microplastics in Plants: A Critical Review*. Nanomaterials 11, 2935 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano1112935>

⁶⁶Hasan, M. M. et al. Impact of microplastics on terrestrial ecosystems: A plant-centric perspective. Environmental Pollution and Management 1, 223–234 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.epm.2024.11.002>

⁶⁷Azeem, I. et al. Uptake and Accumulation of Nano/Microplastics in Plants: A Critical Review. Nanomaterials 11, 2935 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano1112935>

Le système de transport de l'eau chez les plantes peut rapidement acheminer les nanoparticules plastiques vers les tiges, les feuilles et possiblement les fruits. Des recherches sur le tabac (*Nicotiana tabacum*) montrent que les nanoplastiques de 100 nanomètres ne pénètrent pas dans les cellules végétales, tandis que des particules plus petites – de 20 à 40 nanomètres – sont effectivement absorbées.⁶⁸

Par ailleurs, certaines particules plastiques portent des charges de surface, ce qui peut renforcer leur adsorption aux racines par attraction électrostatique. Cette interaction peut affecter l'immobilisation des nutriments ou interférer avec la photosynthèse.⁶⁹ Les microplastiques chargés négativement ont plus de chances de pénétrer dans le cortex racinaire.⁷⁰

Dans les agroécosystèmes fortement contaminés par ces particules, des études rapportent un ralentissement de la croissance des plantes,⁷¹ ainsi que des effets à court terme et transitoires sur la germination des graines et le développement racinaire.⁷²

Des études confirment la présence de microplastiques dans le miel disponible dans le commerce, qu'il soit produit de manière industrielle ou artisanale. Des analyses supplémentaires ont révélé une présence généralisée de microplastiques dans les inflorescences de diverses espèces végétales.^{73,74}

Ces dernières années, l'état des populations mondiales d'abeilles a connu un déclin marqué. Des recherches suggèrent que l'un des facteurs sous-estimés pourrait être la contamination environnementale par les micro- et nanoplastiques. Des études indiquent que les abeilles « collectent » des microplastiques dans l'air, l'eau, les plantes et le sol, puis les rapportent dans leurs ruches. Les abeilles recueillent le nectar et le pollen des fleurs, et puisent de l'eau dans des sources naturelles – toutes contenant déjà des particules microplastiques. Les poils fins qui recouvrent le corps des abeilles agissent comme des « pièges » naturels pour ces particules. Les particules plastiques s'accumulent également sur leurs pattes, notamment dans les articulations et entre les segments, lorsqu'elles entrent en contact avec les surfaces végétales, le sol, l'eau ou même la ruche elle-même.

66

« L'abeille domestique est un excellent bioindicateur de la contamination environnementale car elle est ubiquitaire, couverte de poils qui capturent les contaminants et les particules présentes dans l'air, sensible aux polluants, et dotée d'une grande mobilité ainsi que d'un large rayon de vol, entre autres ». ⁷⁵

⁶⁸Bandmann, V., Müller, J. D., Köhler, T. & Homann, U. Uptake of fluorescent nano beads into BY2-cells involves clathrin-dependent and clathrin-independent endocytosis. *FEBS Letters* 586, 3626–3632 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2012.08.008>

⁶⁹Lian, J. et al. Do polystyrene nanoplastics affect the toxicity of cadmium to wheat (*Triticum aestivum* L.)? *Environmental Pollution* 263, 114498 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114498>

⁷⁰Li, W. et al. Uptake and effect of carboxyl-modified polystyrene microplastics on cotton plants. *Journal of Hazardous Materials* 466, 133581 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133581>

⁷¹Azeem, I. et al. Uptake and Accumulation of Nano/Microplastics in Plants: A Critical Review. *Nanomaterials* 11, 2935 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11112935>

⁷²Bosker, T., Bouwman, L. J., Brun, N. R., Behrens, P. & Vijver, M. G. Microplastics accumulate on pores in seed capsule and delay germination and root growth of the terrestrial vascular plant *Lepidium sativum*. *Chemosphere* 226, 774–781 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.163>

⁷³Liebezeit, G. & Liebezeit, E. Non-pollen particulates in honey and sugar. *Food Additives & Contaminants: Part A* 30, 2136–2140, 2013 <https://doi.org/10.1080/19440049.2013.843025>

⁷⁴Basaran, B. et al. Microplastics in honey from Türkiye: Occurrence, characteristic, human exposure, and risk assessment. *Journal of Food Composition and Analysis* 135, 106646 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106646>

⁷⁵Alma, A. M., de Groot, G. S. & Buteler, M. Microplastics incorporated by honeybees from food are transferred to honey, wax and larvae. *Environmental Pollution* 320, 121078 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121078>

Les micro- et nanoplastiques pénètrent également dans l'organisme de l'abeille à travers la cuticule – la couche externe de son exosquelette. Une fois à l'intérieur, les particules plastiques atteignent le cerveau en seulement trois jours, entraînant des altérations de la mémoire, de l'orientation spatiale et des fonctions cognitives essentielles à la recherche de nourriture et à la navigation.⁷⁶ L'impact des microplastiques sur le cerveau réduit également la capacité des abeilles à restaurer leur mémoire. Cela est particulièrement préoccupant, car les abeilles se repèrent en utilisant des repères environnementaux familiers. Les nanoplastiques présents dans le cerveau des abeilles altèrent davantage leur capacité à se souvenir des sources de nectar, réduisent leur réactivité aux odeurs florales et perturbent leur faculté à retrouver le chemin de la ruche. Ces dysfonctionnements cognitifs réduisent directement l'efficacité de la pollinisation et peuvent déstabiliser l'ensemble de la colonie.⁷⁶

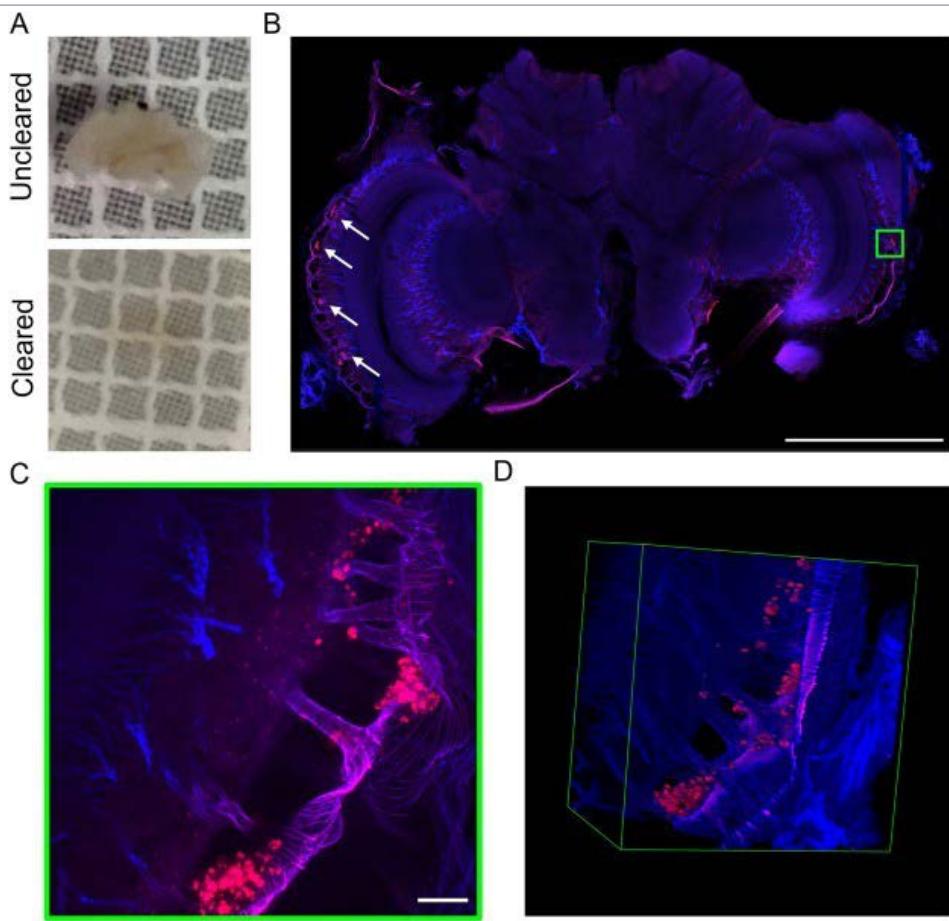


Image 21. Détection de quantités significatives de microplastiques dans le cerveau de l'abeille domestique

A) Photographies d'un cerveau disséqué avant et après clarification par la méthode iDISCO.

B) Plan unique (profondeur ~ 200 µm) d'une reconstruction 3D obtenue par TPFM de l'ensemble du cerveau à l'aide d'un objectif ×10, avec une résolution de $0,51 \times 0,51 \times 2 \mu\text{m}^3$. En bleu = signal d'autofluorescence du tissu ; en rouge = microplastiques fluorescents rouges (indiqués par des flèches blanches). Barre d'échelle = 1 000 µm.

C) Zoom haute résolution de la zone d'intérêt verte en B, acquis avec un objectif ×63. L'image est une projection en intensité maximale d'une pile de 150 µm de profondeur, acquise avec une résolution de $0,17 \times 0,17 \times 1 \mu\text{m}^3$. Barre d'échelle = 20 µm.

D) Rendu 3D de la pile d'images de C. Dimensions = $170 \times 170 \times 150 \mu\text{m}^3$.

Source : Pasquini, E. et al. *Microplastics reach the brain and interfere with honey bee cognition*. Science of The Total Environment 912, 169362 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169362>

⁷⁶Pasquini, E. et al. Microplastics reach the brain and interfere with honey bee cognition. Science of The Total Environment 912, 169362 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169362>

Une fois à l'intérieur du corps de l'abeille, les nanoparticules de plastique provoquent également des lésions intestinales, affaiblissent le système immunitaire et augmentent la sensibilité aux infections virales – des facteurs susceptibles d'entraîner la mort des abeilles même en l'absence de toxicité plastique aiguë.^{75,77} De plus, les fragments de plastique s'accumulent non seulement dans les abeilles elles-mêmes, mais aussi dans le miel, la cire et les larves, créant un cycle fermé de contamination plastique au sein de la ruche.⁷⁵

Cela représente une menace potentiellement grave non seulement pour les populations d'abeilles, mais aussi pour la sécurité alimentaire mondiale. Les abeilles jouent un rôle essentiel de polliniseurs, et leur déclin a un impact direct sur les rendements agricoles.

Les lésions cérébrales, la diminution de la masse corporelle et l'immunité affaiblie réduisent l'activité de pollinisation, ce qui, selon les chercheurs, pourrait aggraver la crise de la production alimentaire mondiale.⁷⁷ Les abeilles fonctionnent comme des bioindicateurs actifs de la pollution environnementale, et des quantités significatives de microplastiques ont déjà été détectées dans le miel, quel que soit le pays d'origine.⁷⁸ L'exposition aux microplastiques réduit la teneur totale en chlorophylle de 5,63 à 17,42 %, ce qui entraîne des pertes mondiales dans la production de riz, de blé et de maïs. Celles-ci représentent entre 4,11 et 13,52 % du rendement annuel mondial total de ces cultures de base – un impact aux conséquences préoccupantes pour la sécurité alimentaire (Image 22).⁷⁹

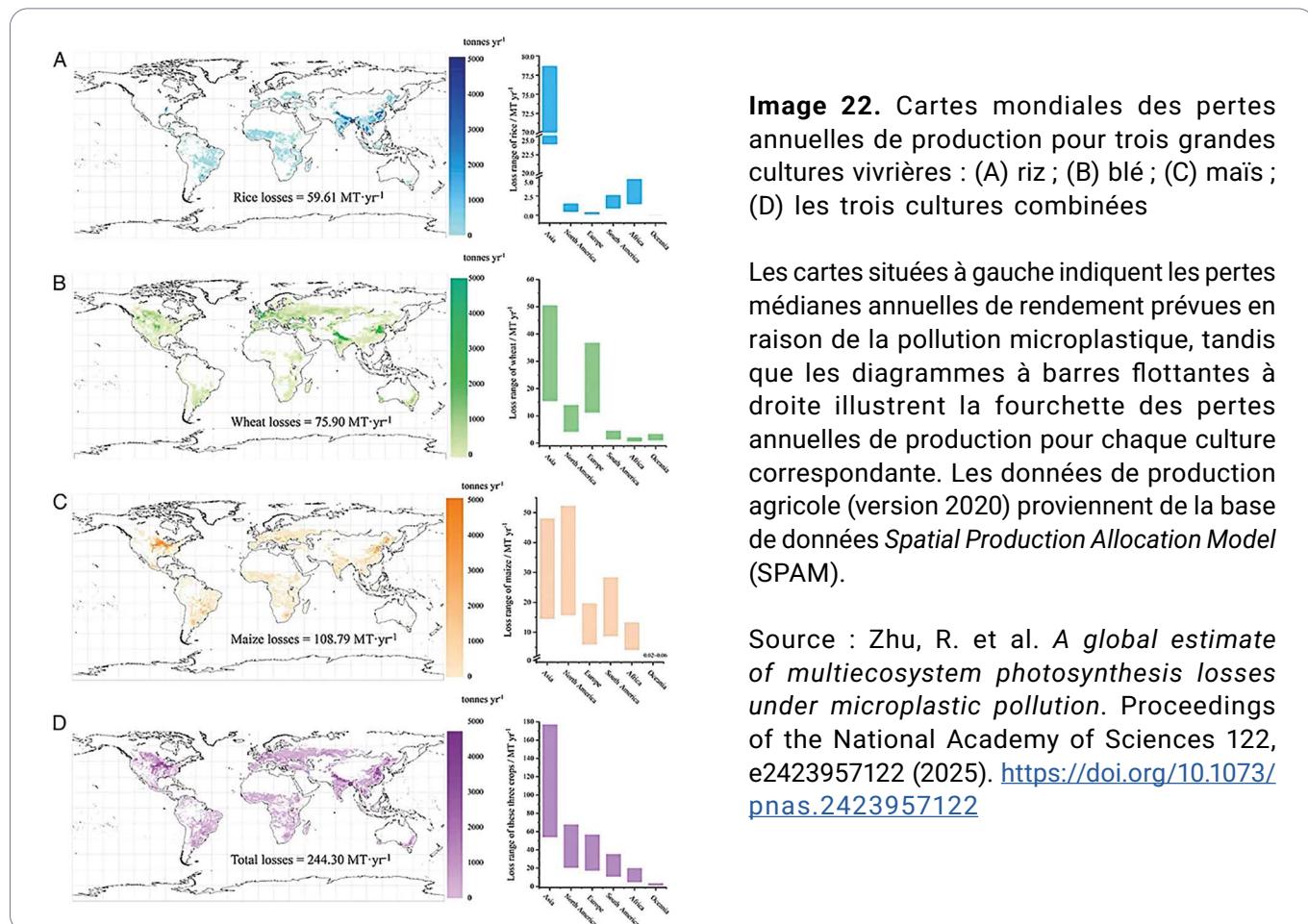


Image 22. Cartes mondiales des pertes annuelles de production pour trois grandes cultures vivrières : (A) riz ; (B) blé ; (C) maïs ; (D) les trois cultures combinées

Les cartes situées à gauche indiquent les pertes médianes annuelles de rendement prévues en raison de la pollution microplastique, tandis que les diagrammes à barres flottantes à droite illustrent la fourchette des pertes annuelles de production pour chaque culture correspondante. Les données de production agricole (version 2020) proviennent de la base de données *Spatial Production Allocation Model* (SPAM).

Source : Zhu, R. et al. A global estimate of multiecosystem photosynthesis losses under microplastic pollution. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 122, e2423957122 (2025). <https://doi.org/10.1073/pnas.2423957122>

⁷⁵Sheng, D., Jing, S., He, X., Klein, A.-M., Köhler, H.-R. & Wanger, T. C. Plastic pollution in agricultural landscapes: an overlooked threat to pollination, biocontrol and food security. *Nature Communications* 15, 8413 (2024).

⁷⁷Al Naggar, Y. A., Sayes, C. M., Collom, J. C., Ayorinde, T., Qi, S., El-Seedi, H. R., Paxton, R. J. & Wang, K. Chronic exposure to polystyrene microplastic fragments has no effect on honey bee survival, but reduces feeding rate and body weight. *Toxics* 11, 100 (2023)

⁷⁹Zhu, R. et al. A global estimate of multiecosystem photosynthesis losses under microplastic pollution. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 122, e2423957122 (2025). <https://doi.org/10.1073/pnas.2423957122>

Les forêts comme accumulateurs de MNPs

Des analyses ont révélé la présence de nanoplastiques dans les racines, les tiges, les feuilles et les aiguilles, et ce à toutes les concentrations et à tous les intervalles de temps étudiés. Les concentrations de nanoplastiques dans les racines dépassaient d'au moins un facteur 10 celles observées dans les parties aériennes.

La pollution plastique nuit au fonctionnement des conifères à feuillage persistant et aux espèces d'arbres à feuilles caduques, en induisant un stress oxydatif et en réduisant l'efficacité photosynthétique, ce qui peut entraîner une inhibition de la croissance, voire la mort des plantes. Les études indiquent que les perturbations des phases de la photosynthèse provoquent l'accumulation d'énergie lumineuse excédentaire. Lorsque cette énergie n'est pas convertie en énergie chimique, elle entraîne un stress photo-oxydatif et des lésions tissulaires. Pour s'en protéger, les plantes activent des mécanismes photoprotecteurs dans lesquels les caroténoïdes dissipent l'excédent d'énergie sous forme de chaleur.⁸⁰

En altérant la photosynthèse, en induisant un stress oxydatif et en réduisant l'activité physiologique des plantes, la pollution plastique accroît la vulnérabilité des écosystèmes au changement climatique. Ces résultats mettent en évidence l'impact à grande échelle de la contamination plastique sur les communautés végétales, et soulèvent ainsi des inquiétudes quant à ses conséquences pour les animaux terrestres qui dépendent de ces écosystèmes.

Comment les nanoplastiques détruisent la faune

De nombreuses études indiquent que l'accumulation de micro- et nanoplastiques dans l'environnement, y compris dans les plantes, affecte la production animale⁸¹ en perturbant les chaînes alimentaires et en impactant la santé des animaux. Des observations effectuées dans une ferme laitière en Italie ont révélé que tous les échantillons de foin de ray-grass contenaient des microplastiques.⁸² Une étude menée en Inde a détecté une contamination au microplastique de polyéthylène téréphthalate dans 100 % des échantillons d'aliments pour bovins laitiers, avec des concentrations allant de 89 à 326 g/kg.⁸³

⁸⁰Murazzi, M. E., Pradel, A., Schefer, R. B., Gessler, A. & Mitrano, D. M. Uptake and physiological impacts of nanoplastics in trees with divergent water use strategies. Environ. Sci.: Nano 11, 3574–3584 (2024). <https://doi.org/10.1039/D4EN00286E>

⁸¹Borreani, G. & Tabacco, E. 9 - Plastics in Animal Production. in A Guide to the Manufacture, Performance, and Potential of Plastics in Agriculture (ed. Orzolek, M. D.) 145–185 (Elsevier, 2017). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102170-5.00009-9>

⁸²Glorio Patrucco, S., Rivoira, L., Bruzzoniti, M. C., Barbera, S. & Tassone, S. Development and application of a novel extraction protocol for the monitoring of microplastic contamination in widely consumed ruminant feeds. Science of The Total Environment 947, 174493 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174493>

⁸³Maganti, S. S. & Akkina, R. C. Detection and characterisation of microplastics in animal feed. ojafr 13, 348–356 (2023). <https://doi.org/10.51227/ojafr.2023.50>

L'analyse a confirmé la présence de microplastiques dans le liquide folliculaire du bétail,⁸⁴ dans le lait,⁸⁵ les fèces de mouton,⁸⁶ la viande bovine et le sang,⁸⁷ ce qui témoigne d'un impact significatif sur les ruminants. Selon les données disponibles, 50 à 60 % des corps étrangers extraits d'animaux d'élevage abattus⁸⁸ — y compris de petits ruminants comme les chèvres et les moutons — étaient constitués de matériaux plastiques. En outre, des microplastiques ont été détectés dans les tissus internes de chiens et chats vivant en milieu urbain,⁸⁹ dans les intestins de canards domestiques,⁹⁰ ainsi que dans les tissus pulmonaires de porcs.⁹¹

Les résultats de recherche confirment que les microplastiques nuisent aux animaux non seulement de manière directe, mais également par le biais des additifs utilisés dans leur fabrication et des polluants qu'ils absorbent dans l'environnement, provoquant des dommages de gravité variable.⁹² Les observations indiquent que les microplastiques déclenchent des effets toxiques chez les animaux, notamment du stress oxydatif, des lésions intestinales, une immunotoxicité, ainsi qu'une toxicité reproductive et neurologique (Image 23).⁹³ De plus, les microplastiques agissent comme vecteurs de contaminants tels que les métaux lourds, les antibiotiques, les composés organiques persistants et les pesticides, ce qui amplifie encore les risques potentiels pour les écosystèmes, la santé animale et la santé humaine.⁹⁴

⁸⁴Grechi, N. et al. Microplastics are present in women's and cows' follicular fluid and polystyrene microplastics compromise bovine oocyte function in vitro. *eLife* 12, (2023). <https://doi.org/10.7554/eLife.86791.1>

⁸⁵Da Costa Filho, P. A. et al. Detection and characterization of small-sized microplastics ($\geq 5 \mu\text{m}$) in milk products. *Sci Rep* 11, 24046 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03458-7>

⁸⁶Beriot, N., Peek, J., Zornoza, R., Geissen, V. & Huerta Lwanga, E. Low density-microplastics detected in sheep faeces and soil: A case study from the intensive vegetable farming in Southeast Spain. *Science of The Total Environment* 755, 142653 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142653>

⁸⁷van der Veen, I., van Mourik, L.M., van Velzen, M.J.M., Groenewoud, Q.R., & Leslie, H.A. Plastic particles in livestock feed, milk, meat and blood: A pilot study. Report EH22-01, 29 April 2022. <https://vakbladvoedingsindustrie.nl/storage/app/media/Rapporten/rapporten%202022/07-juli/VOE-2022-JUL-PLASTICSOUP.pdf>

⁸⁸Galyon, H. et al. Long-term in situ ruminal degradation of biodegradable polymers in Holstein dairy cattle. *JDS Communications* 4, 70–74 (2023). <https://doi.org/10.3168/jdsc.2022-0319>

⁸⁹Prata, J. C. et al. Microplastics in Internal Tissues of Companion Animals from Urban Environments. *Animals* 12, 1979 (2022). <https://doi.org/10.3390/ani12151979>

⁹⁰Susanti, R., Yuniaستuti, A. & Fibriana, F. The Evidence of Microplastic Contamination in Central Javanese Local Ducks from Intensive Animal Husbandry. *Water Air Soil Pollut* 232, 178 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05142-y>

⁹¹Li, H. et al. Detection of microplastics in domestic and fetal pigs' lung tissue in natural environment: A preliminary study. *Environmental Research* 216, 114623 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114623>

⁹²Brennecke, D., Duarte, B., Paiva, F., Caçador, I. & Canning-Clode, J. Microplastics as vector for heavy metal contamination from the marine environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 178, 189–195 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.12.003>

⁹³Su, M. et al. Toxicity Mechanisms of Microplastic and Its Effects on Ruminant Production: A Review. *Biomolecules* 15, 462 (2025). <https://doi.org/10.3390/biom15040462>

⁹⁴Campanale, C., Massarelli, C., Savino, I., Locaputo, V. & Uricchio, V. F. A Detailed Review Study on Potential Effects of Microplastics and Additives of Concern on Human Health. *IJERPH* 17, 1212 (2020). <https://doi.org/10.3390/ijerph17041212>

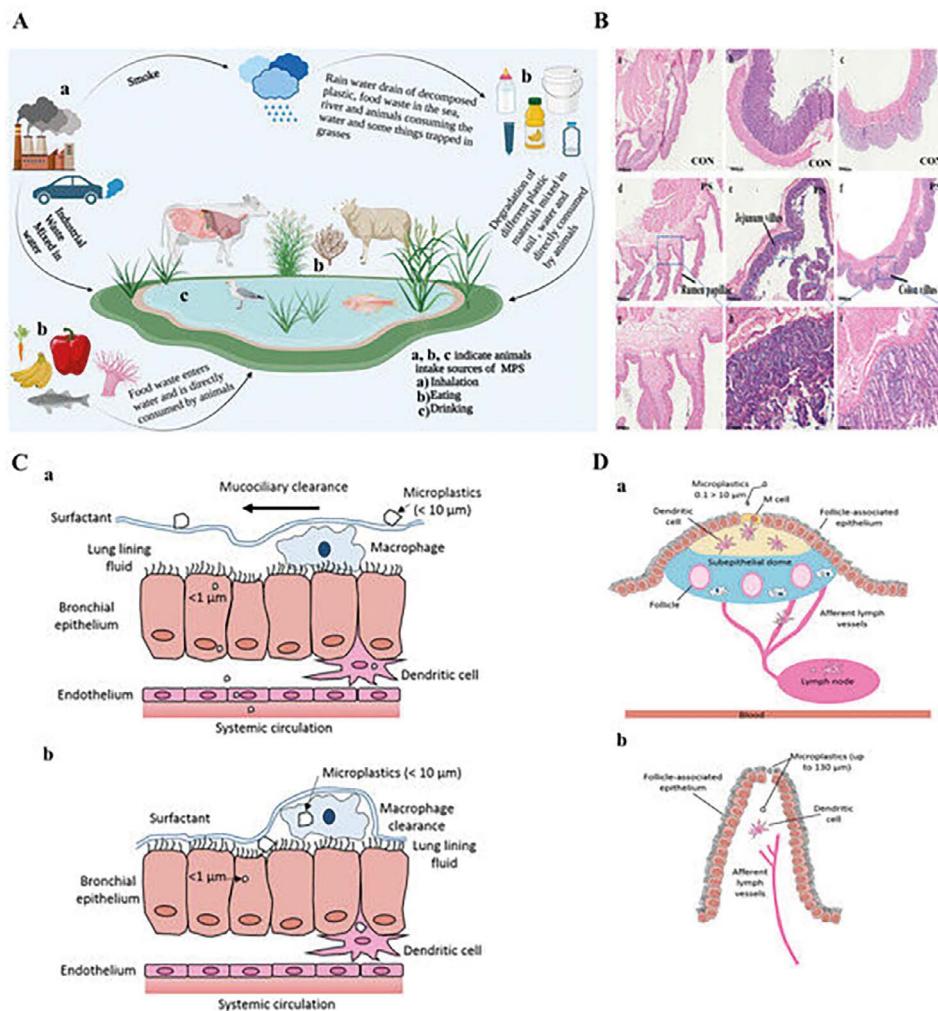


Image 23. Schéma illustrant les voies d'ingestion des MPs chez les animaux et leurs effets sur le tractus gastro-intestinal

(A) Voies d'ingestion des MP par les animaux.

(B) Coupes gastro-intestinales après exposition au polystyrène (PS) :

Images H&E du rumen (a), du jéjunum (b) et du côlon (c) du groupe témoin ;

(d) coupe H&E du rumen du groupe S-PS ;

(e) coupe H&E du jéjunum du groupe L-PS ;

(f) coupe H&E du côlon du groupe L-PS ;

(g à i) images localement agrandies correspondant respectivement à (d à f).

(C) Mécanismes potentiels d'absorption et d'élimination des MPs (de 0,1 à >10 µm) dans les poumons :

(a) Dans les voies respiratoires supérieures (poumon central), où la membrane pulmonaire est plus épaisse, les fluides pulmonaires (surfactants et mucus) déplacent difficilement les microplastiques. Les particules >1 µm sont éliminées par la muqueuse ciliée. Les particules <1 µm peuvent être absorbées à travers l'épithélium.

(b) Si le diamètre aérodynamique des MPs leur permet d'atteindre les régions profondes du poumon, elles peuvent traverser la fine couche de fluide pulmonaire et atteindre l'épithélium, y pénétrant par diffusion ou par absorption cellulaire active.

(D) Voies prévues d'absorption des MPs dans le tractus gastro-intestinal (GIT) :

(a) Absorption des MPs depuis la lumière intestinale par les cellules M des plaques de Peyer, via endocytose (0,1 à >10 µm). Les cellules M prélevent et transportent les particules de la lumière intestinale vers le tissu lymphoïde muqueux.

(b) Absorption des MPs par voie paracellulaire. Les particules non dégradables, comme les MPs, peuvent être mécaniquement forcées à travers les jonctions lâches de la monocouche épithéliale. Les cellules dendritiques peuvent alors les capturer et les transporter vers les vaisseaux lymphatiques ou sanguins sous-jacents, les distribuant à d'autres tissus, y compris le foie, les muscles et le cerveau.

Les données d'observation indiquent que les animaux sauvages prennent souvent les déchets plastiques pour de la nourriture, ce qui entraîne leur accumulation dans les intestins. Au Zimbabwe⁹⁵ et au Sri Lanka,⁹⁶ des éléphants s'étant nourris dans des décharges à ciel ouvert sont morts après avoir ingéré des plastiques non digestibles. Dans le parc de Nara au Japon, des cerfs sauvages sont morts de complications provoquées par l'ingestion de déchets plastiques abandonnés par les touristes.⁹⁷ Une étude menée sur plus de 30 000 chameaux près de Dubaï, aux Émirats Arabes Unis, a révélé qu'environ 1 % des animaux étaient probablement morts en raison de l'accumulation de plastique dans leur système digestif.⁹⁸ Les scientifiques ont introduit le terme « polybézoard » pour désigner l'amas compact de matériaux non digestibles – pouvant inclure du plastique, des cordes, d'autres déchets et des dépôts de sel – qui se forme dans l'estomac ou le tube digestif en une masse solide semblable à une pierre. Le préfixe « poly » renvoie à une substance synthétique, tandis que « bézoard » désigne une concréction pierreuse pouvant se former dans l'estomac de certains animaux, en particulier les ruminants. Les observations confirment que les polybézoards provoquent des obstructions gastro-intestinales, une septicémie due à la prolifération de bactéries intestinales, ainsi qu'une déshydratation et une malnutrition (Image 24).



Image 24. Polybéoards retrouvés dans des cadavres de chameaux dans le désert près de Dubaï. Le plus grand analysé dans la nouvelle étude pesait près de 64 kg (141 livres)

Source : Eriksen, M., Lusher, A., Nixon, M. & Wernery, U. *The plight of camels eating plastic waste*. Journal of Arid Environments 185, 104374 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104374>

⁹⁵Breton, J. L. Visitation patterns of African elephants (*Loxodonta africana*) to a rubbish dumpsite in Victoria Falls, Zimbabwe. *Pachyderm* 60, 45–54 (2019). <https://doi.org/10.69649/pachyderm.v60i.30>

⁹⁶Animal Survival International. Sri Lankan Elephants Die After Eating Plastic From Rubbish Dumps. (2020) <https://animalsurvival.org/habitat-loss/sri-lankan-elephants-die-after-eating-plastic-from-rubbish-dumps>

⁹⁷Agence France-Presse. Japan's famous Nara deer dying from eating plastic bags. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/world/2019/jul/10/japans-famous-nara-deer-dying-from-eating-plastic-bags>

⁹⁸Eriksen, M., Lusher, A., Nixon, M. & Wernery, U. The plight of camels eating plastic waste. *Journal of Arid Environments* 185, 104374 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104374>

Transfert des MNPs à travers les chaînes alimentaires – du plancton à l'être humain

L'accumulation de plastiques dans l'océan a un impact significatif sur les écosystèmes marins. Des observations scientifiques menées au cours des quatre dernières décennies ont révélé la présence de microplastiques dans presque tous les habitats marins du monde.⁹⁹ Les études confirment que les débris plastiques affectent la biodiversité marine dans un large éventail d'habitats. Au moins 690 espèces marines ont été affectées par la pollution plastique à l'échelle mondiale, y compris des cétacés, des pinnipèdes, des oiseaux marins, des tortues, des poissons et des crustacés.¹⁰⁰ L'ingestion de débris plastiques peut également exposer l'animal à une source supplémentaire de toxines. Les composants chimiques peuvent s'infiltrer dans le corps après ingestion, les polluants étant transférés de la proie au prédateur au sein des chaînes alimentaires. Les effets de l'enchevêtrement ou de l'ingestion peuvent être létaux ou sublétaux, et entraîner divers problèmes tels qu'une capacité d'alimentation réduite, des troubles digestifs menant à la malnutrition, des maladies, une baisse de la reproduction, une réduction des taux de croissance et une espérance de vie plus courte.¹⁰¹

En raison de leur petite taille, les microplastiques sont ingérés par le plancton – un élément clé des chaînes alimentaires marines. Le plancton est consommé par de nombreuses espèces marines, et celles qui ne s'en nourrissent pas directement mangent des organismes qui en ont déjà ingéré. De cette manière, les microplastiques s'intègrent dans les chaînes alimentaires (Images 25 et 26).

En 1999, une analyse d'échantillons d'eau de surface dans le gyre subtropical du Pacifique Nord a révélé que la masse de plastique dépassait celle du zooplancton – la principale source alimentaire de l'écosystème – par un facteur six,¹⁰² soulignant la domination du plastique sur les organismes vivants dans l'océan.

Les estimations basées sur des données d'observation indiquent que la concentration de microplastiques augmente avec la taille des poissons. Les données montrent que le plus grand animal – la baleine – ingère jusqu'à 43,6 kg de plastiques par jour, dont 98,5 % de ce volume provient des proies, et non directement de l'eau, puisque les microplastiques sont déjà présents dans la nourriture qu'elle consomme.¹⁰³

⁹⁹Ivar Do Sul, J. A. & Costa, M. F. The present and future of microplastic pollution in the marine environment. *Environmental Pollution* 185, 352–364 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.036>

¹⁰⁰O'Hanlon, N. J., James, N. A., Masden, E. A. & Bond, A. L. Seabirds and marine plastic debris in the northeastern Atlantic: A synthesis and recommendations for monitoring and research. *Environmental Pollution* 231, 1291–1301 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.101>

¹⁰¹Ocean Blue Project. Plastic Pollution in the Ocean: How Many Animals Die from Pollution? (2021)

<https://oceanblueproject.org/wp-content/uploads/2023/02/how-many-animals-die-from-plastic-pollution-ocean-blue-report.pdf>

¹⁰²Moore, C. J., Moore, S. L., Leecaster, M. K. & Weisberg, S. B. A Comparison of Plastic and Plankton in the North Pacific Central Gyre. *Marine Pollution Bulletin* 42, 1297–1300 (2001). [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(01\)00114-X](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(01)00114-X)

¹⁰³Kahane-Rapport, S. R. et al. Field measurements reveal exposure risk to microplastic ingestion by filter-feeding megafauna. *Nat Commun* 13, 6327 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33334-5>

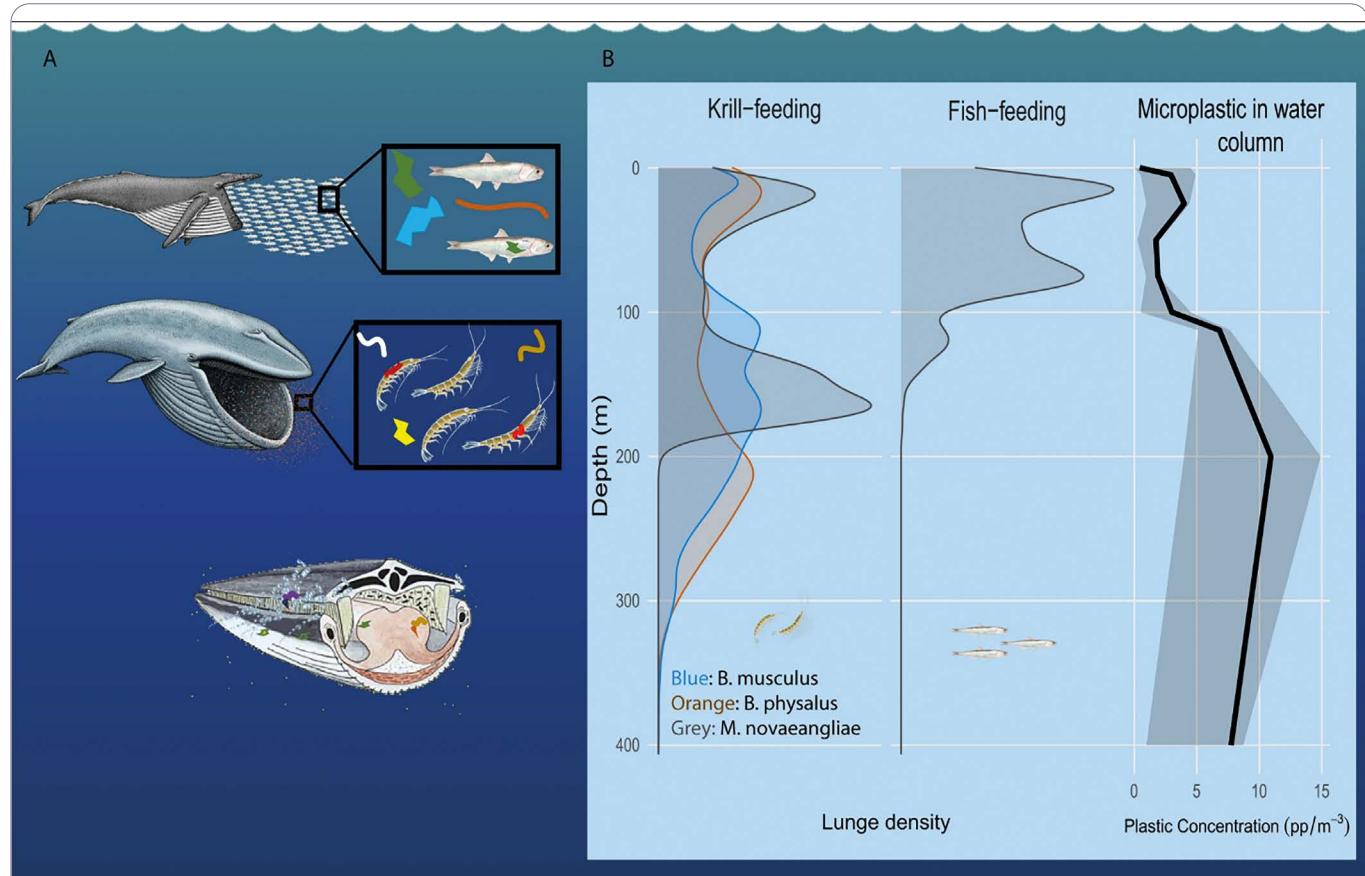


Image 25. Profondeur du comportement alimentaire des baleines rayées en fonction de la concentration de microplastiques dans la colonne d'eau

a – Plastiques ingérés par les baleines par jour, modélisés comme la somme de (i) plastiques filtrés dans l'eau par jour et (ii) plastiques consommés dans les proies par jour. Nous avons créé trois scénarios pour couvrir l'éventail des risques possibles d'exposition à l'ingestion de plastique : faible, moyen et élevé, car certaines variables manquent de données complète.

b – Profondeurs de bonds (lunge depths) enregistrées dans la baie de Monterey, alignées avec le profil de concentration de plastique dans la baie de Monterey. Les baleines et leurs proies ont été illustrées par Alex Boersma, et le schéma en coupe de la filtration a été illustré par Scott Landry du *Center for Coastal Studies*. Les données sources sont fournies dans un fichier de données sources.

Source : Kahane-Rapport, S. R. et al. *Field measurements reveal exposure risk to microplastic ingestion by filter-feeding megafauna*. Nat Commun 13, 6327 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33334-5>



Image 26. Représentation schématique de la pénétration des plastiques dans les chaînes alimentaires

Le plastique tue les organismes marins

Chaque année, environ 1 million d'oiseaux marins et 100 000 mammifères marins meurent à cause de la pollution.¹⁰⁴ Les observations confirment un lien entre l'ingestion de déchets et la mortalité des oiseaux marins. Une étude menée sur 1 733 oiseaux marins appartenant à 51 espèces a révélé que 557 individus (32,1 %) avaient ingéré des déchets marins, allant de 1 à 40 éléments, avec un poids maximal de 3 440 mg et un volume de 3 621 mm³.¹⁰⁵

Certaines données montrent également que certains plastiques libèrent du sulfure de diméthyle – un composé chimique qui imite le signal olfactif utilisé par les oiseaux marins pour localiser leur nourriture.¹⁰⁶ De récentes recherches ont également établi que l'ingestion de plastique provoque des lésions au foie, aux reins et à l'estomac chez les oisillons, ainsi que des lésions cérébrales similaires à celles de la maladie d'Alzheimer. Cela souligne l'impact destructeur de la pollution plastique sur la faune marine.¹⁰⁷ Des particules de plastique ont été retrouvées chez tous les individus des sept espèces de tortues étudiées, réparties dans trois bassins océaniques (Image 27).¹⁰⁸

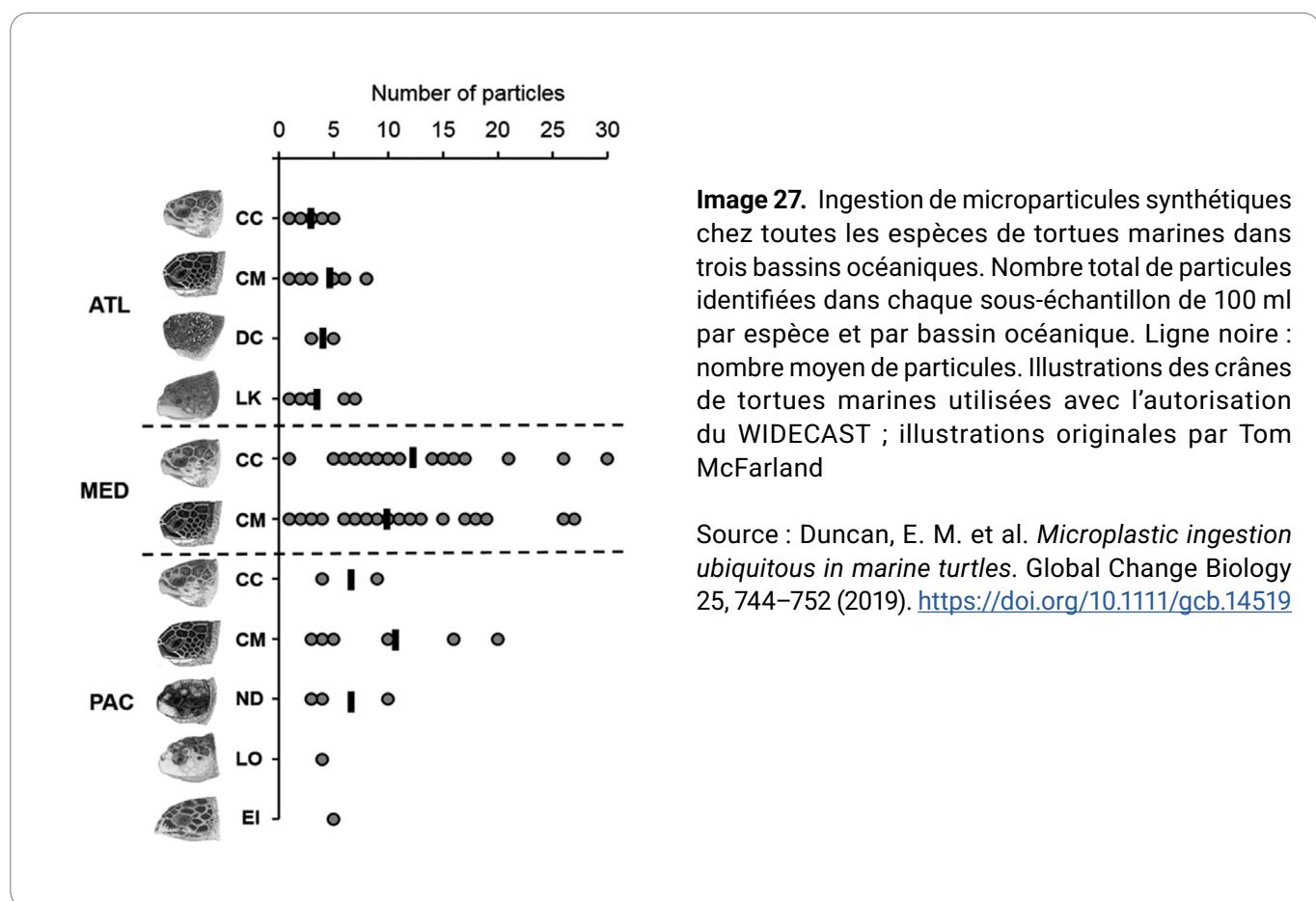


Image 27. Ingestion de microparticules synthétiques chez toutes les espèces de tortues marines dans trois bassins océaniques. Nombre total de particules identifiées dans chaque sous-échantillon de 100 ml par espèce et par bassin océanique. Ligne noire : nombre moyen de particules. Illustrations des crânes de tortues marines utilisées avec l'autorisation du WIDECAST ; illustrations originales par Tom McFarland

Source : Duncan, E. M. et al. *Microplastic ingestion ubiquitous in marine turtles*. Global Change Biology 25, 744–752 (2019). <https://doi.org/10.1111/gcb.14519>

¹⁰⁴WWF-Australia. How many birds die from plastic pollution? <https://wwf.org.au/blogs/how-many-birds-die-from-plastic-pollution>.

¹⁰⁵Roman, L., Hardesty, B. D., Hindell, M. A. & Wilcox, C. A quantitative analysis linking seabird mortality and marine debris ingestion. Sci Rep 9, 3202 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36585-9>

¹⁰⁶Savoca, M. S., Wohlfeil, M. E., Ebeler, S. E. & Nevitt, G. A. Marine plastic debris emits a keystone infochemical for olfactory foraging seabirds. Sci. Adv. 2, e1600395 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600395>

¹⁰⁷De Jersey, A. M. et al. Seabirds in crisis: Plastic ingestion induces proteomic signatures of multiorgan failure and neurodegeneration. Sci. Adv. 11, eads0834 (2025). <https://doi.org/10.1126/sciadv.ads0834>

¹⁰⁸Duncan, E. M. et al. Microplastic ingestion ubiquitous in marine turtles. Global Change Biology 25, 744–752 (2019). <https://doi.org/10.1111/gcb.14519>

Des études portant sur 171 774 individus appartenant à 555 espèces de poissons marins montrent que 386 espèces, dont 210 d'intérêt commercial, consomment des débris plastiques.¹⁰⁹ Le taux d'incidence de plastique ingéré par les poissons atteint 26 %, soit le double par rapport à la décennie précédente (Image 28). L'analyse a révélé une corrélation positive entre l'abondance de plastique dans les eaux de surface (Image 29) et sa consommation par les organismes marins (Image 30).

Les études en laboratoire montrent que les composés du plastique, une fois absorbés dans les tissus des poissons, réduisent leur activité, altèrent le fonctionnement hépatique, endommagent le cerveau, ralentissent la croissance et diminuent la fertilité.^{109, 110, 111}

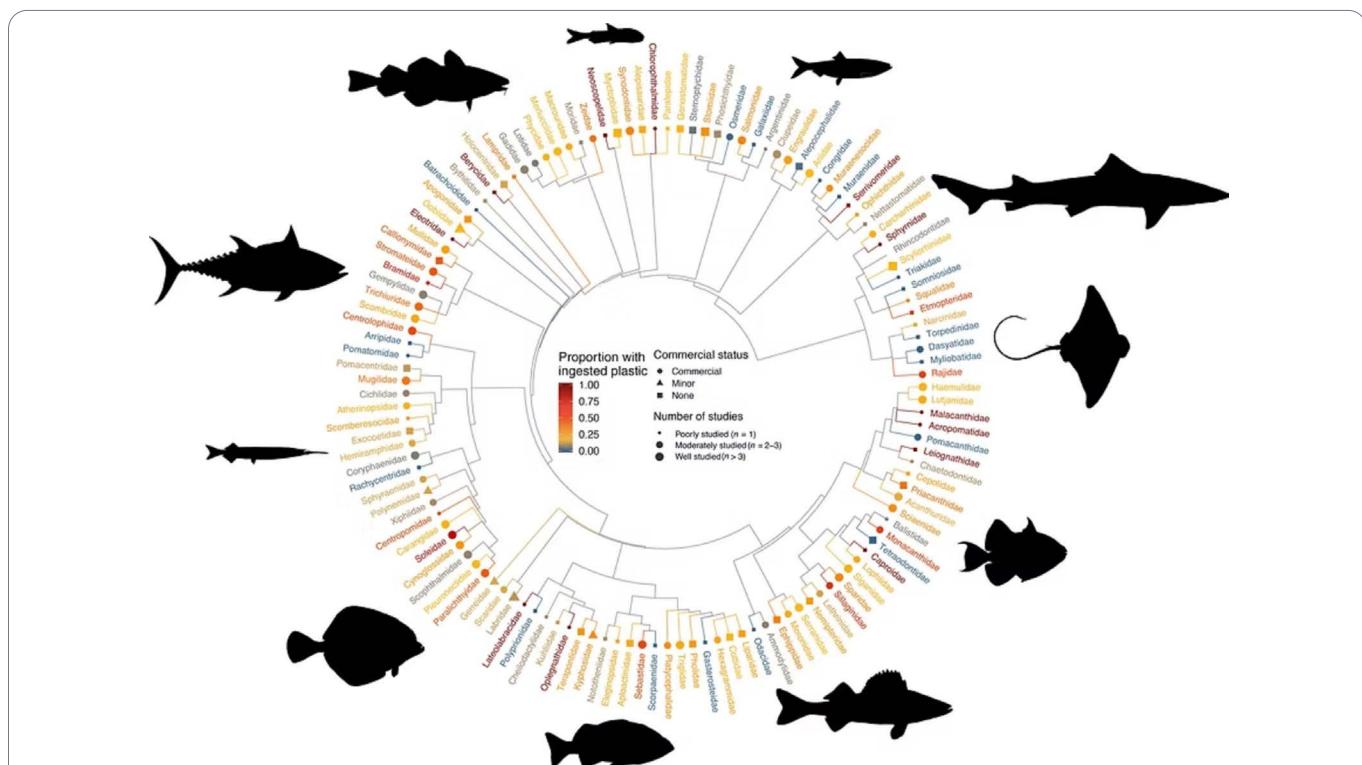


Image 28. Familles de poissons et ingestion de plastique

Relations phylogénétiques entre les familles de poissons marins ($n = 131$), colorées selon leur taux d'ingestion de plastique. La forme de chaque extrémité indique la proportion d'espèces de la famille concernée faisant l'objet d'une pêche commerciale (0 = aucune espèce ciblée commercialement ; faible = 0 % à 25 % des espèces ciblées commercialement ; commercial = plus de 25 % des espèces ciblées commercialement). La taille du point à l'extrémité reflète le nombre d'études menées sur les espèces de cette famille. Sont mises en évidence 15 familles bien documentées ($n > 10$ individus, > 2 espèces) présentant un taux élevé d'ingestion de plastique (FO plastique $> 0,25$) ; parmi les familles présentant des cas d'ingestion de plastique, 67 sont également exploitées commercialement.

Source : Savoca, M. S., McInturf, A. G. & Hazen, E. L. *Plastic ingestion by marine fish is widespread and increasing*. Global Change Biology 27, 2188–2199 (2021). <https://doi.org/10.1111/gcb.15533>

¹⁰⁹Savoca, M. S., McInturf, A. G. & Hazen, E. L. Plastic ingestion by marine fish is widespread and increasing. Global Change Biology 27, 2188–2199 (2021). <https://doi.org/10.1111/gcb.15533>

¹¹⁰Nanthini devi, K., Raju, P., Santhanam, P. & Perumal, P. Impacts of microplastics on marine organisms: Present perspectives and the way forward. Egyptian Journal of Aquatic Research 48, 205–209 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2022.03.001>

¹¹¹Avio, C. G., Gorbi, S. & Regoli, F. Experimental development of a new protocol for extraction and characterization of microplastics in fish tissues: First observations in commercial species from Adriatic Sea. Marine Environmental Research 111, 18–26 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2015.06.014>

Microplastics in the surface ocean, 1950 to 2050

Our World
in Data

Microplastics are buoyant plastic materials smaller than 0.5 centimeters in diameter. Future global accumulation in the surface ocean is shown under three plastic emissions scenarios: (1) emissions to the oceans stop in 2020; (2) stagnate at 2020 rates; or (3) continue to grow until 2050 in line with historical plastic production rates.

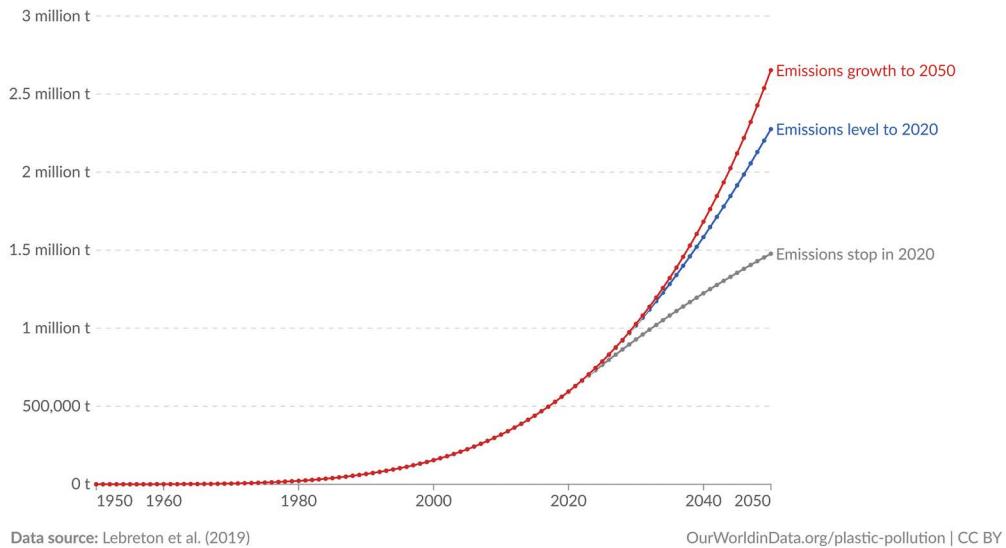


Image 29. Graphique de l'augmentation de la quantité de microplastiques à la surface de l'océan, avec une projection jusqu'en 2050

Source : <https://ourworldindata.org/grapher/microplastics-in-ocean> (consulté le 1er mai 2025)

Source : Lebreton, L., Egger, M. & Slat, B. A global mass budget for positively buoyant macroplastic debris in the ocean. Sci Rep 9, 12922 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49413-5>

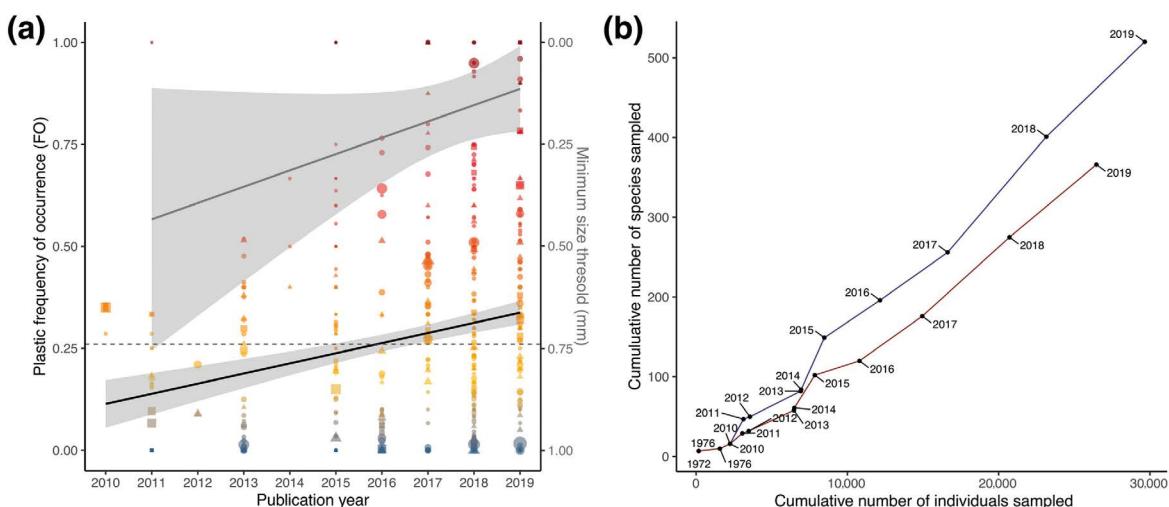


Image 30. Tendances temporelles de l'ingestion de plastiques par les poissons. (a) La ligne grise supérieure indique qu'à partir de 2011, on observe une tendance à détecter des particules de plus en plus petites. La ligne noire inférieure montre une augmentation de la fréquence d'occurrence (FO) du plastique chez toutes les espèces de poissons entre 2010 et 2019. Au cours de cette période, l'incidence de l'ingestion de plastique a augmenté de manière significative à un taux de 2,4 % par an. La ligne pointillée horizontale représente une FO de 0,26, soit l'incidence moyenne de l'ingestion de plastique chez les poissons à l'échelle mondiale. (b) Courbe d'accumulation des espèces : la ligne bleue indique le nombre cumulé d'espèces étudiées au fil du temps (incluant les espèces avec ou sans plastique ingéré), tandis que la ligne rouge ne représente que les espèces ayant ingéré du plastique. L'absence d'asymptote sur la courbe rouge suggère une forte probabilité que de nouvelles espèces continuent à être identifiées comme ingérant du plastique dans les années à venir.

Source : Savoca, M. S., McInturf, A. G. & Hazen, E. L. *Plastic ingestion by marine fish is widespread and increasing*. Global Change Biology 27, 2188–2199 (2021). <https://doi.org/10.1111/gcb.15533>

Les coraux en danger: une micro-menace à l'échelle mondiale

La pollution plastique constitue une menace croissante pour les récifs coralliens, en s'introduisant dans leurs chaînes alimentaires, en aggravant la propagation des maladies et en contribuant à la dégradation des communautés récifales. Des analyses ont identifié des débris anthropiques sur 77 des 84 récifs étudiés, y compris sur des atolls isolés du centre de l'océan Pacifique.¹¹² Des effets sanitaires négatifs, tels que le blanchissement et la nécrose des tissus,¹¹³ ont été observés chez cinq des six espèces examinées (Image 31).¹¹⁴

Les fragments plastiques de grande taille facilitent la transmission de maladies et les dommages physiques, augmentant ainsi la vulnérabilité des coraux aux agents pathogènes.¹¹⁵ Ces effets touchent également le microbiome squelettique, qui joue un rôle crucial dans le maintien de la santé des colonies coraliennes (Image 32).¹¹⁶ Des recherches ont également révélé que les biofilms présents sur les microplastiques – appelés « plastisphères »¹¹⁴ – peuvent induire une dysbiose du microbiome chez les coraux.¹¹⁷ Au contact du plastique, le risque de maladie corallienne passe de 4 % à 89 % (Image 33). La disparition des récifs coralliens a de lourdes conséquences sur la biodiversité, car ils servent d'habitat à un quart des espèces marines.¹¹⁵

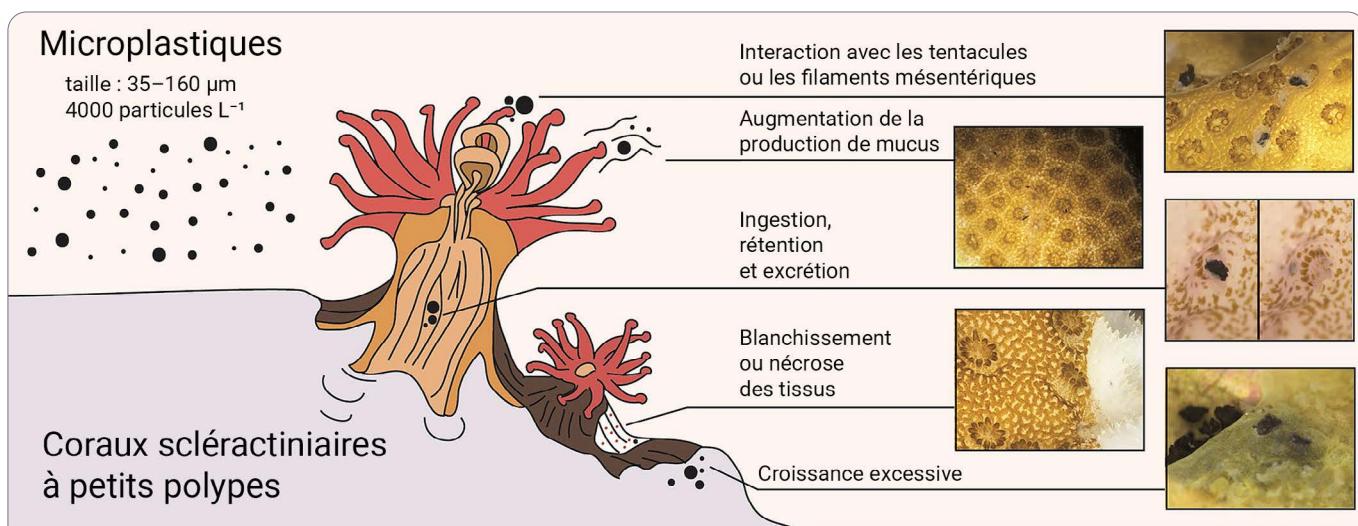


Image 31. Impact des plastiques sur la santé des récifs coralliens

Les coraux peuvent réagir par divers mécanismes d'élimination (par exemple, action ciliaire, production de mucus ou expansion tissulaire), par la rétention des particules via un recouvrement tissulaire, ou encore par l'expulsion de particules ingérées par erreur.

Source : Reichert, J., Schellenberg, J., Schubert, P. & Wilke, T. *Responses of reef building corals to microplastic exposure*. Environmental Pollution 237, 955–960 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.006>

¹¹²Pinheiro, H. T. et al. Plastic pollution on the world's coral reefs. Nature 619, 311–316 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06113-5>

¹¹³Reichert, J., Schellenberg, J., Schubert, P. & Wilke, T. Responses of reef building corals to microplastic exposure. Environmental Pollution 237, 955–960 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.006>

¹¹⁴Pantos, O. Microplastics: impacts on corals and other reef organisms. Emerging Topics in Life Sciences 6, 81–93 (2022). <https://doi.org/10.1042/ETLS20210236>

¹¹⁵Lamb, J. B. et al. Plastic waste associated with disease on coral reefs. Science 359, 460–462 (2018). <https://doi.org/10.1126/science.aar3320>

¹¹⁶Corinaldesi, C., Canensi, S., Dell'Anno, A. et al. Multiple impacts of microplastics can threaten marine habitat-forming species. Commun Biol 4, 431 (2021). <https://doi.org/10.1038/s42003-021-01961-1>

¹¹⁷Lear, G., Kingsbury, J.M., Franchini, S. et al. Plastics and the microbiome: impacts and solutions. Environmental Microbiome 16, 2 (2021). <https://doi.org/10.1186/s40793-020-00371-w>

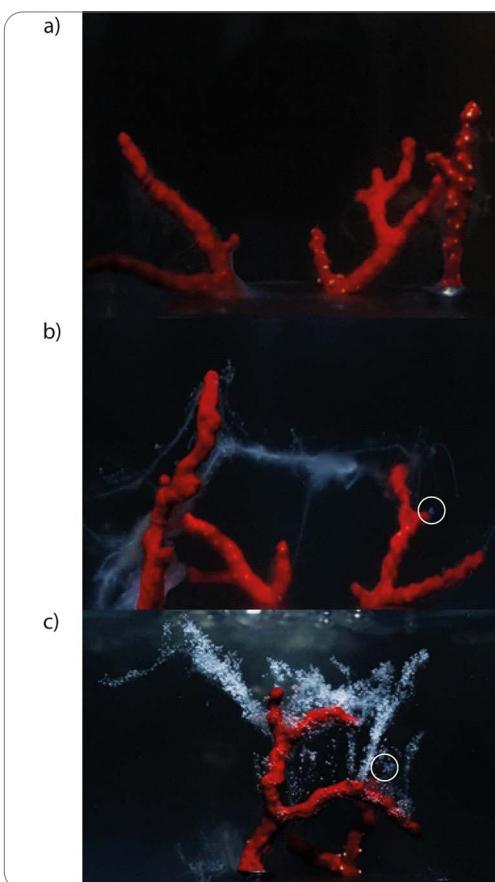
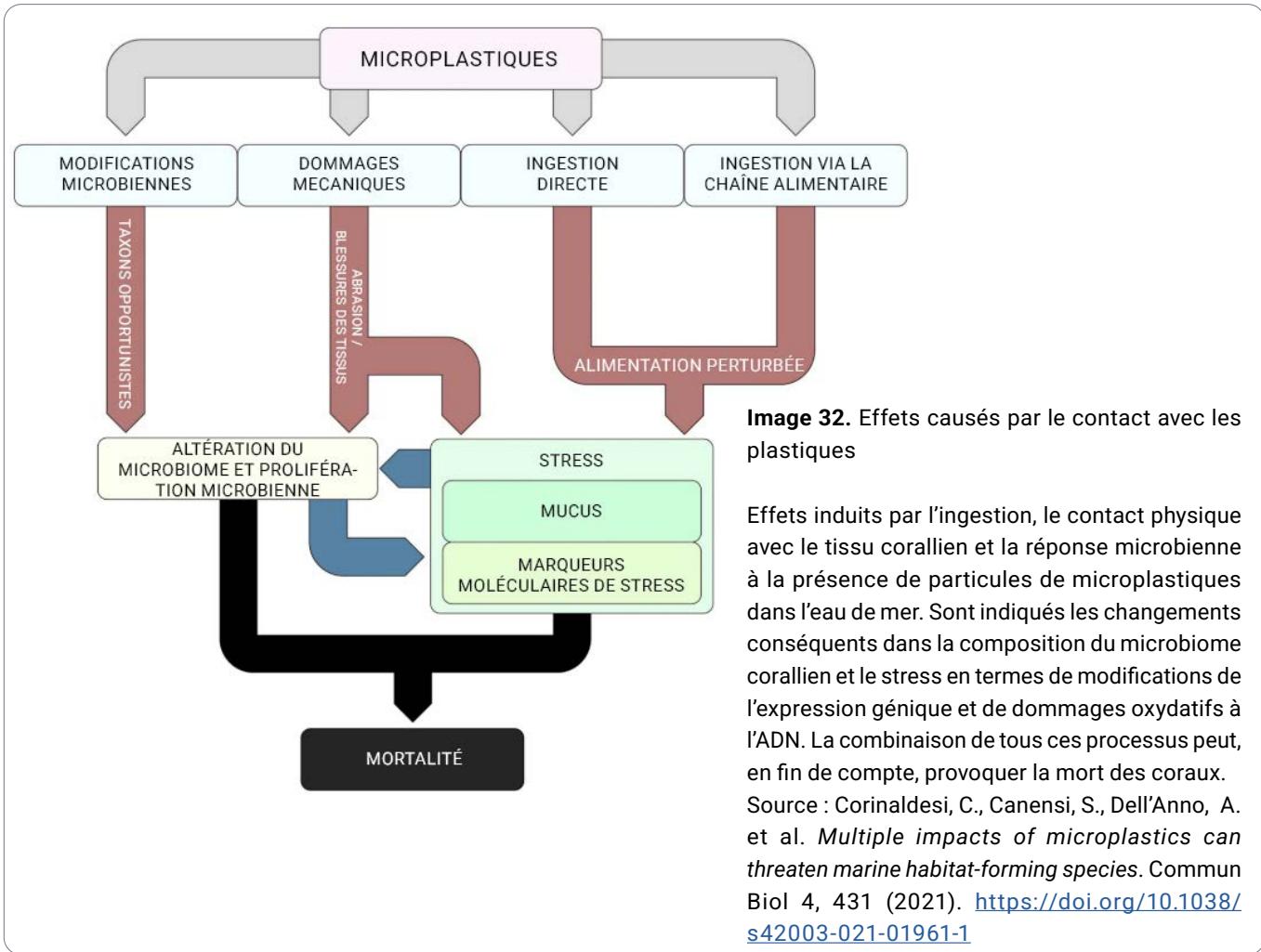


Image 33. La sécrétion de mucus augmente avec la concentration croissante de particules de microplastiques

a – concentrations faibles ; b – moyennes ; c – élevées de particules de microplastiques. La sécrétion de mucus augmente avec la concentration croissante de particules de microplastiques. Les cercles blancs indiquent les particules de microplastiques piégées par le mucus (particules de polyéthylène).

Source : Corinaldesi, C., Canensi, S., Dell'Anno, A. et al. *Multiple impacts of microplastics can threaten marine habitat-forming species*. Commun Biol 4, 431 (2021). <https://doi.org/10.1038/s42003-021-01961-1>

Impact des MNPs sur l'équilibre en oxygène des écosystèmes

Les observations montrent que les plastiques présents dans l'environnement se dégradent principalement sous l'effet du rayonnement solaire. Ce processus modifie leur composition chimique et leur structure. Les recherches confirment que les réactions déclenchées par la lumière du soleil augmentent la lixiviation de composés organiques dissous, ce qui affecte la biogéochimie de l'eau de mer et stimule la croissance des bactéries hétérotrophes (Image 34).¹¹⁸

Les menaces posées par les microplastiques

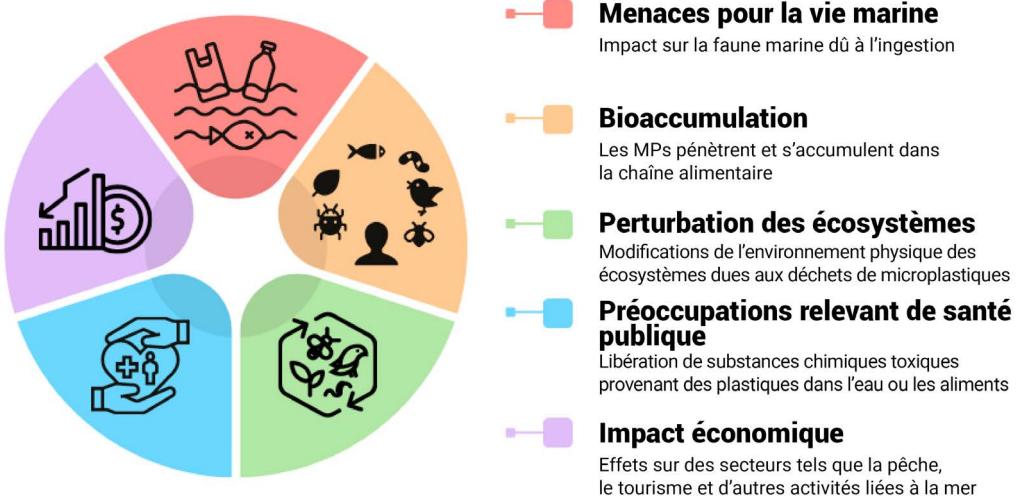


Image 34. Menaces posées par les microplastiques marins

Source : Yu, R.-S. & Singh, S. *Microplastic Pollution: Threats and Impacts on Global Marine Ecosystems*. Sustainability 15, 13252 (2023). <https://doi.org/10.3390/su151713252>

Des études à long terme montrent que les composés chimiques libérés par les plastiques dans l'eau de mer au cours de leur dégradation proviennent soit du matériau lui-même, soit des additifs utilisés pour conférer une couleur ou une stabilité au polymère. Certains de ces composés sont des acides organiques, ce qui explique leur rôle dans la diminution du pH. Ainsi, les plastiques contribuent à l'intensification de l'acidification des océans (Image 35), laquelle peut à son tour perturber de manière significative le fonctionnement des systèmes naturels terrestres.¹¹⁹

¹¹⁸Yu, R.-S. & Singh, S. *Microplastic Pollution: Threats and Impacts on Global Marine Ecosystems*. Sustainability 15, 13252 (2023). <https://doi.org/10.3390/su151713252>

¹¹⁹Romera-Castillo, C. et al. Abiotic plastic leaching contributes to ocean acidification. *Science of The Total Environment* 854, 158683 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158683>

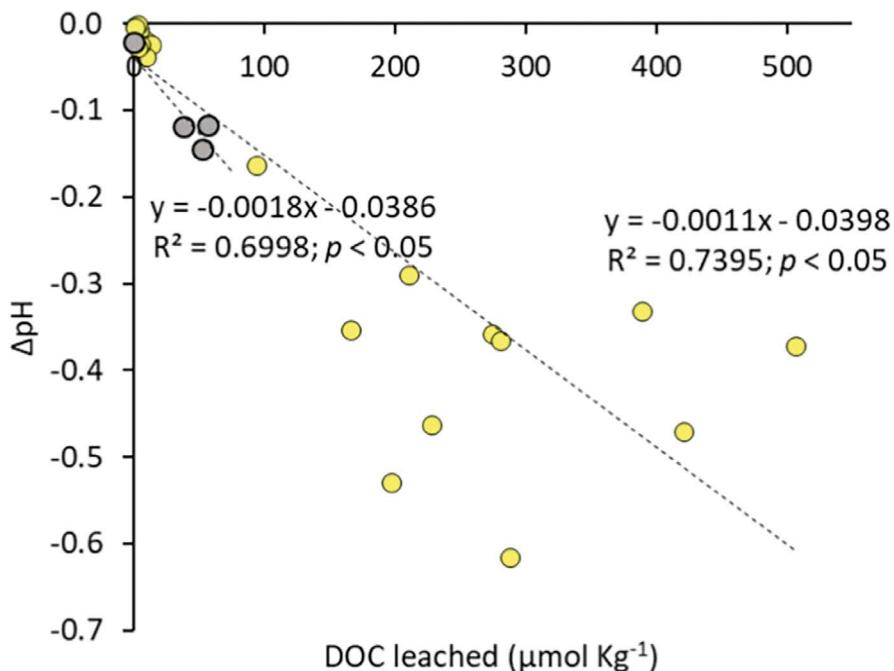


Image 35. Relations entre la variation du pH et le carbone organique dissous (COD) lixivié par les plastiques, représentées pour chaque échantillon individuel de toutes les expériences. Les témoins sans plastique pour chaque expérience sont également inclus. Les points jaunes correspondent aux traitements irradiés et les points gris aux traitements dans l'obscurité

Source : Romera-Castillo, C. et al. *Abiotic plastic leaching contributes to ocean acidification*. Science of The Total Environment 854, 158683 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158683>

66

« Grâce à cette étude, nous avons pu démontrer que, dans les zones de surface océanique fortement polluées par le plastique, la dégradation de celui-ci entraînera une baisse du pH pouvant atteindre 0,5 unité – une diminution comparable à celle estimée dans les pires scénarios d'émissions anthropiques pour la fin du XXI^e siècle », souligne Cristina Romera-Castillo, chercheuse à l'ICM-CSIC et premier auteur de l'étude, publiée dans la revue Science of the Total Environment (Image 36).¹²⁰

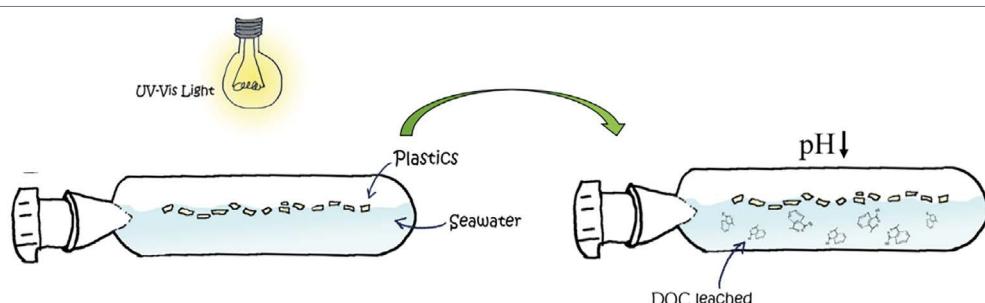


Image 36. La lixiviation des plastiques peut entraîner une baisse du pH de l'eau de mer pouvant atteindre 0,5 unité
Source : Romera-Castillo, C. et al. *Abiotic plastic leaching contributes to ocean acidification*. Science of The Total Environment 854, 158683 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158683>

¹²⁰Institute of Marine Sciences (ICM-CSIC). Plastic degradation in the ocean contributes to its acidification. <https://www.icm.csic.es/en/news/plastic-degradation-ocean-contributes-its-acidification> (Accessed May 1, 2025)

L'acidification des océans correspond à un bouleversement des conditions marines, constituant une pression environnementale persistante et croissante.¹²¹ Ses conséquences sur les écosystèmes s'étendent sur des décennies, voire des siècles ou davantage. Les observations confirment une réduction de la biodiversité dans les systèmes côtiers liée à la baisse du pH.^{122, 123} Cela diminue la résilience des écosystèmes et compromet des fonctions essentielles telles que la fourniture d'habitats, le cycle des nutriments et le stockage du carbone.¹²³

Les recherches indiquent qu'avec l'acidification des océans, les moules (*Mytilus edulis*) connaissent une croissance ralentie et des taux de survie plus faibles (Image 37). Cela entraîne une diminution de leur population, réduisant par conséquent leur capacité à filtrer l'eau et à maintenir la qualité des écosystèmes côtiers.¹²⁴

Les niveaux actuels de pH à la surface des océans sont sans précédent depuis au moins 26 000 ans.¹²⁵ Ce processus a un impact considérable sur les récifs coralliens, les écosystèmes des grands fonds marins et ceux des hautes latitudes, qui dépendent d'espèces uniques. Ces espèces jouent un rôle irremplaçable, et leur disparition perturbe des fonctions clés des écosystèmes, car aucun équivalent ne peut les remplacer.¹²⁶

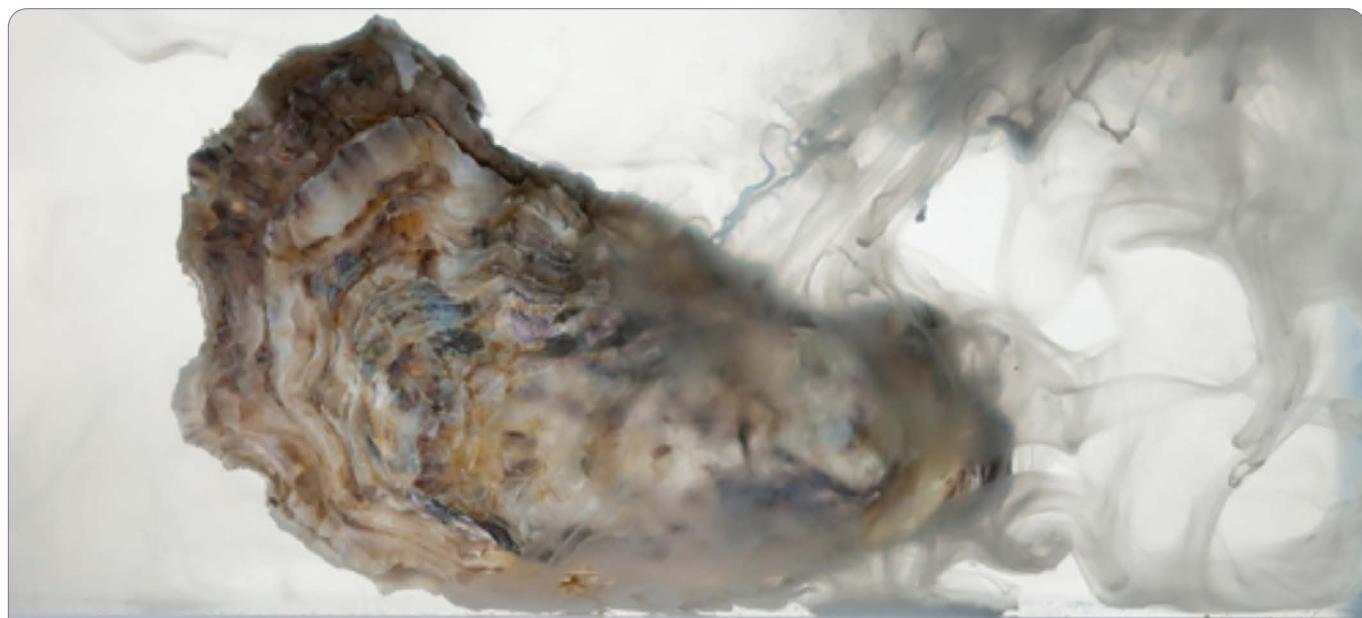


Image 37. Une huître du Pacifique libère un nuage de sperme dans une écloserie d'huîtres à Whiskey Creek, dans l'Oregon. Dans certaines zones côtières, l'acidification a déjà atteint des niveaux critiques : ici, elle a réduit la production de moitié en ralentissant la croissance des larves d'huîtres

Source : <https://www.nationalgeographic.com/magazine/article/ocean-acidification>

¹²¹Scott C. Doney, D. Shallin Busch, Sarah R. Cooley and Kristy J. Kroeker. The Impacts of Ocean Acidification on Marine Ecosystems and Reliant Human Communities. Annual Review of Environment and Resources 45, 83–112 (2020). <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-083019>

¹²²Hall-Spencer, J. M. & Harvey, B. P. Ocean acidification impacts on coastal ecosystem services due to habitat degradation. Emerging Topics in Life Sciences 3, 197–206 (2019). <https://doi.org/10.1042/ETLS20180117>

¹²³James P. Barry, Stephen Widdicombe, and Jason M. Hall-Spencer. Effects of ocean acidification on marine biodiversity and ecosystem function. Ocean acidification, edited by Jean-Pierre Gattuso, Lina Hansson. Oxford, Oxford University Press, 2011. <https://books.google.com.ua/books?id=8yjNFxkALjIC&pg=PA192>

¹²⁴Broszeit, S., Hattam, C. & Beaumont, N. Bioremediation of waste under ocean acidification: Reviewing the role of *Mytilus edulis*. Marine Pollution Bulletin 103, 5–14 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.12.040>

¹²⁵The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1> (Accessed May 1, 2025).

¹²⁶James P. Barry, Stephen Widdicombe, and Jason M. Hall-Spencer. Effects of ocean acidification on marine biodiversity and ecosystem function. Ocean acidification, edited by Jean-Pierre Gattuso, Lina Hansson. Oxford, Oxford University Press, 2011. <https://books.google.com.ua/books?id=8yjNFxkALjIC&pg=PA192>

Les huîtres et les moules présentent une diminution marquée de leur population le long des gradients de saturation décroissante en carbonate. L'acidification des océans pourrait entraîner une baisse des populations d'huîtres et des services écosystémiques qu'elles fournissent à l'état sauvage ; elle pourrait également altérer leur qualité en tant que produit de la mer.

Les recherches confirment que les microplastiques ont des effets négatifs importants sur plusieurs paramètres biologiques tels que la croissance,¹²⁷ la teneur en chlorophylle, l'activité photosynthétique et la production d'espèces réactives de l'oxygène (ROS) chez les microalgues.^{128, 129}

Les données montrent que l'exposition aux MPs entraîne une réduction mondiale de la photosynthèse allant de 7,05 à 12,12 % chez les plantes terrestres, les algues marines et les algues d'eau douce.¹³⁰ La photosynthèse constitue le principal processus de production de dioxygène (O_2) sur Terre, qui est ensuite libéré dans l'atmosphère.

Les microplastiques présents dans les sédiments marins modifient les communautés microbiennes et perturbent le cycle de l'azote, ce qui peut amplifier des problèmes déjà induits par l'activité humaine, tels que les proliférations d'algues toxiques. Les changements dans les communautés planctoniques à la surface des océans pourraient aggraver la désoxygénéation induite par le changement climatique, privant ainsi les organismes marins d'oxygène.¹³¹

Les données montrent qu'entre 1960 et 2010, les océans ont perdu 2 % de leur oxygène dissous en raison de l'élévation de la température de l'eau et de l'accumulation de polluants, notamment les rejets industriels, domestiques et agricoles.¹³² Cette diminution de l'oxygène entraîne la formation de zones mortes – des régions de l'océan où la flore et la faune marines ont presque totalement disparu. Les observations indiquent que dans les années 1960, on recensait 45 zones mortes dans les océans du monde, alors qu'en 2011, leur nombre avoisinait les 700.¹³³ Selon les données publiées sur le site du Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD), le nombre de zones mortes double chaque décennie depuis les années 1960. Si cette tendance se poursuit, il est fort probable que leur nombre atteindra 1 500 d'ici 2025.¹³⁴

La pollution plastique affecte de nombreux processus du système terrestre. D'après les recherches, elle pourrait aggraver des problèmes environnementaux majeurs tels que la perte de la biodiversité et le changement climatique.¹³⁵

¹²⁷Nanthini devi, K., Raju, P., Santhanam, P. & Perumal, P. Impacts of microplastics on marine organisms: Present perspectives and the way forward. Egyptian Journal of Aquatic Research 48, 205–209 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2022.03.001>

¹²⁸Wu, Y. et al. Effect of microplastics exposure on the photosynthesis system of freshwater algae. Journal of Hazardous Materials 374, 219–227 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.04.039>

¹²⁹Sarkar, P., Xavier, K. A. M., Shukla, S. P. & Rathi Bhuvaneswari, G. Nanoplastic exposure inhibits growth, photosynthetic pigment synthesis and oxidative enzymes in microalgae: A new threat to primary producers in aquatic environment. Journal of Hazardous Materials Advances 17, 100613 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100613>

¹³⁰Zhu, R. et al. A global estimate of multiecosystem photosynthesis losses under microplastic pollution. Proceedings of the National Academy of Sciences 122, e2423957122 (2025). <https://doi.org/10.1073/pnas.2423957122>

¹³¹Microplastics pose risk to ocean plankton, climate, other key Earth systems. Mongabay. (2023) <https://news.mongabay.com/2023/10/microplastics-pose-risk-to-ocean-plankton-climate-other-key-earth-systems> (Accessed May 1, 2025)

¹³²Bhuiyan, M. M. U. et al. Oxygen declination in the coastal ocean over the twenty-first century: Driving forces, trends, and impacts. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering 9, 100621 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100621>

¹³³The International Union for Conservation of Nature (IUCN). Ocean deoxygenation. <https://iucn.org/resources/issues-brief/ocean-deoxygenation> (Accessed May 1, 2025)

¹³⁴United Nations Development Programme. Ocean hypoxia: Dead zones. <https://www.undp.org/publications/issue-brief-ocean-hypoxia-dead-zones> (Accessed May 1, 2025)

¹³⁵Villarrubia-Gómez, P., Carney Almroth, B., Eriksen, M., Ryberg, M. & Cornell., S. E. Plastics pollution exacerbates the impacts of all planetary boundaries. One Earth 7, 2119–2138 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.10.017>

IMPACT DES MICRO- ET NANOPLASTIQUES SUR LE CLIMAT

Les fonctions de l'océan

L'océan joue un rôle clé dans le maintien de l'équilibre climatique de la planète, agissant comme un véritable « climatisateur naturel ». Sa capacité unique à absorber puis à libérer progressivement la chaleur contribue à modérer les variations de température sur Terre. Une simple couche d'eau océanique de dix mètres peut absorber davantage de chaleur que toute l'atmosphère terrestre (Image 38). Cela réduit les écarts de température, aussi bien entre le jour et la nuit (Image 39) qu'entre les saisons – été et hiver.

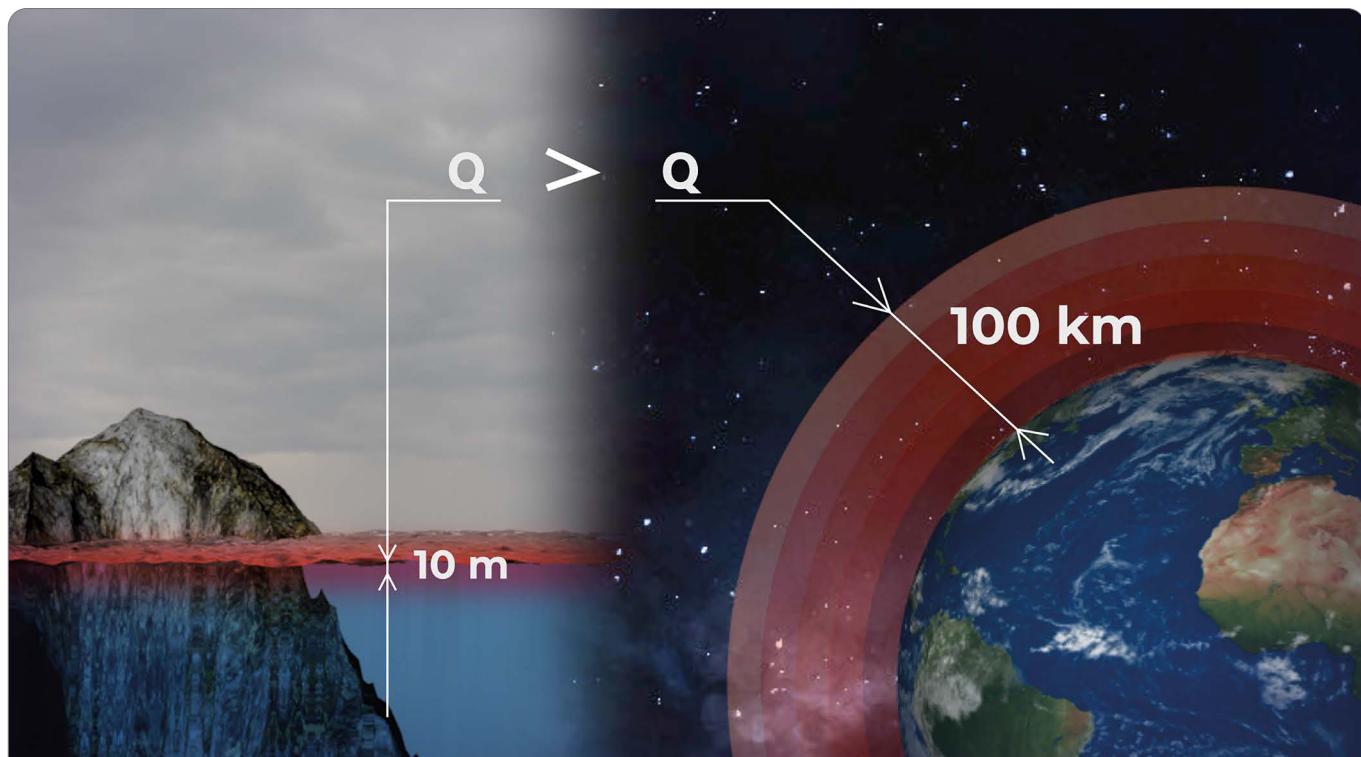


Image 38. Capacité thermique comparée de l'océan et de l'atmosphère: bien que l'atmosphère ait une masse inférieure, l'océan est capable d'accumuler et de conserver des dizaines de fois plus de chaleur, jouant ainsi un rôle essentiel dans la régulation du climat terrestre

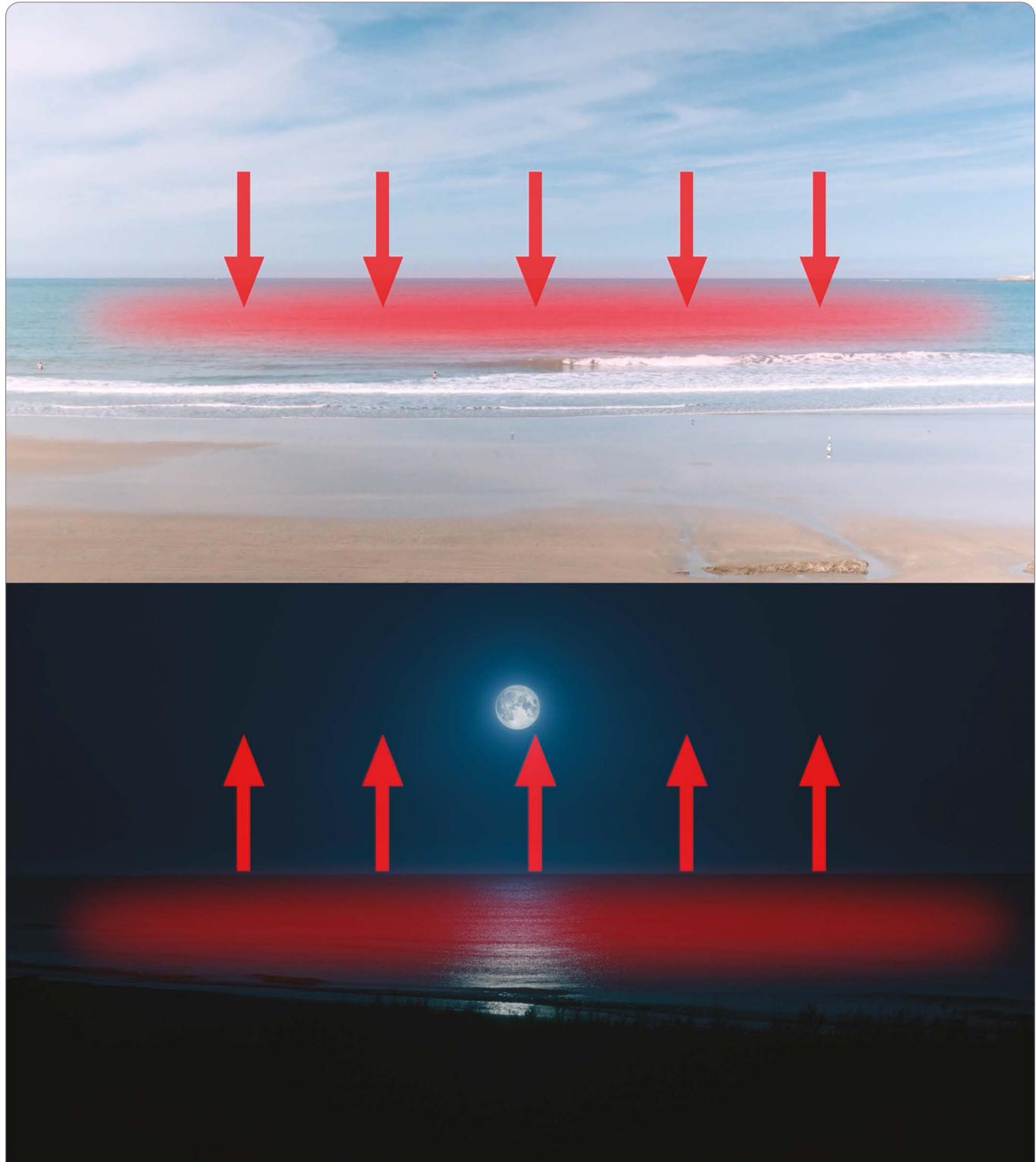


Image 39. Représentation schématique des échanges thermiques journaliers : l'océan absorbe la chaleur pendant la journée et la restitue la nuit, atténuant ainsi les variations de température

Les courants océaniques transportent l'eau chaude des tropiques vers des régions plus froides, comme les hautes latitudes de l'hémisphère Nord. Cela contribue à modérer le climat des zones côtières. En retour, les courants froids ramènent l'eau refroidie vers l'équateur. Ainsi, l'océan régule le climat de la planète.

L'océan exerce une influence majeure sur les processus atmosphériques et joue un rôle essentiel dans la formation des nuages et des précipitations. Chaque jour, une immense quantité d'eau s'évapore à sa surface, se condense ensuite en nuages, puis retombe sur Terre sous forme de pluie ou de neige. Ce processus est vital pour le renouvellement des ressources en eau douce dans les rivières, les lacs et les sols.

Les algues microscopiques présentes dans l'océan, comme le phytoplancton (Image 40), produisent plus de 50 % de l'oxygène atmosphérique.¹³⁶ De nombreux modèles de chimie et de biologie marines prévoient qu'avec le réchauffement de la surface des océans dû à l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, la productivité du phytoplancton diminuera (Image 41).^{137, 138}



Image 40. Le phytoplancton est extrêmement diversifié, allant de bactéries photosynthétiques (cyanobactéries) à des diatomées de type végétal, en passant par des coccolithophores munis d'une « armure » calcaire (dessins non à l'échelle). (Collage adapté d'après des dessins et des micrographies de Sally Bensusen, NASA EOS Project Science Office)

Source : NASA. What are Phytoplankton? <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Phytoplankton>

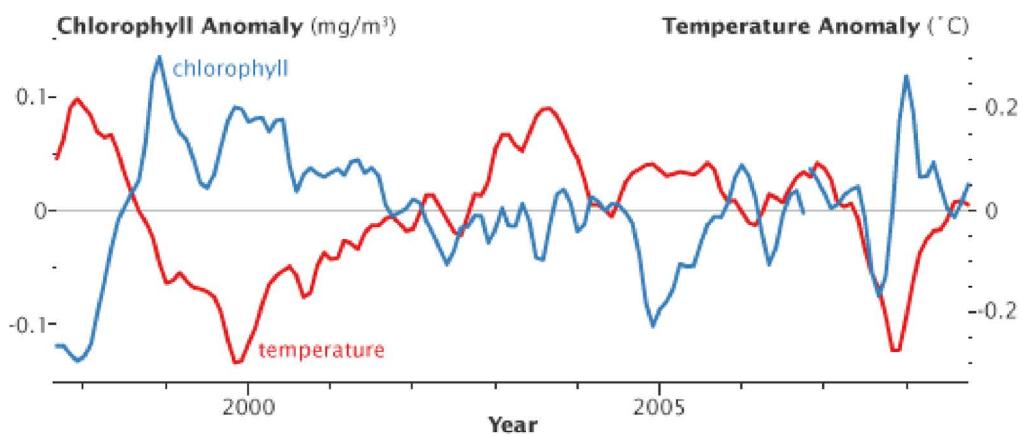


Image 41. Environ 70 % de l'océan est en permanence stratifié en couches qui se mélangent mal. Entre la fin de 1997 et la mi-2008, les satellites ont observé que des températures supérieures à la moyenne (ligne rouge) étaient corrélées à des concentrations de chlorophylle inférieures à la moyenne (ligne bleue) dans ces zones. (Graphique adapté de Behrenfeld et al. 2009 par Robert Simmon)

Source : <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Phytoplankton>

¹³⁶NOAA. How much oxygen comes from the ocean? <https://oceanservice.noaa.gov/facts/ocean-oxygen.html> (Accessed May 1, 2025)

¹³⁷Boyce, D. G., Lewis, M. R. & Worm, B. Global phytoplankton decline over the past century. *Nature* 466, 591–596 (2010). <https://doi.org/10.1038/nature09268>

¹³⁸Bopp, L. et al. Multiple stressors of ocean ecosystems in the 21st century: projections with CMIP5 models. *Biogeosciences* 10, 6225–6245 (2013). <https://doi.org/10.5194/bg-10-6225-2013>

Changement des régimes thermiques océaniques

Le rapport *State of the Global Ocean Report 2024* dresse un constat inquiétant : une tendance au réchauffement océanique sans précédent. Les études montrent qu'entre 1960 et 1986, la température des océans a augmenté à un rythme constant. Cependant, ces dernières décennies, ce processus s'est accéléré, doublant de vitesse (Image 42).¹³⁹

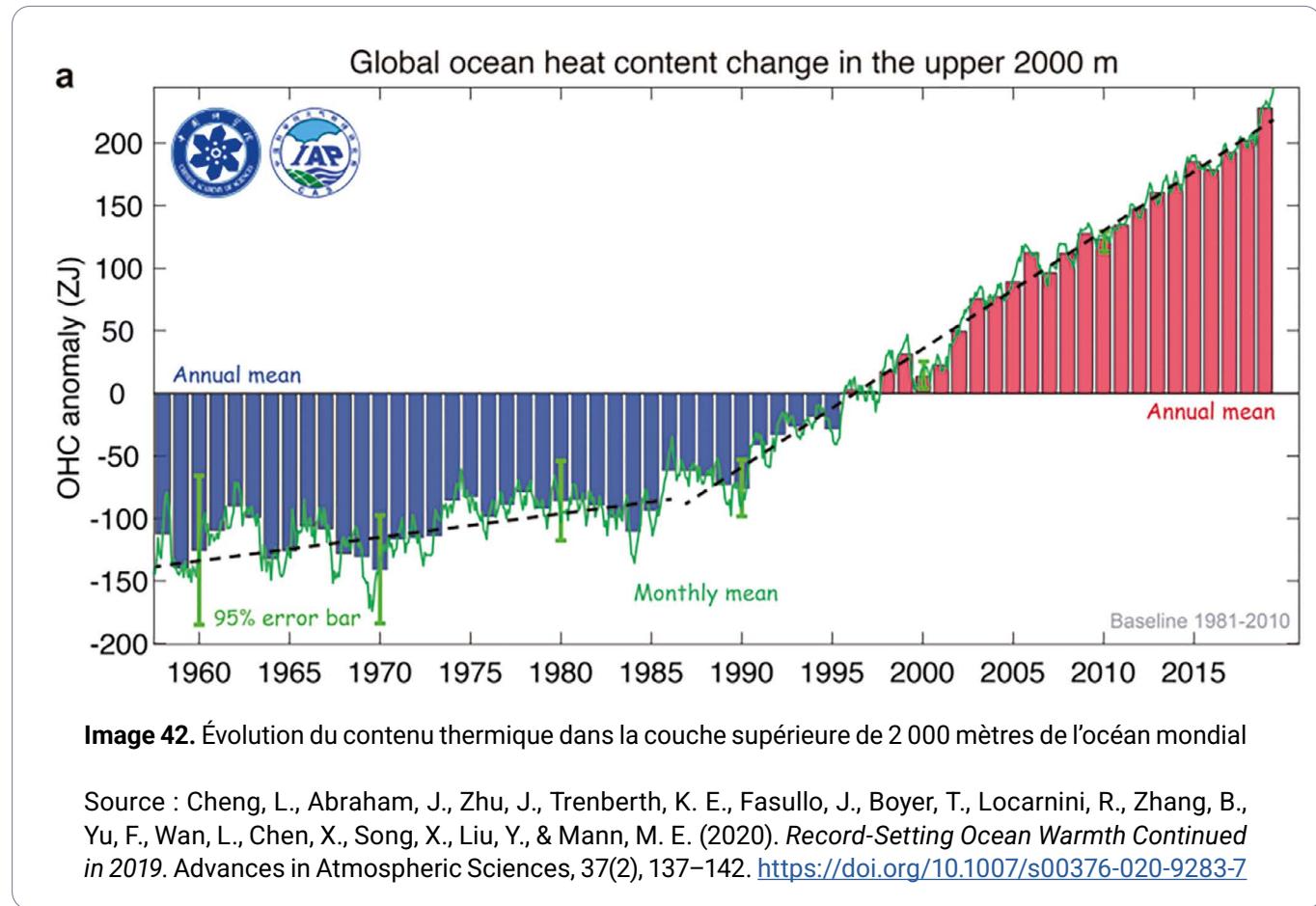


Image 42. Évolution du contenu thermique dans la couche supérieure de 2 000 mètres de l'océan mondial

Source : Cheng, L., Abraham, J., Zhu, J., Trenberth, K. E., Fasullo, J., Boyer, T., Locarnini, R., Zhang, B., Yu, F., Wan, L., Chen, X., Song, X., Liu, Y., & Mann, M. E. (2020). Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. *Advances in Atmospheric Sciences*, 37(2), 137–142. <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>

L'année 2023 est devenue l'année la plus chaude jamais enregistrée, dépassant le précédent record établi en 2016. Un record absolu de température de surface de la mer (SST) a également été observé.¹⁴⁰ Cette tendance s'est poursuivie et l'année 2024 a battu les records de 2023 (Image 43), devenant l'année la plus chaude de l'histoire des relevés climatiques.¹⁴¹ Au cours de cette période, les températures de surface de la mer sont restées à des niveaux mensuels records pendant 15 mois consécutifs, soulignant la persistance de cette tendance au réchauffement.

¹³⁹Cheng, L., Abraham, J., Zhu, J. et al. Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. *Adv. Atmos. Sci.* 37, 137–142 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>

¹⁴⁰NOAA. Earth had its warmest year on record; Upper-ocean heat content was record high while Antarctic sea ice was record low. <https://www.noaa.gov/news/global-climate-202312> (Accessed May 1, 2025)

¹⁴¹World Meteorological Organization (WMO) confirms 2024 as warmest year on record at about 1.55°C above pre-industrial level.

Daily Sea Surface Temperature, World (60°S–60°N, 0–360°E)

Dataset: NOAA OISST V2.1 | Image Credit: ClimateReanalyzer.org, Climate Change Institute, University of Maine

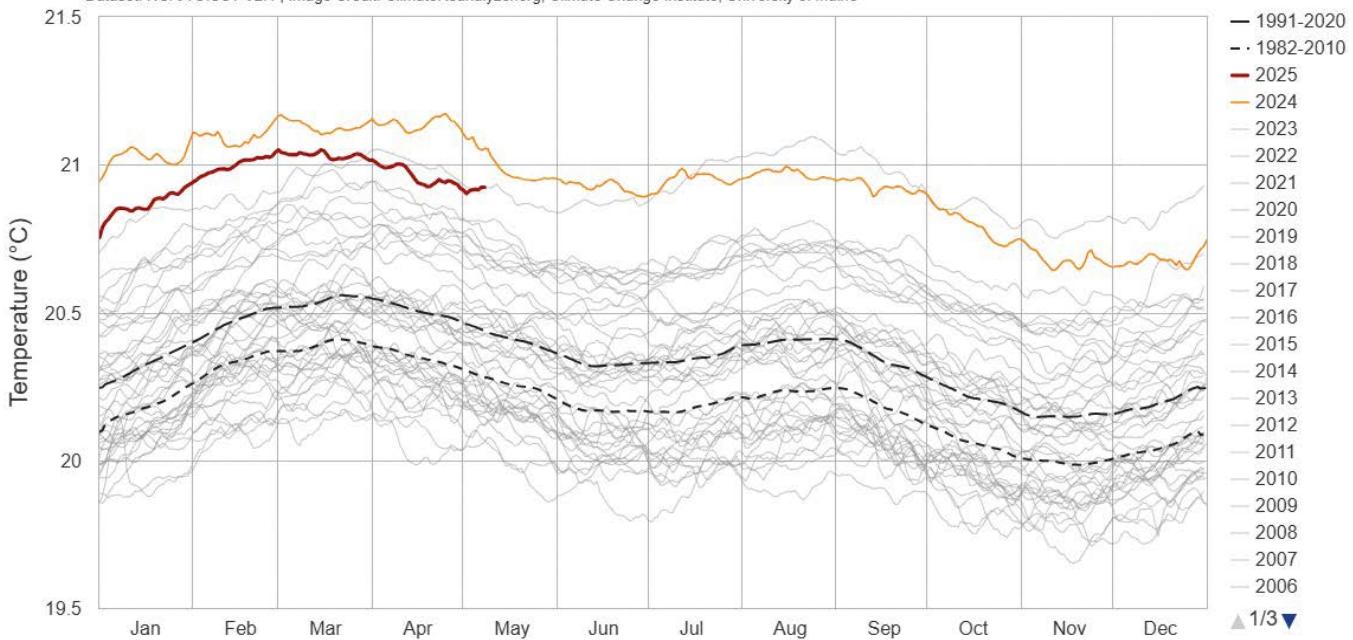


Image 43. Température quotidienne de surface de la mer: représentation graphique des variations de température dans la couche supérieure de l'océan, illustrant les fluctuations saisonnières selon les années

Source : NOAA OISST V2.11. Crédit image : Climate [Reanalyzer.org](https://climatereanalyzer.org/clim/sst_daily/?dm_id=world2), Climate Change Institute. University of Maine https://climatereanalyzer.org/clim/sst_daily/?dm_id=world2

Pour la première fois depuis le début des relevés, la température moyenne mondiale de surface a dépassé de 1,5 °C le niveau préindustriel (Image 44).¹⁴² Selon les experts, il s'agit d'un seuil critique : au-delà de cette limite, l'humanité sera confrontée à des catastrophes climatiques à grande échelle.¹⁴³

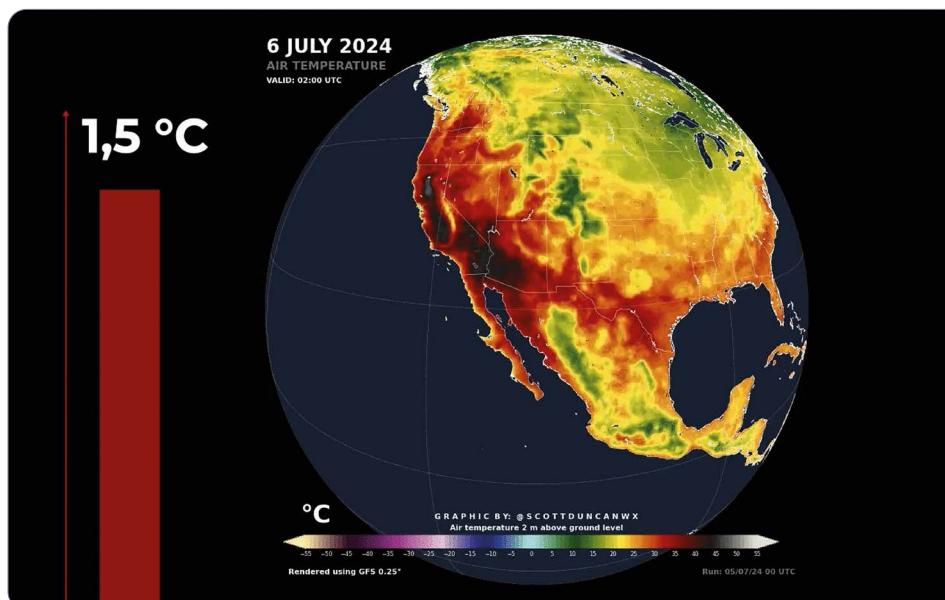


Image 44. Représentation schématique d'un jalon climatique: en 2024, la température moyenne annuelle mondiale a, pour la première fois, dépassé le seuil de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels

¹⁴²World Meteorological Organization (WMO). State of the Global Climate 2024. <https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate-2024> (Accessed May 1, 2025)

¹⁴³IPCC. Global Warming of 1.5°C. (Cambridge University Press, 2022). <https://doi.org/10.1017/9781009157940> (Accessed May 1, 2025)

Une telle augmentation de température était prévue pour le milieu du XXI^e siècle,¹⁴⁴ pourtant ce seuil a déjà été franchi. Selon les estimations de l'ONU, si les tendances actuelles se poursuivent, la température mondiale pourrait augmenter de près de 3 °C au cours de ce siècle.¹⁴⁴

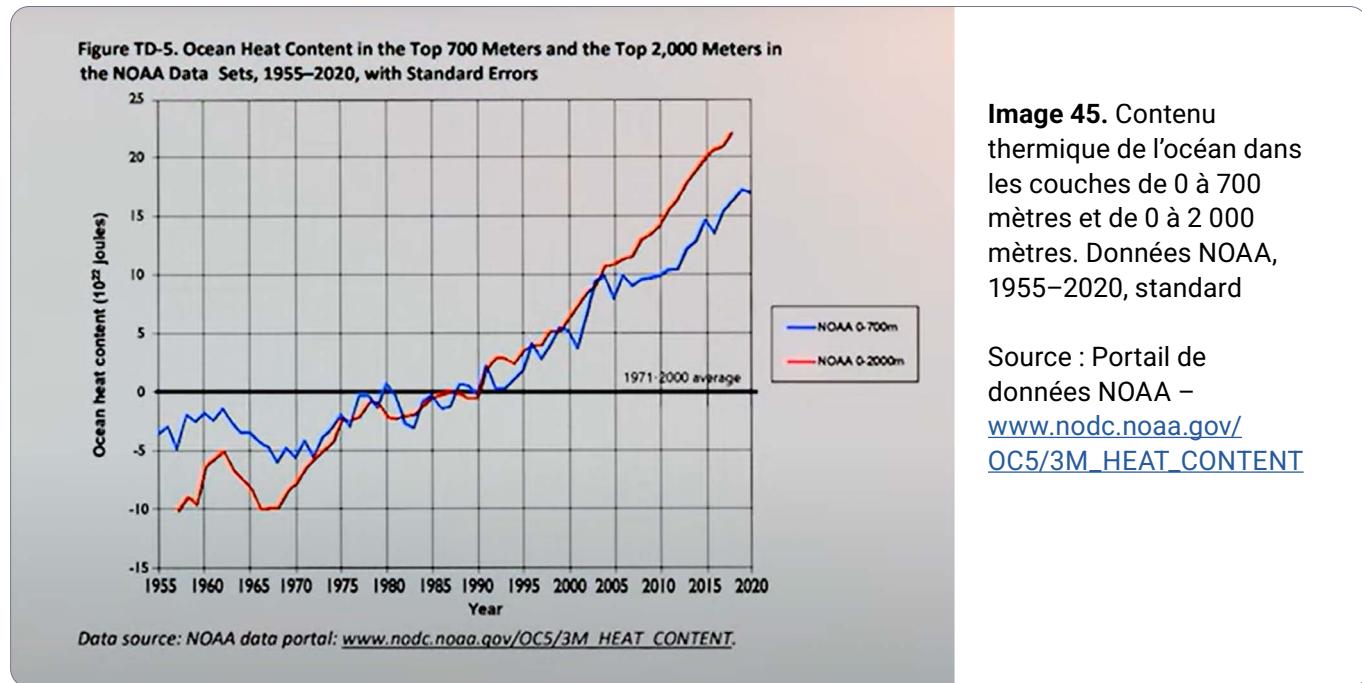


Image 46.

Cette image montre les changements dans le contenu thermique des 700 premiers mètres des océans du globe entre 1955 et 2023. Le contenu thermique océanique est mesuré en joules, une unité d'énergie, et comparé à la moyenne de la période 1971–2000, qui est fixée à zéro comme référence. Le choix d'une autre période de référence ne changerait pas la forme des données dans le temps. Les courbes ont été calculées de manière indépendante selon différentes méthodes par des organismes gouvernementaux de quatre pays : la NOAA (États-Unis), le CSIRO (Australie), l'IAP (Chine) et le MRI/JMA (Japon)



Source : CSIRO, 2024; IAP, 2024; MRI/JMA, 2024; NOAA, 2024

Les profondeurs intermédiaires d'une partie de l'océan Pacifique se sont réchauffées 15 fois plus vite au cours des 60 dernières années que durant les 10 000 années précédentes (Images 45 et 46).¹⁴⁵

¹⁴⁴The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2021: The Physical Science Basis <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

¹⁴⁵Rosenthal, Y., Linsley, B. K., & Oppo, D. W. (2013). Pacific Ocean Heat Content During the Past 10,000 Years. *Science*, 342(6158), 617–621. <https://doi.org/10.1126/science.1240837>; Oppo, D. (2013, October 31). Is Global Heating Hiding Out in the Oceans? <https://www.earth.columbia.edu/articles/view/3130> (Accessed May 1, 2025)

Cela montre que les processus de réchauffement climatique affectent non seulement les couches supérieures de l'océan, mais aussi les zones profondes où la lumière solaire ne pénètre pas. Chauffer l'eau à de telles profondeurs nécessite une quantité d'énergie colossale, soulignant l'ampleur du problème. Selon les scientifiques, pour que l'océan se réchauffe à son rythme actuel, il faudrait une libération d'énergie équivalente à l'explosion de 7 bombes atomiques chaque seconde pendant une année entière¹⁴⁶ – des chiffres vertigineux qui posent une question : d'où vient toute cette énergie ?

La hausse des températures océaniques entraîne inévitablement une élévation du niveau de la mer, menaçant d'engloutir des littoraux entiers. Au cours des deux derniers siècles, le niveau moyen mondial des mers a augmenté de 21 centimètres (8,3 pouces), et rien que durant les 30 dernières années – de 10,1 centimètres (3,98 pouces).¹⁴⁷ Le taux actuel d'élévation est 2,5 fois plus élevé qu'auparavant, et cette tendance devrait se poursuivre. Si la situation ne change pas, des millions de personnes deviendront des réfugiés climatiques, forcés de quitter leur domicile pour chercher refuge loin des côtes.

« *L'élévation que nous avons observée en 2024 a été plus importante que ce que nous avions anticipé* », a déclaré Josh Willis, chercheur sur le niveau de la mer au Jet Propulsion Laboratory de la NASA en Californie du Sud. « *Chaque année est un peu différente, mais ce qui est clair, c'est que l'océan continue de monter, et que le rythme s'accélère de plus en plus* » (Image 47).¹⁴⁸

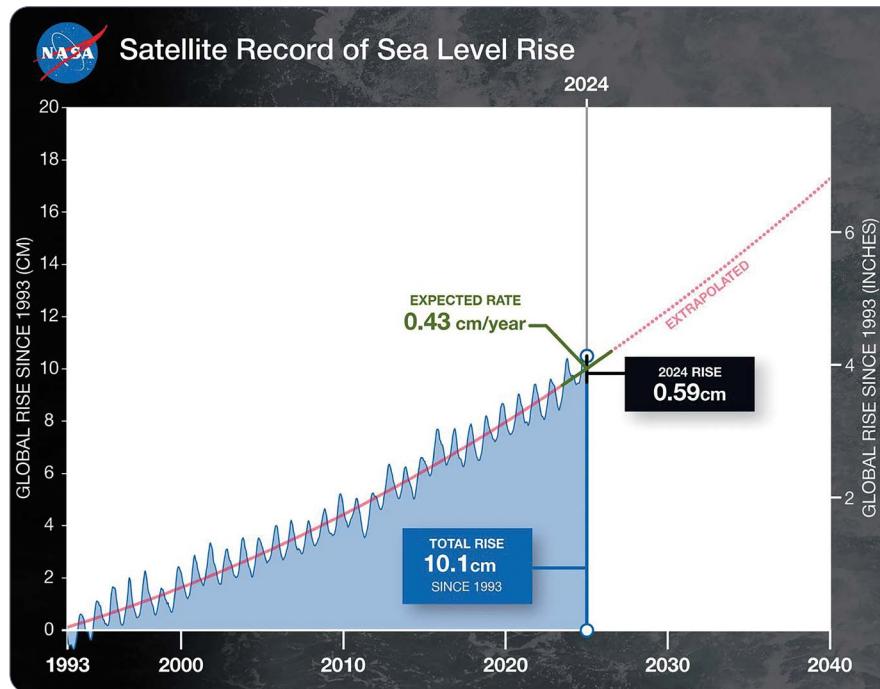


Image 47. Élévation moyenne du niveau de la mer mondial (en bleu) depuis 1993, mesurée par une série de cinq satellites. La ligne rouge continue illustre la trajectoire de cette élévation, qui a plus que doublé au cours des trois dernières décennies. La ligne rouge pointillée représente la projection de l'élévation future du niveau de la mer.

Crédit : NASA/JPL-Caltech.
Source : NASA. NASA Analysis Shows Unexpected Amount of Sea Level Rise in 2024 <https://sealevel.nasa.gov/news/282/nasa-analysis-shows-unexpected-amount-of-sea-level-rise-in-2024>

Le réchauffement des océans contribue également à une augmentation de la fréquence et de l'intensité des phénomènes météorologiques extrêmes, tels que les inondations, les typhons et les précipitations anormales. Ces changements menacent les écosystèmes de la planète ainsi que la vie de milliards de personnes, et leur impact devient chaque année plus manifeste.

¹⁴⁶Cheng, L. et al. Another Year of Record Heat for the Oceans. *Adv. Atmos. Sci.* 40, 963–974 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00376-023-2385-2>

¹⁴⁷NASA. Tracking 30 Years of Sea Level Rise <https://earthobservatory.nasa.gov/images/150192/tracking-30-years-of-sea-level-rise> (Accessed May 1, 2025)

¹⁴⁸NASA. NASA Analysis Shows Unexpected Amount of Sea Level Rise in 2024 <https://sealevel.nasa.gov/news/282/nasa-analysis-shows-unexpected-amount-of-sea-level-rise-in-2024> (Accessed May 1, 2025)

Pourquoi l'océan se réchauffe-il ? Hypothèse

Les principaux facteurs largement reconnus comme contribuant au réchauffement des océans sont les gaz à effet de serre, tels que le CO₂, qui piégent la chaleur dans l'atmosphère et élèvent la température des couches supérieures de l'océan. Cependant, d'autres facteurs pourraient également avoir un impact significatif sur ce processus. Un facteur supplémentaire influençant le réchauffement océanique sera abordé dans le chapitre « Le facteur X : rôle des micro- et nanoplastiques dans la dynamique des catastrophes naturelles ».

Depuis la seconde moitié du XX^e siècle, on observe une augmentation brutale de la quantité de plastiques dans les océans, coïncidant avec une période de développement industriel rapide et de production massive d'objets en plastique (Image 48). Entre 1960 et 2019, une variation de la température des océans a également été enregistrée. Le graphique (image 49) montre une hausse parallèle de la température moyenne de surface de la mer, également observée depuis le milieu du XX^e siècle.

En comparant les deux graphiques (Images 48 et 49), on peut observer une corrélation entre l'augmentation de la concentration de plastiques dans les océans et le réchauffement des eaux océaniques. Cela suggère que la pollution plastique dans les océans pourrait être l'un des facteurs importants – bien que encore insuffisamment étudié – contribuant au réchauffement des eaux marines.

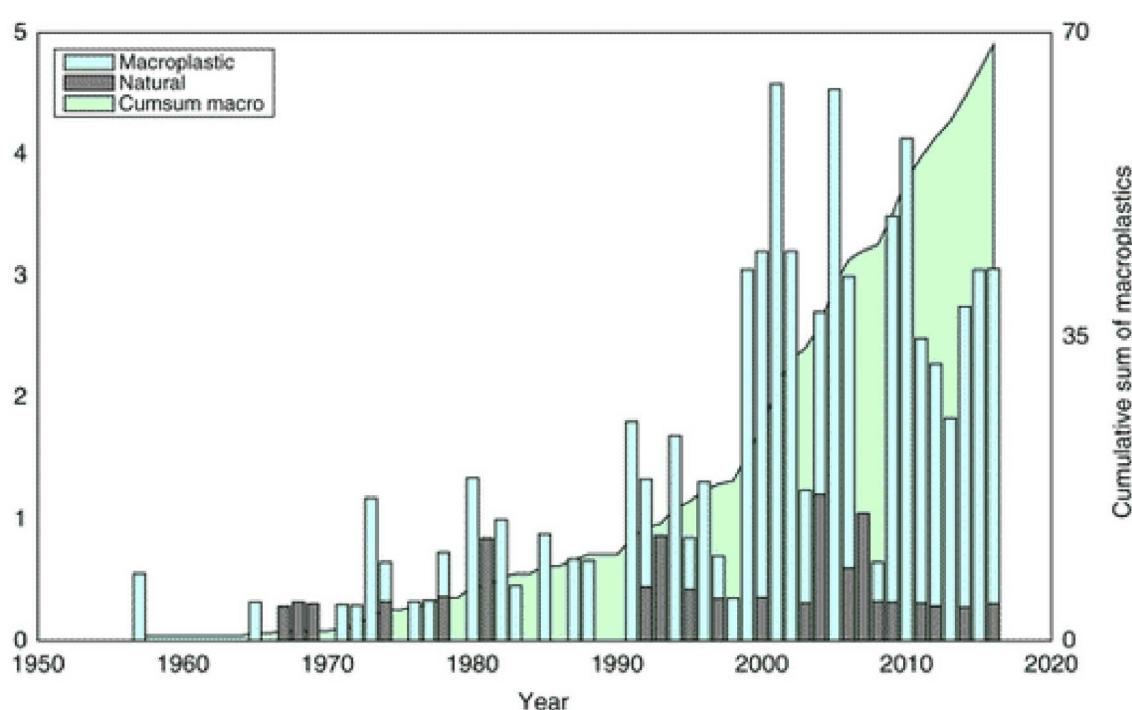


Image 48. Graphique montrant l'augmentation de la concentration de plastiques dans l'océan au cours des dernières décennies. Quantité cumulative de macroplastiques dans l'océan et valeurs annuelles

Source : Ostle, C., Thompson, R.C., Broughton, D. et al. *The rise in ocean plastics evidenced from a 60-year time series*. Nature Communications, 10, 1622 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09506-1>

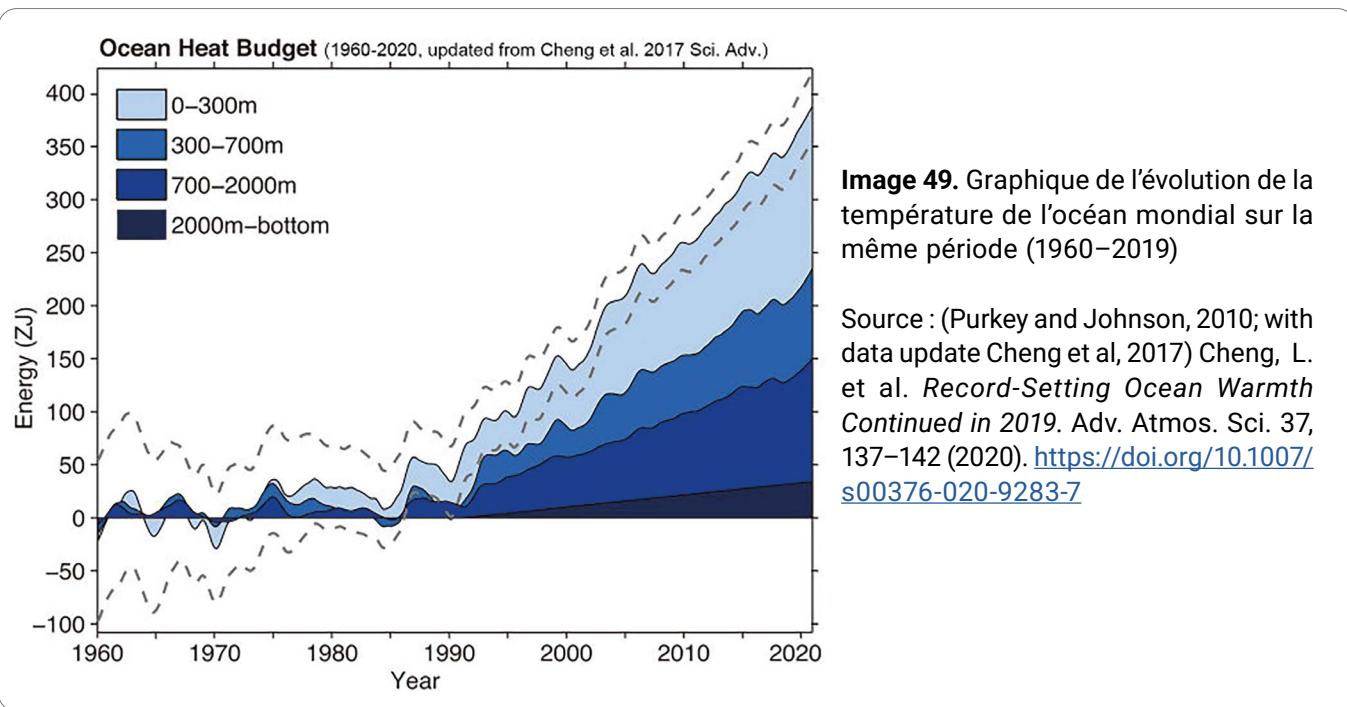


Image 49. Graphique de l'évolution de la température de l'océan mondial sur la même période (1960–2019)

Source : (Purkey and Johnson, 2010; with data update Cheng et al, 2017) Cheng, L. et al. Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. *Adv. Atmos. Sci.* 37, 137–142 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>

Pour approfondir ce problème, il est important de comprendre si les plastiques peuvent altérer les propriétés physiques de l'eau des océans, telles que la conductivité thermique et la capacité thermique. Ces altérations peuvent-elles contribuer à l'augmentation de la température des océans ? Pour mieux appréhender ces processus, examinons les propriétés fondamentales de l'eau ainsi que son interaction avec les polluants.

Propriétés fondamentales de l'eau

La molécule d'eau présente une forme en V symétrique, avec deux atomes d'hydrogène situés d'un même côté par rapport à l'atome d'oxygène, plus volumineux (Image 50).

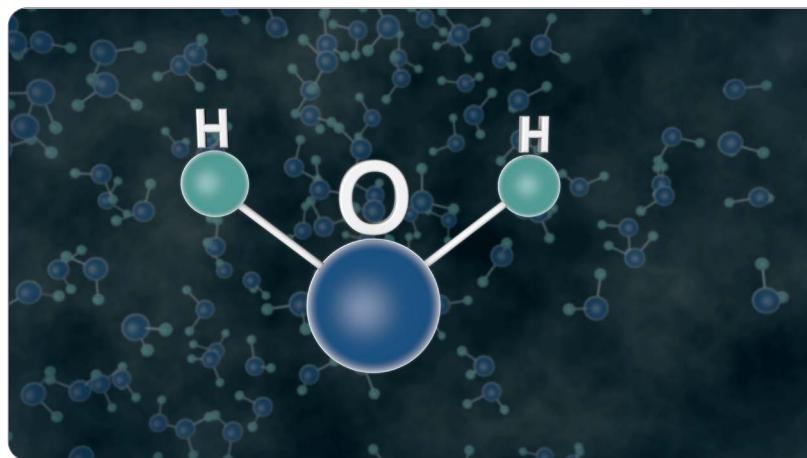


Image 50.

Représentation schématique d'une molécule d'eau : deux atomes d'hydrogène (H) sont liés à un atome d'oxygène (O) selon un angle d'environ 104,5°, formant un dipôle avec une charge positive et une charge négative

Cette structure diffère de celle des molécules linéaires, comme le CO₂, dont tous les atomes sont disposés en ligne droite. La forme unique de la molécule d'eau est essentielle à de nombreux processus sur Terre. Les propriétés particulières des molécules d'eau permettent à l'eau de rester à l'état liquide à des températures qui feraient normalement passer d'autres molécules triatomiques à l'état gazeux (Image 51).

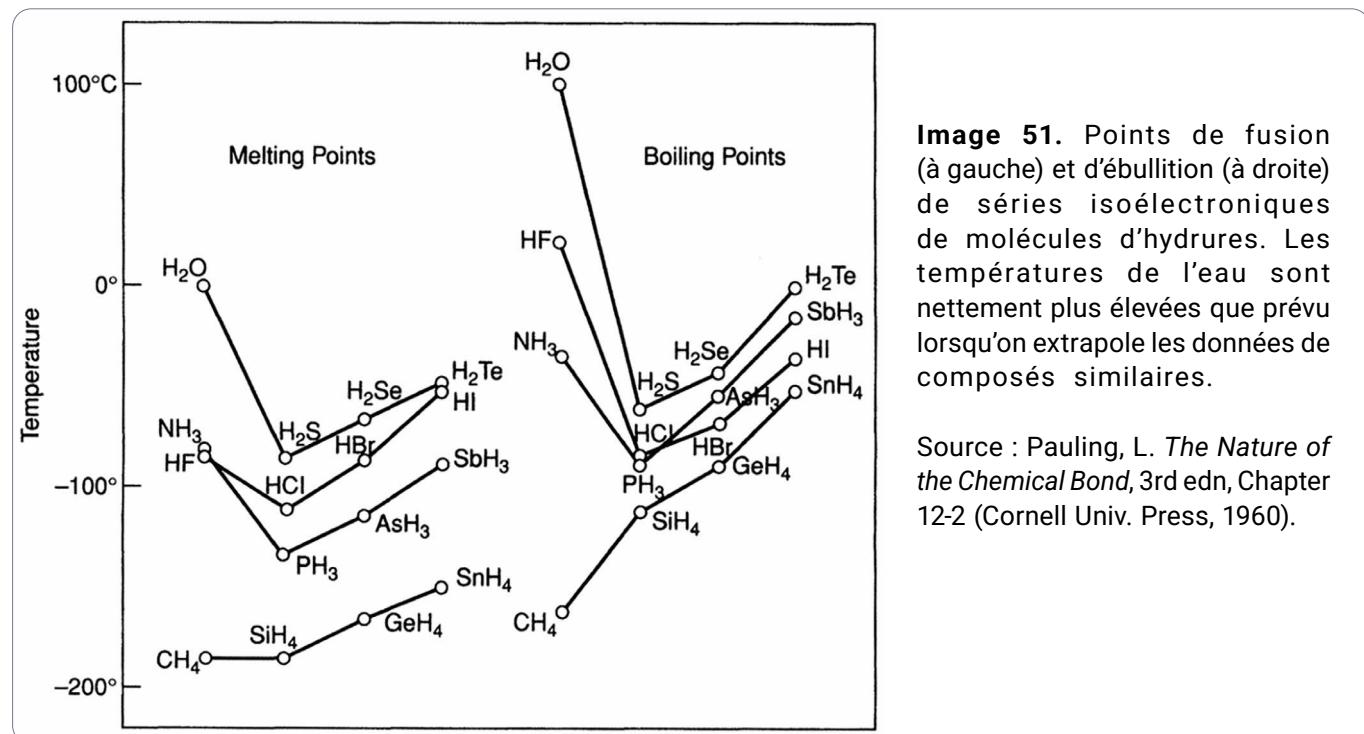


Image 51. Points de fusion (à gauche) et d'ébullition (à droite) de séries isoélectroniques de molécules d'hydrures. Les températures de l'eau sont nettement plus élevées que prévu lorsqu'on extrapole les données de composés similaires.

Source : Pauling, L. *The Nature of the Chemical Bond*, 3rd edn, Chapter 12-2 (Cornell Univ. Press, 1960).

Cela s'explique par les liaisons hydrogène¹⁴⁹ qui relient les molécules d'eau, formant une structure solide et ordonnée.

La plupart des liaisons hydrogène sont des attractions faibles, leur force représentant environ un dixième de celle d'une liaison covalente classique. Elles jouent néanmoins un rôle essentiel. Sans elles, toutes les structures en bois s'effondreraient, le ciment tomberait en poussière, les océans s'évaporeraient et toute matière vivante se désintégrerait en substances inertes.¹⁵⁰

C'est grâce à elles que l'eau peut former des clusters (amas), ce qui explique nombre de ses propriétés anormales (Images 52 et 53). Les clusters d'eau peuvent couvrir plus de 95 % du réseau de liaisons hydrogène, certains regroupant jusqu'à plusieurs milliers de molécules et s'étendant sur plus de 3,0 nanomètres.¹⁵¹

¹⁴⁹ Pauling, L. *The Nature of the Chemical Bond*, 3rd edn, Chapter 12-2 (Cornell Univ. Press, 1960).

¹⁵⁰ Jeffrey, G. A. *An Introduction to Hydrogen Bonding* (Oxford University Press, New York, 1997). <https://books.google.com/books?vid=ISBN0195095499>

¹⁵¹ Gao, Y., Fang, H., Ni, K. & Feng, Y. Water clusters and density fluctuations in liquid water based on extended hierarchical clustering methods. *Sci Rep* 12, 8036 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11947-6>

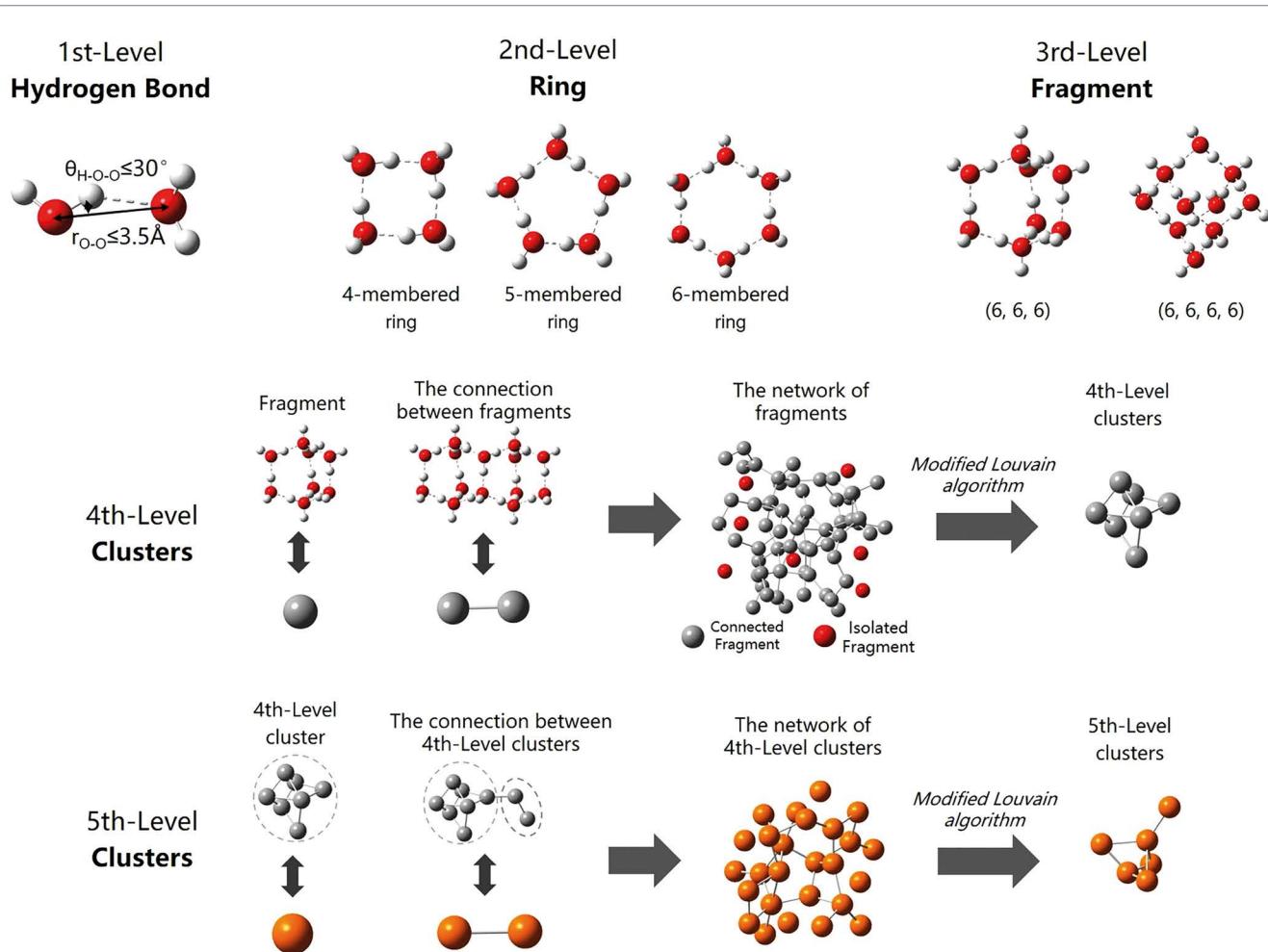


Image 52. Schéma de la méthode de clustering hiérarchique proposée dans cette étude. Les liaisons hydrogène, les cycles et les fragments sont considérés comme des structures de premier, deuxième et troisième niveaux, représentées par des modèles boule-et-bâton selon une perspective chimique. Les boules rouges et blanches représentent respectivement les atomes d'oxygène et d'hydrogène. Les bâtons pleins et pointillés indiquent respectivement les liaisons covalentes O-H et les liaisons hydrogène. Les clusters de quatrième et cinquième niveaux sont illustrés selon une perspective topologique. Les boules représentent la structure des niveaux inférieurs. À noter que les structures figurant dans l'image ne constituent qu'une sélection parmi celles identifiées par l'algorithme de clustering

Source : Gao, Y., Fang, H. & Ni, K. *A hierarchical clustering method of hydrogen bond networks in liquid water undergoing shear flow*. Sci Rep 11, 9542 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88810-7>

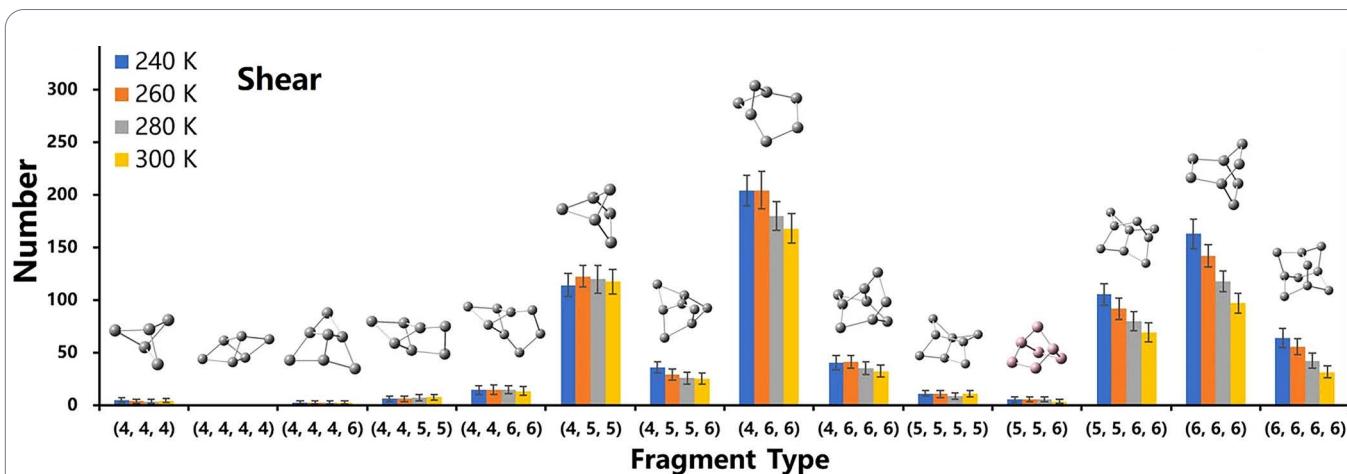


Image 53. Répartition des structures hiérarchiques de 1er, 2e et 3e niveaux dans le réseau, dans divers cas. (a) Répartition des liaisons hydrogène (structures de 1er niveau) à différentes températures. (b) Répartition des cycles (structures de 2e niveau) à différentes températures. (c) Répartition des fragments (structures de 3e niveau) à différentes températures. À noter que (4, 4, 4) désigne un symbole de fragment comprenant trois cycles à 4 atomes.

Source : Gao, Y., Fang, H. & Ni, K. *A hierarchical clustering method of hydrogen bond networks in liquid water undergoing shear flow*. Sci Rep 11, 9542 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88810-7>

Capacité thermique, conductivité thermique et densité de l'eau, et leur importance fonctionnelle

1. Capacité thermique élevée de l'eau

L'eau possède la plus haute capacité thermique massique de tous les liquides et solides dans des conditions normales, à l'exception de quelques gaz comme l'hydrogène.¹⁵² Cela signifie qu'elle peut absorber, stocker et transférer une grande quantité d'énergie thermique tout en subissant une variation de température relativement faible.

La capacité thermique de l'eau se définit comme la quantité de chaleur nécessaire pour éléver la température de 1 gramme d'eau de 1 degré Celsius, et elle est d'environ 4,18 J/(g·°C) dans des conditions standards. Cette propriété constitue l'un des facteurs clés de la régulation climatique : l'eau des océans emmagasine la chaleur pendant la journée et la libère progressivement la nuit. En été, l'océan吸水 l'excès de chaleur, tandis qu'en hiver, il la restitue lentement, agissant comme un thermostat géant et réduisant ainsi les variations de température à l'échelle planétaire.

2. Conductivité thermique de l'eau

L'eau possède une conductivité thermique relativement faible comparée à celle des métaux, mais elle est plus élevée que celle de nombreux autres liquides. La conductivité thermique reflète la capacité d'une substance à transférer la chaleur d'une de ses parties à une autre sans que la substance elle-même ne se déplace. Dans des conditions standard (25 °C), la conductivité thermique de l'eau est d'environ 0,6 W/(m·K), ce qui en fait un bon conducteur de chaleur dans des processus naturels tels que la répartition thermique dans les océans et autres masses d'eau.

¹⁵²Lide, D. R. (ed.) CRC Handbook of Chemistry and Physics, 85th edn (CRC Press, 2004).

Des études montrent que la conductivité thermique de l'eau augmente avec l'augmentation de la température, jusqu'à un certain seuil.¹⁵² De plus, cette valeur peut varier en présence d'impuretés ou de substances dissoutes.^{153,154} Ces caractéristiques influencent la manière dont la chaleur est répartie dans l'eau, ce qui est essentiel pour comprendre les interactions entre l'océan et l'atmosphère.

3. Comportement anormal de la densité de l'eau

Contrairement à la plupart des substances, la densité de l'eau présente un comportement inhabituel en fonction de la température. Lorsque l'eau se refroidit jusqu'à 4 °C, sa densité augmente, mais si elle continue à se refroidir (de 4 °C à 0 °C), sa densité commence à diminuer (Image 54). Lorsqu'elle gèle, sa densité diminue d'environ 8 à 9 %. C'est ce qui explique pourquoi la glace flotte au lieu de couler. Ce phénomène est d'une importance cruciale pour la vie dans les milieux aquatiques, car la glace protège l'eau sous-jacente et les organismes vivants du gel, empêchant ainsi que l'eau ne gèle jusqu'au fond.

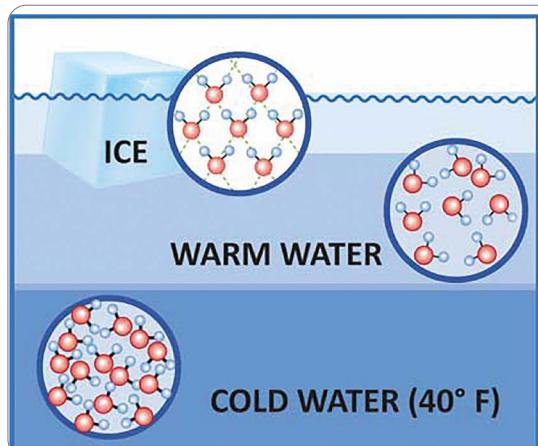


Image 54. Représentation schématique de l'évolution de la densité de l'eau lors du refroidissement : à mesure que l'eau se refroidit, les molécules se rapprochent les unes des autres (ce qui augmente la densité), jusqu'à un certain point. L'eau atteint sa densité maximale à environ 4 °C (soit 40 °F). En continuant de se refroidir, les atomes d'hydrogène se repoussent mutuellement et s'alignent d'une certaine manière pour former des cristaux de glace, ce qui entraîne une expansion et rend la glace environ 10 % moins dense que l'eau liquide

Source : <https://askascientistblog.wordpress.com/2015/11/04/if-molecules-in-colder-things-get-denser-why-does-ice-float/>

Influence des propriétés de l'eau sur le climat et les écosystèmes

Les variations de température de l'eau peuvent affecter de manière significative le bilan thermique de l'océan mondial ainsi que sa capacité à emmagasiner et transférer la chaleur. Cela influencera à son tour le système climatique de la Terre.

Ainsi, les propriétés physico-chimiques de l'eau, en particulier sa capacité thermique et sa conductivité thermique, jouent un rôle essentiel dans le maintien de l'équilibre environnemental de la planète et la régulation des processus climatiques (Image 55).

¹⁵²Lide, D. R. (ed.) CRC Handbook of Chemistry and Physics, 85th edn (CRC Press, 2004).

¹⁵³Sharqawy, M. H., Lienhard, J. H. & Zubair, S. M. Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data. Desalination and Water Treatment 16, 354–380 (2010). <https://doi.org/10.5004/dwt.2010.1079>

¹⁵⁴Jamieson, D. T. & Tudhope, J. S. Physical properties of sea water solutions: thermal conductivity. Desalination 8, 393–401 (1970). [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)80240-4](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)80240-4)

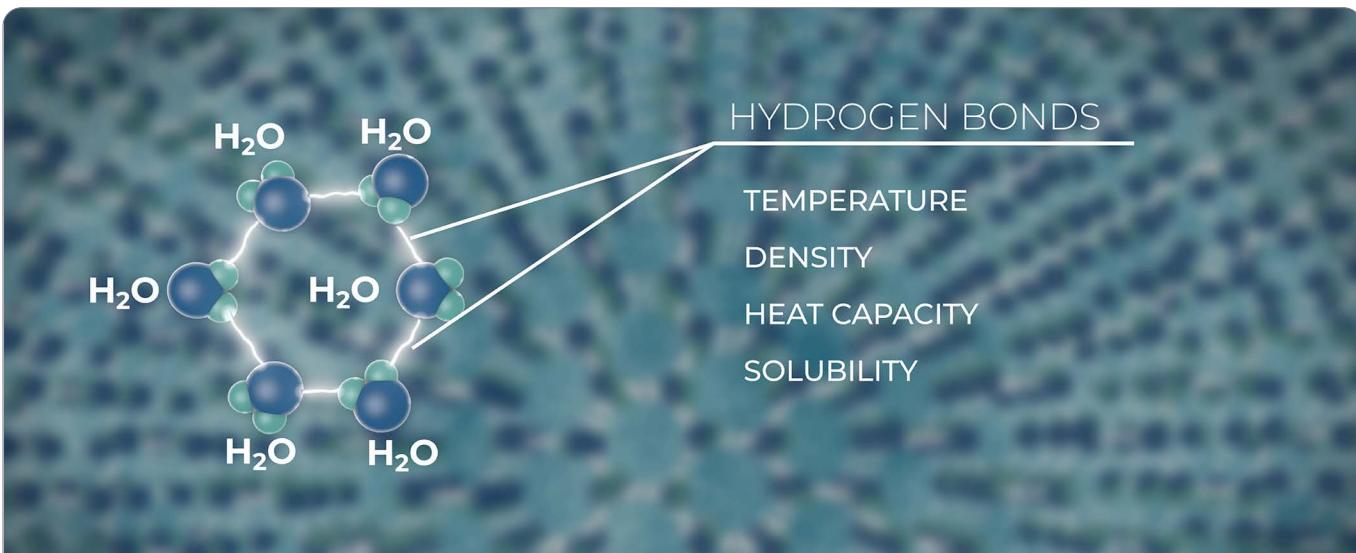


Image 55. Représentation schématique des liaisons hydrogène dans les molécules d'eau et de leur influence sur les propriétés clés de l'eau : les liaisons hydrogène contribuent à la capacité thermique élevée de l'eau, lui permettant d'absorber et de retenir efficacement la chaleur. Elles déterminent également la densité de l'eau – maximale à 4 °C – ainsi que sa capacité à dissoudre les substances polaires et ioniques, faisant de l'eau un solvant universel

Rôle des MNPs dans la modification des propriétés physiques de l'eau de mer

En tant que produits de l'industrie pétrochimique, les plastiques ne se biodégradent pas dans la nature. Ils se décomposent plutôt en particules plus petites, telles que les micro- et nanoplastiques.¹⁵⁵ Ces particules – en particulier les nanoplastiques – peuvent modifier de manière significative les propriétés physiques et chimiques de l'eau, ce qui peut à son tour influencer les écosystèmes et les processus climatiques. Les nanoplastiques sont des particules mesurées en nanomètres, c'est-à-dire qu'elles sont plus petites qu'un virus (Image 56).

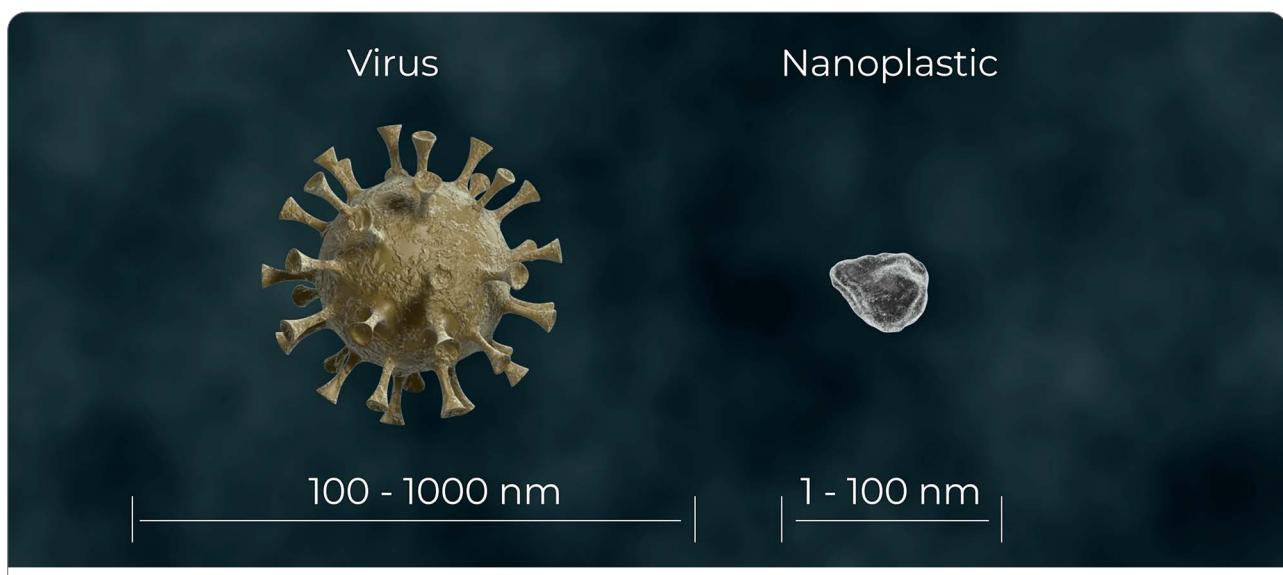


Image 56. Comparaison schématique des tailles d'un virus et d'une particule de nanoplastique

¹⁵⁵Yu, R.-S. & Singh, S. Microplastic Pollution: Threats and Impacts on Global Marine Ecosystems. *Sustainability* 15, 13252 (2023). <https://doi.org/10.3390/su151713252>

Par exemple, les nanoplastiques en nylon (polyamide), qui contiennent de l'azote et de l'oxygène, peuvent former des liaisons hydrogène avec les molécules d'eau.¹⁵⁶ Lorsqu'ils pénètrent dans l'eau, ces nanoplastiques perturbent la structure ordonnée des liaisons hydrogène entre les molécules d'eau, ce qui peut modifier les propriétés physico-chimiques de l'eau (Image 57). En particulier, la mobilité des molécules d'eau diminue, ce qui réduit leur capacité à participer efficacement aux processus d'échange thermique. De plus, dans des solutions aqueuses contenant diverses substances, les nanoparticules plastiques peuvent acquérir une charge électrique.¹⁵⁷

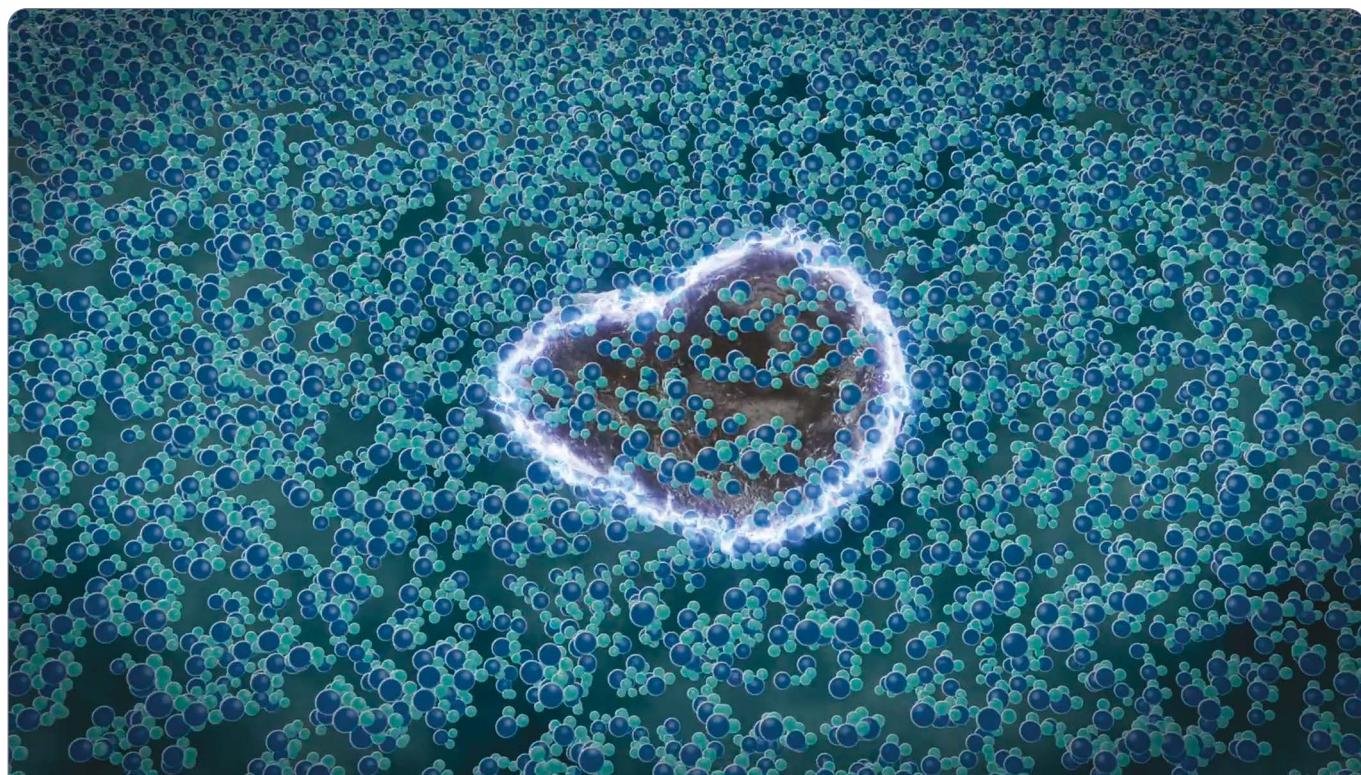


Image 57. Représentation schématique de nanoparticules plastiques chargées dans l'eau : lorsqu'elles sont exposées à des conditions instables de l'eau, telles que la présence d'impuretés organiques ou synthétiques, des variations de pH, de température ou de salinité, la surface des nanoplastiques devient potentiellement active et capable de générer des charges électriques dans le milieu aquatique

Source : Rahman, A. M. N. A. A. et al. *A review of microplastic surface interactions in water and potential capturing methods*. Water Science and Engineering 17, 361–370 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.11.008>

Cela est dû à des modifications chimiques à leur surface, telles que l'oxydation et l'adsorption d'ions, par exemple le sodium (Na^+) et le chlore (Cl^-) présents dans l'eau de mer. Les nanoparticules plastiques chargées, entourées d'ions, attirent les molécules d'eau et forment autour d'elles une coque d'hydratation (Image 58).¹⁵⁸

¹⁵⁶Ivleva, N. P. Chemical Analysis of Microplastics and Nanoplastics: Challenges, Advanced Methods, and Perspectives. *Chem. Rev.* 121, 11886–11936 (2021). <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00178>

¹⁵⁷Rahman, A. M. N. A. A. et al. *A review of microplastic surface interactions in water and potential capturing methods*. Water Science and Engineering 17, 361–370 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.11.008>

¹⁵⁸Chen, Y. et al. Electrolytes induce long-range orientational order and free energy changes in the H-bond network of bulk water. *Sci. Adv.* 2, e1501891 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501891>

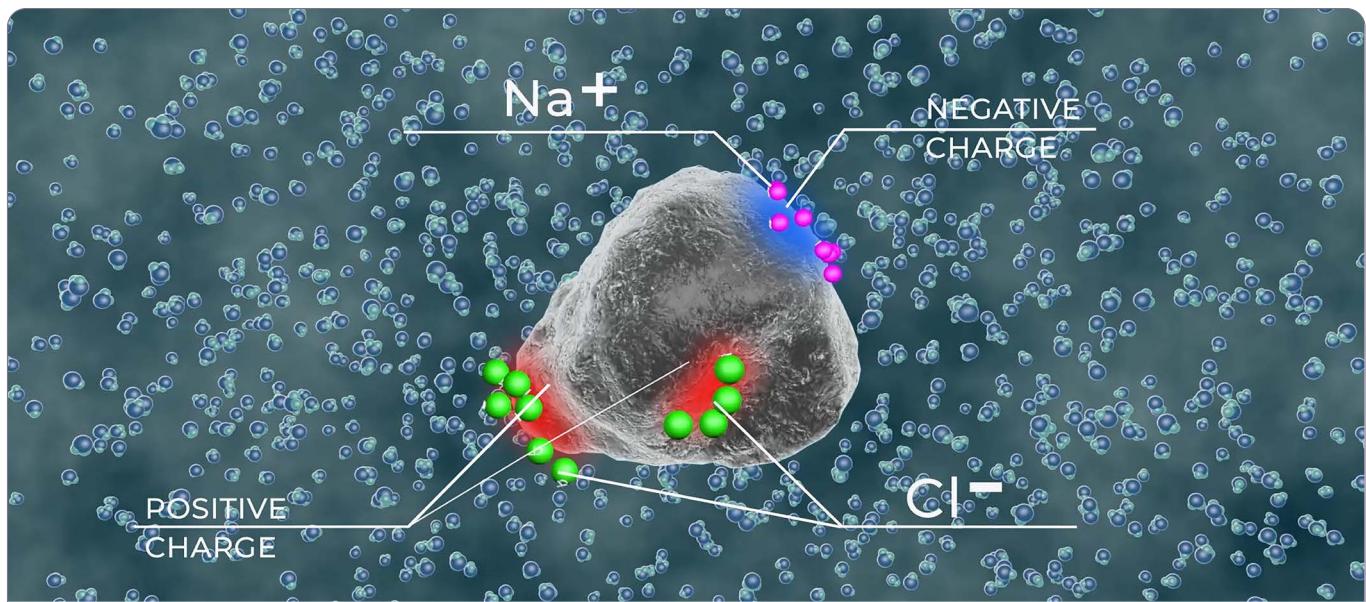


Image 58. Représentation schématique de la formation d'une coque d'hydratation autour de nanoparticules plastiques chargées : dans ce processus, les nanoparticules chargées attirent des ions, ce qui favorise l'organisation de molécules d'eau autour d'elles et crée une coque d'hydratation protectrice

Source : Chen, Y. et al. *Electrolytes induce long-range orientational order and free energy changes in the H-bond network of bulk water*. Sci. Adv. 2, e1501891 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501891>

Des chercheurs de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) ont voulu déterminer la taille de cette coque d'hydratation ionique, c'est-à-dire combien de molécules d'eau réagissent à un ion. Il s'est avéré qu'un seul ion peut influencer environ un million de molécules d'eau autour de lui. Cet effet est renforcé lorsqu'une particule présente une forte charge de surface et une concentration élevée d'ions adsorbés. Par conséquent, une seule nanoparticule plastique peut modifier les propriétés de millions de molécules d'eau (Image 59).¹⁵⁸ Les molécules liées dans une coque d'hydratation sont moins mobiles.¹⁵⁹ En conséquence, la capacité thermique totale de l'eau diminue.^{160, 161}

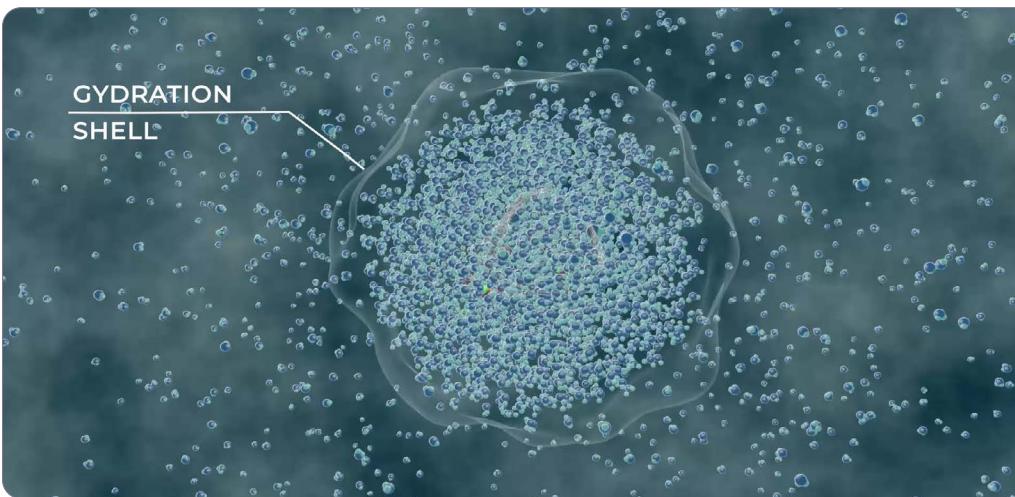


Image 59. Illustration schématique de la coque d'hydratation entourant une nanoparticule plastique

¹⁵⁸Chen, Y. et al. *Electrolytes induce long-range orientational order and free energy changes in the H-bond network of bulk water*. Sci. Adv. 2, e1501891 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501891>

¹⁵⁹Laage, D., Elsaesser, T. & Hynes, J. T. *Water Dynamics in the Hydration Shells of Biomolecules*. Chem. Rev. 117, 10694–10725 (2017). <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00765>

¹⁶⁰Chew, T., Daik, R. & Hamid, M. *Thermal Conductivity and Specific Heat Capacity of Dodecylbenzenesulfonic Acid-Doped Polyaniline Particles—Water Based Nanofluid*. Polymers 7, 1221–1231 (2015). <https://doi.org/10.3390/polym7071221>

¹⁶¹Riazi, H. et al. *Specific heat control of nanofluids: A critical review*. International Journal of Thermal Sciences 107, 25–38 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.03.024>

La perturbation des structures de liaisons hydrogène entraîne également une diminution de la conductivité thermique.¹⁶² Par conséquent, l'eau peut rester chaude à proximité des nanoparticules plastiques, car elle perd sa capacité à transférer efficacement la chaleur.

Zones de concentration des micro- et nanoplastiques dans l'océan

Les micro- et nanoplastiques peuvent être dispersés dans tout l'océan par les courants, tandis que les particules plus denses ou les plastiques contaminés peuvent se déposer sur le fond marin. Une accumulation de nanoplastiques est également observée dans les zones de thermocline – des couches de transition entre les eaux de surface chaudes et les eaux profondes plus froides (Image 60).¹⁶³

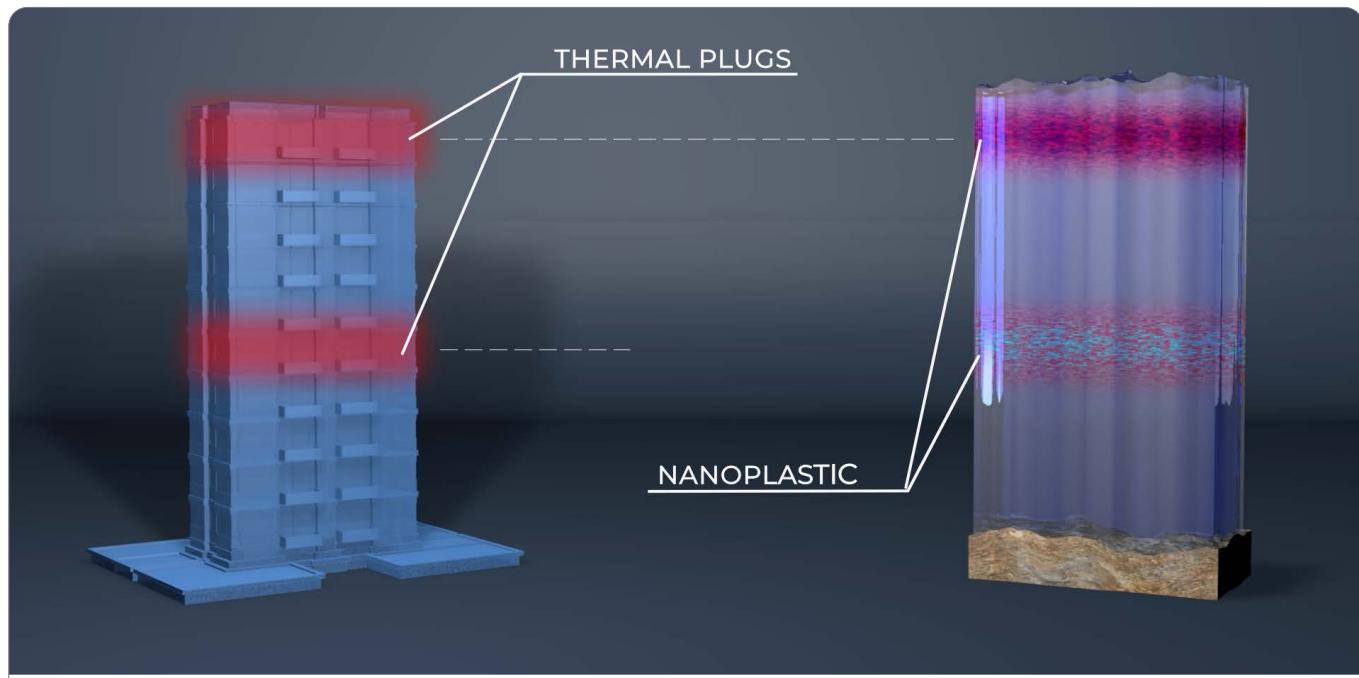


Image 60. Cette image illustre une analogie entre les zones de concentration des micro- et nanoplastiques dans l'océan et un immeuble à plusieurs étages présentant des « blocages thermiques » aux 5^e et 10^e étages. Ces blocages empêchent un échange thermique normal, provoquant une accumulation de chaleur à ces niveaux au lieu d'une répartition uniforme. Une caméra thermique révélerait que la température à l'intérieur de cet immeuble est nettement plus élevée que dans un immeuble similaire sans blocages. De façon similaire, les nanoplastiques perturbent les mécanismes naturels d'échange thermique dans l'eau, créant des « blocages thermiques » dans l'océan

Des concentrations accrues de nanoplastiques dans les océans peuvent entraîner des modifications du bilan thermique global. Cela peut influencer l'élévation de la température des océans, contribuant potentiellement aux changements climatiques. Il est important de noter que même une faible quantité de nanoplastiques peut avoir un impact significatif sur les écosystèmes. L'augmentation de la température de surface des océans accélère la fragmentation des déchets plastiques en micro- et nanoplastiques (Image 61). Par conséquent, le nombre de ces particules augmente, et elles pénètrent dans l'atmosphère avec la vapeur d'eau. La présence de micro- et nanoplastiques dans l'atmosphère contribue à un réchauffement supplémentaire, ce qui, à son tour, accentue le réchauffement de l'océan. Ainsi, une boucle de rétroaction se forme, dans laquelle ces processus se renforcent mutuellement.

¹⁶²Berger Bioucas, F. E. et al. Effective Thermal Conductivity of Nanofluids: Measurement and Prediction. *Int J Thermophys* 41, 55 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10765-020-2621-2>

¹⁶³Tikhonova, D. A., Karetnikov, S. G., Ivanova, E. V. & Shalunova, E. P. The Vertical Distribution of Microplastics in the Water Column of Lake Ladoga. *Water Resour* 51, 146–153 (2024). <https://doi.org/10.1134/S009780782370063X>

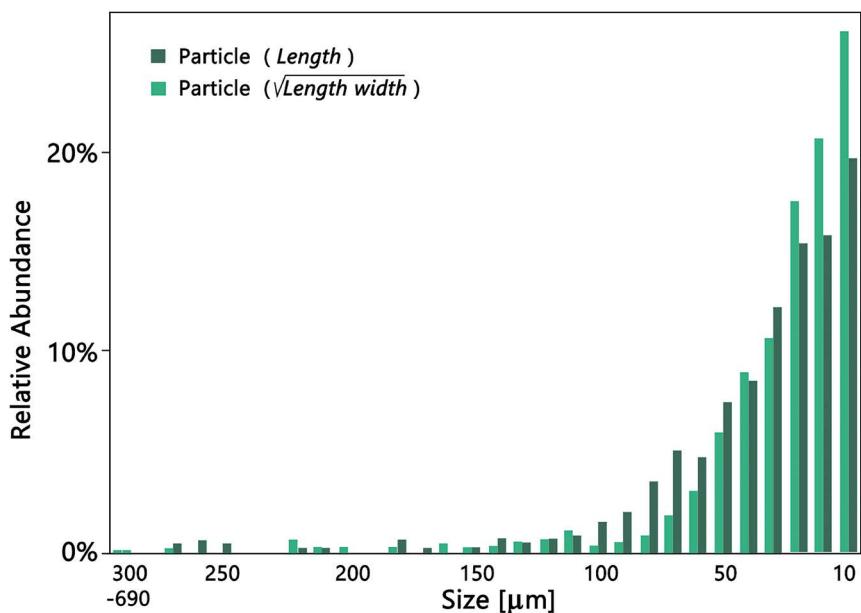


Image 61. Répartition relative des particules de microplastiques par taille sur l'ensemble des stations analysées (np = 543). Les images montrent la plus petite (à gauche) et la plus grande (à droite) particule de microplastique observée et confirmée par spectroscopie Raman

Source : Enders, K., Lenz, R., Stedmon, C. A. & Nielsen, T. G. *Abundance, size and polymer composition of marine microplastics $\geq 10 \mu\text{m}$ in the Atlantic Ocean and their modelled vertical distribution*. Marine Pollution Bulletin 100, 70–81 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.09.027>

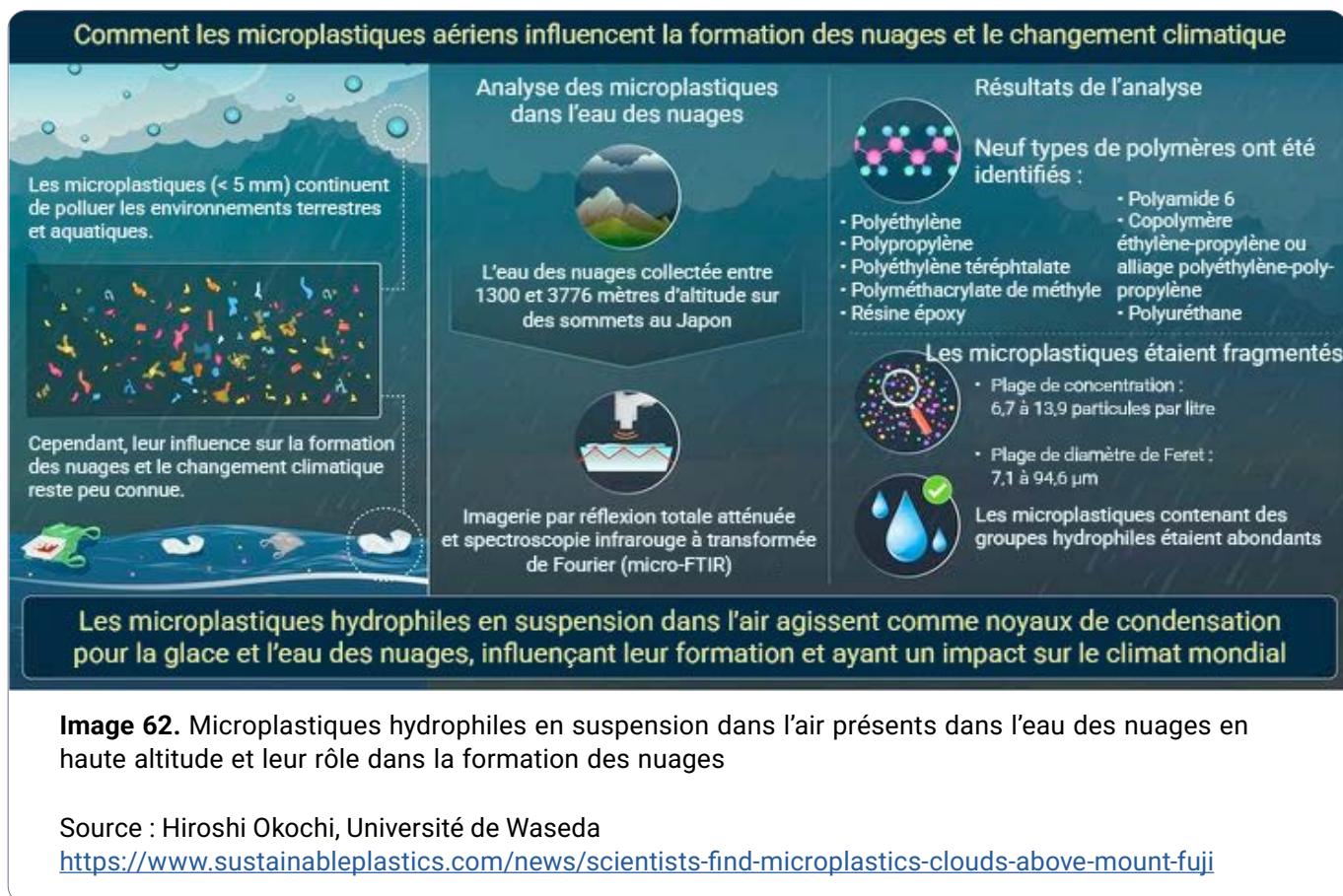
Lien entre la charge électrostatique des MNP et les phénomènes atmosphériques

Les micro- et nanoplastiques pénètrent dans l'atmosphère par divers vecteurs. La vapeur d'eau s'évaporant à la surface des océans et d'autres masses d'eau transporte des microparticules dans l'air.¹⁶⁴ Sur terre, les principales sources de plastiques atmosphériques comprennent les usines, les incinérateurs de déchets et les décharges. De plus, les microplastiques sont libérés dans l'air lorsque les engrangements agricoles et les films plastiques se dessèchent et sont dispersés par les vents. Les particules de microplastiques sont également émises par le frottement des pneus de voiture.

Ces sources – parmi d'autres – contribuent de manière significative à la pollution atmosphérique. Ces processus favorisent l'accumulation et la dispersion des microplastiques dans l'atmosphère, générant des menaces environnementales et climatiques majeures. Une fois dans l'atmosphère, les particules de micro- et nanoplastiques peuvent servir de noyaux de condensation pour la vapeur d'eau. Plus ces noyaux sont nombreux, plus la condensation de la vapeur en gouttelettes se produit rapidement. Des microplastiques en suspension dans l'air ont été détectés dans des échantillons d'eau de nuages prélevés au sommet de montagnes au Japon (Image 62).¹⁶⁵

¹⁶⁴Shaw, D. B., Li, Q., Nunes, J. K. & Deike, L. Ocean emission of microplastic. PNAS Nexus 2, pgad296 (2023). <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad296>

¹⁶⁵Wang, Y. et al. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation. Environ Chem Lett 21, 3055–3062 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x>



66

« Dans un environnement pollué contenant beaucoup plus de particules d'aérosols, comme les microplastiques, l'eau disponible se répartit entre un bien plus grand nombre de particules d'aérosols, formant de plus petites gouttelettes autour de chacune d'elles. Lorsqu'il y a plus de gouttelettes, il pleut moins, car les gouttelettes ne tombent qu'une fois qu'elles atteignent une taille suffisante. Ainsi, davantage d'eau s'accumule dans le nuage avant que les gouttelettes ne deviennent assez grosses pour tomber, ce qui donne lieu, au final, à des précipitations plus intenses », explique Miriam Friedman, professeure de chimie au Département de météorologie et de sciences de l'atmosphère de l'Université d'État de Pennsylvanie.¹⁶⁶

Cela permet d'expliquer pourquoi des précipitations anormales ont été observées dans différentes régions ces dernières années.

¹⁶⁶The Pennsylvania State University Research. Microplastics impact cloud formation, likely affecting weather and climate. (2024)
<https://www.psu.edu/news/research/story/microplastics-impact-cloud-formation-likely-affecting-weather-and-climate>

Charges électriques dans les nuages

L'atmosphère terrestre constitue un système électrique complexe dans lequel les molécules d'eau jouent un rôle essentiel. Depuis 1752, lorsque Benjamin Franklin a démontré pour la première fois que l'atmosphère est électrifiée et que les orages possèdent une nature électrique, il est devenu clair que l'eau — sous forme de vapeur, de liquide ou de glace — joue un rôle clé dans ces processus. Bien que l'eau pure soit électriquement neutre, lors des changements de phase comme la fusion ou la congélation, ainsi que lors des collisions entre molécules, elle peut transférer des ions à d'autres particules. Cela entraîne une accumulation de charges électriques et contribue aux phénomènes électriques atmosphériques.

Dans l'atmosphère, les collisions entre cristaux de glace, gouttelettes d'eau surfondue et autres particules, en particulier en présence de champs électriques naturels, provoquent une séparation des charges. Ce processus joue un rôle central dans le développement de l'électricité atmosphérique, y compris dans la formation des nuages d'orage. Il est également essentiel à la formation des nuages et des précipitations. Les gouttelettes électriquement chargées s'attirent mutuellement, ce qui accélère leur coalescence en gouttes plus grosses. Cela conduit finalement à la formation de nuages capables de produire des précipitations telles que la pluie, la neige ou la grêle.

66

« Les charges sont vraiment importantes, et dans la formation des nuages, elles sont pratiquement tout. Et ce que nous avons découvert, c'est qu'elles sont cruciales », explique Gerald H. Pollack, PhD, professeur de bioingénierie à l'Université de Washington, rédacteur en chef et fondateur de la revue de recherche interdisciplinaire WATER.¹⁶⁷

En 1843, Michael Faraday a découvert que de l'électricité peut être générée lorsque des gouttelettes d'eau frottent des surfaces métalliques, chargeant ainsi efficacement l'eau. Cette découverte a suscité des recherches supplémentaires sur la manière dont l'eau devient électriquement chargée par frottement, transitions de phase et électrification par contact, et a même donné lieu à des tentatives pour exploiter cet effet comme nouvelle source d'énergie.

Il est connu que l'air humide peut neutraliser les charges de surface en formant un mince film d'eau qui permet aux ions de se déplacer et de dissiper la charge accumulée. Cependant, dans certains cas, les surfaces qui absorbent l'eau peuvent au contraire accumuler une charge issue d'une atmosphère humide, ce qui influence également l'environnement électrique avoisinant.¹⁶⁸ Des recherches ont également montré que les métaux lourds peuvent facilement se lier aux microplastiques, et que cette combinaison pourrait représenter un risque sérieux pour les écosystèmes mondiaux.

¹⁶⁷AllatRa TV. Anthropogenic factor in the oceans' demise: Popular science film. Time 55:00, (2025).

<https://allatra.tv/en/video/anthropogenic-factor-in-the-oceans-demise-popular-science-film> (Accessed May 1, 2025).

¹⁶⁸Lax, J. Y., Price, C. & Saaroni, H. On the Spontaneous Build-Up of Voltage between Dissimilar Metals Under High Relative Humidity Conditions. Sci Rep 10, 7642 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64409-2>

De plus, les microplastiques et le mélange de substances présentes à leur surface peuvent non seulement se fixer à d'autres polluants, mais aussi interagir entre eux, modifiant ainsi leurs propriétés chimiques.¹⁶⁹ Lorsque des particules de micro- et nanoplastiques pénètrent dans l'atmosphère, elles peuvent perturber l'équilibre fragile des processus atmosphériques. Les particules plastiques peuvent porter une charge, renforçant l'attraction des molécules d'eau polaires et favorisant la formation de gouttelettes. Contrairement aux noyaux de condensation typiques comme le pollen, le sel marin ou la suie, les particules plastiques peuvent rassembler des gouttelettes plus efficacement que des particules neutres.¹⁷⁰

Cela signifie que les gouttelettes d'eau commencent à se former plus rapidement autour des particules chargées, ce qui modifie la structure des nuages et peut conduire à la formation de gouttelettes plus grosses, voire de cristaux de glace anormalement grands.¹⁷¹ Par exemple, une étude récente menée par un groupe de chercheurs a identifié des granulés plastiques à surface hydrophile dans des nuages au sommet de montagnes au Japon.¹⁷²

Impact sur la formation des nuages et les précipitations

Les microplastiques peuvent influencer la nature des précipitations, la prévision météorologique, la modélisation climatique, voire la sécurité des vols, en affectant la manière dont les cristaux de glace atmosphériques forment les nuages.

Une étude¹⁷³ a montré que les gouttelettes d'eau contenant des microplastiques gèlent à des températures de 4 à 10 °C plus élevées que les gouttelettes sans microplastiques, ce qui signifie qu'elles gèlent à des altitudes plus basses. En général, une gouttelette d'eau sans impuretés gèle autour de -38 °C. Cependant, dans le cas des microplastiques, 50 % des gouttelettes ont gelé entre -18 et -24 degrés Celsius, selon le type de plastique.

Les gouttelettes d'eau contenant des microplastiques gèlent plus rapidement, formant des particules de glace plus grosses. Celles-ci sont entraînées vers le haut par les courants ascendants, enrobées à plusieurs reprises de couches de glace, puis retombent au sol. Ce phénomène peut entraîner une augmentation de la taille des grêlons (Images 63 et 64), intensifiant leur pouvoir destructeur et accélérant la formation des nuages de glace. Par conséquent, la fréquence et l'intensité des précipitations – y compris la pluie et la neige – peuvent être modifiées. Cela peut déclencher des effets en cascade qui affectent le climat, le cycle hydrologique et les écosystèmes.

¹⁶⁹Ho, W.-K. et al. Sorption Behavior, Speciation, and Toxicity of Microplastic-Bound Chromium in Multisolute Systems. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 10, 27–32 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689>

¹⁷⁰Harrison, R. G. Atmospheric electricity and cloud microphysics <https://cds.cern.ch/record/557170/files/p75.pdf>

¹⁷¹The Pennsylvania State University News. Microplastics impact cloud formation, likely affecting weather and climate. (2024) <https://www.psu.edu/news/research/story/microplastics-impact-cloud-formation-likely-affecting-weather-and-climate>

¹⁷²Wang, Y., Okochi, H., Tani, Y. et al. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation. *Environ Chem Lett* 21, 3055–3062 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x>

¹⁷³Busse, H. L., Ariyasena, D. Dh., Orris J. & Freedman, M. Ar. Pristine and Aged Microplastics Can Nucleate Ice through Immersion Freezing. *ACS ES&T Air* 1, 1579–1588 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsestair.4c00146>

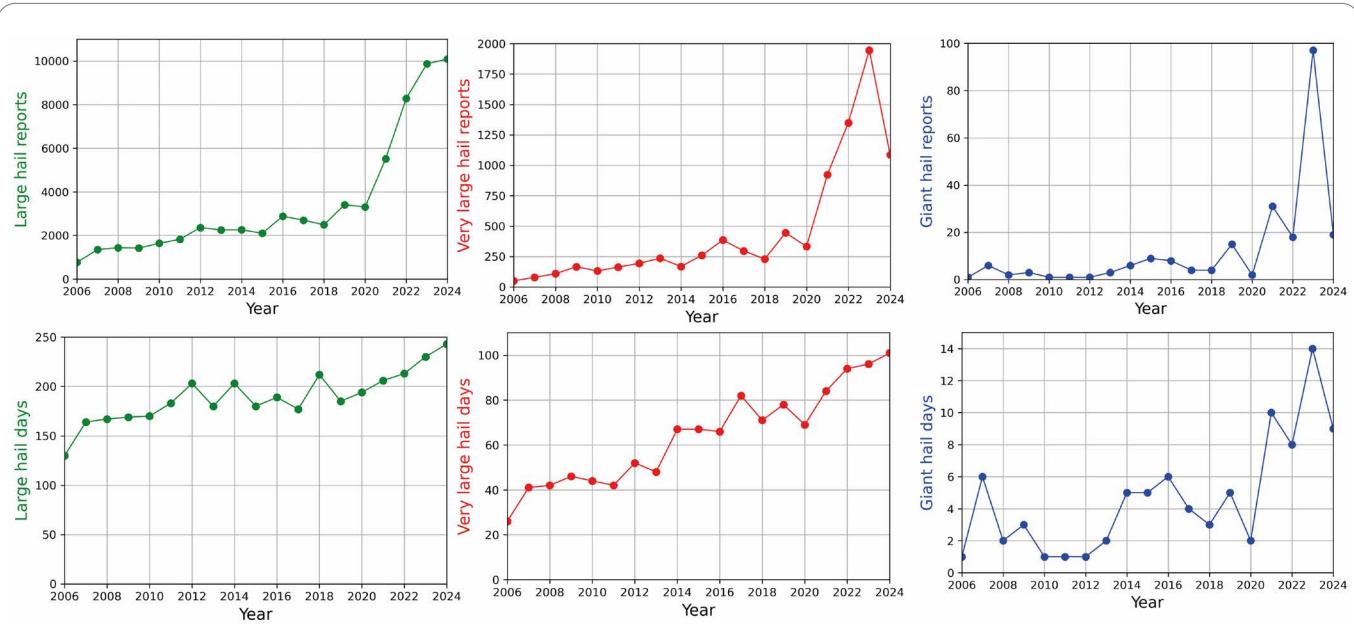


Image 63. Nombre de signalements et de jours avec des grêlons de taille importante (plus de 2 cm), très grande (plus de 5 cm) et géante (plus de 10 cm) entre 2006 et 2024

Source : European Severe Storms Laboratory. Hailstorms of 2024

<https://www.essl.org/cms/hailstorms-of-2024/>

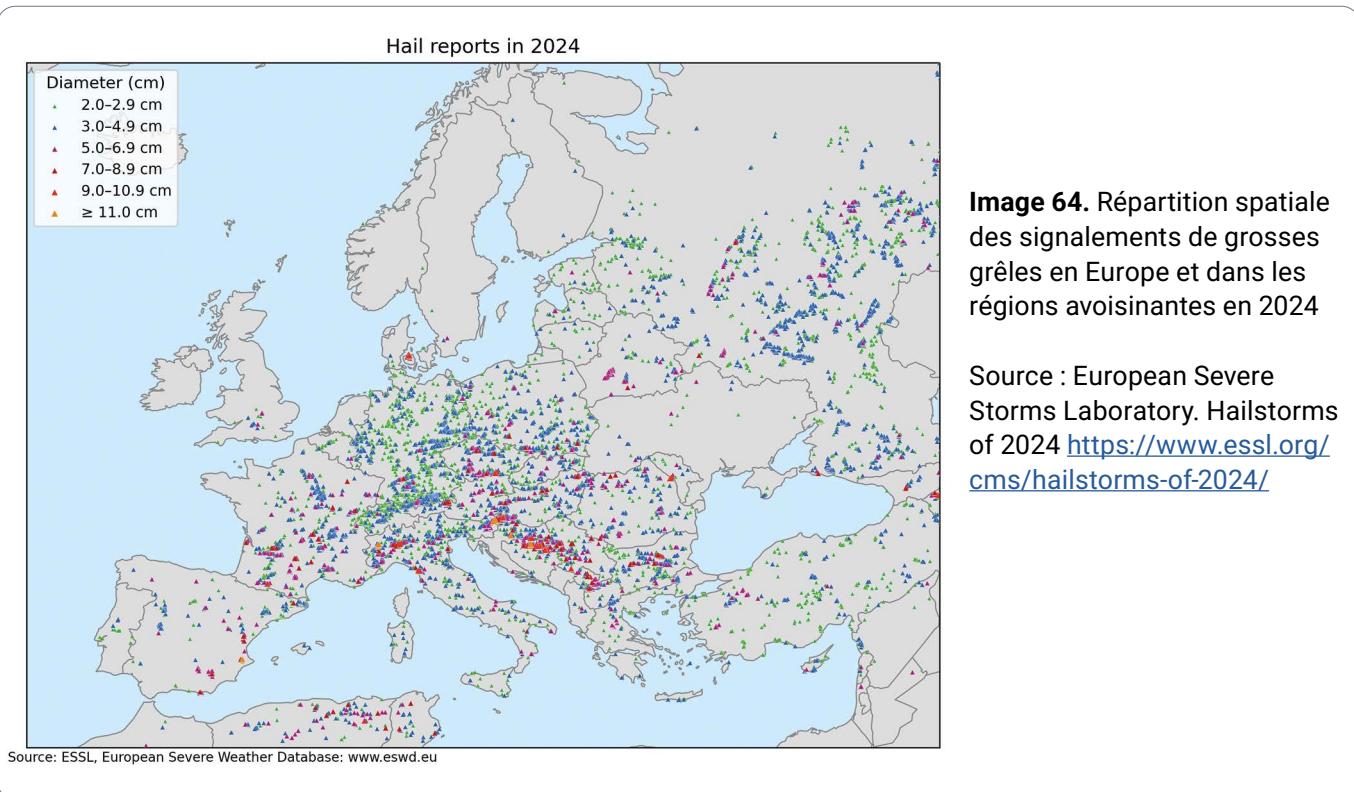


Image 64. Répartition spatiale des signalements de grosses grêles en Europe et dans les régions avoisinantes en 2024

Source : European Severe Storms Laboratory. Hailstorms of 2024 <https://www.essl.org/cms/hailstorms-of-2024/>

Lorsque des particules de nanoplastiques sont présentes dans l'atmosphère, les nuages commencent à se former à des altitudes plus basses – généralement en dessous de 2 000 mètres. Cela rend les nuages moins mobiles, ce qui perturbe les régimes normaux de précipitations. Par conséquent, certaines régions peuvent connaître des épisodes de sécheresse, tandis que d'autres subissent des pluies excessives.

Rôle des MNPs dans la perturbation de l'équilibre climatique de la Terre

Des nuages plus denses commencent à piéger la chaleur dans les couches inférieures de l'atmosphère, agissant comme une couverture en absorbant et en réémettant l'énergie thermique vers la surface de la Terre. Cela réduit la quantité de chaleur s'échappant dans l'espace et contribue au réchauffement de l'atmosphère. L'augmentation des températures entraîne une évaporation accrue des océans, tandis qu'une plus grande humidité dans l'air amplifie encore le réchauffement, créant un cycle auto-renforcé. Il est à noter que pour chaque augmentation de 1 °C (1,8 °F), la quantité d'humidité dans l'atmosphère augmente d'environ 7 %,¹⁷⁴ et la fréquence des éclairs s'accroît d'environ 12 %.¹⁷⁵

66

Comme le souligne Kevin Trenberth, climatologue de renom au Centre National de Recherche Atmosphérique (NCAR) des États-Unis et auteur principal des rapports du GIEC : « **Ces deux éléments – l'augmentation de la température et celle de la vapeur d'eau – accroissent l'instabilité de l'atmosphère. Ce qui en découle, ce sont davantage de mouvements convectifs, davantage de tempêtes, dont certaines, parmi les plus intenses, deviennent des orages. Et il y a un risque accru d'orages violents en conséquence.**

Si ces orages se rassemblent et coopèrent, comme c'est le cas dans une tempête tropicale, on peut alors se retrouver avec des ouragans plus puissants. Ainsi, tous ces éléments s'additionnent. Et le risque augmente pour ce type de phénomènes – les orages violents, en particulier les supercellules, qui produisent de la grêle et peuvent, dans certaines régions et conditions, donner naissance à des tornades ».

Ainsi, le réchauffement extrême des océans, combiné à un excès d'électricité et de chaleur dans l'atmosphère, agrave la situation climatique, provoquant des événements météorologiques destructeurs tels que des orages violents, des ouragans, des éclairs et des sprites.

Dans l'atmosphère, les plastiques ne se contentent pas de polluer l'environnement : ils perturbent également les processus climatiques en influençant la formation des nuages et les précipitations. Ils augmentent les charges électrostatiques dans l'atmosphère, accélèrent la condensation de la vapeur d'eau et modifient la densité des nuages – des facteurs susceptibles d'accroître l'intensité des tempêtes, des orages et d'autres phénomènes météorologiques extrêmes. Nous sommes à l'aube de comprendre l'ampleur réelle de cet impact sur le climat, ce qui souligne l'urgence d'une action globale pour réduire la pollution par les particules plastiques, tant dans les océans que dans l'atmosphère.

¹⁷⁴NASA. Steamy relationships: How atmospheric water vapor amplifies Earth's greenhouse effect. (2022)

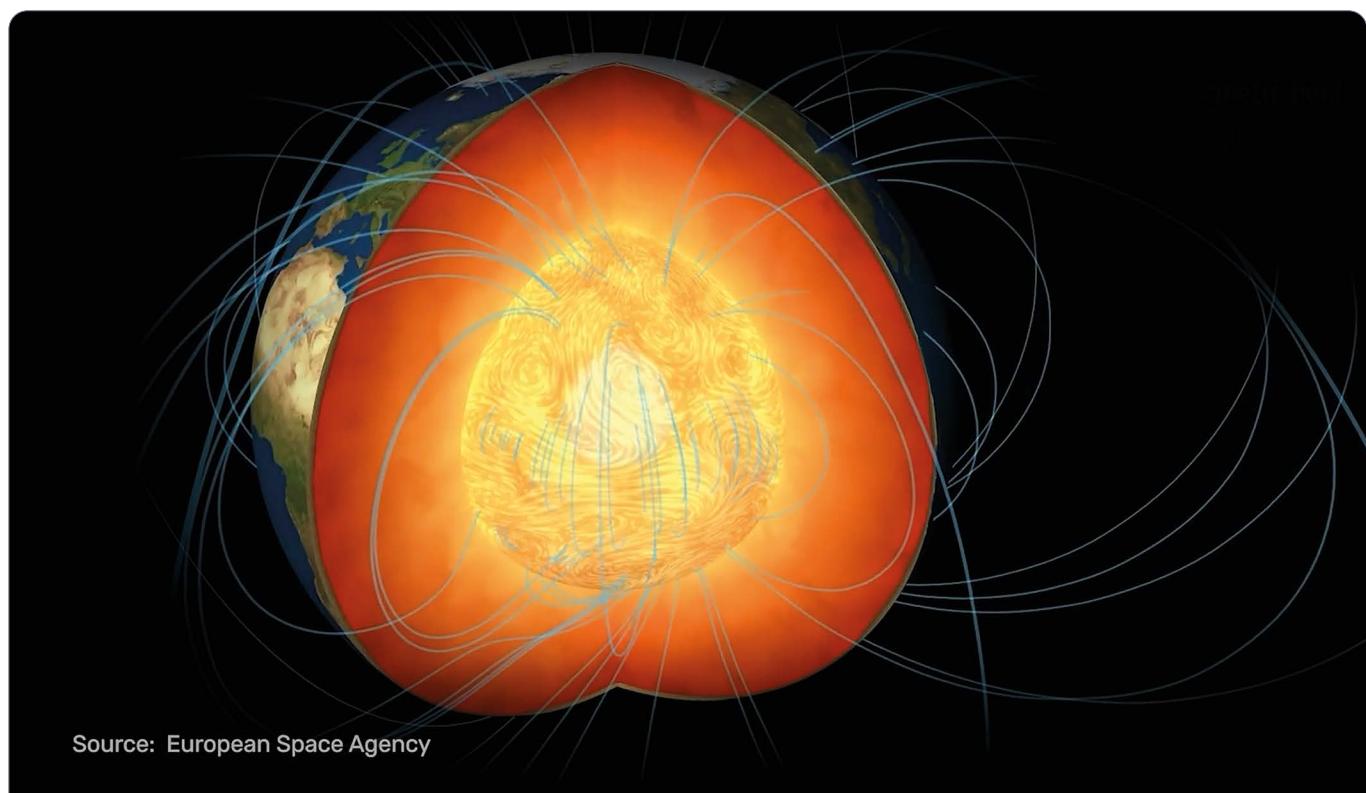
<https://science.nasa.gov/earth/climate-change/steamy-relationships-how-atmospheric-water-vapor-amplifiesearths-greenhouse-effect>

¹⁷⁵Romps, D. M., Seeley, J. T., Vollaro, D. & Molinari, J. Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming. Science 346, 851–854 (2014). <https://doi.org/10.1126/science.1259100>

Interaction entre l'océan et le champ magnétique terrestre

Les océans couvrent environ 70 % de la surface de la Terre et représentent bien plus que de vastes réservoirs d'eau : ils jouent un rôle crucial dans les systèmes électriques complexes de la planète. Ils interagissent avec le champ magnétique terrestre et participent activement à ses processus électromagnétiques.

Le champ magnétique terrestre agit comme un bouclier naturel, protégeant la surface de la planète du vent solaire et du rayonnement cosmique. Sans lui, notre atmosphère serait progressivement arrachée. Ce champ géomagnétique est généré dans les profondeurs de la planète, où le noyau externe liquide, composé de métaux, se déplace autour du noyau interne solide, créant un générateur naturel par un processus appelé géodynamo (Image 65).



Source: European Space Agency

Image 65. Illustration schématique du processus de formation du champ géomagnétique : le noyau externe liquide de la Terre tourne autour de son noyau interne solide, agissant comme un générateur naturel appelé géodynamo, qui produit le champ magnétique de la planète

Source : Agence spatiale européenne (ESA) <https://www.esa.int/>

Le champ magnétique terrestre interagit avec les phénomènes électriques présents à la fois dans les océans et dans l'atmosphère. L'eau de mer, riche en sels et en ions dissous, est hautement conductrice et capable de transporter des courants électriques. Ces courants interagissent à leur tour avec le champ magnétique de la planète, générant des processus électromagnétiques complexes qui influencent la dynamique du système géomagnétique terrestre.

Comme nous l'avons vu précédemment, la pollution des océans – en particulier celle causée par les micro- et nanoplastiques – peut modifier les propriétés chimiques et électriques de l'eau de mer. Plus la concentration en polluants est élevée, plus les processus électromagnétiques naturels sont perturbés. Lorsque l'eau polluée s'évapore, elle peut emporter avec elle des métaux, des microplastiques et d'autres substances, susceptibles d'influencer les processus atmosphériques.

Lors de l'évaporation, des gouttelettes microscopiques et des aérosols peuvent transporter des micro- et nanoplastiques, des métaux lourds¹⁷⁶ et d'autres contaminants dans l'atmosphère, où ils peuvent affecter les conditions électromagnétiques locales. Ce processus est en quelque sorte analogue à la présence d'un objet métallique à proximité d'un aimant : il déforme le champ magnétique et en affaiblit l'intensité dans certaines zones.

L'impact de la pollution océanique sur le champ magnétique terrestre nécessite des recherches approfondies, en particulier dans le contexte du changement climatique mondial. Une compréhension plus poussée de ces processus pourrait aider les scientifiques à évaluer leurs effets potentiels sur le système climatique de la planète et sur les écosystèmes.

¹⁷⁶Ho, W.-K. et al. Sorption Behavior, Speciation, and Toxicity of Microplastic-Bound Chromium in Multisolute Systems. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 10, 27–32 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689>

L'IMPACT DES MICRO- ET NANOPLASTIQUES SUR LA SANTÉ HUMAINE

66

« Les plastiques polluent nos océans et nos cours d'eau et menacent la vie marine. Ils sont présents en chacun de nous, et leur consommation est inévitable. Une action mondiale est essentielle et urgente pour lutter contre cette crise ».

Marco Lambertini
Directeur général de WWF International

Les micro- et nanoplastiques comme nouveau facteur de risque dans le développement des épidémies du XXIe siècle

Au cours des 30 dernières années, on observe une augmentation continue des infarctus, des AVC, des cancers, du diabète, des allergies et des maladies inflammatoires de l'intestin. La baisse de l'immunité touche tant les enfants que les adultes à travers le monde. L'infertilité est également en hausse. Malgré le manque de données précises sur le nombre de personnes et de couples infertiles, l'Organisation mondiale de la santé estime qu'environ 17,5 % des adultes¹⁷⁷ – soit environ une personne sur six dans le monde – sont confrontés à des problèmes de fertilité.

Depuis 2010, on note une diminution des capacités intellectuelles chez les individus. Même dans les pays développés, 25 % des adultes n'arrivent pas à résoudre des problèmes mathématiques de base ; aux États-Unis, ce chiffre atteint 35 %. On observe une baisse de la capacité de concentration, de la pensée logique et de la résolution de problèmes élémentaires. La prévalence des différentes formes de démence et des troubles cognitifs est en hausse.¹⁷⁸

L'augmentation des troubles mentaux dépasse celle des maladies somatiques.¹⁷⁹ Les troubles anxieux, l'autisme, la dépression, le trouble bipolaire, ainsi que le trouble du déficit de l'attention avec ou sans hyperactivité (TDAH) atteignent des proportions pandémiques.

De plus en plus de données suggèrent que les micro- et nanoplastiques jouent un rôle dans le développement de diverses maladies.

¹⁷⁷ World Health Organization. 1 in 6 people globally affected by infertility. (2023)

<https://www.who.int/news/item/04-04-2023-1-in-6-people-globally-affected-by-infertility> (Accessed May 1, 2025).

¹⁷⁸ Financial Times. Have humans passed peak brain power? <https://www.ft.com/content/a8016c64-63b7-458b-a371-e0e1c54a13fc> (Accessed May 1, 2025).

¹⁷⁹ Ipsos. Ipsos Health Service Report 2024: Mental Health seen as the biggest Health issue. (2024) <https://www.ipsos.com/en/ipsos-health-service-report> (accessed 1 May 2025).

Mécanismes moléculaires de la toxicité des MNP : dommages à l'ADN, aux mitochondries et aux membranes cellulaires

Les micro- et nanoplastiques (MNP) représentent l'une des formes les plus répandues de pollution environnementale d'origine anthropique. En raison de leurs propriétés physico-chimiques, les particules plastiques peuvent se déplacer sur de longues distances, franchissant les barrières géographiques et écologiques. Les principales voies d'entrée des micro- et nanoplastiques dans l'organisme humain sont l'ingestion (par l'eau et la nourriture)¹⁸⁰ l'inhalation (via l'air), ainsi que la pénétration cutanée (Image 66).

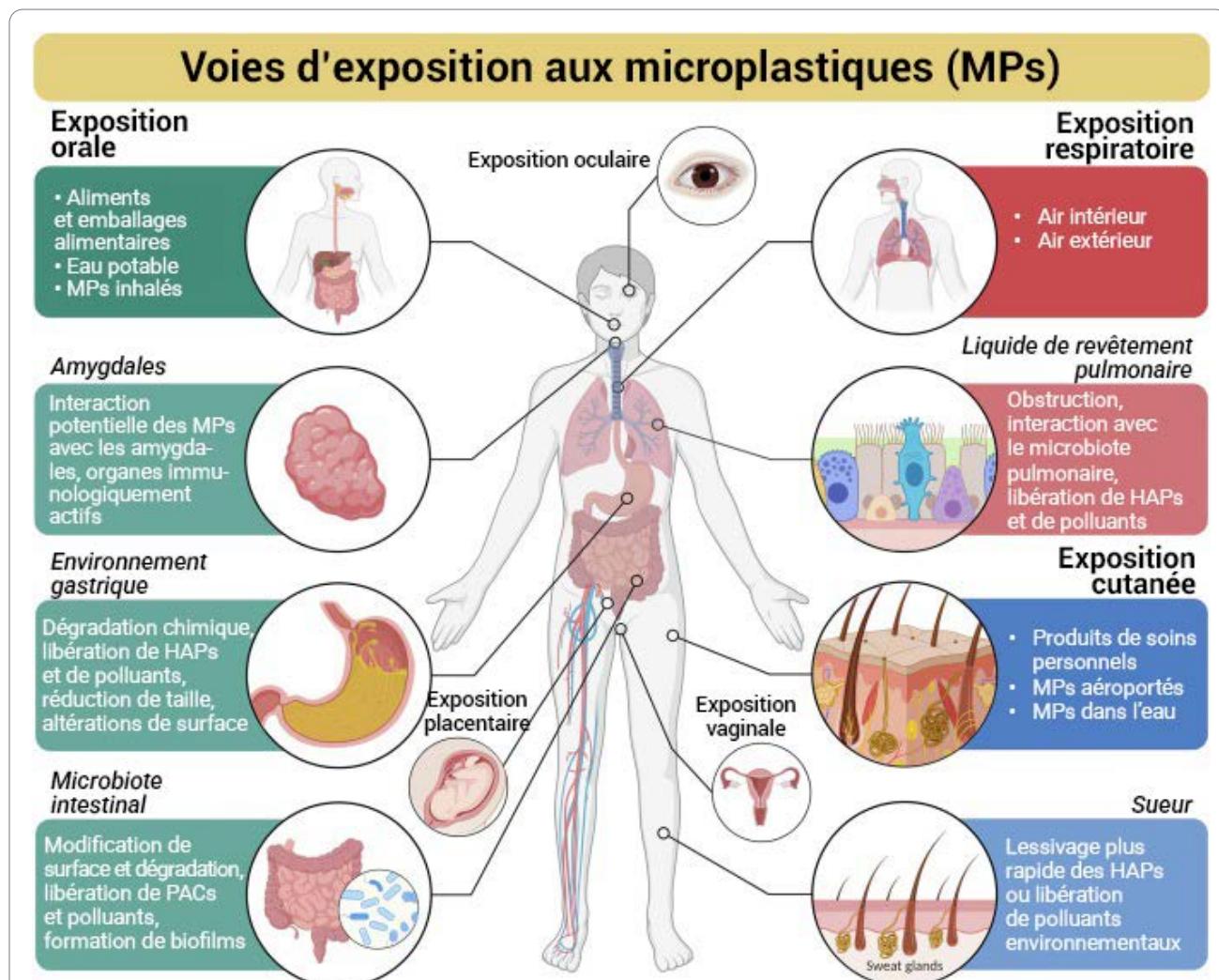


Image 66. Vue d'ensemble des voies d'exposition aux microplastiques (MP) chez l'humain et des événements généraux pouvant moduler l'impact des particules de MP, des substances chimiques associées aux plastiques (SAP) et des polluants environnementaux adsorbés sur la santé humaine

Source : Alijagic, A. et al. *The triple exposure nexus of microplastic particles, plastic-associated chemicals, and environmental pollutants from a human health perspective*. Environment International 188, 108736 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108736>

¹⁸⁰Bora, S. S. et al. Microplastics and human health: unveiling the gut microbiome disruption and chronic disease risks. *Front. Cell. Infect. Microbiol.* 14, 1492759 (2024). <https://doi.org/10.3389/fcimb.2024.1492759>

Comme mentionné dans la partie 1 : « Conséquences de la pollution plastique : les micro- et nanoplastiques (MNP) comme nouveau facteur de la crise planétaire », le milieu marin constitue une source importante de microplastiques secondaires. Selon les estimations, la brise marine transporte environ 136 000 tonnes de microplastiques vers les zones côtières chaque année. De plus, les plans d'eau situés dans des zones urbanisées, y compris les systèmes d'eaux usées et de drainage pluvial, deviennent des centres majeurs d'accumulation et de propagation ultérieure de particules plastiques, leur concentration pouvant dépasser les estimations précédentes de 90 %.

Les aliments représentent une voie importante d'entrée des MNP dans l'organisme humain. Les plantes sont capables d'accumuler des nanoparticules de plastique par leur système racinaire : lors de l'arrosage ou des précipitations, les particules pénètrent dans le sol et sont absorbées avec l'eau, se propageant dans le xylème et s'accumulant dans les tissus des feuilles et des fruits.¹⁸¹ La plus forte concentration de particules plastiques a été détectée dans des cultures telles que les pommes, les poires, les carottes et le brocoli.

Les fruits de mer constituent également une voie de transfert des MNP. L'ingestion de microplastiques par les organismes marins a été observée à tous les niveaux trophiques. Selon une étude de l'université de Newcastle, une personne moyenne pourrait consommer jusqu'à 250 g de microplastiques par an, soit environ 5 g par semaine – l'équivalent du poids d'une carte bancaire plastique. De plus, lors du chauffage de contenants en plastique, y compris ceux destinés à l'alimentation infantile, dans des fours à micro-ondes, plus de 2 milliards de nanoparticules et 4 millions de microparticules de plastique peuvent être libérées dans la nourriture par centimètre carré de surface.

Les microplastiques sont largement présents dans l'eau potable. Des études montrent que jusqu'à 90 % des échantillons d'eau du robinet aux États-Unis contiennent des particules de MNP. Les principales voies de pénétration dans les systèmes aquatiques sont les eaux usées, les rejets industriels et les précipitations atmosphériques, contenant des particules de plastique captées depuis l'air. Lors de l'évaporation de l'eau contaminée, les particules plastiques peuvent monter dans l'atmosphère et retomber avec la pluie ou la neige. Dans une étude menée dans 11 parcs nationaux des États-Unis, plus de 1 000 tonnes de particules plastiques ont été enregistrées dans les précipitations sur une période de 14 mois – un volume suffisant pour produire 120 millions de bouteilles en plastique.

La diffusion aérienne des MNP constitue l'un des mécanismes les plus dangereux de leur impact sur la santé humaine. Les particules de plastique s'élèvent des surfaces marines et aquatiques, sont transportées par les masses d'air et deviennent un composant des aérosols atmosphériques. Des estimations indiquent que, dans les conditions d'une grande ville, un adulte peut inhale jusqu'à 106 000 particules de microplastique lors d'une promenade de deux heures, un chiffre qui peut être multiplié par dix dans les zones proches des plans d'eau.

¹⁸¹Azeem, I. et al. Uptake and Accumulation of Nano/Microplastics in Plants: A Critical Review. *Nanomaterials* 11, 2935 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11112935>

Une nouvelle étude présentée lors de la conférence de l'American College of Cardiology (ACC.25) a révélé qu'une exposition plus élevée aux microplastiques, qui peuvent être ingérés ou inhalés involontairement, est associée à une prévalence accrue de maladies chroniques non transmissibles. L'étude a montré que dans les communautés situées le long des côtes est et ouest des États-Unis, ainsi que sur certaines rives de lacs, des concentrations plus élevées de microplastiques dans l'environnement sont associées à une prévalence accrue de maladies chroniques non transmissibles telles que l'hypertension, le diabète et les accidents vasculaires cérébraux.

66

« *Cette étude fournit des preuves initiales que l'exposition aux microplastiques a un impact sur la santé cardiovasculaire, en particulier sur les maladies chroniques non transmissibles comme l'hypertension, le diabète et les AVC* », a déclaré Sai Rahul Ponnana, titulaire d'un master en sciences et chercheur en données à la faculté de médecine de la Case Western Reserve University dans l'Ohio, et auteur principal de l'étude. « *Lorsque nous avons inclus 154 caractéristiques socio-économiques et environnementales différentes dans notre analyse, nous ne nous attendions pas à ce que les microplastiques figurent parmi les dix premiers facteurs prédictifs de la prévalence des maladies chroniques non transmissibles* ».¹⁸²

Les micro- et nanoplastiques peuvent franchir des barrières biologiques, y compris celles de l'intestin, des poumons, du cerveau et du placenta.¹⁸³ Les microplastiques exposés à l'eau douce ou à l'eau de mer pénètrent plus facilement dans les cellules (Image 67) en raison du dépôt de biomolécules à leur surface. Ces biomolécules forment un revêtement facilitant leur passage à travers le tractus digestif et leur intégration dans les tissus. Ce revêtement agit comme un « cheval de Troie »,¹⁸⁴ facilitant l'entrée des plastiques dans les cellules.

¹⁸²American College of Cardiology. New evidence links microplastics with chronic disease. (2025)

<https://www.acc.org/About-ACC/Press-Releases/2025/03/25/10/19/New-Evidence-Links-Microplastics-with-Chronic-Disease> (Accessed May 1, 2025).

¹⁸³Alqahtani, S., Alqahtani, S., Saquib, Q. & Mohiddin, F. Toxicological impact of microplastics and nanoplastics on humans: understanding the mechanistic aspect of the interaction. Front. Toxicol. 5, 1193386 (2023). <https://doi.org/10.3389/ftox.2023.1193386>

¹⁸⁴Ramsperger, A. F. R. M. et al. Environmental exposure enhances the internalization of microplastic particles into cells. Sci. Adv. 6, eabd1211 (2020). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd1211>

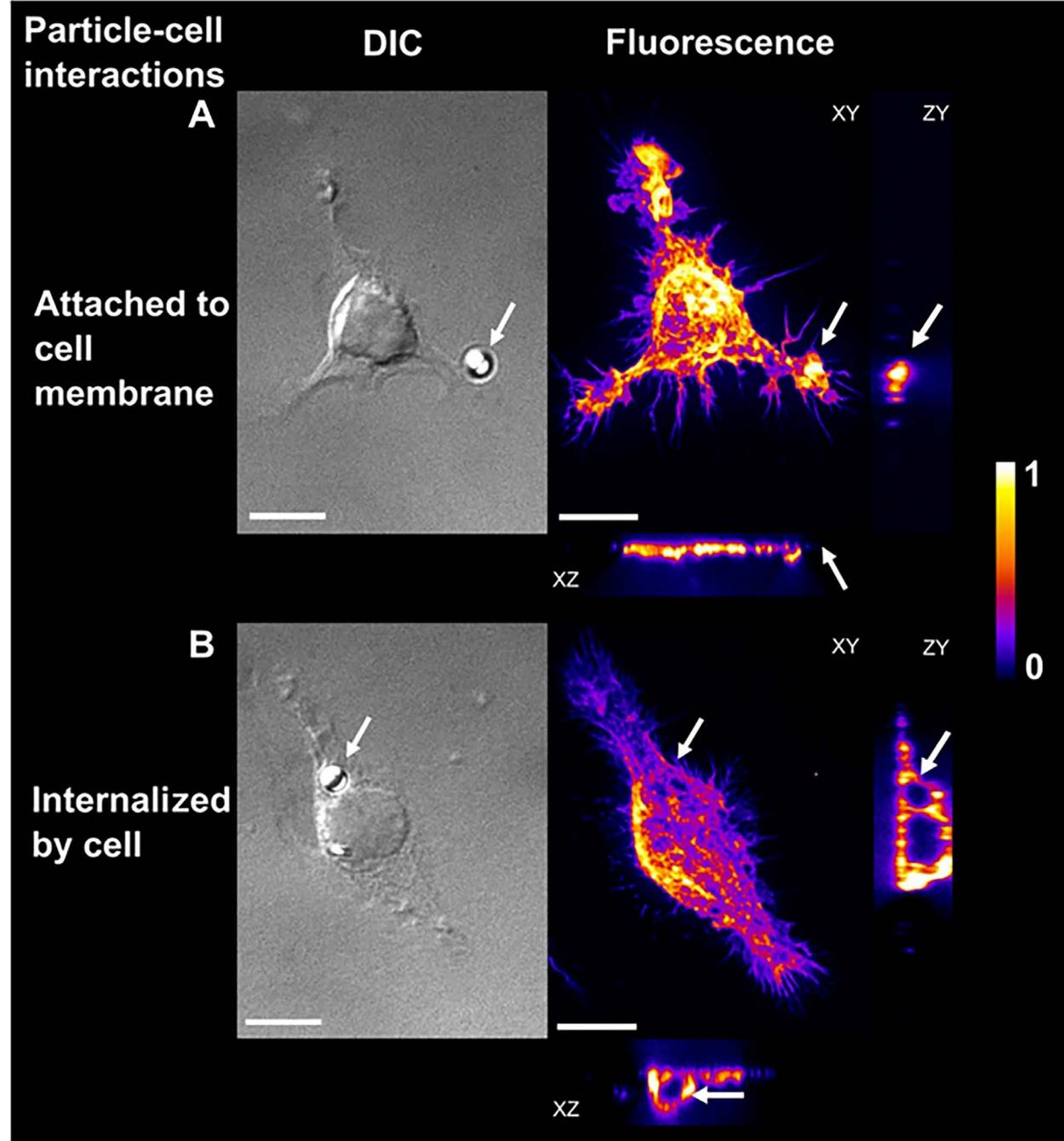


Image 67. Images de l'interaction des particules de microplastiques avec les cellules, après exposition à l'eau douce pendant deux semaines

DIC : images microscopiques à contraste interférentiel différentiel illustrant les interactions particule-cellule. Fluorescence : images confocales sur disque rotatif de cellules avec actine filamenteuse marquée par fluorescence (images en fausses couleurs, projection maximale d'intensité montrant des unités arbitraires). Les projections XY, YZ et XZ des images 3D permettent de différencier les particules de microplastique (A) fixées à la membrane cellulaire ou (B) internalisées. Les flèches indiquent la position des particules. Échelle : 10 µm.

Source : Ramsperger, A. F. R. M. et al. *Environmental exposure enhances the internalization of microplastic particles into cells*. Sci. Adv. 6, eabd1211 (2020). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd1211>

La toxicité des microplastiques dépend de nombreux facteurs : taille, forme, charge de surface, niveau de dégradation, durée d'exposition, composition des additifs et autres caractéristiques.¹⁸⁵ Les particules plus petites pénètrent plus facilement dans les cellules et induisent un stress oxydatif plus important. La charge de surface est un paramètre clé déterminant l'efficacité de l'absorption cellulaire (influence l'adhésion). De plus, les microplastiques contiennent des polymères et divers additifs qui amplifient leurs effets nocifs.¹⁸⁶

Les particules de micro- et nanoplastiques, les composés chimiques des plastiques et les polluants environnementaux adsorbés exercent un effet combiné¹⁸⁷ néfaste sur la santé humaine (Image 68), représentant une menace importante.

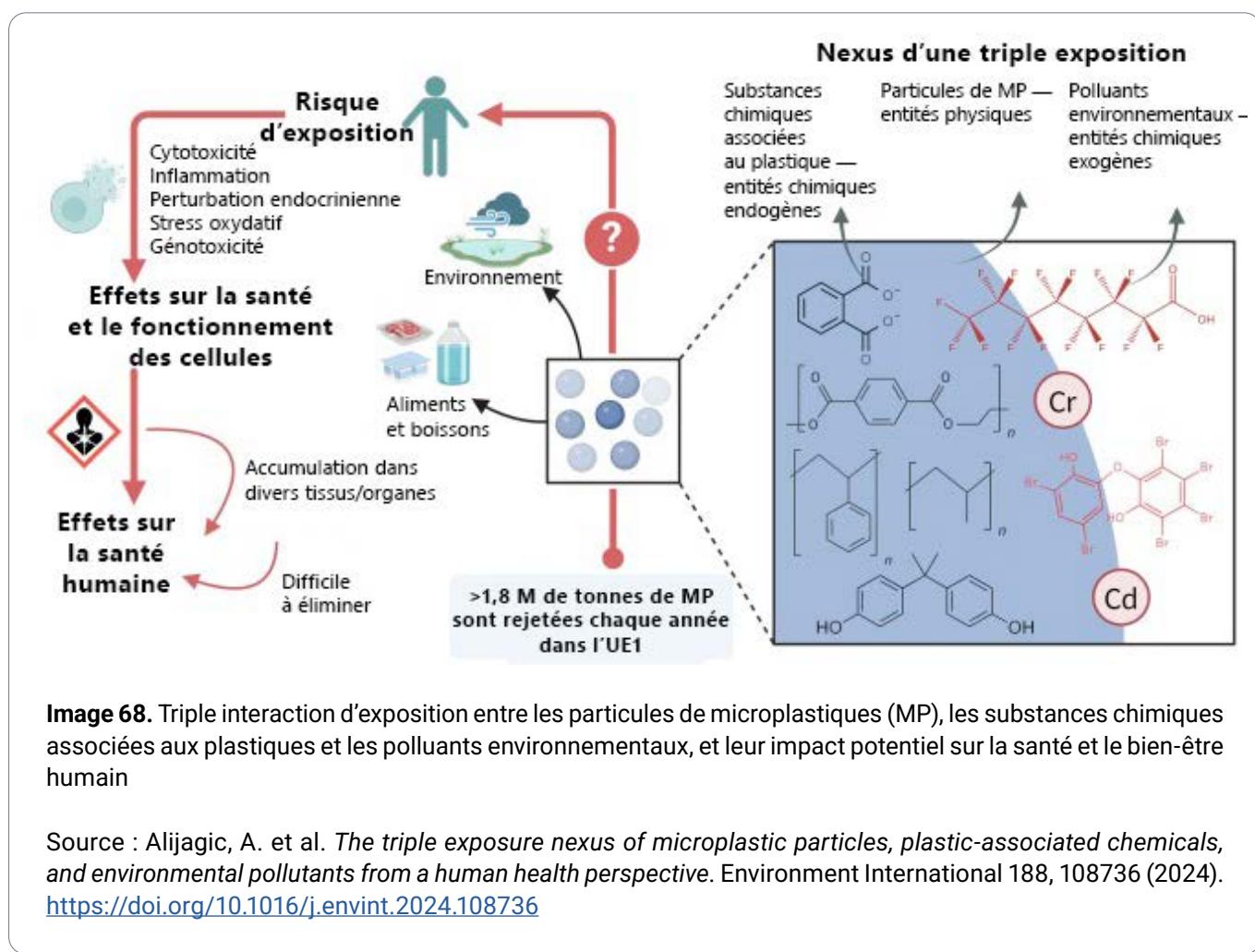


Image 68. Triple interaction d'exposition entre les particules de microplastiques (MP), les substances chimiques associées aux plastiques et les polluants environnementaux, et leur impact potentiel sur la santé et le bien-être humain

Source : Alijagic, A. et al. *The triple exposure nexus of microplastic particles, plastic-associated chemicals, and environmental pollutants from a human health perspective*. Environment International 188, 108736 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108736>

¹⁸⁵Li, Y. et al. Potential Health Impact of Microplastics: A Review of Environmental Distribution, Human Exposure, and Toxic Effects. Environ. Health 1, 249–257 (2023). <https://doi.org/10.1021/envhealth.3c00052>

¹⁸⁶Alijagic, A. et al. The triple exposure nexus of microplastic particles, plastic-associated chemicals, and environmental pollutants from a human health perspective. Environment International 188, 108736 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108736>

¹⁸⁷Shanwei Government. Content on environmental health. Microplastics found in the human body for the first time, are they harmful to health? Here's the answer. https://www.shanwei.gov.cn/swbjj/467/503/content/post_550539.html (Accessed May 1, 2025).

Un gramme de microplastique peut contenir jusqu'à 24 000 nanogrammes de polluants organiques persistants.¹⁸⁷ Ces substances sont hautement toxiques, s'accumulent dans les organismes et peuvent être nocives même à de faibles concentrations.

Les microplastiques peuvent rendre d'autres polluants encore plus dangereux,¹⁸⁸ car les particules plastiques et les mélanges de substances à leur surface peuvent adhérer à d'autres polluants et interagir chimiquement avec eux, modifiant ainsi leurs propriétés.

Les recherches montrent que l'exposition aux micro- et nanoplastiques provoque des effets toxiques à divers niveaux d'organisation biologique :

- **Macromolécules** : dommages à l'ADN, perturbation de l'expression génique, altérations de la transcription des protéines.
- **Cellules et organites** : perturbation de la division cellulaire, cytotoxicité, apoptose, stress oxydatif, dérégulation métabolique, augmentation du calcium intracellulaire.
- **Tissus** : inflammation, fibrose, ostéolyse du tissu osseux.
- **Organes** : réactions immunitaires, dysfonctionnement d'organes, neurotoxicité, cancérogenèse, altérations du métabolisme et de l'équilibre énergétique.
- **Populations animales et humaines** : baisse de la fertilité, ralentissement de la croissance, dépopulation.

Ces effets soulignent l'impact à multiples niveaux des micro- et nanoplastiques sur les systèmes biologiques.¹⁸⁹

1. Perturbation des fonctions cellulaires

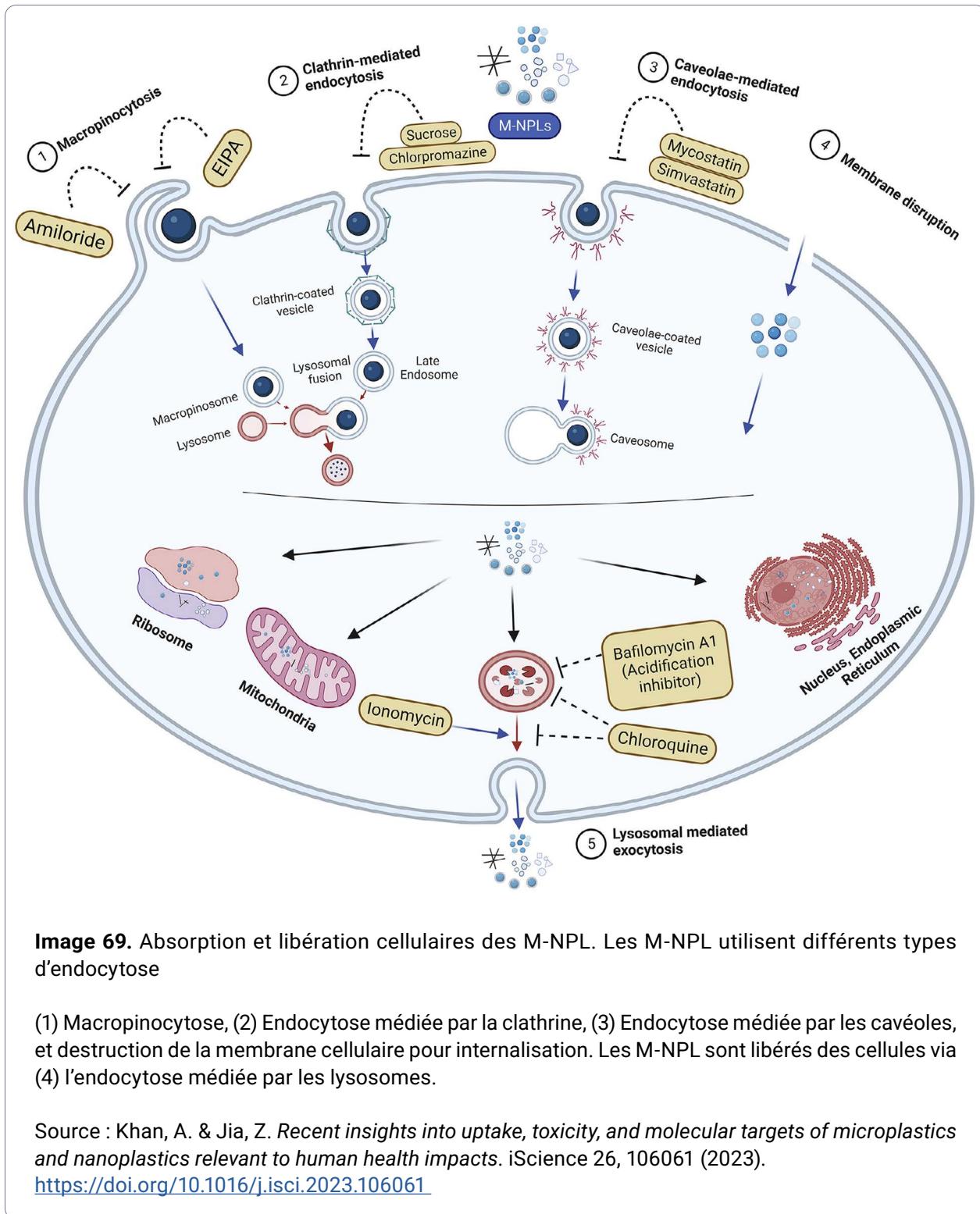
La dégradation de l'organisme sous l'effet des MNP commence au niveau cellulaire.¹⁹⁰ Les MNP interagissent avec les membranes cellulaires par divers mécanismes, y compris des liaisons hydrogène, halogènes, des interactions hydrophobes, de Van der Waals et électrostatiques. En agissant comme facteur déstabilisant, les MNP compromettent l'intégrité et le fonctionnement des membranes cellulaires (Image 69).

¹⁸⁷ Shanwei Government. Content on environmental health. Microplastics found in the human body for the first time, are they harmful to health? Here's the answer. https://www.shanwei.gov.cn/swbj/467/503/content/post_550539.html (Accessed May 1, 2025).

¹⁸⁸ Ho, W.-K. et al. Sorption Behavior, Speciation, and Toxicity of Microplastic-Bound Chromium in Multisolute Systems. Environ. Sci. Technol. Lett. 10, 27–32 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689>

¹⁸⁹ Kaushik, A., Singh, A., Kumar Gupta, V. & Mishra, Y. K. Nano/micro-plastic, an invisible threat getting into the brain. Chemosphere 361, 142380 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142380>

¹⁹⁰ Khan, A. & Jia, Z. Recent insights into uptake, toxicity, and molecular targets of microplastics and nanoplastics relevant to human health impacts. iScience 26, 106061 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106061>



Grâce à leur petite taille, les micro- et nanoplastiques (MNP) sont capables de pénétrer profondément dans les systèmes biologiques (Image 70). Leur taille réduite ainsi que la charge électrostatique qu'ils accumulent expliquent leur impact systémique sur l'organisme humain.¹⁹¹

¹⁹¹Casella, C. & Ballaz, S. J. Genotoxic and neurotoxic potential of intracellular nanoplastics: A review. *Journal of Applied Toxicology* 44, 1657–1678 (2024).
<https://doi.org/10.1002/jat.4598>

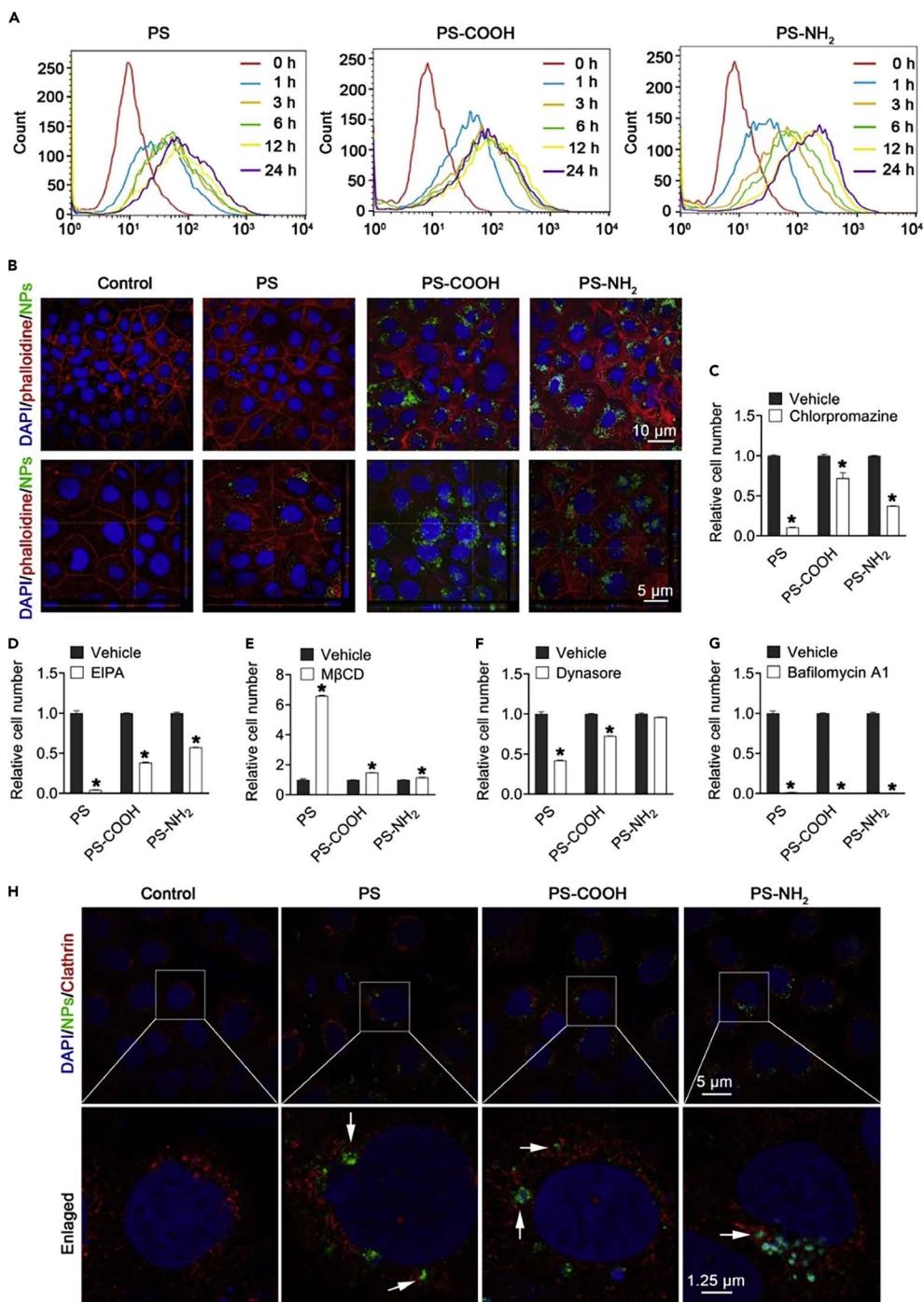


Image 70. Cellules Caco-2 internalisant des nanoparticules (NP)

(A-G) Analyse de l'internalisation des NP par les cellules Caco-2 à l'aide de la cytométrie en flux (A) et de la microscopie confocale (B). Analyse par cytométrie en flux des cellules Caco-2 prétraitées pendant 1 h avec de la chlorpromazine (C), de l'EIPA (D), du MβCD (E), de la dynasore (F) et de la bafilomycine A1 (G), suivie d'un traitement avec les NP pendant 24 h. Localisation des NP dans les vésicules médiées par la clathrine, observée par microscopie confocale (H).

Source : Khan, A. & Jia, Z. Recent insights into uptake, toxicity, and molecular targets of microplastics and nanoplastics relevant to human health impacts. *iScience* 26, 106061 (2023).

<https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106061>

Le point central des effets destructeurs au niveau cellulaire est la détérioration des membranes cellulaires, des mitochondries et des dommages à l'ADN. Les particules électrostatiquement chargées de micro- et nanoplastiques peuvent déstabiliser le potentiel membranaire des cellules, en particulier des neurones, provoquant des signaux électriques spontanés, des perturbations de la transmission d'informations entre les cellules, voire la mort cellulaire.

À l'intérieur de la cellule, les mitochondries – organites essentiels à la survie et à la régénération cellulaire – sont les premières touchées par les effets délétères des nanoparticules (Image 71). Outre leur rôle de « centrales énergétiques », les mitochondries jouent un rôle multifonctionnel fondamental dans la santé de l'organisme, la résistance au stress, le développement des maladies chroniques et les processus de vieillissement.

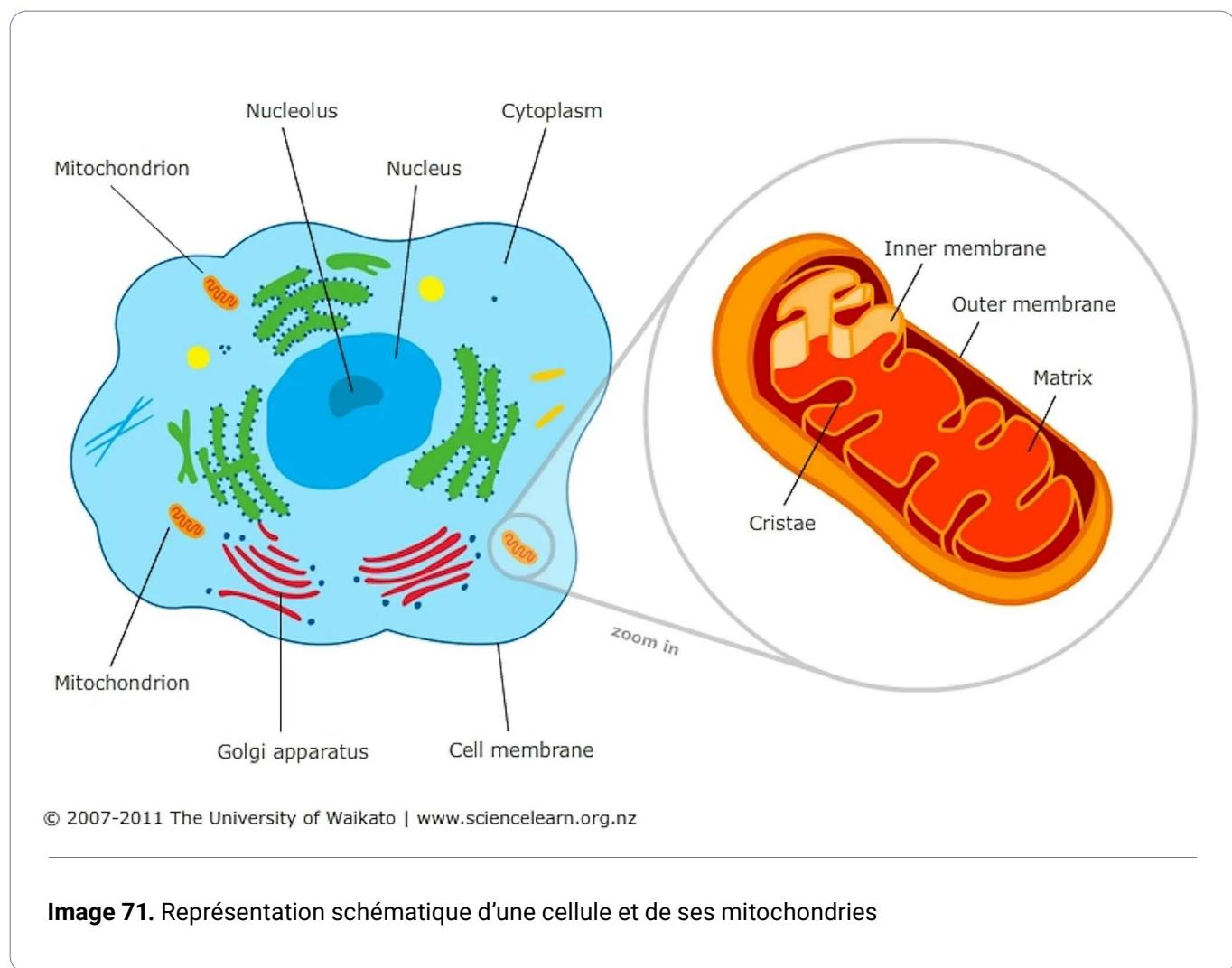


Image 71. Représentation schématique d'une cellule et de ses mitochondries

Le bon fonctionnement des mitochondries est essentiel à la survie cellulaire, à l'homéostasie et à la bioénergétique. Leur structure et leur fonction sont maintenues par un système de contrôle de qualité mitochondrial, comprenant la biogénèse mitochondriale, la dynamique mitochondriale (fusion/ fission), la mitophagie, et la réponse au stress mitochondrial (UPRmt). Les dysfonctionnements ou les dommages mitochondriaux sont associés à l'apparition et à la progression de nombreuses maladies humaines, notamment les maladies neurodégénératives, cardiovasculaires, liées à l'âge, le diabète et le cancer.

Le stress environnemental et les polluants renforcent la sensibilité des mitochondries aux dommages, entraînant leur dysfonctionnement. De plus en plus de données confirment l'impact des micro- et nanoplastiques sur la santé et le fonctionnement mitochondrial. Il a été démontré que les MNP provoquent un stress oxydatif et la production d'espèces réactives de l'oxygène, perturbant ainsi le potentiel membranaire mitochondrial.

Les MNP peuvent traverser les barrières biologiques de l'organisme humain et être absorbés par les cellules, modifiant potentiellement la dynamique, la bioénergétique et les voies de signalisation mitochondrielles, influençant ainsi le métabolisme et les fonctions cellulaires.

Compte tenu du rôle critique des mitochondries pour la santé cellulaire et systémique, les MNP représentent une menace majeure pour leur bon fonctionnement. Les données actuelles soulignent l'urgence de résoudre le problème global de la pollution par les MNP, non seulement pour protéger l'environnement, mais aussi pour préserver la santé humaine.¹⁹²

Les mitochondries synthétisent l'ATP – molécule énergétique universelle nécessaire à tous les processus biologiques : contraction musculaire, transmission des impulsions nerveuses, synthèse hormonale et division cellulaire. Elles participent au métabolisme des glucides, des lipides et des acides aminés, et assurent l'équilibre métabolique de l'organisme.

Les mitochondries contrôlent également l'apoptose – processus vital qui permet d'éviter l'accumulation de cellules endommagées ou potentiellement dangereuses. Les perturbations de ce mécanisme sont associées au développement de cancers, de maladies auto-immunes et neurodégénératives. Les mitochondries jouent aussi un rôle central dans la défense antioxydante en régulant les niveaux d'espèces réactives de l'oxygène. Lorsque ce système échoue, les dommages s'accumulent, le vieillissement s'accélère, et les risques d'inflammations chroniques et de maladies augmentent (Image 72).

¹⁹²Yöntem, F. D. & Ahbab, M. A. Mitochondria as a target of micro- and nanoplastic toxicity. Cambridge Prisms: Plastics 2, e6 (2024). <https://doi.org/10.1017/plc.2024.6>

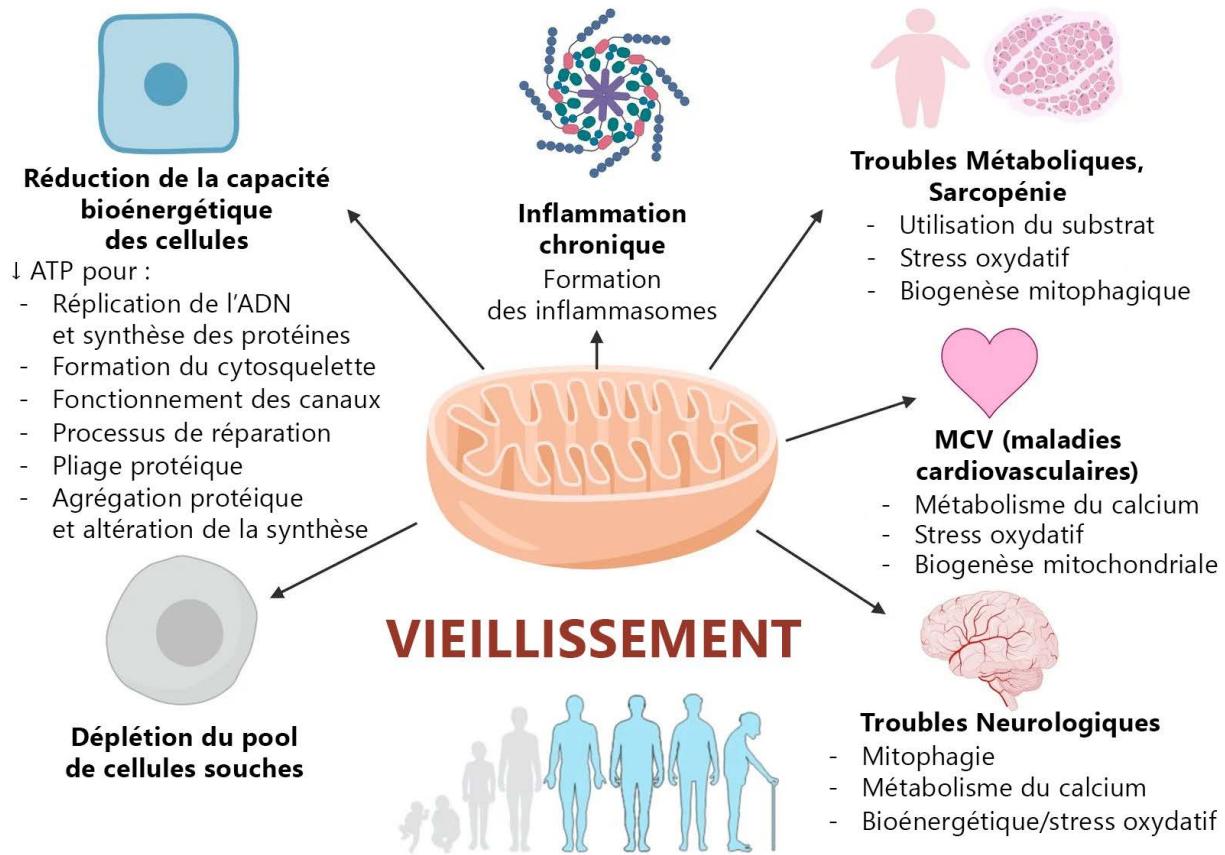


Image 72. La perturbation des fonctions mitochondrielles causée par la pollution environnementale peut entraîner diverses maladies

Source : Borisova, O. *Mitochondria medicine*. Open Longevity. (2019)
https://openlongevity.org/mitochondria_medicine_1 (consulté le 1er mai 2025).

Les mitochondries possèdent leur propre ADN, transmis par la lignée maternelle, ce qui en fait des acteurs uniques dans les maladies héréditaires. Elles régulent l'activité des gènes nucléaires et l'adaptation des cellules aux changements de l'environnement externe. Les mitochondries participent également à la synthèse des hormones stéroïdiennes – le cortisol, les œstrogènes et la testostérone.

C'est précisément l'altération des fonctions mitochondrielles sous l'effet des nanoplastiques qui constitue la base d'une cascade de processus pathologiques pouvant entraîner des conséquences graves et potentiellement irréversibles, tant au niveau des organes et systèmes spécifiques qu'à celui de l'organisme dans son ensemble (Tableau 1).

Maladies neurologiques	Maladie de Parkinson, Maladie d'Alzheimer, Sclérose latérale amyotrophique (SLA), Épilepsie, Migraines, Encéphalomyopathies mitochondrielles (par exemple, le syndrome MELAS)
Maladies cardiovasculaires	Cardiomyopathies, Insuffisance cardiaque, Athérosclérose (via le stress oxydatif)
Maladies immunitaires et inflammatoires	Maladies auto-immunes (par exemple, le lupus érythémateux systémique), États inflammatoires chroniques (par dysfonctionnement des espèces réactives de l'oxygène (ERO) et des signaux des cytokines)
Troubles métaboliques	Diabète de type 2, Obésité, Syndrome métabolique, Troubles du métabolisme des acides gras et du lactate
Maladies oncologiques	La dysfonction mitochondriale augmente le risque de mutations et de transformation maligne des cellules
Maladies musculaires	Myopathies mitochondrielles, Faiblesse musculaire chronique et fatigue
Maladies des organes sensoriels	Rétinite pigmentaire, Neuropathie optique de Leber (perte de vision héréditaire)
Syndromes mitochondriaux génétiques	Syndrome de Leigh, Syndrome de Kearns-Sayre, Syndrome de Barth

Tableau 1. Aperçu de certaines maladies liées à une dysfonction mitochondriale

Rôle des MNP dans le vieillissement préaturé et le développement du cancer

L'exposition aux nanoparticules plastiques peut provoquer un vieillissement prématué en interférant avec le fonctionnement des mitochondries et en perturbant les programmes génétiques de l'organisme. Les dommages mitochondriaux entraînent une production excessive d'espèces réactives de l'oxygène (ERO), responsables du stress oxydatif. Cela endommage l'ADN, perturbe la stabilité génétique, active l'inflammation et accélère le vieillissement des tissus. En outre, le nanoplastique contribue au raccourcissement des télomères, ce qui limite la capacité des cellules à se diviser.

66

« Nous avons également pu démontrer que, chez l'humain, une seule mutation dans l'ADN mitochondrial, liée à une altération de la fonction mitochondriale et à des maladies mitochondrielles infantiles, peut accélérer le processus de vieillissement », a déclaré Taosheng Huang, docteur en médecine, docteur en philosophie, professeur et directeur du département de génétique au sein du département de pédiatrie de la Jacobs School of Medicine and Biomedical Sciences à l'Université de Buffalo. **« Nous avons constaté que les formes actives d'oxygène, dues à une mauvaise fonction mitochondriale, augmentent les dommages à l'ADN au fil du temps ».**¹⁹³

Le vieillissement épigénétique correspond à des modifications dans la régulation des gènes qui se produisent au niveau des modifications de l'ADN (activation/ désactivation des gènes), sans changement de la séquence d'ADN elle-même. C'est une sorte de « minuterie moléculaire » subtile, qui peut être mesurée et dont le rythme peut être plus rapide ou plus lent que le vieillissement chronologique habituel. Une activité élevée de l'ADN mitochondrial est associée à un vieillissement épigénétique accéléré. Chez certaines personnes, dès l'âge de 20 à 30 ans, l'âge biologique de leurs cellules peut être bien supérieur à leur âge chronologique – autrement dit, leur corps vieillit plus rapidement qu'il ne le devrait.

Chez les personnes présentant des troubles mitochondriaux, des maladies liées à l'âge telles que la démence, les maladies cardiovasculaires, les arythmies ou l'insuffisance cardiaque peuvent apparaître dès le jeune âge.

Des chercheurs écossais ont découvert que plus une personne est née tardivement, plus son risque de développer une maladie avant 50 ans est élevé. Par exemple, les personnes nées entre 1956 et 1960 souffrent en moyenne de plus de maladies que celles nées entre 1951 et 1955, ou entre 1946 et 1950 (Image 73).¹⁹⁴

¹⁹³Medindia. Study unravels how mitochondrial dysfunction leads to premature aging. (2022) <https://www.medindia.net/news/study-unravels-how-mitochondrial-dysfunction-leads-to-premature-aging-208364-1.htm> (Accessed May 1, 2025).

¹⁹⁴Ribe, E., Cezard, G. I., Marshall, A. & Keenan, K. Younger but sicker? Cohort trends in disease accumulation among middle-aged and older adults in Scotland using health-linked data from the Scottish Longitudinal Study. European Journal of Public Health 34, 696–703 (2024). <https://doi.org/10.1093/ejph/ckae062>

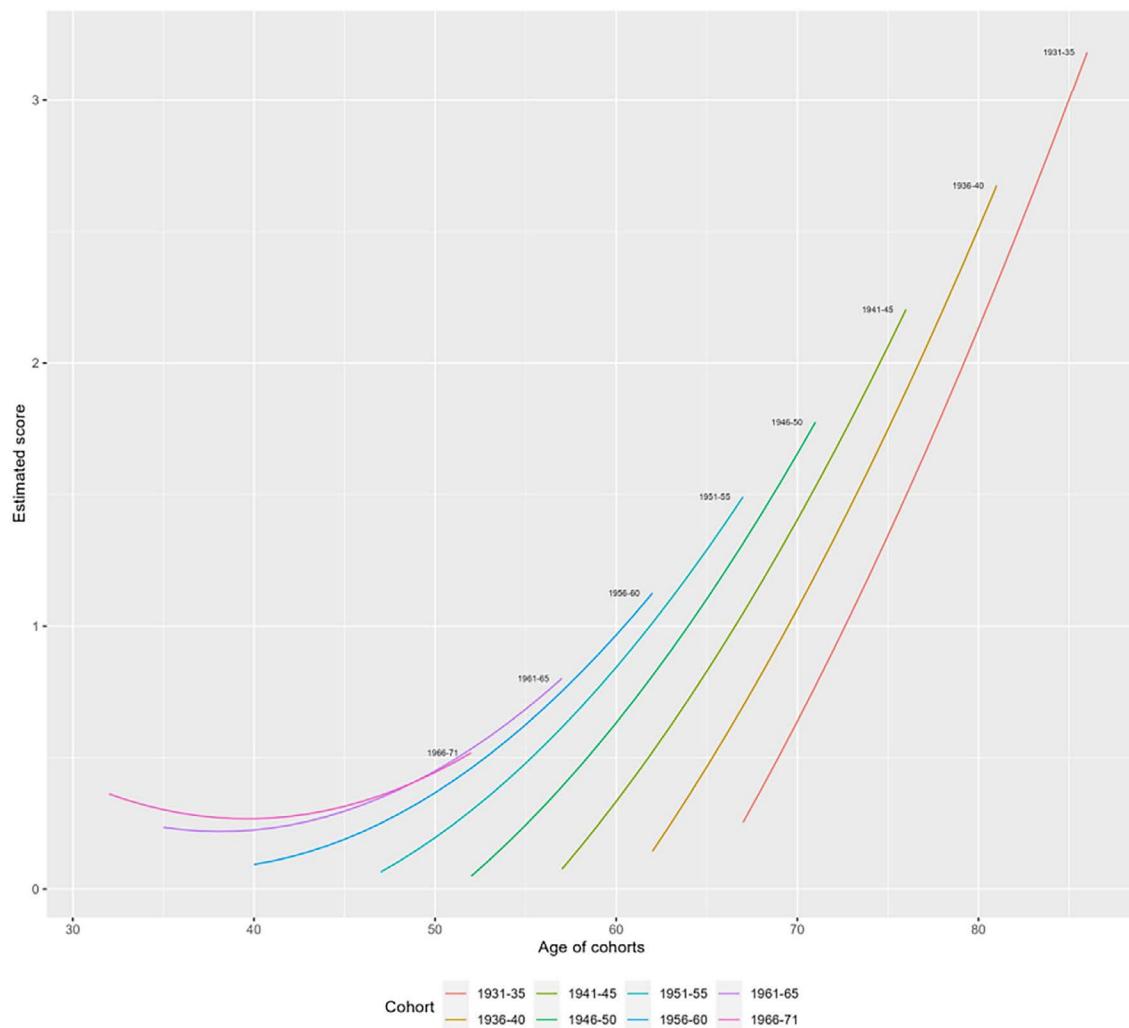


Image 73. Prévalence projetée de la multimorbidité selon les cohortes et l'âge

Source : Scottish Longitudinal Study. Ribe, E., Cezard, G. I., Marshall, A. & Keenan, K. *Younger but sicker? Cohort trends in disease accumulation among middle-aged and older adults in Scotland using health-linked data from the Scottish Longitudinal Study*. European Journal of Public Health 34, 696–703 (2024). <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckae062>

Mutations de l'ADN mitochondrial dans le vieillissement et le cancer

Les mécanismes clés à l'origine du vieillissement et du développement des maladies oncologiques présentent de nombreuses similitudes. L'un des éléments centraux est le dysfonctionnement des mitochondries, ces organites cellulaires responsables de la production d'énergie. Avec l'âge, des mutations de l'ADN mitochondrial (ADNmt) s'accumulent dans les tissus humains, et des altérations similaires ont été observées depuis longtemps dans différentes formes de cancer.¹⁹⁵

Lorsqu'une mutation survient dans une cellule, elle peut modifier son fonctionnement. Par exemple, une cellule peut commencer à croître et se diviser plus rapidement, ne pas mourir lorsqu'elle le devrait, devenir " invisible " pour le système immunitaire, ou mieux résister au manque d'oxygène et de nutriments.

Ces cellules acquièrent un avantage sur les cellules normales : elles vivent plus longtemps, se divisent plus fréquemment, occupent de plus en plus d'espace et finissent par dominer leur environnement. Lorsque leur accumulation devient importante, cela peut conduire au développement d'une tumeur.



Image 74. Dommages à l'ADN entraînant des mutations

Les cellules post-mitotiques sont particulièrement vulnérables aux dommages mitochondriaux, notamment les neurones, les cardiomyocytes et certaines cellules musculaires. Ces cellules ne se divisent pas, ce qui signifie que les mutations accumulées avec l'âge, en particulier celles affectant l'ADN mitochondrial (Image 74), restent présentes tout au long de leur existence.

¹⁹⁵Smith, A. L. M., Whitehall, J. C. & Greaves, L. C. Mitochondrial DNA mutations in ageing and cancer. *Molecular Oncology* 16, 3276–3294 (2022). <https://doi.org/10.1002/1878-0261.13291>

Les cellules post-mitotiques sont extrêmement actives : les neurones consomment beaucoup d'énergie pour transmettre des signaux, tandis que les cellules cardiaques pompent continuellement le sang. Ainsi, les mitochondries fonctionnent à leur maximum, générant un volume important d'espèces réactives de l'oxygène (ERO). Ces espèces réactives endommagent les mitochondries, amplifiant la production de nouvelles ERO et déclenchant un cercle vicieux de dégradation cellulaire.

Ces dommages s'accumulent, pouvant conduire à des processus pathologiques, tels que des maladies neurodégénératives, cardiovasculaires, ou encore des cancers, et potentiellement à la mort.

Cela pourrait expliquer pourquoi les maladies cardiovasculaires, les infarctus, les AVC et les cancers figurent parmi les principales causes de mortalité. De plus, l'effet toxique des nanoparticules de plastique sur le corps humain, qui s'est intensifié au cours des 10 à 20 dernières années, pourrait expliquer pourquoi ces maladies affectent désormais des populations plus jeunes et ont atteint des proportions pandémiques, causant des dizaines de millions de décès chaque année. En effet, le nanoplastique perturbe avant tout le fonctionnement des mitochondries, favorisant le stress oxydatif et les mutations de l'ADN mitochondrial et nucléaire.

Déstabilisation du système hormonal sous l'influence des MNPs

La production de plastiques implique l'utilisation de composés chimiques qui perturbent le fonctionnement du système endocrinien et l'équilibre hormonal. Ces substances peuvent imiter, bloquer ou modifier l'action des hormones naturelles, ce qui peut entraîner divers problèmes de santé.

Plus de 3 000 substances chimiques utilisées dans les emballages ont été détectées dans le corps humain.¹⁹⁶ Environ 100 de ces substances sont classées comme présentant un « risque élevé » pour la santé humaine.

Bisphénol A

Le bisphénol A (BPA, C₁₅H₁₆O₂) est un plastifiant synthétique largement utilisé dans les plastiques en polycarbonate (bouteilles, contenants), les résines époxy (revêtements de boîtes de conserve) et les dispositifs médicaux.

Lorsqu'il est chauffé, le BPA migre dans les aliments et les boissons.

¹⁹⁶Geueke, B. et al. Evidence for widespread human exposure to food contact chemicals. J Expo Sci Environ Epidemiol 1–12 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41370-024-00718-2>

66

« *Le BPA agit comme une hormone “ incontrôlée ”, prenant la place d'une hormone naturelle qui participe normalement à ce processus* », a déclaré le professeur Ian Rae, expert en substances chimiques environnementales à la faculté de chimie de l'Université de Melbourne (Image 75).¹⁹⁷

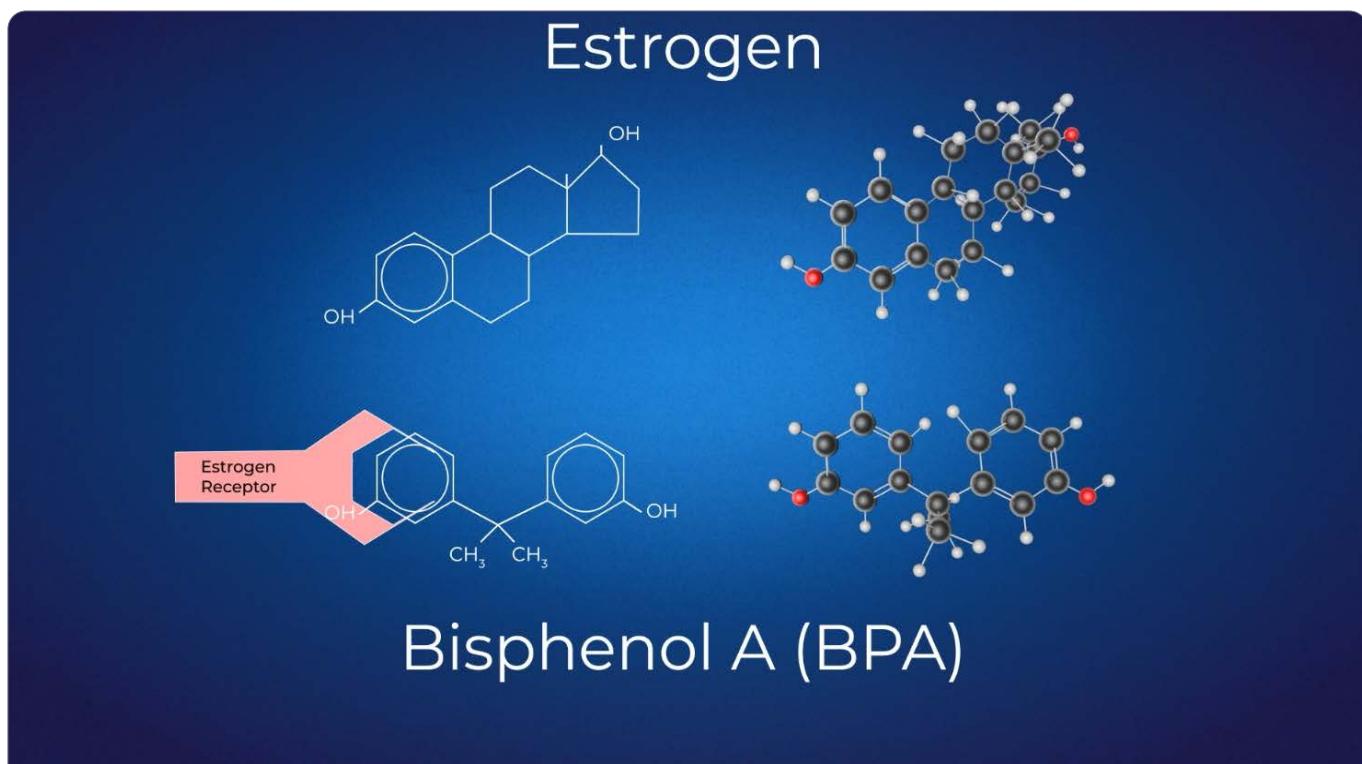


Image 75. Le Bisphénol A ($C_{15}H_{16}O_2$) exerce un effet perturbateur endocrinien en raison de sa similitude structurelle avec l'hormone œstrogène

Chaque année, 8 millions de tonnes de bisphénol A sont produites dans le monde, et 100 tonnes sont rejetées dans la biosphère.¹⁹⁸

Les recherches montrent que le BPA et son substitut, le bisphénol S (BPS), perturbent la coordination des signaux excitateurs et inhibiteurs dans le système nerveux.¹⁹⁹ À des concentrations élevées, ces deux composés induisent des effets pathologiques similaires (Image 76). Des expériences sur des cellules cérébrales ont révélé que même de faibles doses de BPA/BPS, lorsqu'elles sont administrées pendant un mois, modifient la transmission chimique et électrique des signaux à travers les synapses.²⁰⁰

¹⁹⁷New Atlas. Autism in boys linked to common plastic exposure in the womb. (2024) <https://newatlas.com/health-wellbeing/prenatal-bisphenol-a-bpa-autism-boys/> (Accessed May 1, 2025).

¹⁹⁸Global Industry Analysts. Bisphenol A: Global strategic business report. Research and Markets. (2025) https://www.researchandmarkets.com/reports/1227819/bisphenol_a_global_strategic_business_report (accessed 1 May 2025).

¹⁹⁹Glausiusz, J. Toxicology: The plastics puzzle. Nature 508, 306–308 (2014). <https://doi.org/10.1038/508306a>

²⁰⁰News-Medical. Plasticizers can impair important brain functions in humans. (2021) <https://www.news-medical.net/news/20210412/Plasticizers-can-impair-important-brain-functions-in-humans.aspx> (Accessed May 1, 2025).

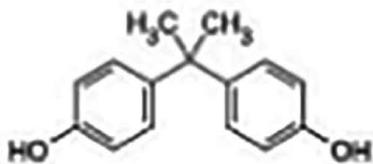
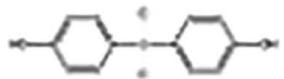
BPA (C₁₅H₁₆O₂)BPS (C₁₂H₁₀O₄S)

Image 76. Structures moléculaires et formules chimiques du bisphénol A (BPA) et du bisphénol S (BPS)

En 2023, une étude a révélé que les enfants atteints du trouble du déficit de l'attention avec hyperactivité (TDAH) présentaient des niveaux plus élevés de bisphénol A (BPA) et de phtalates que les enfants ne souffrant pas de cette condition.²⁰¹

Des chercheurs de l'Institut de neurologie et de santé mentale Florey, à Melbourne, ont identifié une multiplication par six du risque d'autisme à l'âge de 11 ans chez les garçons dont les mères avaient des niveaux élevés de BPA au cours des derniers stades de la grossesse.²⁰²

66

« **Le BPA peut perturber le développement cérébral hormonalement contrôlé du fœtus masculin par plusieurs mécanismes, notamment en inhibant l'enzyme clé, l'aromatase, qui régule les neurohormones et joue un rôle essentiel dans le développement du cerveau du fœtus masculin** », a déclaré la professeure Ponsonby.

« **Cela semble être un élément du puzzle de l'autisme** ».¹⁹⁷

L'inhibition de l'enzyme aromatase pourrait expliquer la disproportion entre les sexes dans l'autisme, avec un ratio de 4 à 5 garçons pour 1 fille.²⁰³ Les filles sont moins souvent atteintes d'autisme, mais lorsqu'elles le sont, elles en souffrent sous une forme plus sévère.²⁰⁴

Le bisphénol A (BPA) contribue également au développement du diabète de type 2, en provoquant une hyperglycémie et une résistance à l'insuline.²⁰⁵ La mortalité mondiale due au diabète continue d'augmenter de manière constante (Image 77).

²⁰¹[EarthDay.org](https://www.earthday.org/babies-vs-plastics-what-every-parent-should-know). Babies vs. Plastics Report. (2023) <https://www.earthday.org/babies-vs-plastics-what-every-parent-should-know> (Accessed May 1, 2025)

²⁰²Symeonides, C., Vacy, K., Thomson, S. et al. Male autism spectrum disorder is linked to brain aromatase disruption by prenatal BPA in multimodal investigations and 10HDA ameliorates the related mouse phenotype. Nat Commun 15, 6367 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48897-8>

²⁰³Zeidan, J. et al. Global prevalence of autism: A systematic review update. Autism Research 15, 778–790 (2022). <https://doi.org/10.1002/aur.2696>

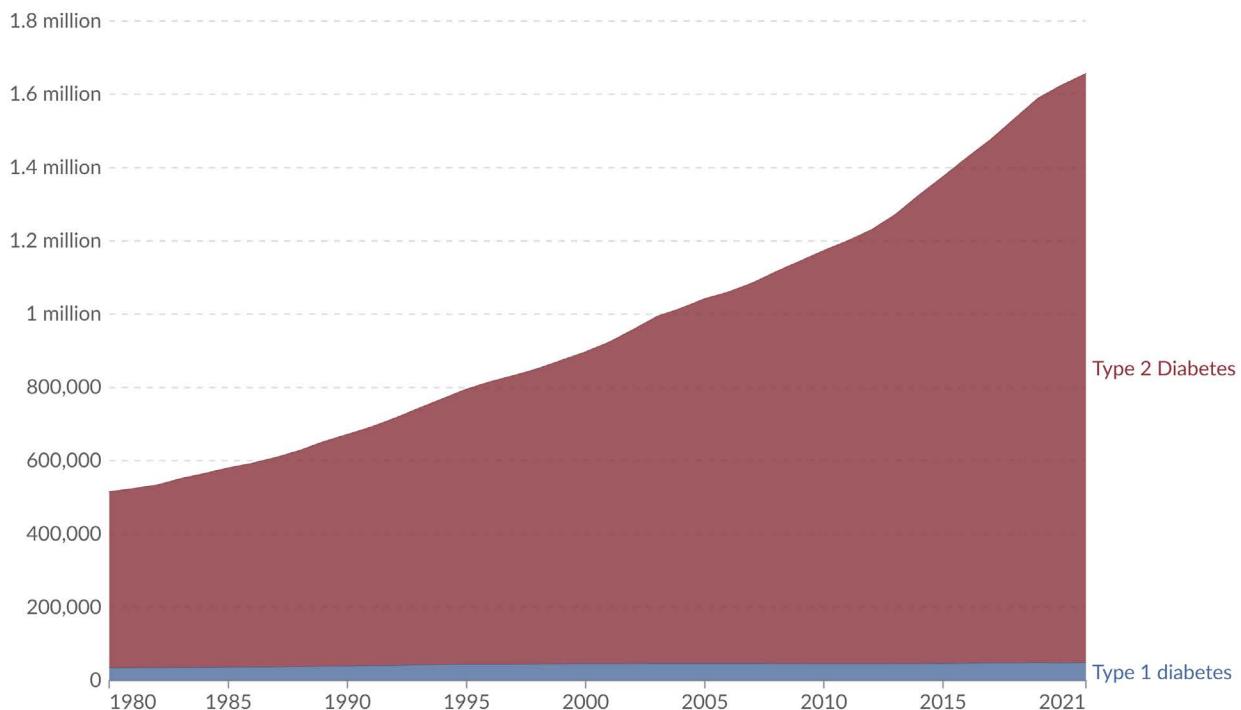
²⁰⁴Frazier, T. W., Georgiades, S., Bishop, S. L. & Hardan, A. Y. Behavioral and Cognitive Characteristics of Females and Males With Autism in the Simons Simplex Collection. Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry 53, 329–340.e3 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.jaac.2013.12.004>

²⁰⁵Sun, Q. et al. Association of Urinary Concentrations of Bisphenol A and Phthalate Metabolites with Risk of Type 2 Diabetes: A Prospective Investigation in the Nurses' Health Study (NHS) and NHSII Cohorts. Environ Health Perspect 122, 616–623 (2014). <https://doi.org/10.1289/ehp.1307201>

Deaths from diabetes, by type, World, 1980 to 2021

Our World
in Data

Annual deaths from diabetes. Type 1 diabetes is an autoimmune disease, where cells making insulin are destroyed; Type 2 diabetes is insulin resistance. Both types lead to high levels of glucose in blood.



Data source: IHME, Global Burden of Disease (2024)

OurWorldinData.org/causes-of-death | CC BY

Image 77. Mortalité due au diabète par type, monde, 1980-2021

Source : <https://ourworldindata.org/grapher/deaths-from-diabetes-by-type>

Phtalates

Les phtalates sont un groupe de composés chimiques utilisés principalement comme plastifiants, c'est-à-dire des substances qui rendent les plastiques, tels que le polychlorure de vinyle (PVC), plus flexibles, souples et durables.

Les phtalates sont largement utilisés dans l'industrie et la vie quotidienne, mais leur capacité à perturber le fonctionnement du système endocrinien suscite des inquiétudes.²⁰⁶

Formule moléculaire (Image 78). Les phtalates ne sont pas des hormones, mais ils peuvent inhiber l'action des androgènes (par exemple, la testostérone), ce qui est particulièrement critique pour le développement masculin. Leur exposition est associée à une réduction de la mobilité des spermatozoïdes, à des anomalies du développement des organes génitaux (par exemple, cryptorchidie chez les nouveau-nés). Les hommes diagnostiqués comme étant infertiles présentent des concentrations plus élevées de phtalates.

²⁰⁶Arrigo, F., Impellitteri, F., Piccione, G. & Faggio, C. Phtalates and their effects on human health: Focus on erythrocytes and the reproductive system. Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology 270, 109645 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2023.109645>

C₈H₆O₄
C₆H₄ (COOH)

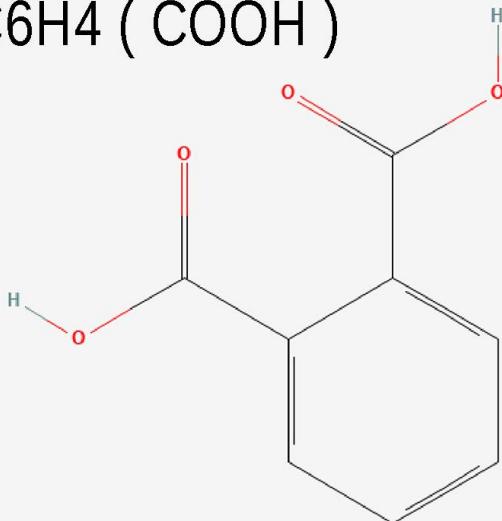


Image 78. Image de la structure chimique du phtalate

Source : National Center for Biotechnology Information. Bisphenol A, 2D Structure PubChem. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/1017#section=2D-Structure> (consulté le 1er mai 2025).

Chez les femmes, l'exposition aux phtalates perturbe le cycle menstruel, augmente le risque de fausses couches et de naissances prématurées. Une exposition pendant la grossesse peut entraîner un retard de développement cérébral, une diminution du QI, et des troubles du comportement.²⁰⁷

Les chercheurs ont démontré un lien de causalité entre les phtalates environnementaux (des substances chimiques toxiques contenues dans des produits de consommation courante) et l'augmentation du développement des fibromes utérins, les tumeurs les plus fréquentes chez les femmes.²⁰⁸

L'exposition aux phtalates présents dans les plastiques augmente le risque de cancers pédiatriques de 20%, avec une augmentation de trois fois des cas de tumeurs osseuses malignes et un doublement des cas de lymphomes et de leucémies.²⁰⁹

Une étude impliquant plus de 5 000 mères américaines a montré que les phtalates sont associés à un risque accru de naissance prématurée et de faible poids chez les nouveau-nés.²¹⁰ Les auteurs notent que ces facteurs augmentent modérément la probabilité de mortalité infantile et pourraient influencer la réussite scolaire, ainsi qu'accroître le risque de maladies cardiovasculaires, de diabète et de troubles psychiatriques tels que l'autisme et le TDAH²¹¹ chez les enfants.

²⁰⁷ Welch, B. M. et al. Associations Between Prenatal Urinary Biomarkers of Phthalate Exposure and Preterm Birth: A Pooled Study of 16 US Cohorts. *JAMA Pediatrics* 176, 895–905 (2022). <https://doi.org/10.1001/jamapediatrics.2022.2252>

²⁰⁸Iizuka, T. et al. Mono-(2-ethyl-5-hydroxyhexyl) phthalate promotes uterine leiomyoma cell survival through tryptophan-kynurenone-AHR pathway activation. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 119, e2208886119 (2022). <https://doi.org/10.1073/pnas.2208886119>

²⁰⁹Ahern, T. P. et al. Medication-Associated Phthalate Exposure and Childhood Cancer Incidence. *JNCI: Journal of the National Cancer Institute* 114, 885–894 (2022). <https://doi.org/10.1093/jnci/djac045>

²¹⁰Trasande, L. et al. Prenatal phthalate exposure and adverse birth outcomes in the USA: a prospective analysis of births and estimates of attributable burden and costs. *The Lancet Planetary Health* 8, e74–e85 (2024). [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(23\)00270-X](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(23)00270-X)

²¹¹Baker, B. H. et al. Ultra-processed and fast food consumption, exposure to phthalates during pregnancy, and socioeconomic disparities in phthalate exposures. *Environment International* 183, 108427 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108427>

Les additifs chimiques présents dans les plastiques contribuent au développement de l'obésité.²¹² Selon les données de l'OMS, entre 1990 et 2020, le taux d'obésité chez les adultes a plus que doublé à l'échelle mondiale, tandis que chez les adolescents, il a été multiplié par quatre.²¹³

Tendances de l'obésité chez les adultes et les jeunes aux États-Unis (Images 79-80).

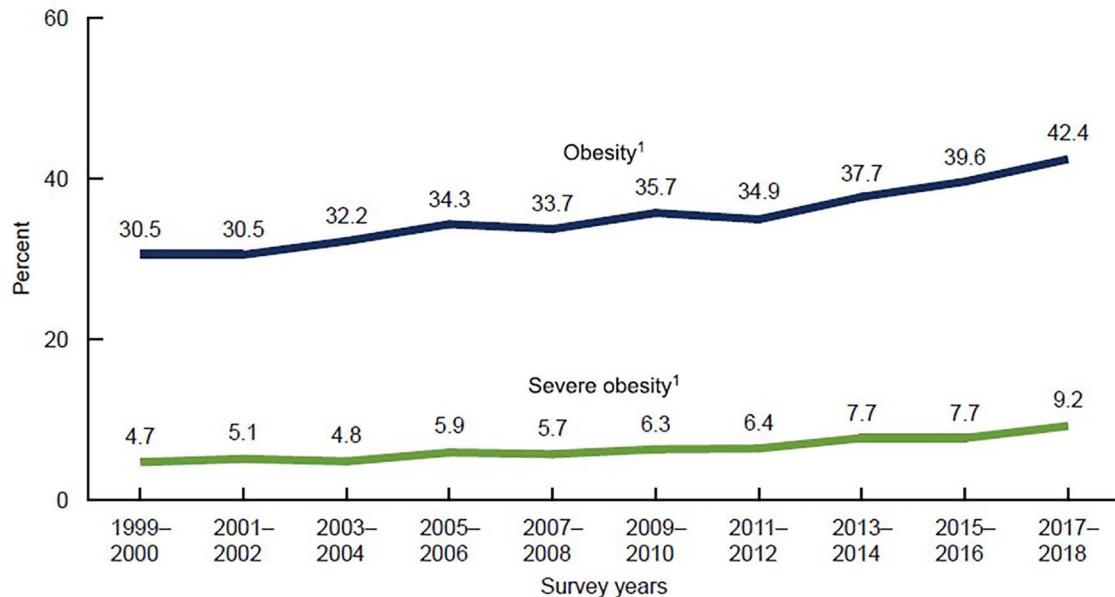


Image 79. Tendances de la prévalence de l'obésité et de l'obésité sévère chez les adultes de 20 ans et plus, ajustées selon l'âge : États-Unis, 1999-2000 à 2017-2018

Source : National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases. *Overweight & Obesity Statistics*. NIDDK (2021) <https://www.niddk.nih.gov/health-information/health-statistics/overweight-obesity> (consulté le 1er mai 2025).

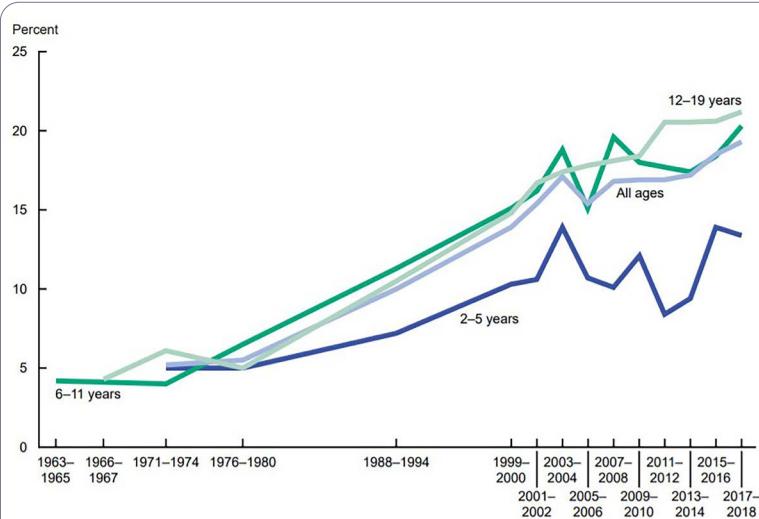


Image 80. Tendances de l'obésité chez les enfants et les adolescents âgés de 2 à 19 ans, par tranche d'âge : États-Unis, 1963-1965 à 2017-2018

Source: National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases. *Overweight & Obesity Statistics*. NIDDK (2021) <https://www.niddk.nih.gov/health-information/health-statistics/overweight-obesity> (consulté le 1er mai 2025).

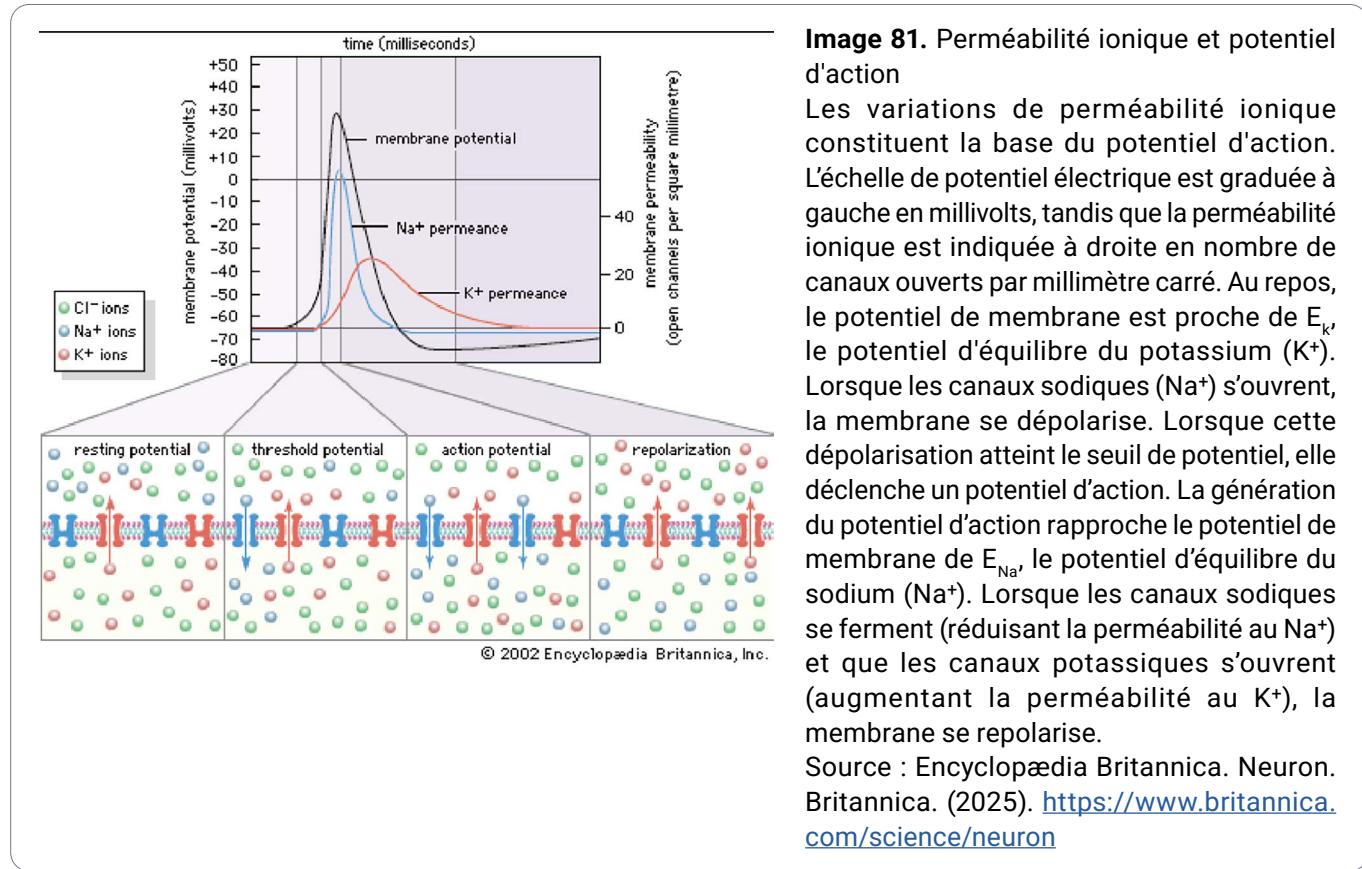
²¹²Völker, J., Ashcroft, F., Vedøy, Å., Zimmermann, L. & Wagner, M. Adipogenic Activity of Chemicals Used in Plastic Consumer Products. *Environ. Sci. Technol.* 56, 2487–2496 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c06316>

²¹³World Health Organization. Obesity and overweight. WHO Fact Sheets. (2025) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight> (Accessed May 10, 2025).

Charge électrostatique du nanoplastique comme facteur clé de sa toxicité accrue pour le corps humain

Le corps humain produit constamment de l'énergie bioélectrique. Tous les processus physiologiques - qu'il s'agisse de l'activité cardiaque, de la perception sensorielle ou des fonctions cognitives supérieures - sont régulés par des réactions chimiques initiées par le déplacement de charges électriques. Les fluides intracellulaires et extracellulaires contenant des protéines sont principalement constitués d'eau, qui possède des propriétés électropolaires. Ainsi, les interactions électrostatiques, incluant les liaisons hydrogène, les liaisons ioniques et l'encapsulation hydrophobe, jouent un rôle fondamental dans la structuration des protéines cellulaires, essentielles à leur bon fonctionnement et, par conséquent, au maintien des fonctions vitales de l'organisme.²¹⁴

L'activité bioélectrique est directement impliquée dans le fonctionnement cellulaire via l'interaction des canaux ioniques et les potentiels membranaires. Chaque cellule maintient une différence de potentiel électrique entre son environnement interne et externe—le potentiel de membrane au repos—qui est régulé par la concentration variable d'ions à l'intérieur et à l'extérieur de la cellule (Images 81). Les principaux types de canaux ioniques présents dans le corps humain incluent les canaux sodiques, potassiques, calciques et chlorure. Ces canaux, en synergie avec le potentiel membranaire, assurent les fonctions essentielles de divers types cellulaires (Images 82, 83).



²¹⁴Azim Premji University. The Biology of Electricity: How electricity is critical to the functioning of the human body. (2022) <https://azimpremjiuniversity.edu.in/news/2022/the-biology-of-electricity> (Accessed May 1, 2025).

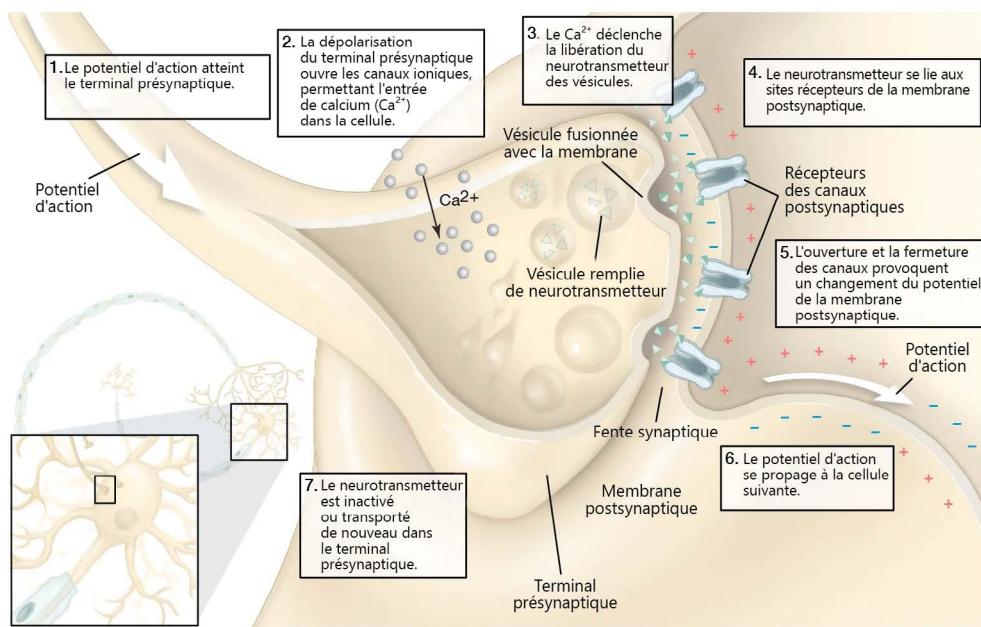


Image 82. Synapse

La transmission chimique de l'influx nerveux au niveau du synapse. L'arrivée de l'influx nerveux dans la terminaison présynaptique stimule la libération de neurotransmetteurs dans l'espace synaptique. Liaison des neurotransmetteurs aux récepteurs de la membrane postsynaptique stimule la régénération du potentiel d'action dans le neurone postsynaptique.

Source : Encyclopædia Britannica. Neuron. Britannica. (2025). <https://www.britannica.com/science/neuron>

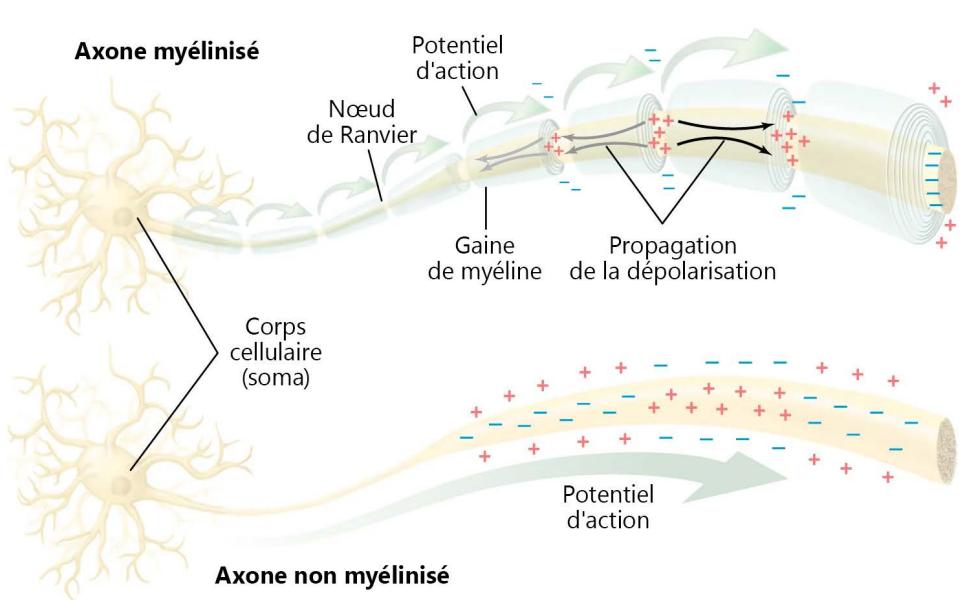


Image 83. Neurone : conduction du potentiel d'action

Dans un axone myélinisé, la gaine de myéline empêche le courant local (petites flèches noires) de traverser la membrane. Cela force le courant à se déplacer le long de la fibre nerveuse jusqu'aux nœuds de Ranvier non myélinisés, qui présentent une forte concentration de canaux ioniques. Lorsqu'ils sont stimulés, ces canaux propagent le potentiel d'action (grandes flèches vertes) jusqu'au nœud suivant. Ainsi, le potentiel d'action "sauté" le long de la fibre, étant régénéré à chaque nœud, un processus appelé conduction saltatoire. Dans un axone non myélinisé, le potentiel d'action se propage le long de toute la membrane, s'affaiblissant progressivement à mesure qu'il diffuse en retour à travers la membrane vers la zone initialement dépolarisée.

Source : Encyclopædia Britannica. Neuron. Britannica. (2025). <https://www.britannica.com/science/neuron>

La bioélectricité générée dans le corps humain (par exemple, lors de l'activité musculaire ou de la transmission des impulsions nerveuses) ne nuit pas à l'humain, car elle fait partie intégrante des processus physiologiques. Cependant, lorsque les micro- et nanoplastiques pénètrent dans le corps, ils transportent avec eux une charge électrostatique qu'ils peuvent conserver longtemps. C'est précisément cette charge qui pourrait perturber les fonctions biologiques et nuire à la santé.

Le nanoplastique est constitué de particules de plastique mesurant moins de 1 micromètre, qui, grâce à leur structure unique, ont la capacité d'accumuler des charges électrostatiques, ce qui en fait un sujet d'étude prioritaire pour les scientifiques.

Lorsque les particules de micro- et nanoplastiques se chargent électriquement en raison de l'*effet triboélectrique* (lors du contact et du frottement avec d'autres surfaces), elles acquièrent une charge électrostatique – positive ou négative. Cette charge influence la façon dont les particules se comportent dans le corps et dans l'environnement.

La structure unique des particules de nanoplastique leur permet d'absorber des polluants, des ions et des molécules organiques, ce qui renforce leur rôle en tant que vecteurs de toxines dans les écosystèmes.^{215, 216}

La composition chimique des nanoplastiques joue un rôle clé dans la formation de leurs propriétés électrostatiques. Des polymères tels que le polystyrène (PS), le polyéthylène (PE) ou le polypropylène (PP) contiennent souvent des groupes fonctionnels - carboxyles (-COOH), sulfates (-SO₃H) ou amines (-NH₂) qui peuvent s'ioniser en fonction des conditions environnementales. Par exemple, une étude publiée dans la revue Langmuir a révélé que les nanoparticules de polystyrène contenant des groupes carboxyles (PS-COOH) présentent un potentiel zéta négatif, tandis que celles avec des groupes amines (PS-NH₂) ont un potentiel positif, ce qui confirme l'impact des groupes fonctionnels sur la charge des nanoplastiques.²¹⁷

Le processus d'accumulation de charges ne se limite pas aux propriétés chimiques. Lors de la production ou d'une action mécanique, telle que le frottement, les nanoplastiques peuvent acquérir une charge par électrification par contact. Une étude menée sur des contenants en plastique a révélé que le polystyrène est capable d'accumuler une charge allant jusqu'à -10 kV, qui persiste longtemps et attire des particules de charge opposée, telles que la poussière ou les spores bactériennes.²¹⁸ De plus, les variations dans la structure du polymère – par exemple, la présence de groupes polaires – permettent aux nanoplastiques de manifester une charge positive ou négative en fonction du pH de l'environnement. Dans un milieu acide, les groupes amines peuvent conférer une charge positive aux particules, tandis que dans un milieu alcalin, les charges négatives prédominent en raison des groupes carboxyles, comme le confirment des études sur la plante *Arabidopsis thaliana*.²¹⁹

²¹⁵Rai, P. K., Sonne, C., Brown, R. J. C., Younis, S. A. & Kim, K.-H. Adsorption of environmental contaminants on micro- and nano-scale plastic polymers and the influence of weathering processes on their adsorptive attributes. *Journal of Hazardous Materials* 427, 127903 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127903>

²¹⁶Zhang, W. et al. The mechanism for adsorption of Cr(VI) ions by PE microplastics in ternary system of natural water environment. *Environmental Pollution* 257, 113440 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113440>

²¹⁷Perini, D. A. et al. Surface-Functionalized Polystyrene Nanoparticles Alter the Transmembrane Potential via Ion-Selective Pores Maintaining Global Bilayer Integrity. *Langmuir* 38, 14837–14849 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.2c02487>

²¹⁸Baribio, L. E., Avens, J. S. & O'Neill, R. D. Effect of Electrostatic Charge on the Contamination of Plastic Food Containers by Airborne Bacterial Spores. *Applied Microbiology* 14, 905–913 (1966). <https://doi.org/10.1128/am.14.6.905-913.1966>

²¹⁹Sun, X.D., Yuan, X.Z., Jia, Y. et al. Differentially charged nanoplastics demonstrate distinct accumulation in *Arabidopsis thaliana*. *Nat. Nanotechnol.* 15, 755–760 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41565-020-0707-4>

Ainsi, la compréhension de la structure du nanoplastique et de ses caractéristiques électrostatiques ne se limite pas à révéler sa nature physique, mais elle pose également les bases de l'analyse de son impact sur les écosystèmes et les organismes, ce qui sera exploré plus en détail à travers ses mécanismes pathogènes.

Grâce à sa permittivité diélectrique élevée (sa capacité à retenir une charge électrique), le nanoplastique, une fois introduit dans l'organisme, continue d'accumuler de nouvelles charges nocives qui, en temps normal, sont neutralisées ou dissipées par les systèmes conducteurs naturels du corps.

Cette perturbation compromet les processus d'autorégulation de l'organisme, exposant les structures cellulaires à une énergie électrostatique anormale sur une période prolongée.

Pour évaluer l'ampleur du risque posé par le nanoplastique dans l'organisme, il est essentiel de se tourner vers les systèmes bioélectriques du corps : des mécanismes complexes où les impulsions électriques constituent le langage de la communication intercellulaire.

Chaque mouvement et chaque pensée sont rendus possibles par des signaux invisibles qui transmettent des instructions aux cellules. Les neurones échangent des informations par des impulsions électriques, les muscles se contractent en réponse à ces signaux et le cerveau traite les données en combinant processus bioélectriques et chimiques. Même la respiration, les réflexes, la vision et l'audition dépendent de micro-décharges électriques qui régulent le fonctionnement des organes.

Ces courants invisibles, affinés par des millions d'années d'évolution, transforment les impulsions bioélectriques en langage de la vie. Mais leur harmonie est perturbée par des éléments étrangers : des particules microscopiques de nanoplastiques.

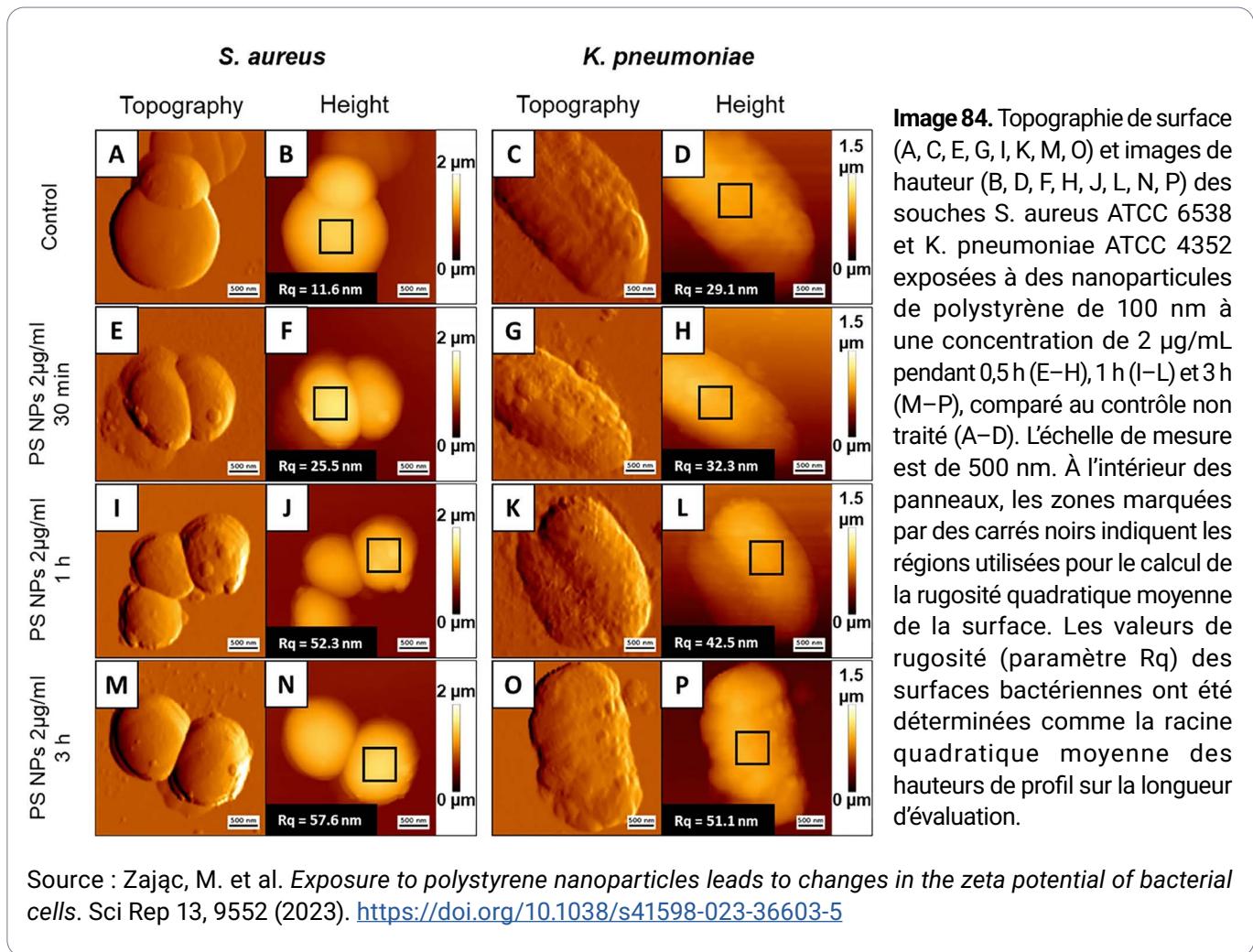
Les nanoplastiques, une fois introduits dans l'organisme, sont capables d'absorber des ions et de former des zones à conductivité électrique anormale, perturbant l'équilibre ionique naturel et les processus de neutralisation des charges locales, régulés par les fluides intercellulaires. L'adsorption d'ions à la surface des nanoplastiques conduit à l'accumulation de charges électrostatiques sur ces particules. Ce phénomène peut provoquer un stress oxydatif en favorisant la génération d'espèces réactives de l'oxygène (ERO), ainsi que perturber la communication électrochimique entre les cellules, affectant négativement leurs fonctions.

Cela est confirmé par une étude²²⁰ où des particules de polystyrène de 100 nm, même en présence d'ions sodium (Na^+), conservaient leur stabilité et restaient adsorbées à la surface des bactéries, malgré leur charge négative. Par exemple, des expériences avec *Staphylococcus aureus* et *Klebsiella pneumoniae* ont montré que les nanoplastiques modifient de manière significative le potentiel zéta des cellules, rendant leur surface plus négative, ce qui perturbe l'équilibre électrostatique naturel.

²²⁰Zajac, M. et al. Exposure to polystyrene nanoparticles leads to changes in the zeta potential of bacterial cells. Sci Rep 13, 9552 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36603-5>

Les particules chargées de nanoplastiques peuvent influencer les champs électriques autour des cellules, déformant la transmission des signaux. Cela ressemble à des interférences dans les communications radio : au lieu de commandes claires, un bruit chaotique empêche les cellules d'échanger des informations. Bien que l'impact direct sur les cellules nerveuses n'ait pas été étudié dans cette recherche et que les conclusions sur l'impact chez l'être humain soient préliminaires et nécessitent des études supplémentaires, la modification de la charge de surface des bactéries indique que les nanoplastiques peuvent modifier les propriétés électrochimiques des membranes. Par exemple, à des concentrations supérieures à 64 microgrammes par millimètre, les particules de polystyrène provoquaient des déviations significatives du potentiel zéta, ce qui peut potentiellement perturber le fonctionnement des canaux ioniques ou des récepteurs, essentiels à la communication intercellulaire.

La capacité des nanoparticules à « s'accrocher » aux surfaces, comme l'ont montré les images de microscopie à force atomique dans l'étude mentionnée ci-dessus (Image 84), crée un risque d'exposition à long terme. Les particules, en se déposant dans les tissus, peuvent former des anomalies électrostatiques persistantes que les ions sodium et potassium ne peuvent pas complètement neutraliser, surtout si le nanoplastic pénètre à l'intérieur des cellules, contournant les mécanismes de protection du fluide intercellulaire.



Le danger du chargement pathogène accumulé sur les nanoparticules plastiques réside également dans le fait qu'il peut générer des interférences électriques autour des cellules immunitaires, ce qui est confirmé par une étude²²¹ montrant que les nanoparticules de polystyrène chargées positivement ($\text{PS}-\text{NH}_2$) réduisent significativement la viabilité des cellules immunitaires et la stabilité des membranes lysosomales, par rapport à celles chargées négativement ($\text{PS}-\text{COOH}$), soulignant ainsi l'importance de la charge dans leur interaction avec les cellules.

Les particules de MNP électrostatiquement chargées possèdent une capacité accrue à s'adsorber sur les membranes cellulaires, les tissus et d'autres surfaces biologiques, en y adhérant littéralement, ce qui augmente le risque de dommages mécaniques et chimiques aux cellules, perturbant leur structure et leurs fonctions.

La charge électrostatique peut faciliter la pénétration des particules de MNP à travers des barrières biologiques complexes telles que la barrière hémato-encéphalique ou la barrière hémato-placentaire. En conséquence, les toxines peuvent atteindre le cerveau ou le fœtus, augmentant ainsi le risque d'effets neurotoxiques et de troubles du développement prénatal.

L'exposition électrostatique aux nanoparticules plastiques peut perturber la structure et le fonctionnement des protéines, des canaux ioniques et des récepteurs cellulaires, ce qui entraîne des défaillances dans la transmission des signaux entre les cellules, déclenche un stress oxydatif et affaiblit la défense immunitaire de l'organisme.

Ces altérations peuvent initier une cascade de processus pathologiques, notamment une inflammation chronique, des troubles neurodégénératifs, le développement de tumeurs malignes et une dysfonction systémique de l'organisme, augmentant considérablement le risque de maladies graves.

Ainsi, l'accumulation de charge électrostatique sur les nanoparticules plastiques n'est pas simplement un phénomène physique, mais un mécanisme qui renforce la dangerosité des MNP. Cela est d'autant plus préoccupant que cette charge électrostatique peut persister très longtemps sur les MNP, tandis que les particules de micro- et nanoplastiques sont très difficiles à éliminer de l'organisme.

L'étude de ce phénomène est actuellement d'une importance capitale, car elle permet de comprendre comment les charges d'électricité pathogène accumulées sur les nanoparticules plastiques peuvent devenir une menace macroscopique pour la survie de l'espèce humaine dans son ensemble.

Jusqu'à récemment, on pensait que le fondement de l'énergie cellulaire — le transfert de protons — était déterminé exclusivement par la chimie : les protons semblaient « sauter » d'une molécule d'eau à une autre. Cependant, une nouvelle étude publiée dans *Proceedings of the National Academy of Sciences* change radicalement cette vision. Il s'avère que le transport des protons dans les organismes vivants dépend non seulement des propriétés chimiques, mais aussi des propriétés quantiques, en particulier du spin des électrons et de la chiralité des molécules biologiques (Image 85).

²²¹Murano, C., Bergami, E., Liberatori, G., Palumbo, A. & Corsi, I. Interplay Between Nanoplastics and the Immune System of the Mediterranean Sea Urchin *Paracentrotus lividus*. *Front. Mar. Sci.* 8, 647394 (2021). <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.647394>

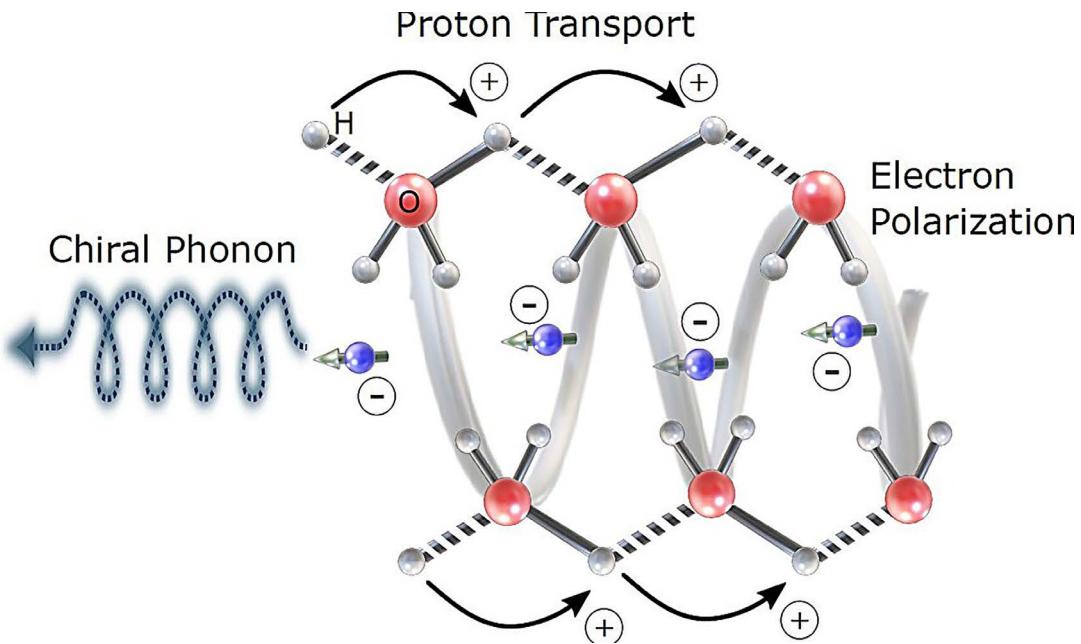


Image 85. Modèle schématique simplifié. Le transport des protons s'accompagne d'une polarisation électrique dans les milieux chiraux. En raison de l'effet CISS, cette polarisation électrique entraîne une polarisation de spin. La conservation du moment angulaire génère des phonons chiraux qui renforcent le transfert des protons.

Source : Goren, N. et al. *Coupling between electrons' spin and proton transfer in chiral biological crystals*. PNAS 122, e2500584122 (2025). <https://doi.org/10.1073/pnas.2500584122>

Une étude menée par des scientifiques israéliens de l'Université hébraïque a démontré que, dans des protéines telles que le lysozyme, le transfert de protons s'accélère considérablement lorsqu'on introduit des électrons avec un spin « correct » et, au contraire, il est ralenti avec le spin opposé. Cela s'explique par le fait que, dans les systèmes vivants, les protons et les électrons fonctionnent comme un mécanisme quantique coordonné. Même des changements minimes dans leur orientation de spin peuvent affecter des processus fondamentaux tels que la production d'énergie, le métabolisme et la régulation intracellulaire.

66

Comme l'a souligné le responsable de l'étude, Naam Goren : « **Nos résultats montrent que le mode de déplacement des protons dans les systèmes biologiques concerne non seulement la chimie, mais aussi la physique quantique** ». Cela signifie que même les plus petites perturbations de la charge électrique ou de l'orientation magnétique peuvent influencer le métabolisme cellulaire, la production d'énergie et l'état de santé général.²²²

²²²[Phys.org](https://phys.org/news/2025-05-quantum-effects-proteins-tiny-particles.html). Quantum effects in proteins: How tiny particles coordinate energy transfer inside cells. (2025) <https://phys.org/news/2025-05-quantum-effects-proteins-tiny-particles.html> (Accessed May 10, 2025).

Effet systémique des MNP sur les organes et les systèmes fonctionnels humains

Une fois dans l'organisme humain, les MNP se propagent avec le flux sanguin dans tous les organes et tissus (Image 86). Des particules plastiques ont été retrouvées dans le sang humain, les tissus cardiaque et osseux, le cerveau, le placenta, les poumons, le foie et d'autres organes.²²³

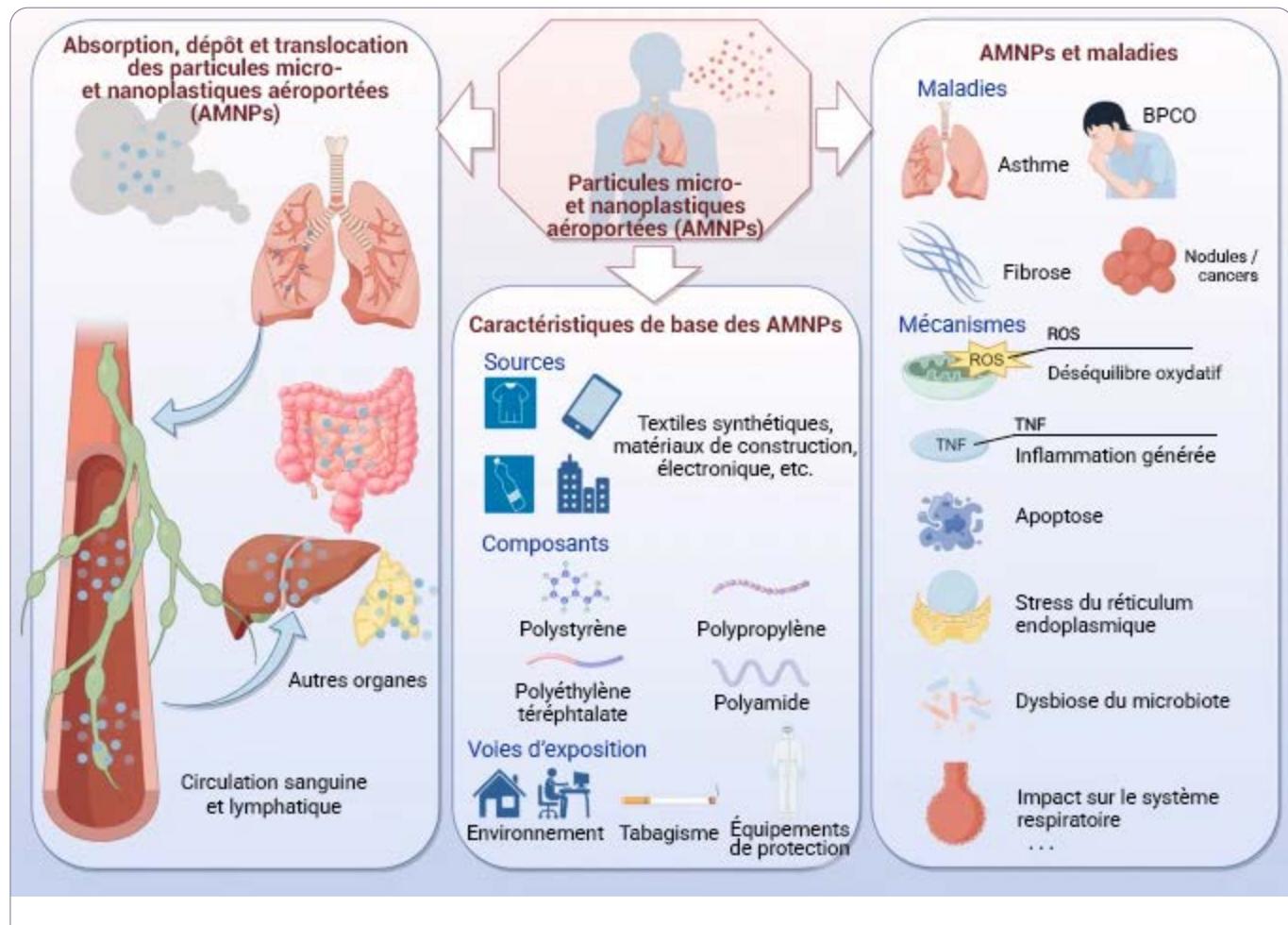


Image 86. MNP, sources, voies d'exposition et effets toxiques

Source : Gou, Z., Wu, H., Li, S., Liu, Z. & Zhang, Y. *Airborne micro and nanoplastics: emerging causes of respiratory diseases*. Particle and Fibre Toxicology 21, 50 (2024). <https://doi.org/10.1186/s12989-024-00613-6>

²²³Khan, A. & Jia, Z. Recent insights into uptake, toxicity, and molecular targets of microplastics and nanoplastics relevant to human health impacts. iScience 26, 106061 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106061>

Mécanismes d'atteinte du système respiratoire par inhalation de MNP

L'une des principales voies d'entrée des MNP dans l'organisme humain est la respiration.

Les résultats d'une étude menée par des chercheurs chinois²²⁴ ont montré que, pendant deux heures passées en extérieur, un adulte inhale environ 106 000 particules de microplastique, tandis qu'un enfant en inhale environ 73 700.

Les particules de taille inférieure à 0,1 µm, grâce à leurs propriétés thermodynamiques, peuvent efficacement se déposer dans l'ensemble des voies respiratoires (des voies respiratoires supérieures jusqu'aux alvéoles).²²⁵

Les poumons possèdent une large surface alvéolaire (environ 150 m²) et une fine barrière tissulaire (moins de 1 µm), ce qui permet aux nanoparticules de pénétrer facilement dans la circulation sanguine (Image 87).

Des microplastiques ont été détectés dans 13 des 20 échantillons de tissu pulmonaire humain.²²⁶

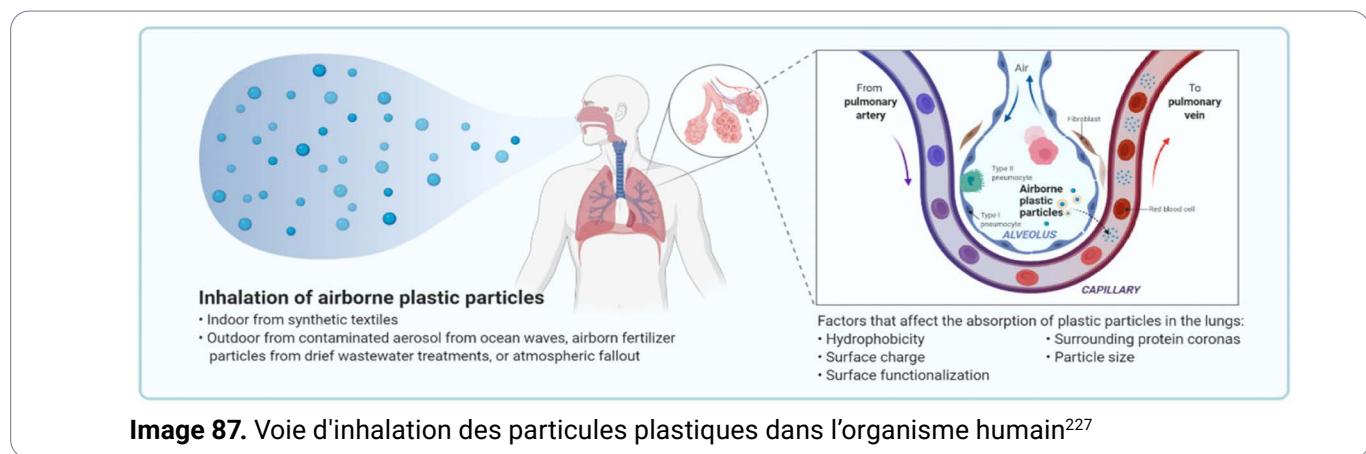


Image 87. Voie d'inhalation des particules plastiques dans l'organisme humain²²⁷

Selon une étude menée auprès de 22 patients atteints de maladies pulmonaires, des microplastiques ont été détectés dans tous les échantillons de mucus bronchique²²⁸ : entre 18,75 et 91,75 particules/10 ml.²²⁹ Un lien a également été établi entre la rhinite allergique et les microplastiques.²³⁰

Les MNP sont étroitement associés à l'apparition et au développement de diverses maladies respiratoires, y compris l'asthme, la fibrose pulmonaire, la BPCO et les tumeurs.²²⁹ Une étude a montré que 97 % des échantillons de tumeurs malignes pulmonaires contenaient des fibres de microplastique.²³¹

²²⁴Peking University Center for Environmental Science and Engineering. Prof. Yi Huang's team made new progress in atmospheric microplastic distribution and its human health risk. CESE. (2022) <https://cese.pku.edu.cn/kycg/156506.htm> (Accessed May 1, 2025).

²²⁵Gou, Z., Wu, H., Li, S., Liu, Z. & Zhang, Y. Airborne micro- and nanoplastics: emerging causes of respiratory diseases. Particle and Fibre Toxicology 21, 50 (2024). <https://doi.org/10.1186/s12989-024-00613-6>

²²⁶Amato-Lourenço, L. F. et al. Presence of airborne microplastics in human lung tissue. Journal of Hazardous Materials 416, 126124 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126124>

²²⁷Yee, M. S.-L. et al. Impact of Microplastics and Nanoplastics on Human Health. Nanomaterials 11, 496 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11020496>

²²⁸Huang, S. et al. Detection and Analysis of Microplastics in Human Sputum. Environ. Sci. Technol. 56, 2476–2486 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03859>

²²⁹Xu, M. et al. Internalization and toxicity: A preliminary study of effects of nanoplastic particles on human lung epithelial cell. Science of The Total Environment 694, 133794 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133794>

²³⁰Tuna, A., Taş, B.M., Başaran Kankılıç, G. et al. Detection of microplastics in patients with allergic rhinitis. Eur Arch Otorhinolaryngol 280, 5363–5367 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00405-023-08105-7>

²³¹Dris, R. et al. A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments. Environmental Pollution 221, 453–458 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.013>

Les mécanismes possibles incluent le stress oxydatif, l'inflammation et le déséquilibre du microbiote pulmonaire. Les MNP peuvent entraîner une inflammation pulmonaire.²³²

Selon un rapport de l'OMS, les infections des voies respiratoires inférieures restent actuellement la maladie infectieuse la plus mortelle au monde et occupent la cinquième place parmi toutes les causes de mortalité. De plus, le nombre de décès dus au cancer de la trachée, des bronches et des poumons a augmenté et occupe désormais la sixième place parmi les principales causes de mortalité.²³³

Neurotoxicité des MNPs.

Atteinte du système nerveux central et périphérique

Les recherches confirment que les troubles neurologiques sont la principale cause d'incapacité physique et cognitive dans le monde entier, touchant actuellement environ 3,4 milliards de personnes. Le nombre absolu de patients a considérablement augmenté au cours des 30 dernières années.²³⁴ De plus, on s'attend à ce que la charge des maladies neurodégénératives chroniques double au moins au cours des deux prochaines décennies. Selon les données de l'OMS, une personne sur huit dans le monde souffre d'un trouble mental.²³⁵

L'incidence du trouble bipolaire chez les adolescents et les jeunes adultes dans le monde a augmenté, passant de 79,21 pour 100 000 habitants en 1990 à 84,97 pour 100 000 habitants en 2019.²³⁶ Au cours des trois dernières décennies, l'incidence a augmenté tant chez les hommes que chez les femmes (Image 88). Les recherches montrent une augmentation des troubles mentaux parmi les enfants et les adolescents ces dernières années. Selon le rapport de 2022 sur la qualité et les disparités nationales en matière de soins de santé, entre 2016 et 2019, le nombre de visites aux urgences pour des raisons liées à la santé mentale chez les enfants de 0 à 17 ans a augmenté, passant de 784,1 à 869,3 pour 100 000 habitants. De plus, entre 2008 et 2020, le taux de mortalité par suicide chez les personnes âgées de 12 ans et plus a augmenté de 16 %, passant de 14,0 à 16,3 pour 100 000 habitants.²³⁷

Selon un rapport de la compagnie d'assurances santé Blue Cross Blue Shield, depuis 2013, le nombre de diagnostics de dépression clinique, également appelée dépression majeure, a augmenté de 33 %. Certaines sources prédisent déjà que, d'ici 2030, la dépression deviendra la principale cause de perte d'espérance de vie ou de décès ». Les femmes et les hommes souffrant de dépression peuvent, en moyenne, perdre jusqu'à 9,6 années de vie en bonne santé, selon le rapport.²³⁸

²³²Bengalli, R. et al. Characterization of microparticles derived from waste plastics and their bio-interaction with human lung A549 cells. *Journal of Applied Toxicology* 42, 2030–2044 (2022). <https://doi.org/10.1002/jat.4372>

²³³World Health Organization. The top 10 causes of death. WHO Fact Sheets. (2024) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death> (Accessed May 1, 2025).

²³⁴Van Schependom, J. & D'haeseleer, M. Advances in Neurodegenerative Diseases. *Journal of Clinical Medicine* 12, 1709 (2023). <https://doi.org/10.3390/jcm12051709>

²³⁵World Health Organization. Mental disorders. WHO Fact Sheets. (2022) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/mental-disorders> (Accessed May 1, 2025).

²³⁶Zhong, Y. et al. Global, regional and national burdens of bipolar disorders in adolescents and young adults: a trend analysis from 1990 to 2019. *Gen Psych* 37, e101255 (2024). <https://doi.org/10.1136/gpsych-2023-101255>

²³⁷U.S. Department Of Health And Human Services. 2022 National Healthcare Quality and Disparities Report. Rockville, MD: Agency for Healthcare Research and Quality. (2022) <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK587174> (Accessed May 1, 2025).

²³⁸Lépine, J.-P. & Briley, M. The increasing burden of depression. *NDT* 7, 3–7 (2011). <https://doi.org/10.2147/NDT.S19617>

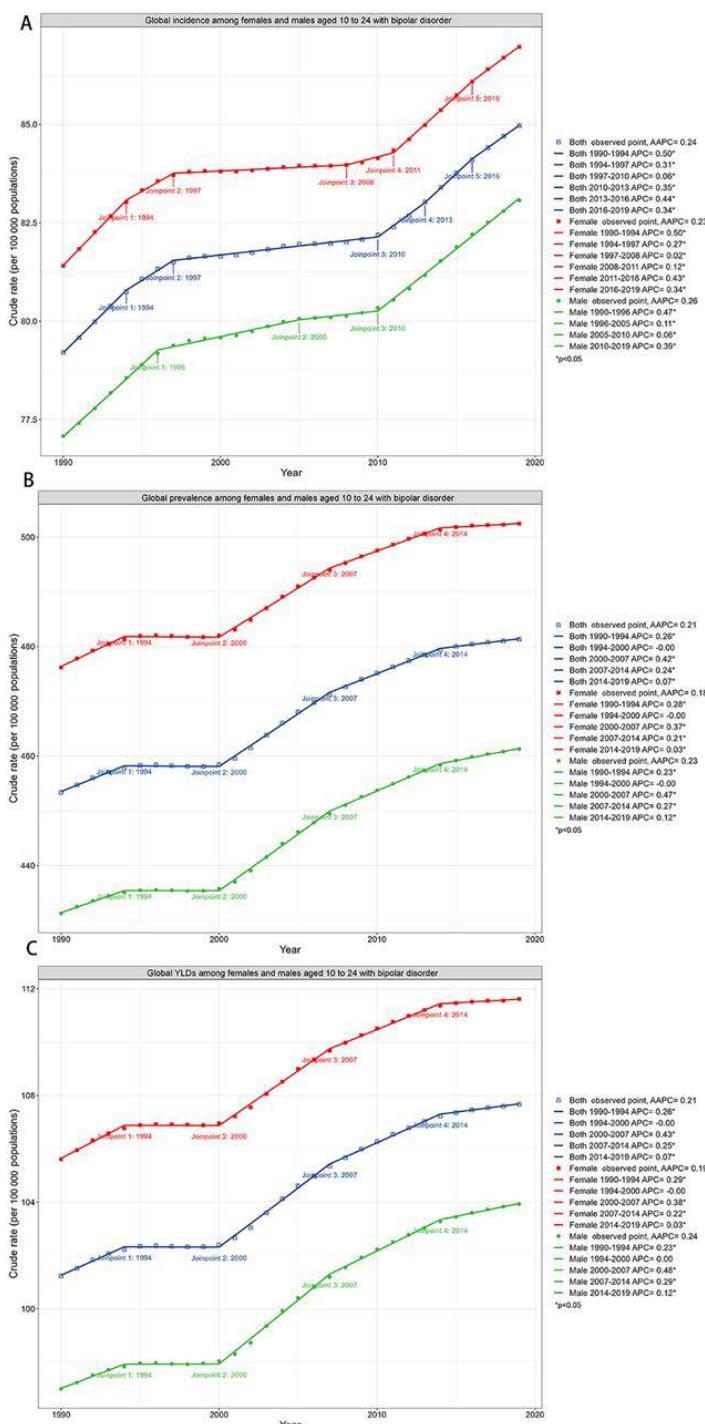


Image 88. Analyse de régression des points d'inflexion de l'incidence mondiale du trouble bipolaire, de la prévalence et des années vécues avec incapacité (YLD) chez tous les adolescents et jeunes adultes âgés de 10 à 24 ans de 1990 à 2019. p<0,05 ; AAPC – changement annuel moyen en pourcentage ; APC – changement annuel en pourcentage ; YLDs – années vécues avec une incapacité.

Source : Zhong, Y. et al. *Global, regional and national burdens of bipolar disorders in adolescents and young adults: a trend analysis from 1990 to 2019*. Gen Psych 37, e101255 (2024). <https://doi.org/10.1136/gpsych-2023-101255>

Au cours des dernières décennies, le nombre de diagnostics du trouble du déficit de l'attention avec hyperactivité (TDAH) a augmenté de manière constante. Les enquêtes nationales de population des États-Unis montrent une augmentation de la prévalence, passant de 6,1 % à 10,2 % sur une période de 20 ans, de 1997 à 2016 (Image 89).²³⁹

Une revue de 2023, couvrant 31 pays, a révélé que le niveau de littératie et de compétences en calcul diminué (Image 90).²⁴⁰

²³⁹Xu, G., Strathearn, L., Liu, B., Yang, B. & Bao, W. Twenty-Year Trends in Diagnosed Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder Among US Children and Adolescents, 1997-2016. JAMA Network Open 1, e181471 (2018). <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2018.1471>

²⁴⁰Organisation for Economic Co-operation and Development. Do adults have the skills they need to thrive in a changing world? OECD Publications. (2024) https://www.oecd.org/en/publications/do-adults-have-the-skills-they-need-to-thrive-in-a-changing-world_b263dc5d-en.html (Accessed May 1, 2025).

Pourcentage d'enfants ayant reçu un diagnostic de TDAH selon leurs parents

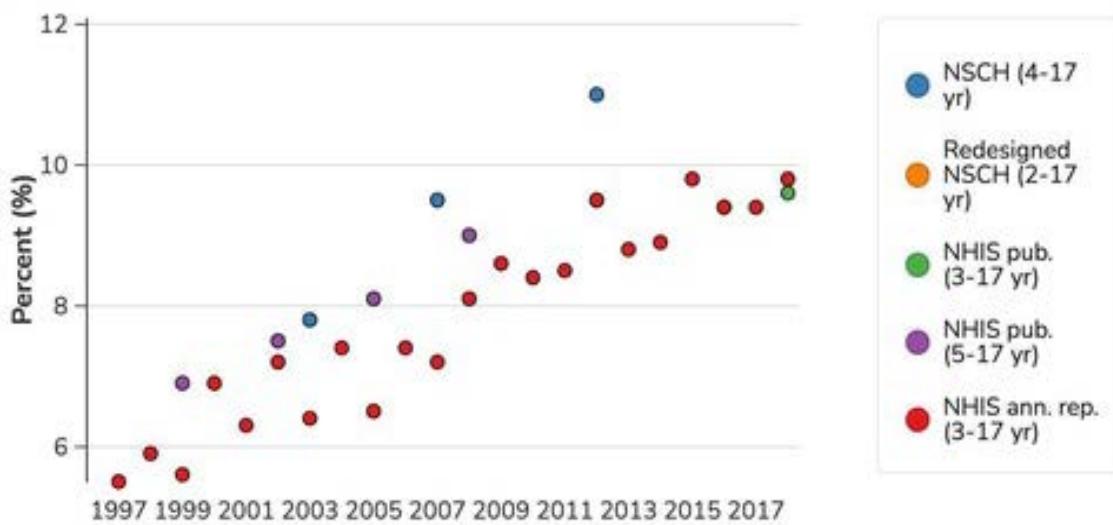
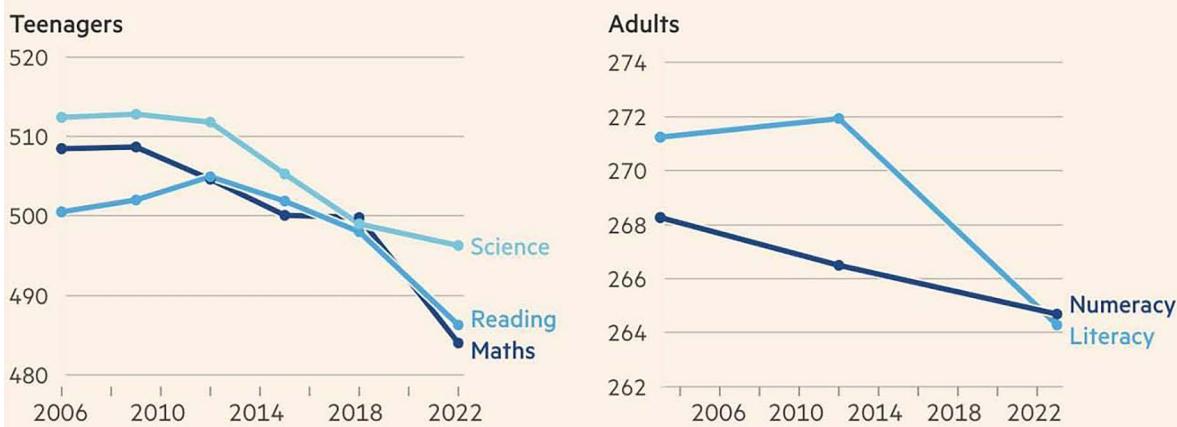


Image 89. Graphique de l'augmentation du TDAH de 1997 à 2016

Source : Xu, G., Strathearn, L., Liu, B., Yang, B. & Bao, W. Twenty-Year Trends in Diagnosed Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder Among US Children and Adolescents, 1997–2016. *JAMA Network Open* 1, e181471 (2018). <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2018.1471>

Performance in reasoning and problem-solving tests is declining

Average scores on assessments across different domains in high-income countries (teen and adult scores use different scales)



Source: OECD PISA, PIAAC and Adult Literacy and Lifeskills Survey

FT graphic: John Burn-Murdoch / @jburnmurdoch

©FT

Image 90. La performance aux tests de logique et de résolution de problèmes est en baisse

Source : OECD PISA, PIAAC and Adult Literacy and Lifeskills Survey

Graphique FT : John-Murdoch / @jburnmurdoch

Les tendances de l'augmentation des maladies neurodégénératives et neuropsychiatriques sont clairement corrélées à l'augmentation du plastique dans l'environnement (Image 96-97).

Les concentrations les plus élevées de nanoparticules ont été trouvées dans les tissus du cerveau humain – de 7 à 30 fois plus élevées que celles dans le foie ou les reins, et les échantillons de tissu cérébral de personnes diagnostiquées avec la démence ont montré une présence encore plus importante de nanoparticules – jusqu'à 10 fois plus – par rapport aux tissus cérébraux des personnes sans démence (Image 91).²⁴¹

Les particules prédominantes dans le cerveau étaient de minuscules éclats ou flocons de polyéthylène - l'un des plastiques les plus populaires utilisés dans l'emballage.

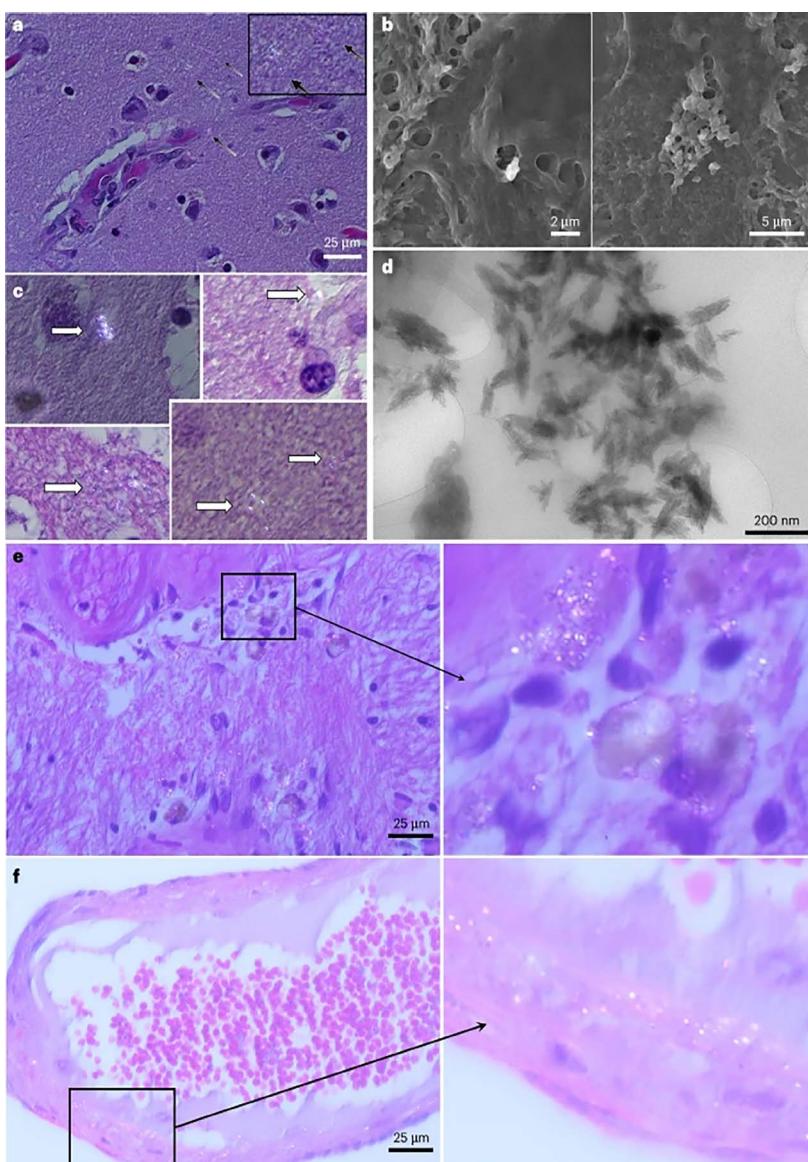


Image 91. Microscopie à onde de polarisation (a, les flèches noires indiquent les inclusions réfractaires ; l'insertion montre un agrandissement numérique pour plus de clarté) et MEB (b, les champs de vision ont des largeurs de 15,4 et 20,1 μm) ont été utilisées pour scanner des coupes cérébrales d'échantillons de défunt. c, Aucune inclusion de grande taille (> 1 μm) n'a été observée ; des exemples supplémentaires d'onde de polarisation sont indiqués (les flèches blanches pointent vers des inclusions réfractaires submicroniques). Les limites de résolution de ces technologies ont conduit à l'utilisation de MET pour étudier des extraits de granulés utilisés pour Py-GC/ MS. d, Exemple d'images MET montrant d'innombrables particules solides sous forme d'éclats ou de flocons après dispersion, avec des tailles principalement <200 nm en longueur et <40 nm en largeur. e, f, La microscopie à onde de polarisation révèle un nombre significativement plus élevé d'inclusions réfractaires dans les cas de démence, en particulier dans les zones avec un accumulation concomitante de cellules immunitaires (e) et le long des parois des vaisseaux sanguins (f). Toutes les images ont été obtenues sur un petit sous-groupe de participants ($n = 10$ pour les cerveaux normaux ; $n = 3$ pour les cas de démence) pour fournir des preuves visuelles soutenant la chimie analytique.

Source : Nihart, A.J., Garcia, M.A., El Hayek, E. et al. *Bioaccumulation of microplastics in decedent human brains*. Nat Med 31, 1114–1119 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03453-1>

²⁴¹Nihart, A.J., Garcia, M.A., El Hayek, E. et al. Bioaccumulation of microplastics in decedent human brains. Nat Med 31, 1114–1119 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03453-1>

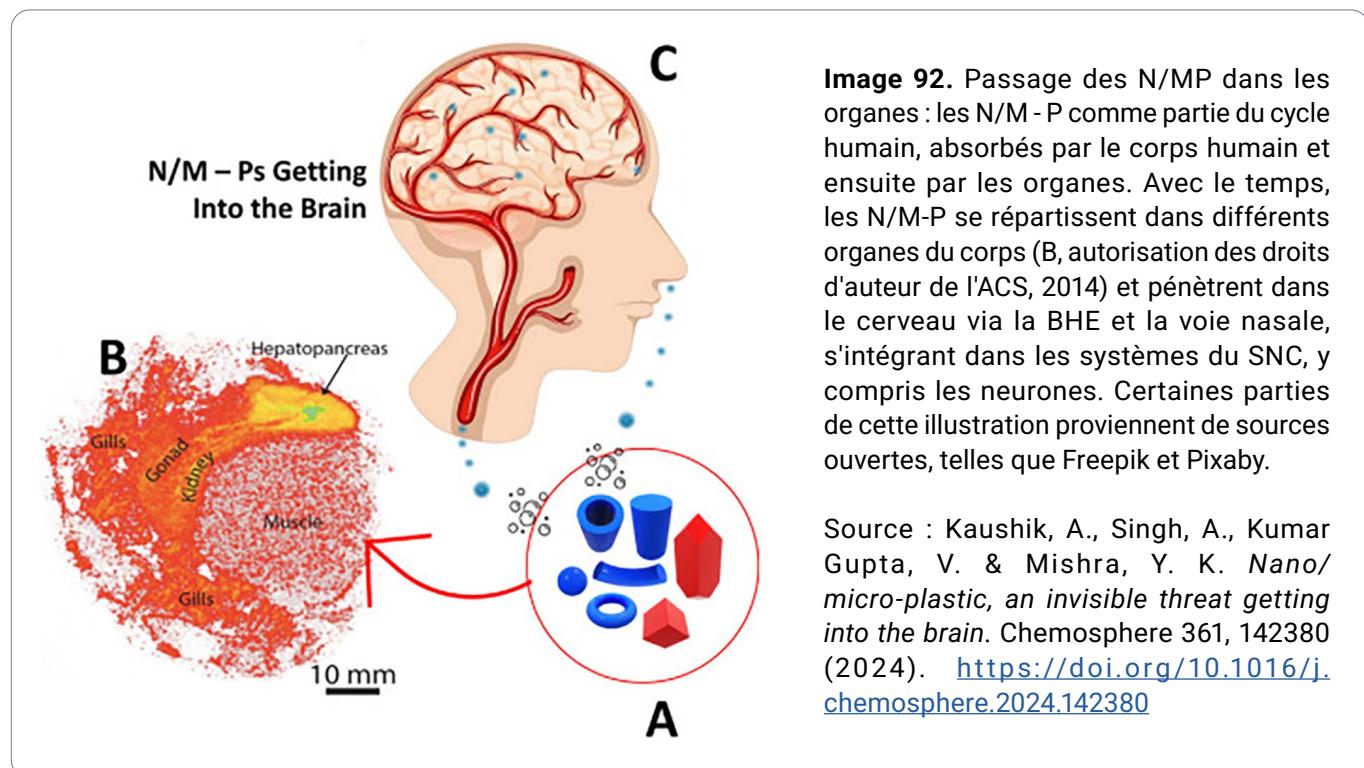
De nouvelles données confirment que de 2016 à 2024, soit en 8 ans, la teneur en plastique dans le cerveau a augmenté de 50 %.²⁴¹

66

« Chez les personnes en bonne santé âgées de 45 à 50 ans, nous avons trouvé en moyenne 4 900 microgrammes de particules plastiques par gramme de tissu cérébral. (...) Une cuillère en plastique entière. C'est à peu près la quantité de microplastique présente dans notre cerveau. Cela signifie que notre cerveau est aujourd'hui composé à 99,5 % de cerveau, et le reste – de plastique », a déclaré le principal chercheur Matthew Campen de l'Université du Nouveau-Mexique.²⁴²

Compte tenu de la progression de la teneur en particules plastiques dans l'atmosphère, l'eau et la nourriture, on peut affirmer avec certitude que la quantité de nanoplastiques dans notre corps ne fera qu'augmenter. Si cette tendance se poursuit, dans 4 ans, le niveau de plastique dans le cerveau augmentera encore de 50 %.

Les nanoparticules plastiques pénètrent dans le cerveau par le sang, franchissant la barrière hémato-encéphalique (BHE), et par la voie olfactive via l'inhalation (Image 92).



²⁴¹Nihart, A.J., Garcia, M.A., El Hayek, E. et al. Bioaccumulation of microplastics in decedent human brains. Nat Med 31, 1114–1119 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03453-1>

²⁴²VRT NWS. Brain contains “full plastic spoonful” of microplastics. (2025) <https://www.vrt.be/vrtnws/nl/2025/02/04/microplastics-in-de-hersenen> (Accessed May 1, 2025).

La barrière hémato-encéphalique est un système physiologique spécialisé qui régule le transfert de substances depuis la circulation sanguine vers le système nerveux central (Image 93). Elle laisse passer sélectivement les nutriments et l'oxygène, tout en bloquant l'entrée des toxines et des pathogènes (Image 94). Ce mécanisme assure une protection critique du cerveau en maintenant l'homéostasie de l'environnement neuronal.

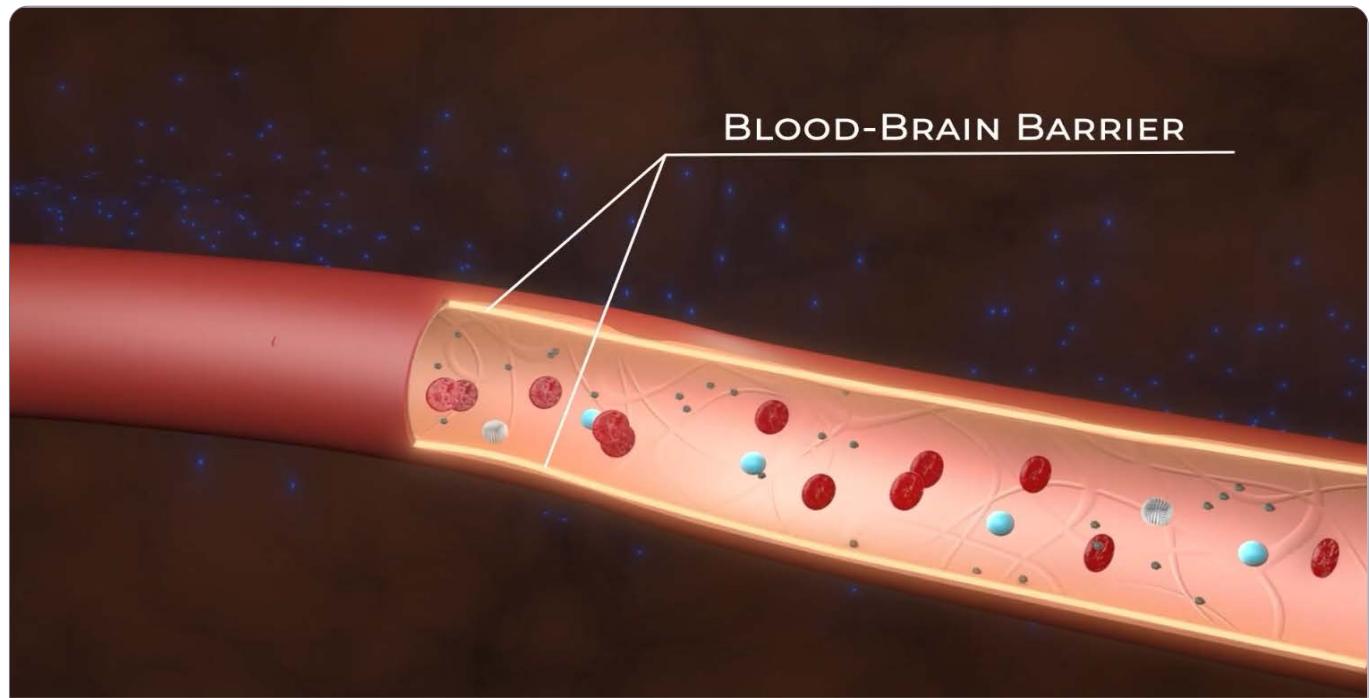


Image 93. Schéma d'un vaisseau sanguin cérébral

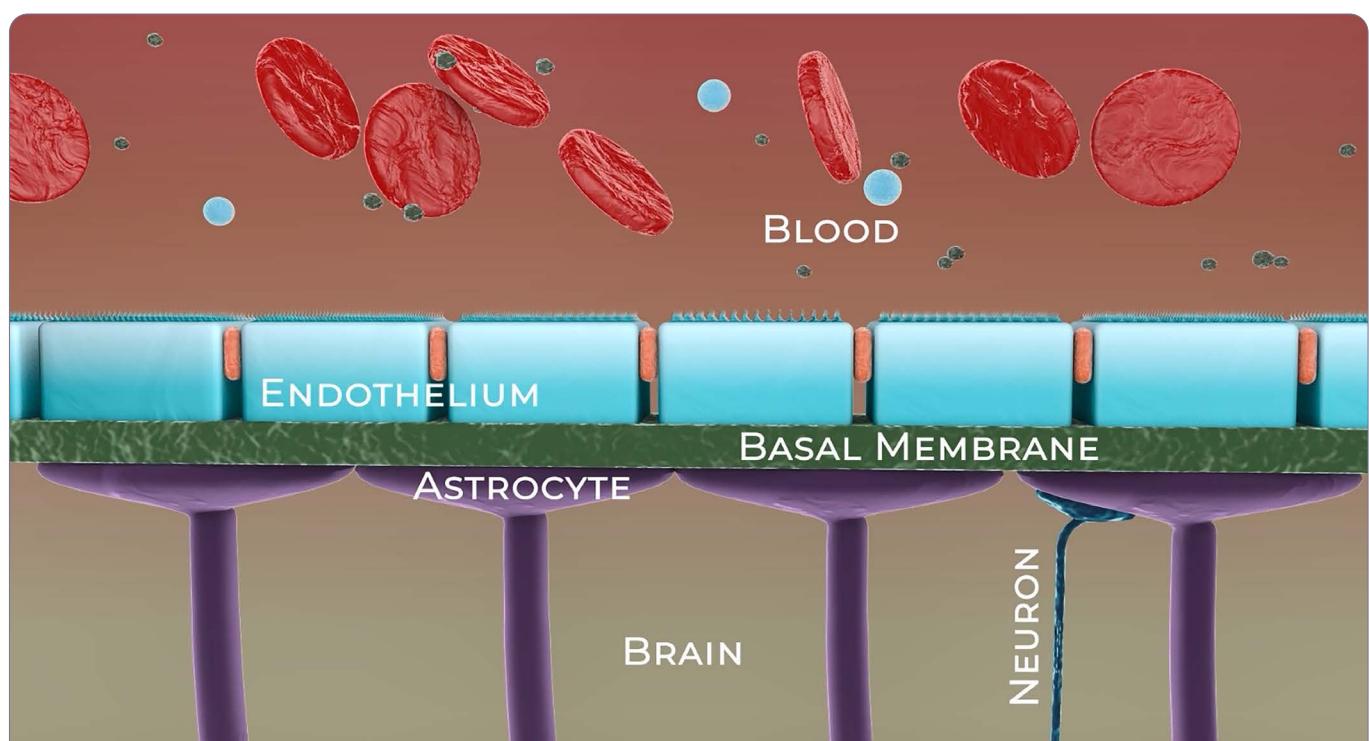


Image 94. Schéma de la barrière hémato-encéphalique

Les nanoparticules plastiques, en raison de leurs dimensions submicroniques et de leurs propriétés physico-chimiques, pénètrent dans le cerveau seulement 2 heures après leur entrée dans l'organisme.²⁴³

Lors de l'inhalation, les nanoparticules plastiques passent directement dans la zone du cerveau responsable de la perception des odeurs via les nerfs olfactifs (Image 95).²⁴⁴ Par conséquent, elles empruntent une voie plus courte et directe vers le cerveau par rapport aux autres organes.

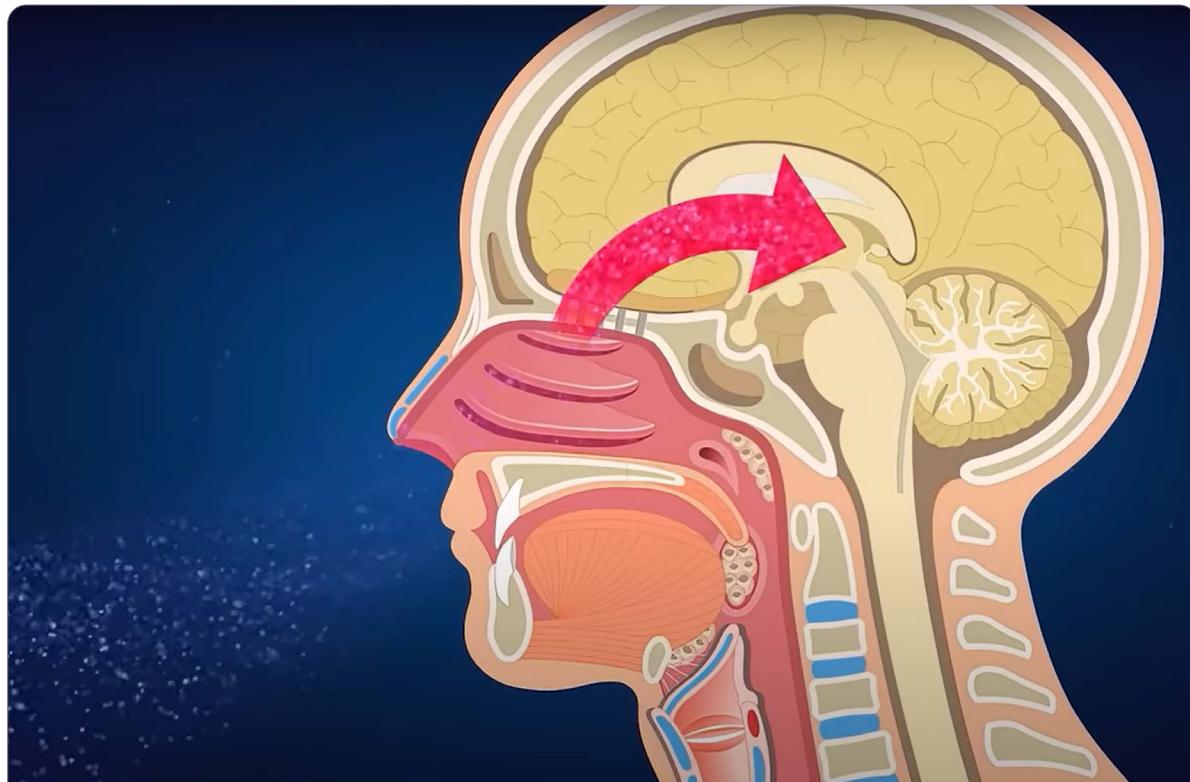


Figure 95. Pénétration des nanoparticules à travers les nerfs olfactifs dans le cerveau

Une fois pénétrant dans le cerveau, le nanoplastique perturbe le fonctionnement des cellules cérébrales – les neurones. Il a été démontré que la surface des nanoparticules et leur charge électrique peuvent influencer de manière significative leur interaction avec les neurones et la transmission des impulsions nerveuses.

La charge électrostatique du nanoplastique permet de perturber sans entrave le fonctionnement de chaque cellule du corps humain, en pénétrant à l'intérieur, provoquant un stress oxydatif et une inflammation chronique, perturbant le fonctionnement des mitochondries, jusqu'à leur destruction totale et à la mort de la cellule elle-même.

Une étude²⁴⁵ a montré que les nanoparticules chargées négativement peuvent provoquer une dépolarisation de la membrane des neurones, entraînant un changement de leur activité électrique.

²⁴³Kopatz, V. et al. Micro- and Nanoplastics Breach the Blood–Brain Barrier (BBB): Biomolecular Corona's Role Revealed. *Nanomaterials* 13, 1404 (2023). <https://doi.org/10.3390/nano13081404>

²⁴⁴Amato-Lourenço, L. F. et al. Microplastics in the Olfactory Bulb of the Human Brain. *JAMA Netw Open* 7, e2440018 (2024). <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2024.40018>

²⁴⁵Dante, S. et al. Selective Targeting of Neurons with Inorganic Nanoparticles: Revealing the Crucial Role of Nanoparticle Surface Charge. *ACS Nano* 11, 6630–6640 (2017). <https://doi.org/10.1021/acsnano.7b00397>

À la suite de l'expérience, il a été observé que les particules de nanoplastique chargées négativement se liaient sélectivement aux neurones impliqués activement dans la transmission des impulsions nerveuses. Elles s'adhéraient aux corps des neurones, aux dendrites et aux fentes synaptiques, tandis que les cellules gliales, qui ne possèdent pas d'activité électrique, n'interagissaient pas avec elles.

Cela signifie que l'activité électrique des neurones est le principal mécanisme déclencheur de la liaison du nanoplastique chargé négativement avec la membrane cellulaire.

Selon les recherches, les micro- et nanoplastiques ont tendance à s'accumuler dans la gaine de myéline du cerveau, riche en lipides, qui entoure les neurones et assure la transmission des signaux nerveux.²⁴⁶ Le nanoplastique provoque la destruction de la gaine de myéline des axones,^{247,248} ce qui perturbe la transmission des impulsions nerveuses entre les neurones.

Effets du nanoplastique sur les neurones

L'impact du nanoplastique sur les neurones peut s'exercer à travers plusieurs points d'action :

1. Influence sur le potentiel membranaire des neurones

Les neurones fonctionnent grâce à une différence de potentiel à travers leur membrane (environ -70 mV au repos), générée par les gradients ioniques (Na^+ , K^+ , Cl^- , etc.) et l'activité des canaux ioniques. Lorsqu'une particule de nanoplastique électriquement chargée se trouve à proximité de la membrane neuronale, elle peut modifier le champ électrique local et déstabiliser le potentiel membranaire. Cela peut entraîner une dépolarisation ou une hyperpolarisation, et dans le pire des cas, une activation spontanée du neurone ou un blocage de la transmission du signal.

2. Interaction électrostatique avec les canaux ioniques

Les canaux ioniques présents dans la membrane des neurones contiennent des acides aminés chargés, notamment au niveau des " portes " du canal. Une particule possédant une charge électrique très négative ou très positive peut interagir électrostatiquement avec ces régions, modifiant ainsi la conformation du canal. Cela peut entraîner son blocage ou une activation inappropriée, perturbant le fonctionnement normal du neurone.

3. Perturbation du fonctionnement des synapses

Les synapses dépendent du fonctionnement précis des ions Ca^{2+} , Na^+ et des neurotransmetteurs.²⁴⁹ Les particules de nanoplastique chargées électrostatiquement peuvent perturber la libération des neurotransmetteurs ou générer un faux signal, ce qui peut entraîner des dysfonctionnements dans la transmission des impulsions nerveuses.

²⁴⁶Peking University Center for Environmental Science and Engineering. Prof. Yi Huang's team made new progress in atmospheric microplastic distribution and its human health risk. CESE. (2022) <https://cese.pku.edu.cn/kycg/156506.htm> (Accessed May 1, 2025).

²⁴⁷Kim, D. Y. et al. Effects of Microplastic Accumulation on Neuronal Death After Global Cerebral Ischemia. Cells 14, 241 (2025). <https://doi.org/10.3390/cells14040241>

²⁴⁸Zhang, Y. et al. Selective bioaccumulation of polystyrene nanoplastics in fetal rat brain and damage to myelin development. Ecotoxicology and Environmental Safety 278, 116393 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116393>

²⁴⁹Moiniafshari, K. et al. A perspective on the potential impact of microplastics and nanoplastics on the human central nervous system. Environmental Science: Nano 12, 1809–1820 (2025). <https://doi.org/10.1039/D4EN01017E>

4. Stress oxydatif et inflammation

Les nanoplastiques chargés peuvent augmenter la production d'espèces réactives de l'oxygène (ERO), entraînant un stress oxydatif. Le stress oxydatif dans les neurones survient lorsque le niveau d'ERO dépasse la capacité de la cellule à les neutraliser. Cela endommage l'ADN ainsi que les structures cellulaires comme les membranes, les protéines et les mitochondries, altérant ainsi le fonctionnement normal des neurones. En conséquence, la cellule perd sa capacité à transmettre efficacement les signaux nerveux, ce qui conduit à sa dégradation, puis à sa mort. Étant donné que les neurones ont une capacité limitée de régénération, les dommages causés par le stress oxydatif sont souvent irréversibles et peuvent provoquer une détérioration progressive de la mémoire, de l'attention et d'autres fonctions cognitives.

5. Impact sur la fonction mitochondriale

Les nanoplastiques dotés d'une charge électrostatique positive peuvent, en pénétrant dans la cellule, s'accumuler dans les mitochondries et perturber leur potentiel membranaire. Cela affecte la chaîne respiratoire, provoquant des fuites d'électrons qui réagissent avec l'oxygène pour former des ERO, notamment des anions superoxydes. Leur accumulation excessive accentue le stress oxydatif et peut entraîner des dommages aux structures cellulaires.

6. Mutations mitochondrielles

Les nanoparticules de plastique peuvent endommager l'ADN mitochondrial, perturbant le fonctionnement normal des mitochondries. Cela affecte des processus cellulaires clés : production d'énergie, régulation du stress oxydatif, apoptose (mort cellulaire programmée) et métabolisme. Les perturbations de ces systèmes peuvent favoriser le développement de diverses pathologies.

7. Propriétés réactives des surfaces de nanoplastiques

La grande surface spécifique des nanoplastiques est l'un des principaux facteurs de leur forte réactivité chimique et de leur capacité à générer des espèces réactives de l'oxygène (ERO). Comparées aux microplastiques, les nanoparticules ont une surface de dizaines, voire de centaines de fois supérieure par unité de masse, ce qui intensifie leur interaction avec les biomolécules et l'environnement.

La charge électrostatique des particules plastiques peut perturber l'activité neuronale, en bloquant ou en déformant la transmission des impulsions nerveuses. Cela conduit à un dysfonctionnement du système nerveux et peut provoquer une large gamme de troubles pathologiques dans l'organisme. Ces effets se manifestent par divers troubles neurologiques, végétatifs, cognitifs et psychiatriques (voir tableau 2).

L'impact des nanoplastiques sur les cellules nerveuses peut provoquer un large éventail de maladies : sclérose en plaques et sclérose latérale amyotrophique, maladie d'Alzheimer et de Parkinson, maladies auto-immunes, épilepsie, AVC ischémique et hémorragique, dépression, troubles anxieux et cognitifs, schizophrénie, trouble bipolaire, autisme, etc.

Catégorie	Manifestacija	Cause / Mécanisme
Troubles moteurs	Paralysie	Perturbation de la transmission des influx moteurs du système nerveux central vers les muscles
	Crises convulsives	Déséquilibre entre les signaux neuronaux excitateurs et inhibiteurs
	Perte de sensibilité	Dysfonctionnement des voies sensorielles transmettant l'information des récepteurs au cerveau
	Coordination altérée	Lésions des voies de conduction cérébelleuses ou spinales
Troubles sensoriels	Troubles de la parole, de la vision et de l'audition	Lésions des voies nerveuses reliant les centres sensoriels et moteurs du cerveau
Dystonie neurovégétative	Troubles de la respiration, du rythme cardiaque, de la digestion	Perturbation du système nerveux autonome
	Thermorégulation altérée, dysfonctionnement des organes	Dysfonctionnement des centres régulateurs autonomes
Troubles cognitifs	Troubles de la mémoire et de l'attention	Altérations structurelles ou fonctionnelles du cortex cérébral
	Altération de la conscience, coma	Lésions de la formation réticulée du cerveau, impliquée dans la régulation de l'éveil et de la conscience
Troubles psychologiques et émotionnels	Anxiété, dépression, troubles de l'humeur	Déséquilibres des neurotransmetteurs ; atteinte des centres émotionnels du cerveau

Tableau 2. Spectre des pathologies causées par l'exposition des neurones aux nanoplastiques

Les micro- et nanoplastiques comme facteur de risque des troubles du spectre autistique (TSA)

Parallèlement à l'augmentation de la pollution plastique de l'environnement, on observe une hausse de la prévalence des troubles du spectre autistique (TSA) (Images 96, 97).

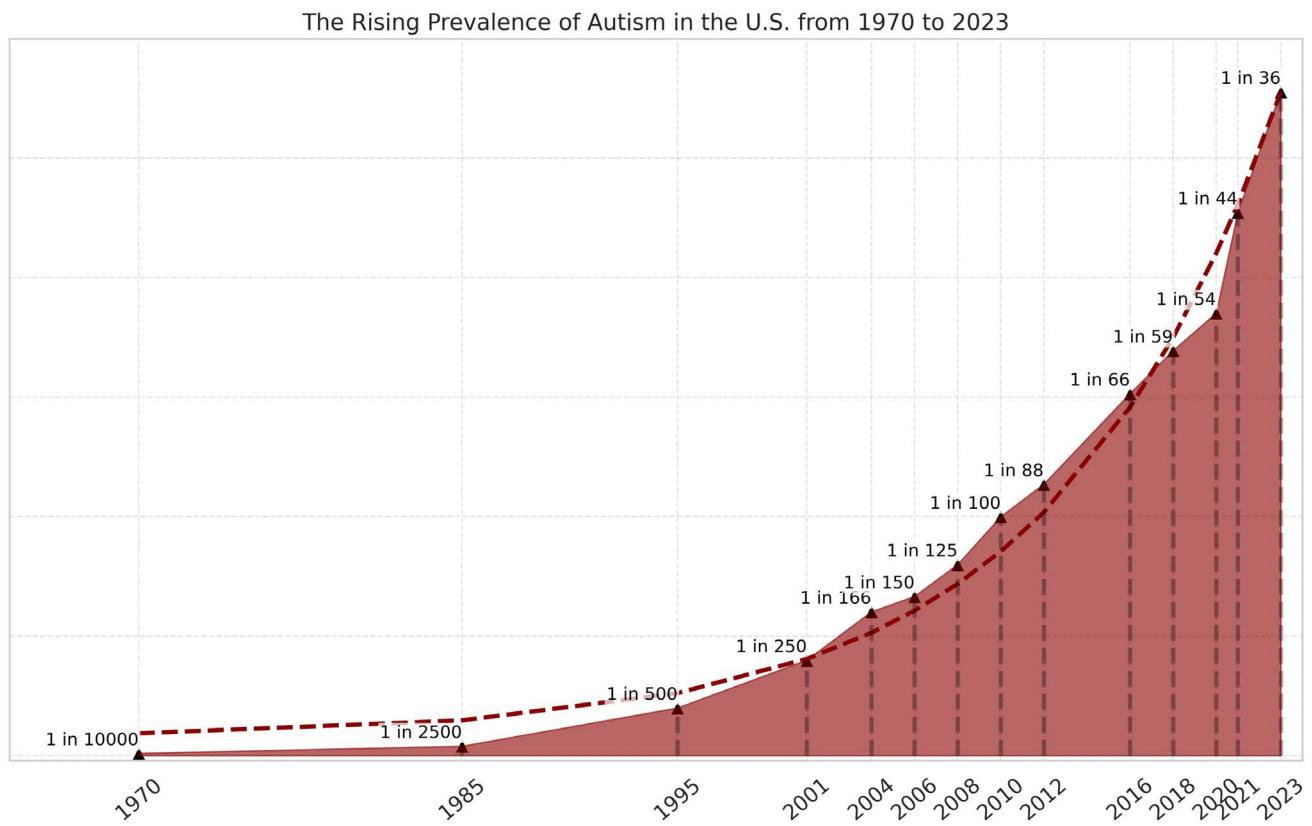


Image 96. Évolution de la prévalence de l'autisme aux États-Unis de 1970 à 2023

Source : Rogers, T. *The political economy of autism*. Substack. <https://tobyrogers.substack.com/p/the-political-economy-of-autism> (Дата доступа: 01.05.2025).

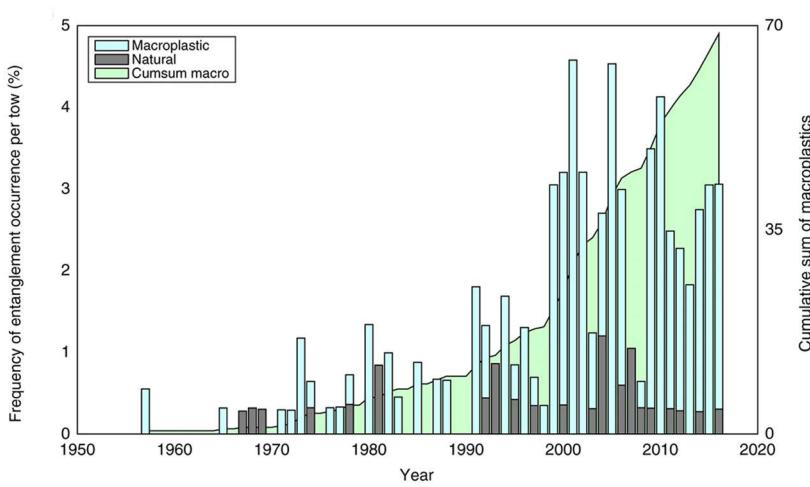


Image 97. Augmentation de la quantité de plastique dans les océans de 1957 à 2020

Source : Ostle, C. et al. *The rise in ocean plastics evidenced from a 60-year time series*. Nat Commun 10, 1622 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09506-1>

Un enfant sur 36 aux États-Unis a été diagnostiqué avec un TSA, selon les estimations du Réseau de surveillance de l'autisme et des troubles du développement (ADDM) du CDC. En 2020, le nombre de cas d'autisme avait augmenté de 317 % par rapport à l'an 2000.^{250, 251}

Le système nerveux humain se forme dès la période embryonnaire et durant les premières années de vie. Des études suggèrent un lien potentiel entre l'exposition aux micro- et nanoplastiques et le développement des TSA. Des données expérimentales provenant de chercheurs sud-coréens montrent que l'exposition prénatale et postnatale aux micro- et nanoplastiques (MNP) peut favoriser des troubles du neurodéveloppement.²⁵²

Une étude sur les effets moléculaires des nanoplastiques de polystyrène sur les cellules souches nerveuses humaines a démontré que cette exposition peut entraîner des lésions tissulaires et des maladies liées au développement neurologique.²⁵³

Des recherches sur les rongeurs²⁵⁴ ont montré que l'exposition de la mère aux MNP pendant la grossesse et l'allaitement peut perturber la neurogenèse dans l'hippocampe de la progéniture, ainsi que réduire le volume de structures cérébrales telles que le cortex moteur, l'hippocampe, l'hypothalamus, le bulbe rachidien et le bulbe olfactif.

On sait que les modifications de la structure et du fonctionnement des protéines du tissu nerveux jouent un rôle important dans le développement de nombreuses maladies, y compris l'autisme.²⁵⁵

Des études récentes ont révélé que les nanoplastiques interagissent avec les protéines principalement par des liaisons faibles telles que les interactions hydrophobes, les liaisons hydrogène, les forces de Van der Waals et les forces électrostatiques.²⁵⁶ Cela entraîne des déformations structurelles des molécules protéiques, altérant leur fonctionnalité. Étant donné le rôle des protéines dans la formation des réseaux neuronaux et de la transmission synaptique, de telles altérations peuvent influencer le développement des TSA.

²⁵⁰Autism Parenting Magazine. Autism Statistics You Need To Know in 2024. (2025) <https://www.autismparentingmagazine.com/autism-statistics> (Accessed May 1, 2025).

²⁵¹Centers for Disease Control and Prevention. Autism Prevalence Higher, According to Data from 11 ADDM Communities. <https://www.cdc.gov/media/releases/2023/p0323-autism.html> (Accessed May 1, 2025).

²⁵²Zaheer, J. et al. Pre/post-natal exposure to microplastic as a potential risk factor for autism spectrum disorder. Environment International 161, 107121 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107121>

²⁵³Martin-Folgar, R. et al. Molecular effects of polystyrene nanoplastics on human neural stem cells. PLOS ONE 19, e0295816 (2024). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295816>

²⁵⁴Kim, N.-H., Choo, H.-I. & Lee, Y.-A. Effect of nanoplastic intake on the dopamine system during the development of male mice. Neuroscience 555, 11–22 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2024.07.018>

²⁵⁵Panisi, C. & Marini, M. Dynamic and Systemic Perspective in Autism Spectrum Disorders: A Change of Gaze in Research Opens to A New Landscape of Needs and Solutions. Brain Sciences 12, 250 (2022). <https://doi.org/10.3390/brainsci12020250>

²⁵⁶Windheim, J. et al. Micro- and Nanoplastics' Effects on Protein Folding and Amyloidosis. International Journal of Molecular Sciences 23, 10329 (2022). <https://doi.org/10.3390/ijms231810329>

Implication des micro- et nanoplastiques dans la pathogénèse des maladies cardiovasculaires

Les particules de plastique peuvent non seulement circuler dans le sang, mais aussi se déposer sur les parois vasculaires, déclenchant un enchaînement de modifications pathologiques. Il est particulièrement inquiétant de trouver du microplastique dans les plaques athéroscléreuses.²⁵⁷ Une étude récente a montré que chez les patients présentant du microplastique dans les artères carotides, le risque d'infarctus du myocarde, d'AVC et de décès était 4,5 fois plus élevé. Cela témoigne de l'implication active des fragments plastiques dans la formation et la déstabilisation des plaques athéroscléreuses, favorisant leur rupture et la formation de caillots.²⁵⁸ Les MNP perturbent également l'intégrité de l'endothélium, la couche cellulaire tapissant l'intérieur des vaisseaux et régulant le tonus vasculaire, la prévention de la thrombose et les réponses inflammatoires. Les dommages endothéliaux dus aux particules plastiques provoquent une inflammation chronique et augmentent le risque de thrombose, ce qui est particulièrement dangereux dans les artères irriguant le cœur et le cerveau.²⁵⁹ Le microplastique interagit avec les éléments figurés du sang, tels que les plaquettes et les érythrocytes. Il favorise l'agrégation des plaquettes, déclenchant ainsi la formation de caillots. De plus, la surface des microplastiques peut causer des dommages mécaniques aux cellules et activer les cascades de coagulation, ce qui, à long terme, peut entraîner une hypercoagulabilité chronique et des troubles microvasculaires.

Les cellules immunitaires sont capables d'absorber les microparticules de plastique, mais elles ne disposent pas des mécanismes nécessaires à leur dégradation complète. Cela entraîne des déformations cellulaires et une augmentation de leur taille. L'accumulation de ces cellules altérées dans les petits vaisseaux cérébraux contribue à la formation de microthromboses, perturbant l'irrigation du cerveau et augmentant le risque d'AVC, y compris chez les jeunes.²⁶⁰ Une hypoxie chronique – baisse de l'apport en oxygène au cerveau – entraîne la mort neuronale et le développement de modifications neurodégénératives, incluant l'atrophie du tissu cérébral.²⁶¹ À long terme, ces processus peuvent réduire le volume de certaines structures cérébrales.

Grâce à leur charge électrostatique, les micro- et nanoplastiques (MNP) interagissent activement avec les membranes cellulaires, perturbant leur potentiel électrique. Cela affecte à son tour la contractilité des vaisseaux sanguins, la transmission des signaux dans les myocytes et le rythme cardiaque. La mortalité liée aux maladies cardiovasculaires augmente régulièrement dans le monde entier (Image 98). Une attention particulière doit être portée au syndrome de mort subite cardiaque chez les jeunes adultes âgés de 25 à 44 ans²⁶² (Image 99). Aux États-Unis, il est reconnu comme la principale cause de décès dans cette tranche d'âge. Au cours des deux dernières décennies, le nombre de cas a fortement augmenté. Étant donné la diffusion omniprésente des MNP, leur rôle potentiel dans ces événements tragiques ne peut être exclu.

²⁵⁷Liu, S. et al. Microplastics in three types of human arteries detected by pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry (Py-GC/MS). *Journal of Hazardous Materials* 469, 133855 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133855>

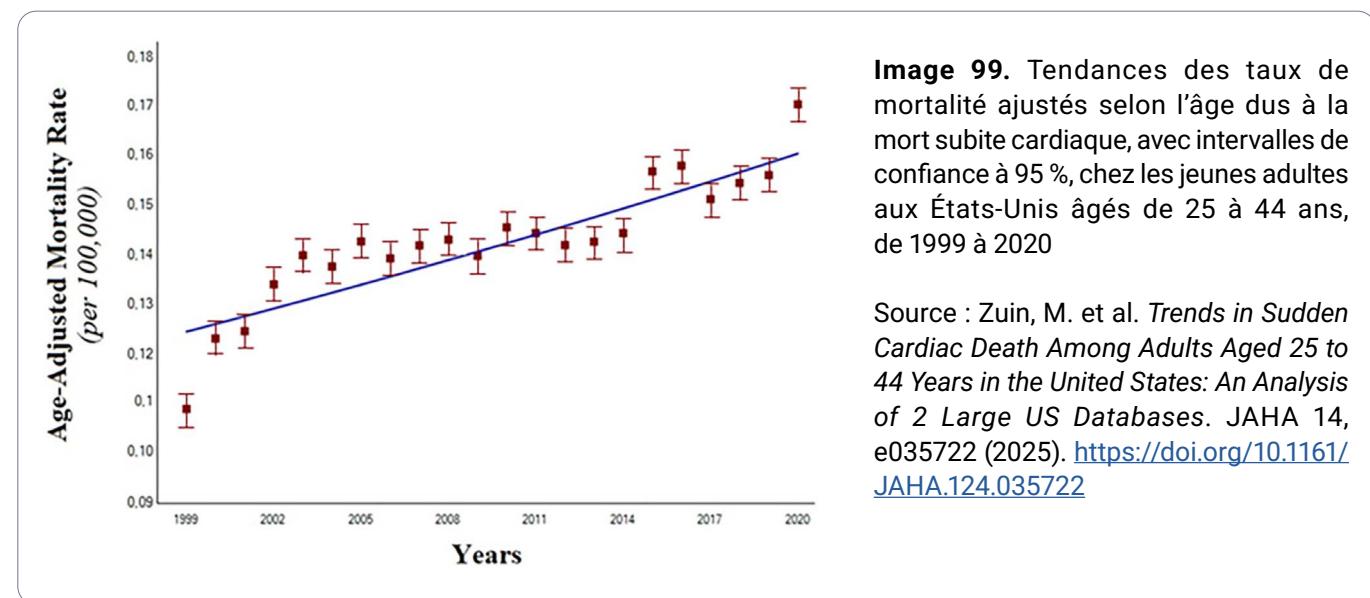
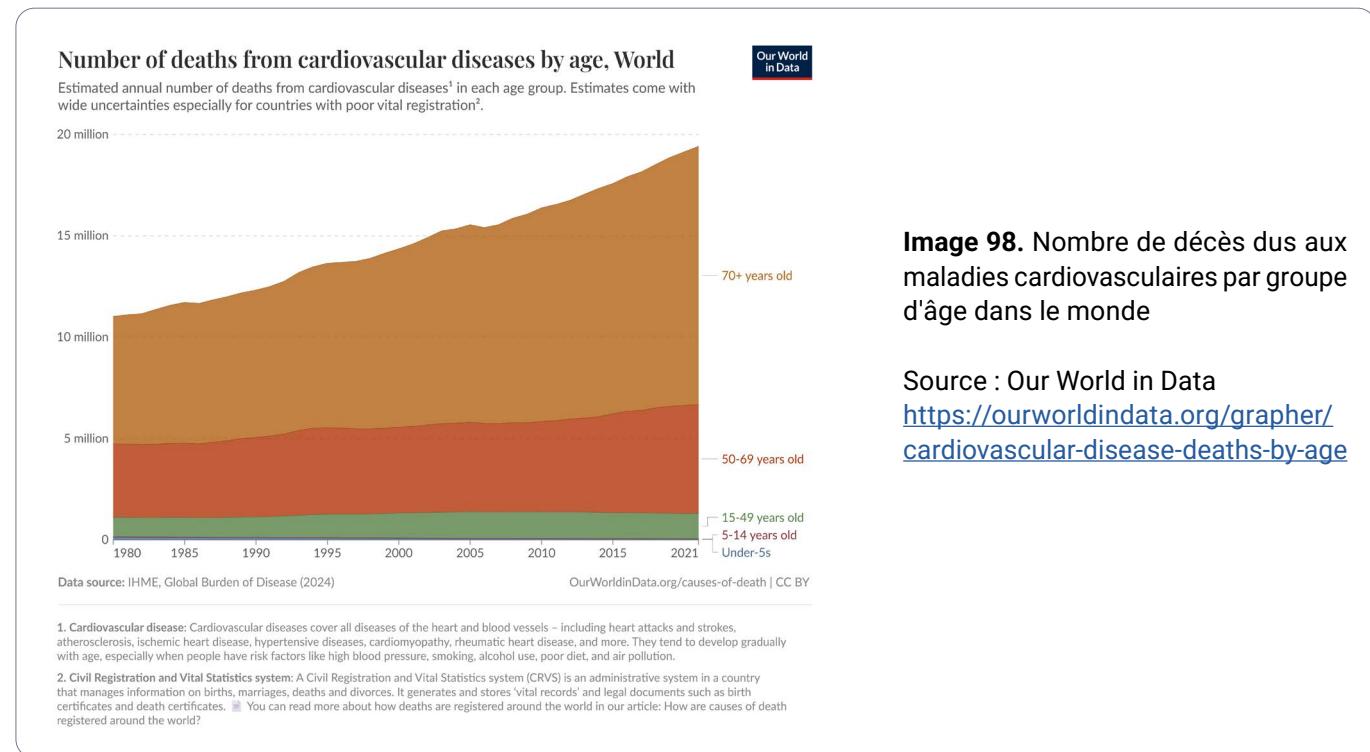
²⁵⁸Marfella, R. et al. Microplastics and Nanoplastics in Atheromas and Cardiovascular Events. *N Engl J Med* 390, 900–910 (2024). <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2309822>

²⁵⁹Rajendran, D. & Chandrasekaran, N. Journey of micronanoplastics with blood components. *RSC Adv.* 13, 31435–31459 (2023). <https://doi.org/10.1039/D3RA05620A>

²⁶⁰Huang, H. et al. Microplastics in the bloodstream can induce cerebral thrombosis by causing cell obstruction and lead to neurobehavioral abnormalities. *Sci. Adv.* 11, ead8243 (2025). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adr8243>

²⁶¹Kaushik, A., Singh, A., Kumar Gupta, V. & Mishra, Y. K. Nano/micro-plastic, an invisible threat getting into the brain. *Chemosphere* 361, 142380 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142380>

²⁶²Zuin, M. et al. Trends in Sudden Cardiac Death Among Adults Aged 25 to 44 Years in the United States: An Analysis of 2 Large US Databases. *JAMA* 14, e035722 (2025). <https://doi.org/10.1161/JAHA.124.035722>



Une autre préoccupation majeure est l'augmentation de la mortalité subite du nourrisson (MSN). Rien qu'aux États-Unis, ce taux a augmenté de 15 % entre 2019 et 2020, faisant passer le syndrome de la quatrième à la troisième place parmi les causes de mortalité infantile.²⁶³ Bien que les causes exactes de la MSN ne soient pas encore entièrement élucidées, de nombreux scientifiques estiment que les facteurs perturbant la régulation du rythme cardiaque et du tonus vasculaire chez les nourrissons pourraient jouer un rôle central. Le nanoplastique, capable de traverser le placenta et de s'accumuler dans les tissus de l'organisme en développement, est considéré comme un facteur de risque potentiel. De plus en plus de chercheurs s'accordent à dire que le nanoplastique est l'un des principaux candidats au rôle de « tueur invisible ».

²⁶³Shapiro-Mendoza, C. K. et al. Sudden Unexpected Infant Deaths: 2015–2020. Pediatrics 151, e2022058820 (2023). <https://doi.org/10.1542/peds.2022-058820>

Image 98. Nombre de décès dus aux maladies cardiovasculaires par groupe d'âge dans le monde

Source : Our World in Data

<https://ourworldindata.org/grapher/cardiovascular-disease-deaths-by-age>

Image 99. Tendances des taux de mortalité ajustés selon l'âge dus à la mort subite cardiaque, avec intervalles de confiance à 95 %, chez les jeunes adultes aux États-Unis âgés de 25 à 44 ans, de 1999 à 2020

Source : Zuin, M. et al. Trends in Sudden Cardiac Death Among Adults Aged 25 to 44 Years in the United States: An Analysis of 2 Large US Databases. JAHA 14, e035722 (2025). <https://doi.org/10.1161/JAHA.124.035722>

Le cœur, en tant qu'organe à forte demande énergétique, dépend de manière critique du bon fonctionnement des mitochondries pour son approvisionnement en énergie. L'exposition aux particules de microplastique perturbe les processus mitochondriaux, ce qui peut entraîner un déficit énergétique dans le myocarde et, par conséquent, une altération de la fonction cardiaque.

Dysfonctionnement du tractus gastro-intestinal sous l'effet des MNP

L'intestin est le plus grand organe immunitaire de l'être humain. Il contient environ 70 % des cellules immunitaires, quelque 500 millions de neurones, et plus de 100 000 milliards de micro-organismes.²⁶⁴ Le microbiote intestinal joue un rôle fondamental dans le maintien du système immunitaire. Un déséquilibre du microbiote peut affaiblir l'immunité et contribuer au développement de diverses maladies. L'intestin est souvent qualifié de « deuxième cerveau » en raison de son réseau neuronal dense et de sa capacité à interagir avec le système nerveux central.²⁶⁵ L'échange de signaux biochimiques complexes entre le cerveau et l'intestin est appelé « axe intestin-cerveau » et joue un rôle clé dans la régulation de l'état physique et psycho-émotionnel (Image 100).

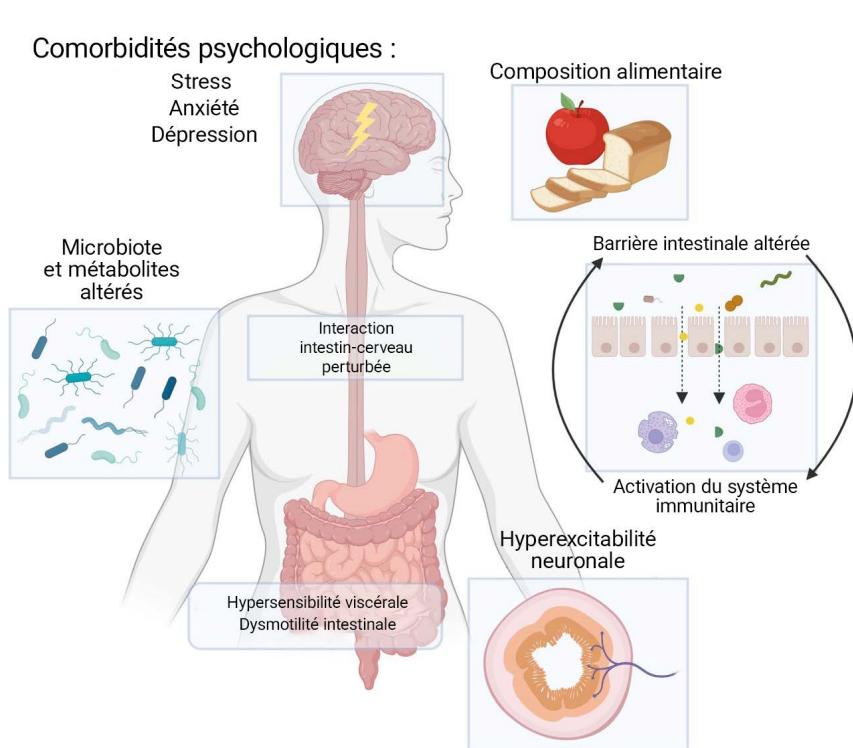


Image 100. Mécanismes pathophysiologiques dans les troubles de l'interaction intestin-cerveau

Source : Vanuytsel, T., Bercik, P. & Boeckxstaens, G. *Understanding neuroimmune interactions in disorders of gut-brain interaction: from functional to immune-mediated disorders*. Gut 72, 787–798 (2023).
<https://doi.org/10.1136/gutjnl-2020-320633>

²⁶⁴Yu, C. D., Xu, Q. J. & Chang, R. B. Vagal sensory neurons and gut-brain signaling. Current Opinion in Neurobiology 62, 133–140 (2020).
<https://doi.org/10.1016/j.conb.2020.03.006>

²⁶⁵Sofield, C. E., Anderton, R. S. & Gorecki, A. M. Mind over Microplastics: Exploring Microplastic-Induced Gut Disruption and Gut-Brain-Axis Consequences. Current Issues in Molecular Biology 46, 4186–4202 (2024). <https://doi.org/10.3390/cimb46050256>

Une barrière intestinale saine empêche les microbes et les particules étrangères de pénétrer du lumen intestinal dans la circulation sanguine.²⁶⁵ Les micro- et nanoplastiques compromettent cette barrière en augmentant la perméabilité de la paroi intestinale. Cela entraîne une inflammation non seulement au niveau intestinal, mais aussi dans d'autres organes, affaiblissant ainsi le système immunitaire. Parallèlement, les MNP modifient la composition du microbiote intestinal, provoquant un déséquilibre entre les micro-organismes bénéfiques et pathogènes.²⁶⁶ Ce déséquilibre perturbe les processus digestifs, diminue la capacité de l'organisme à dégrader les allergènes alimentaires et accroît le risque d'allergies alimentaires.²⁶⁷

Cela crée un cercle vicieux : le plastique perturbe le microbiote intestinal, augmente l'inflammation et compromet l'intégrité de la paroi intestinale. En conséquence, des toxines, des bactéries et des particules plastiques commencent à pénétrer dans la circulation sanguine. Leur présence dans le sang déclenche une réponse immunitaire entraînant une inflammation chronique dans tout le corps. Depuis la circulation sanguine, ces toxines, bactéries et nanoparticules plastiques peuvent traverser la barrière hémato-encéphalique et atteindre le cerveau, où elles provoquent des réactions inflammatoires. À leur tour, ces processus affaiblissent davantage la réponse immunitaire, intensifient la réaction de stress de l'organisme et peuvent altérer le microbiote intestinal via des mécanismes neuroendocriniens, refermant ainsi le cercle vicieux le long de l'axe « intestin-cerveau ».

La perturbation de l'interaction entre le microbiome intestinal et le système nerveux central est directement liée aux troubles neurologiques. Ainsi, un déséquilibre important du microbiote a été observé chez des enfants atteints de troubles du spectre autistique, ce qui est confirmé à la fois par des analyses microbiologiques et l'évaluation des fonctions digestives.²⁶⁸

Les études menées chez les patients atteints de maladies inflammatoires chroniques de l'intestin (MICI) montrent une corrélation positive entre la gravité de la maladie et la concentration de microplastiques dans les selles. Chez les patients atteints de MICI, cette concentration est plus élevée (41,8 particules/g) que chez les personnes en bonne santé (28,0 particules/g). De plus, une accumulation significative de microplastiques a été observée dans les lésions ulcérées de la muqueuse rectale chez ces patients.²⁶⁹

Par ailleurs, le microplastique restant dans l'intestin continue d'exercer des effets néfastes même longtemps après sa première ingestion.

²⁶⁵Sofield, C. E., Anderton, R. S. & Gorecki, A. M. Mind over Microplastics: Exploring Microplastic-Induced Gut Disruption and Gut-Brain-Axis Consequences. *Current Issues in Molecular Biology* 46, 4186–4202 (2024). <https://doi.org/10.3390/cimb46050256>

²⁶⁶Winiarska, E., Jutel, M. & Zemelka-Wiaczek, M. The potential impact of nano- and microplastics on human health: Understanding human health risks. *Environmental Research* 251, 118535 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118535>

²⁶⁷ScienceDirect. Food allergy. ScienceDirect Topics. <https://www.sciencedirect.com/topics/pharmacology-toxicology-and-pharmaceutical-science/food-allergy> (Accessed May 1, 2025).

²⁶⁸Su, Q., Wong, O.W.H., Lu, W. et al. Multikingdom and functional gut microbiota markers for autism spectrum disorder. *Nat Microbiol* 9, 2344–2355 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41564-024-01739-1>

²⁶⁹ScienceDirect. Inflammatory bowel disease. ScienceDirect Topics. <https://www.sciencedirect.com/topics/pharmacology-toxicology-and-pharmaceutical-science/inflammatory-bowel-disease> (Accessed May 1, 2025).

Effets des MNP sur le système immunitaire

Les micro- et nanoplastiques (MNP) perturbent la réponse immunitaire de l'organisme, créant des conditions favorables à la prolifération de pathogènes. Les nanoparticules plastiques (MNP) chargées, attirent plus facilement d'autres molécules, telles que les toxines, les sels de métaux lourds, les bactéries et les virus (Image 101). Cela en fait une sorte de « plateforme de transport » pour les composés toxiques, amplifiant l'activité biologique et la toxicité de ces substances. La charge électrostatique des nanoplastiques agit également comme une source d'énergie ou une « batterie », aidant les virus et les bactéries à rester viables plus longtemps.

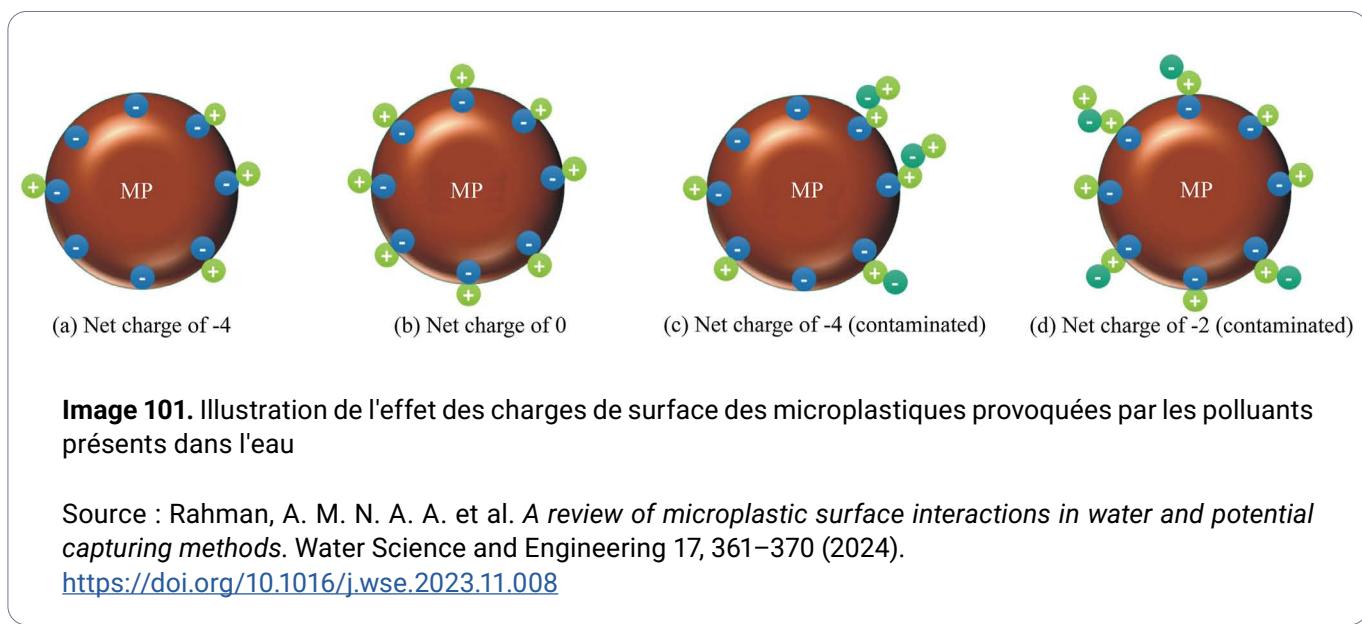


Image 101. Illustration de l'effet des charges de surface des microplastiques provoquées par les polluants présents dans l'eau

Source : Rahman, A. M. N. A. A. et al. *A review of microplastic surface interactions in water and potential capturing methods*. Water Science and Engineering 17, 361–370 (2024).

<https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.11.008>

De plus, les particules plastiques micro- et nanoplastiques chargées peuvent rester en suspension dans l'eau et l'air pendant de longues périodes. Elles s'élèvent plus facilement sous forme d'aérosols et pénètrent dans le système respiratoire, augmentant ainsi la probabilité d'être absorbées par l'organisme.

L'impact combiné des MNP sur le microbiome, les agents pathogènes et le système immunitaire constitue un risque complexe pour la santé.

Les cellules immunitaires exposées aux microplastiques meurent environ trois fois plus vite que celles qui n'y sont pas exposées.²⁷⁰

Les particules de microplastique sont capables d'adsorber des virus à leur surface grâce à des interactions électrostatiques et hydrophobes, prolongeant ainsi leur viabilité.²⁷¹

²⁷⁰Plastics News. Study highlights health hazards of microplastics. (2019) <https://www.plasticsnews.com/news/study-highlights-health-hazards-microplastics> (Accessed May 1, 2025).

²⁷¹Moresco, V. et al. Binding, recovery, and infectiousness of enveloped and non-enveloped viruses associated with plastic pollution in surface water. Environmental Pollution 308, 119594 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119594>

Des études ont montré que les virus présents à la surface du microplastique peuvent rester actifs jusqu'à trois jours – suffisamment pour parcourir, par exemple, la distance entre une station d'épuration et une plage.²⁷²

Le microplastique facilite la dispersion des agents pathogènes et peut contribuer à leur recombinaison génétique. Une étude a révélé que les particules plastiques non seulement réduisent l'efficacité des médicaments, mais peuvent aussi favoriser le développement de bactéries résistantes aux antibiotiques.²⁷³

Les particules MNP chargées servent de plateforme pour la colonisation par les micro-organismes.²⁷⁴ Les bactéries et les champignons, utilisant les champs électrostatiques du nanoplastique, présentent une croissance accélérée. Des recherches menées sur des daphnies ont révélé que l'exposition au nanoplastique induit un stress oxydatif et augmente le niveau d'infections fongiques par *Metschnikowia* d'un facteur 11.²⁷⁵ Cela est en accord avec l'expansion mondiale de l'aire de répartition et de la résistance des infections fongiques, que l'OMS considère comme une menace croissante pour la santé publique.

66

« Sortant de l'ombre de la pandémie, la résistance des champignons aux traitements antifongiques progresse. Les infections fongiques se propagent et deviennent de plus en plus résistantes aux traitements, représentant un problème de santé publique mondial », a déclaré le Dr Hanan Balkhy, Sous-Directrice générale de l'OMS chargée de la résistance aux antimicrobiens.²⁷⁶

Les métabolites fongiques produits en présence de MNP sont associés à la croissance tumorale²⁷⁷ et à l'inflammation chronique. De l'ADN fongique a été détecté dans certains types de cancers, suggérant un rôle potentiel des MNP dans l'oncogenèse.²⁷⁸

²⁷²University of Stirling. Hitch-hiking viruses can survive on microplastics in freshwater, new study finds. (2022) <https://www.stir.ac.uk/news/2022/june-2022-news/hitch-hiking-viruses-can-survive-on-microplastics-in-freshwater-new-study-finds> (Accessed May 1, 2025).

²⁷³Dick, L. et al. The adsorption of drugs on nanoplastics has severe biological impact. Sci Rep 14, 25853 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75785-4>

²⁷⁴Rahman, A. M. N. A. A. et al. A review of microplastic surface interactions in water and potential capturing methods. Water Science and Engineering 17, 361–370 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.11.008>

²⁷⁵Manzi, F., Schliösser, P., Owczarz, A. & Wolinska, J. Polystyrene nanoplastics differentially influence the outcome of infection by two microparasites of the host *Daphnia magna*. Phil. Trans. R. Soc. B 378, 20220013 (2023). <https://doi.org/10.1098/rstb.2022.0013>

²⁷⁶World Health Organization. WHO releases first-ever list of health-threatening fungi. (2022) <https://www.who.int/news/item/25-10-2022-who-releases-first-ever-list-of-health-threatening-fungi> (Accessed May 1, 2025).

²⁷⁷Aykut, B., Pushalkar, S., Chen, R. et al. The fungal mycobiome promotes pancreatic oncogenesis via activation of MBL. Nature 574, 264–267 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1608-2>

²⁷⁸Dohlmán, A. B. et al. A pan-cancer mycobiome analysis reveals fungal involvement in gastrointestinal and lung tumors. Cell 185, 3807–3822.e12 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cell.2022.09.015>

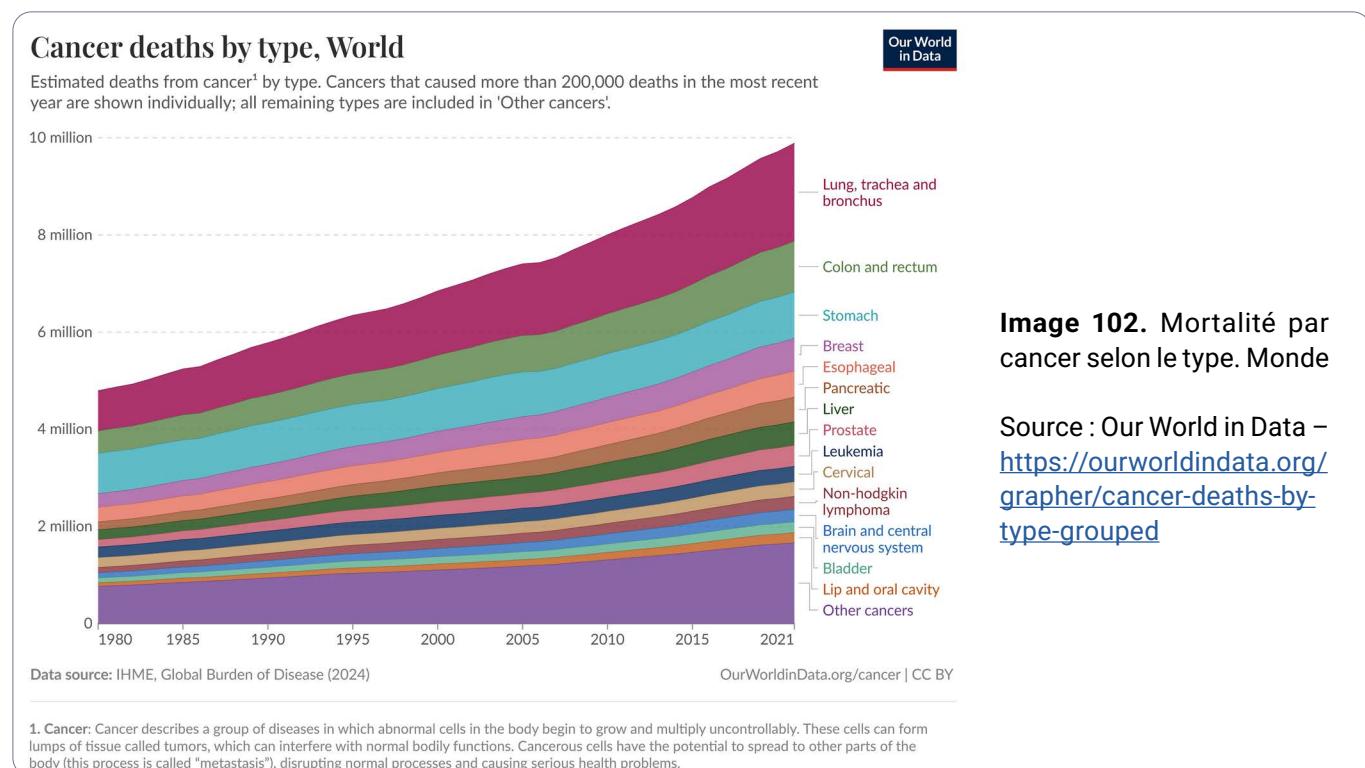
Effet oncogène des MNP. Mécanismes de mutations et développement des métastases

Comme mentionné précédemment, les micro- et nanoplastiques représentent un facteur important dans le développement des tumeurs malignes, en raison de leur impact négatif aux niveaux cellulaire et systémique.

Les recherches montrent que les microplastiques et nanoplastiques peuvent agir comme des catalyseurs cachés du développement du cancer, en favorisant la migration cellulaire et la formation de métastases.²⁷⁹ Il a également été démontré que les particules de MNP peuvent persister longtemps à l'intérieur des cellules et être transmises aux cellules filles lors de la division cellulaire.

Actuellement, la mortalité due aux cancers continue d'augmenter dans le monde (Image 102).

Il est prévu qu'en 2050, le nombre de nouveaux cas de cancer augmente de 77 %.²⁸⁰



1. Cancer: Cancer describes a group of diseases in which abnormal cells in the body begin to grow and multiply uncontrollably. These cells can form lumps of tissue called tumors, which can interfere with normal bodily functions. Cancerous cells have the potential to spread to other parts of the body (this process is called "metastasis"), disrupting normal processes and causing serious health problems.

²⁷⁹ Brynzak-Schreiber, E. et al. Microplastics role in cell migration and distribution during cancer cell division. Chemosphere 353, 141463 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141463>

²⁸⁰ World Health Organization. Global cancer burden growing, amidst mounting need for services. (2024)

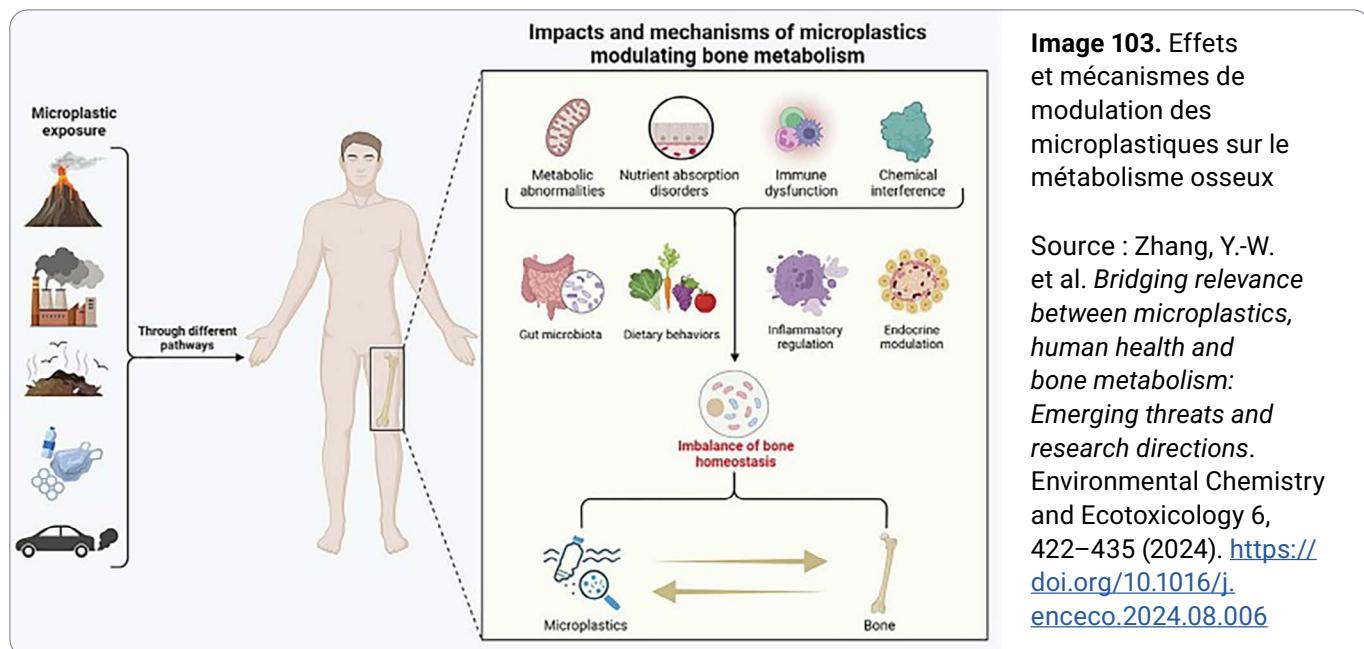
<https://www.who.int/news/item/01-02-2024-global-cancer-burden-growing--amidst-mounting-need-for-services> (Accessed May 1, 2025).

L'impact des micro- et nanoplastiques (MNP) sur le métabolisme du calcium et la structure osseuse

Les particules plastiques sont capables de pénétrer jusqu'au système musculo-squelettique – fondement du fonctionnement physique humain (Image 103). Là où règne un équilibre précis entre destruction et reconstruction, où les os se renouvellent quotidiennement, où les articulations absorbent les frictions et où les muscles soutiennent le mouvement et la production de chaleur, les microplastiques – notamment en raison de leur charge électrostatique – peuvent se substituer aux molécules de construction et déclencher des processus lents et destructeurs.

Les recherches montrent que les microplastiques peuvent pénétrer dans le tissu osseux, où leur structure moléculaire leur permet d'imiter le calcium et d'autres minéraux essentiels au métabolisme osseux. En conséquence, le plastique peut être perçu à tort par l'organisme comme un matériau de construction des os. Le corps commence littéralement à « construire » les os à partir de plastique.

Ce dysfonctionnement de reconnaissance moléculaire entraîne une série de conséquences néfastes : les microplastiques peuvent altérer les fonctions des ostéoblastes et des ostéoclastes, perturber le métabolisme du calcium et du phosphore, contribuant ainsi au développement de l'ostéoporose. Des cascades inflammatoires sont déclenchées, l'expression génique est perturbée, et le tissu osseux perd en densité et en solidité. Par ailleurs, la présence de nanoplastiques peut provoquer une inflammation chronique, endommageant le cartilage articulaire et le tissu osseux, ce qui est associé à un risque accru d'arthrose, de douleurs et de raideurs articulaires.^{281,282}



²⁸¹Zhang, Y.-W. et al. Bridging relevance between microplastics, human health and bone metabolism: Emerging threats and research directions. Environmental Chemistry and Ecotoxicology 6, 422–435 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2024.08.006>

²⁸²China Environment News. Microplastics "secretly attack" the human body, how much damage can they cause? (2025) <https://cenews.com.cn/news.html?aid=1205048> (Accessed May 1, 2025).

Une étude menée sur des rongeurs a démontré que le nombre d'ostéoblastes diminuait de manière significative chez les souris ayant reçu du microplastique de polystyrène.²⁸⁰

Le plastique représente également une menace importante pour les muscles squelettiques. Des recherches montrent que les nanoparticules plastiques peuvent pénétrer dans les cellules musculaires et perturber le fonctionnement des mitochondries. Il en résulte un déficit énergétique, l'activation d'espèces réactives de l'oxygène agressives, ce qui accélère le vieillissement cellulaire, nuit à la régénération musculaire après l'effort et favorise l'atrophie musculaire. Les personnes âgées et les patients atteints de maladies chroniques sont particulièrement vulnérables.

Les micro- et nanoplastiques s'accumulent dans la moelle osseuse,²⁸³ perturbant la formation des cellules souches (hématopoïétiques et mésenchymateuses),²⁸⁴ à l'origine des erythrocytes, leucocytes, thrombocytes, ostéocytes, chondrocytes et adipocytes. Leur dysfonctionnement entraîne des atteintes systémiques de l'organisme.

Troubles reproductifs associés à l'exposition aux MNP : infertilité et dysfonction érectile

Diminution de la fertilité

Selon les prévisions, le monde pourrait devenir entièrement infertile d'ici 2045.²⁸⁵

Dès 2018, un groupe de médecins et scientifiques renommés, réunis lors du **XIIIe Symposium international sur la spermatologie** à Stockholm, avait appelé les gouvernements à reconnaître la baisse de fertilité masculine comme un problème majeur de santé publique et à souligner l'importance de la santé reproductive masculine pour la survie de l'espèce humaine.²⁸⁶

La santé reproductive, contrairement aux idées reçues, ne dépend pas uniquement de l'équilibre hormonal, de l'hérédité et du mode de vie. Un nombre croissant d'études scientifiques soulignent le rôle crucial des mitochondries dans les processus de conception et de développement embryonnaire. Ces minuscules organites, responsables de la production d'énergie nécessaire à toutes les fonctions vitales, jouent un rôle déterminant dans la fertilité aussi bien chez les hommes que chez les femmes, leur importance étant bien plus grande qu'on ne le pensait.

Les dysfonctionnements mitochondriaux peuvent être à l'origine de l'infertilité tant chez les femmes que chez les hommes. Chez les hommes, les mitochondries situées dans la partie postérieure du spermatozoïde sont responsables de sa mobilité, indispensable à la fécondation. Tout dysfonctionnement à ce niveau réduit la mobilité des spermatozoïdes et peut entraîner des anomalies.

²⁸⁰World Health Organization. Global cancer burden growing, amidst mounting need for services. (2024)

<https://www.who.int/news/item/01-02-2024-global-cancer-burden-growing--amidst-mounting-need-for-services> (Accessed May 1, 2025).

²⁸³Guo, X. et al. Discovery and analysis of microplastics in human bone marrow. Journal of Hazardous Materials 477, 135266 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135266>

²⁸⁴Sun, R. et al. Preliminary study on impacts of polystyrene microplastics on the hematological system and gene expression in bone marrow cells of mice. Ecotoxicology and Environmental Safety 218, 112296 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112296>

²⁸⁵The Guardian. Shanna Swan: 'Most couples may have to use assisted reproduction by 2045'. (2021) <https://www.theguardian.com/society/2021/mar/28/shanna-swan-fertility-reproduction-count-down> (Accessed May 1, 2025).

²⁸⁶Levine, H. et al. Male reproductive health statement (XIIIth international symposium on Spermatology, may 9th–12th 2018, Stockholm, Sweden. Basic Clin. Androl. 28, 13 (2018). <https://doi.org/10.1186/s12610-018-0077-z>

Dans des études menées par des scientifiques chinois, des microplastiques ont été détectés dans tous les échantillons de sperme – en moyenne deux particules par échantillon, mesurant jusqu'à 7 µm, le plus souvent du polystyrène.²⁸⁷ Leur présence est associée à des anomalies morphologiques des spermatozoïdes et à un raccourcissement des télomères.

Grâce à leur taille microscopique et à leur charge, les nanoparticules plastiques peuvent traverser la barrière hémato-testiculaire et pénétrer dans les organes reproducteurs, en perturbant leur fonctionnement.

Une tendance particulièrement préoccupante est la baisse observée du nombre total de spermatozoïdes chez les hommes : une diminution de 62,3 % entre 1973 et 2018 (Image 104).²⁸⁸

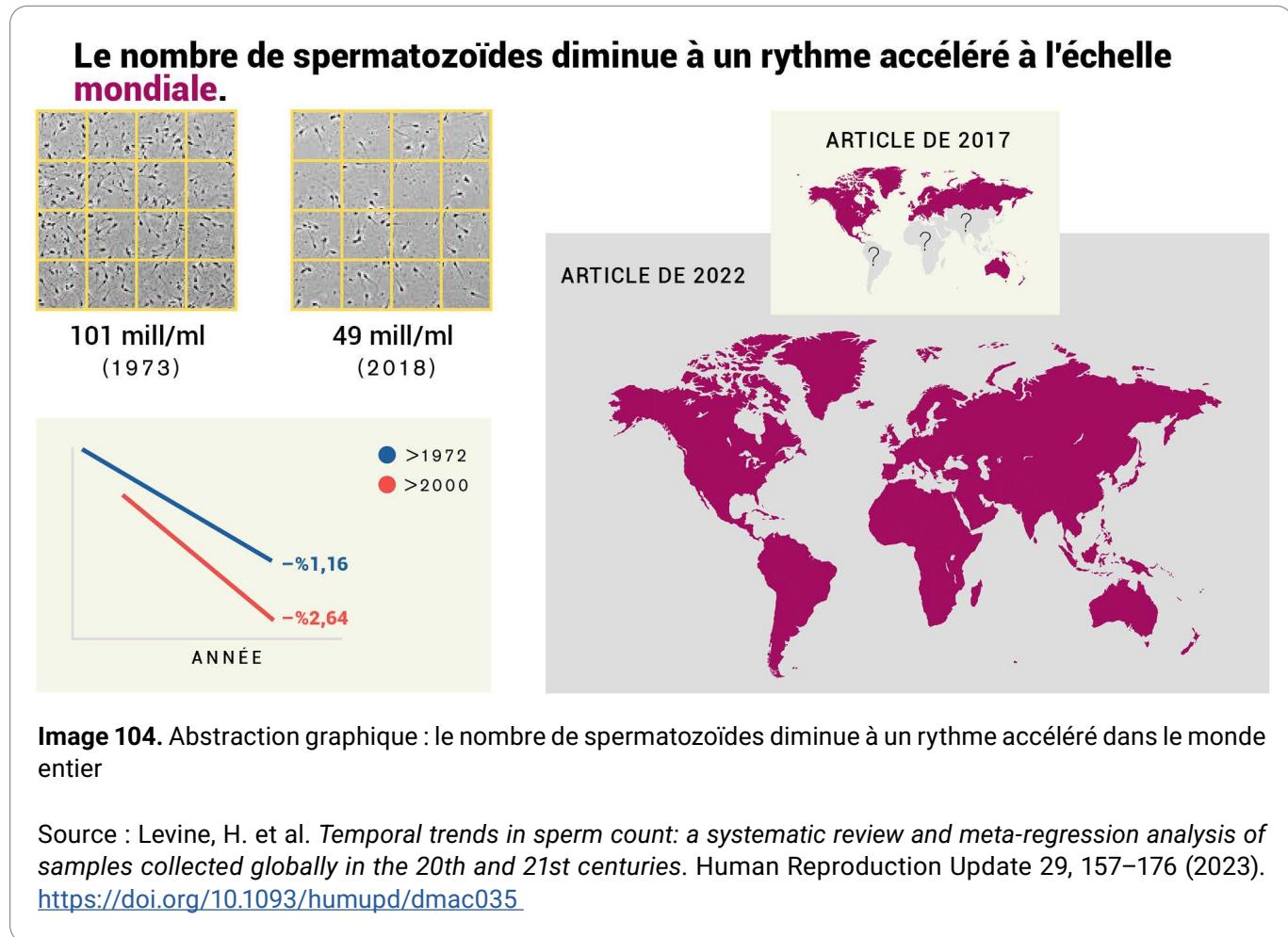


Image 104. Abstraction graphique : le nombre de spermatozoïdes diminue à un rythme accéléré dans le monde entier

Source : Levine, H. et al. *Temporal trends in sperm count: a systematic review and meta-regression analysis of samples collected globally in the 20th and 21st centuries*. Human Reproduction Update 29, 157–176 (2023). <https://doi.org/10.1093/humupd/dmac035>

Bien que de nombreux facteurs influencent la fertilité, un nombre croissant de scientifiques estiment que les composés chimiques présents dans le plastique jouent un rôle clé dans ce processus. Les phtalates, utilisés pour assouplir les plastiques, perturbent l'équilibre hormonal, réduisent la libido et peuvent contribuer à une puberté précoce ainsi qu'à des dysfonctionnements testiculaires.

²⁸⁷Li, N. et al. Prevalence and implications of microplastic contaminants in general human seminal fluid: A Raman spectroscopic study. Science of The Total Environment 937, 173522 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173522>

²⁸⁸Levine, H. et al. Temporal trends in sperm count: a systematic review and meta-regression analysis of samples collected globally in the 20th and 21st centuries. Human Reproduction Update 29, 157–176 (2023). <https://doi.org/10.1093/humupd/dmac035>

La situation n'est pas moins préoccupante du côté de la fertilité féminine. Une étude réalisée en 2025 a révélé la présence de particules de microplastique dans le liquide folliculaire des ovaires chez 14 femmes sur 18, avec en moyenne plus de 2 000 particules par millilitre, dont la majorité avait un diamètre inférieur à 5 µm (Image 105).²⁸⁹

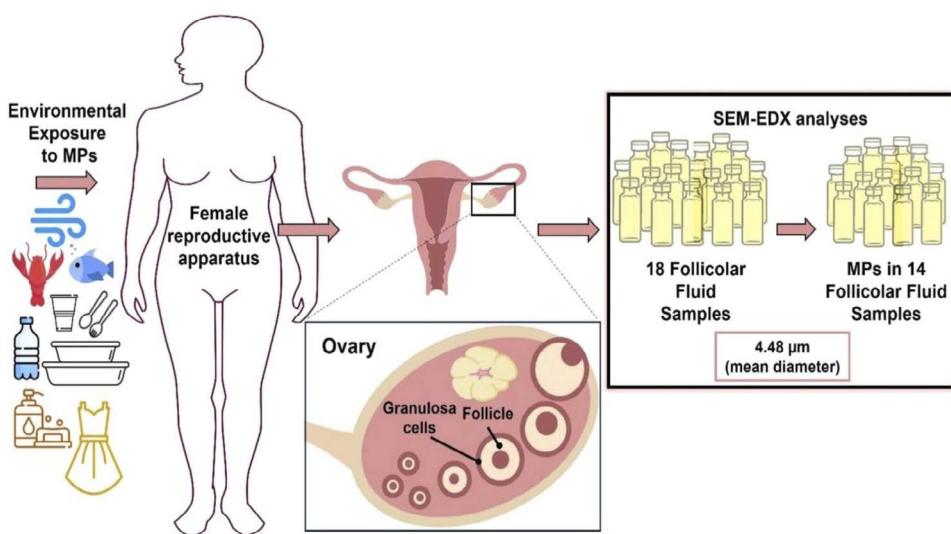


Image 105. Schéma du mécanisme de pénétration des microplastiques (MP) dans le liquide folliculaire ovarien : par l'exposition environnementale (inhalation, ingestion et contact cutané), les MP pénètrent dans l'organisme humain, atteignant l'appareil reproducteur féminin, notamment en franchissant la barrière hémato-folliculaire

Source : Montano, L. et al. *First evidence of microplastics in human ovarian follicular fluid: An emerging threat to female fertility*. Ecotoxicology and Environmental Safety 291, 117868 (2025).

<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.117868>

Ces données témoignent de la capacité des particules plastiques à franchir la barrière hémato-folliculaire dans les ovaires. À l'échelle cellulaire, les micro- et nanoplastiques peuvent endommager l'ADN, perturber la division cellulaire et provoquer des inflammations. Leur interférence dans la régulation hormonale a été démontrée, ainsi que leurs effets sur la fonction placentaire, l'angiogenèse et leur lien possible avec le développement de fibromes utérins.

Dysfonction érectile

Les résultats d'une enquête nationale menée au Japon ont révélé une diminution de la fonction érectile et de l'activité sexuelle chez la jeune génération.²⁹⁰ Une évaluation basée sur l'EHS (Échelle de Rigidité de l'Érection) a montré une prévalence de la dysfonction érectile (DE) de 30,9 %, touchant environ 14 millions d'hommes. Le désir sexuel, la rigidité de l'érection, les orgasmes et la satisfaction étaient inférieurs aux attentes chez les jeunes Japonais, en particulier chez les hommes âgés de 20 à 24 ans, bien que ces facteurs tendent également à se détériorer avec l'âge. En effet, la prévalence dans le groupe des 20–24 ans atteignait 26,6 %, soit presque autant que dans le groupe des 50–54 ans (27,8 %) (Images 106 et 107).

²⁸⁹Montano, L. et al. *First evidence of microplastics in human ovarian follicular fluid: An emerging threat to female fertility*. Ecotoxicology and Environmental Safety 291, 117868 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.117868>

²⁹⁰Tsujiimura, A. et al. *Erectile Function and Sexual Activity Are Declining in the Younger Generation: Results from a National Survey in Japan*. The World Journal of Men's Health 43, 239–248 (2025). <https://doi.org/10.5534/wjmh.240137>

Par ailleurs, une autre étude menée à l'échelle mondiale indique que trois hommes sur quatre présentent des symptômes de DE, montrant ainsi que cette affection est loin d'être rare et peut toucher n'importe quel homme. La première étude nationale officielle sur la fonction sexuelle au Japon, réalisée en 1998, estimait à environ 11,3 millions le nombre d'hommes souffrant de DE modérée à sévère. De plus, des enquêtes nationales sur l'infertilité masculine au Japon, menées en 1996 et 2015, ont révélé des résultats alarmants. L'étude de 2015 a montré que 13,5 % des hommes étaient touchés par l'infertilité masculine due à la DE comme cause principale, soit près de quatre fois plus qu'en 1996.

L'ensemble des données scientifiques actuelles indique que les micro- et nanoplastiques présents dans l'organisme représentent l'une des causes cachées mais significatives de la dégradation de la santé reproductive. Ces particules pénètrent dans les organes reproducteurs, altèrent la fonction mitochondriale, provoquent des inflammations, des perturbations hormonales et des dommages à l'ADN, tout en réduisant la mobilité et la qualité morphologique des spermatozoïdes. Leur présence dans le sperme et dans le liquide folliculaire prouve leur capacité à franchir les barrières biologiques et à exercer un impact systémique profond. Cela menace non seulement la santé individuelle, mais aussi la capacité reproductive future de l'humanité.

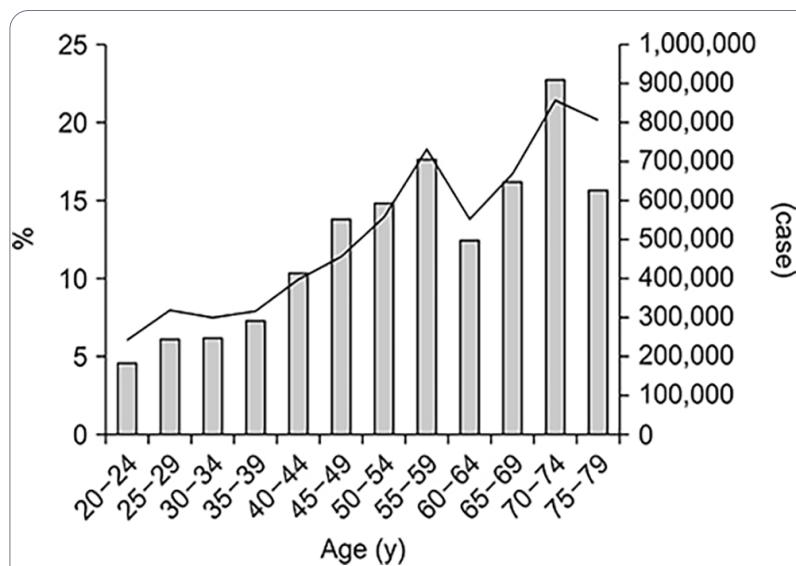


Image 106. Prévalence et nombre de patients atteints de dysfonction érectile, évalués selon la question : « Êtes-vous préoccupé par une dysfonction érectile ? »

Source : Tsujimura, A. et al. *Erectile Function and Sexual Activity Are Declining in the Younger Generation: Results from a National Survey in Japan*. The World Journal of Men's Health 43, 239–248 (2025).
<https://doi.org/10.5534/wjmh.240137>

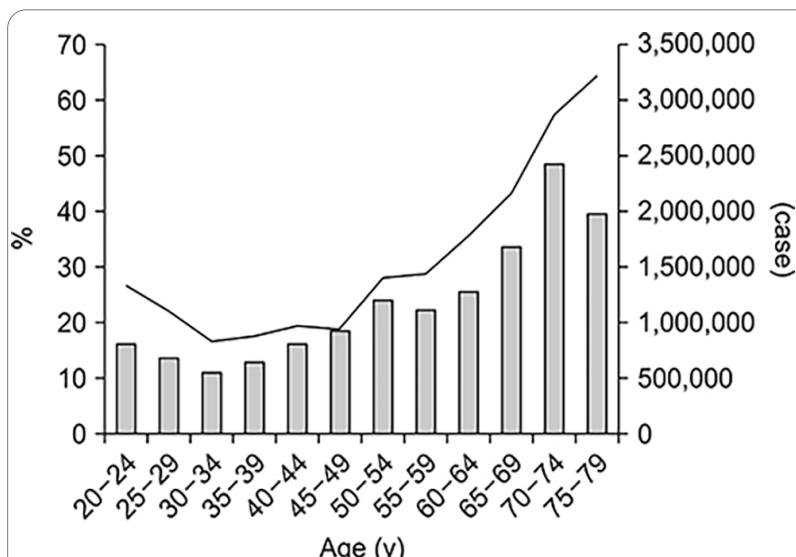


Image 107. Graphique montrant la prévalence et le nombre de patients souffrant de dysfonction érectile, évalués selon l'échelle de rigidité de l'érection

Source : Tsujimura, A. et al. *Erectile Function and Sexual Activity Are Declining in the Younger Generation: Results from a National Survey in Japan*. The World Journal of Men's Health 43, 239–248 (2025).
<https://doi.org/10.5534/wjmh.240137>

Pénétration des MNP à travers la barrière placentaire et impact sur le fœtus en développement

Exposition prénatale aux micro- et nanoplastiques

Les femmes enceintes présentent une vulnérabilité particulière à l'exposition aux microplastiques.²⁹¹ Une fois dans l'organisme maternel, les particules plastiques peuvent atteindre le fœtus en traversant le placenta, interférer avec la sécrétion hormonale qui régule la grossesse, et augmenter le risque d'accouchement prématuré, de fausse couche et d'anomalies du développement fœtal (Image 108). En 2020, on estime que 13,4 millions d'enfants (soit 1 sur 10) sont nés prématurément (<37 semaines), ce qui constitue toujours la principale cause de mortalité infantile. Les enfants survivants présentent un risque accru de maladies graves et de troubles chroniques.²⁹²

Le système endocrinien en développement des enfants est également extrêmement sensible aux substances chimiques contenues dans le plastique, qui peuvent imiter ou bloquer les hormones²⁹³ (Image 109). L'exposition peut survenir dès la période néonatale, notamment par le lait maternel. De plus, les nanoparticules plastiques pourraient exercer des effets différents, perturbant la formation des cellules germinales pendant l'enfance et l'adolescence, ce qui réduirait la fertilité à l'âge adulte.

La barrière hématoplacentaire (BHP) joue un rôle clé dans la régulation des échanges entre la mère et le fœtus, assurant une protection contre les substances nocives. Cependant, les recherches montrent que les micro- et nanoplastiques sont capables de franchir cette barrière.

En 2020, une étude dirigée par Antonio Ragusa, utilisant la microspectroscopie Raman (une méthode d'analyse basée sur la diffusion de la lumière pour déterminer la composition chimique des matériaux), a révélé la présence de microplastiques dans les placentas de quatre femmes sur six ayant eu une grossesse normale. Douze particules de 5 à 10 µm, incluant du polypropylène et des pigments utilisés dans les cosmétiques, peintures, colles et produits d'hygiène, ont été identifiées.²⁹⁴

²⁹¹Dugershaw-Kurzer, B. et al. Nanoparticles Dysregulate the Human Placental Secretome with Consequences on Angiogenesis and Vascularization. *Advanced Science* 11, 2401060 (2024). <https://doi.org/10.1002/advs.202401060>

²⁹²World Health Organization. 1 in 10 babies worldwide are born early, with major impacts on health and survival. (2023) <https://www.who.int/news/item/06-10-2023-1-in-10-babies-worldwide-are-born-early-with-major-impacts-on-health-and-survival> (Accessed May 1, 2025).

²⁹³Sharma, R. K. et al. Impact of Microplastics on Pregnancy and Fetal Development: A Systematic Review. *Cureus* 16, e60712 (2024). <https://doi.org/10.7759/cureus.60712>

²⁹⁴Ragusa, A. et al. Plasticita: First evidence of microplastics in human placenta. *Environment International* 146, 106274 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106274>

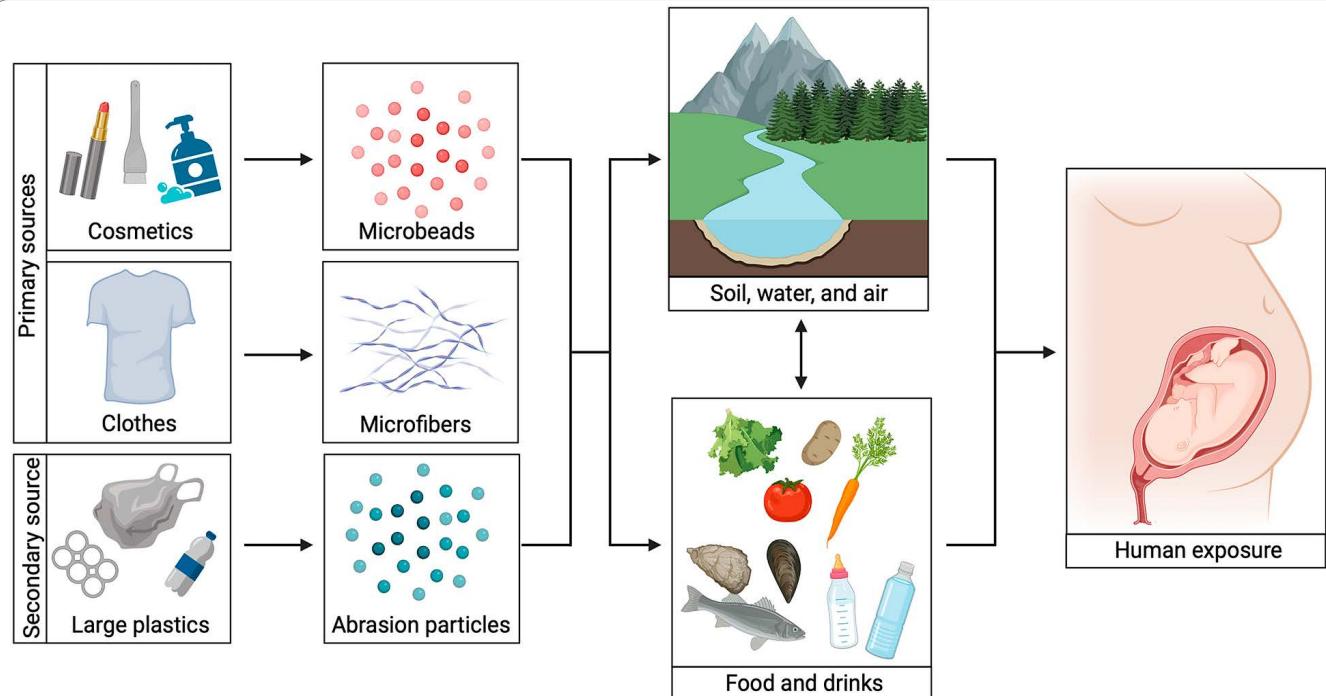


Image 108. Pénétration des microplastiques dans l'organisme maternel

Source : Hofstede, L. T., Vasse, G. F. & Melgert, B. N. *Microplastics: A threat for developing and repairing organs?* Cambridge Prisms: Plastics 1, e19 (2023). <https://doi.org/10.1017/plc.2023.19>

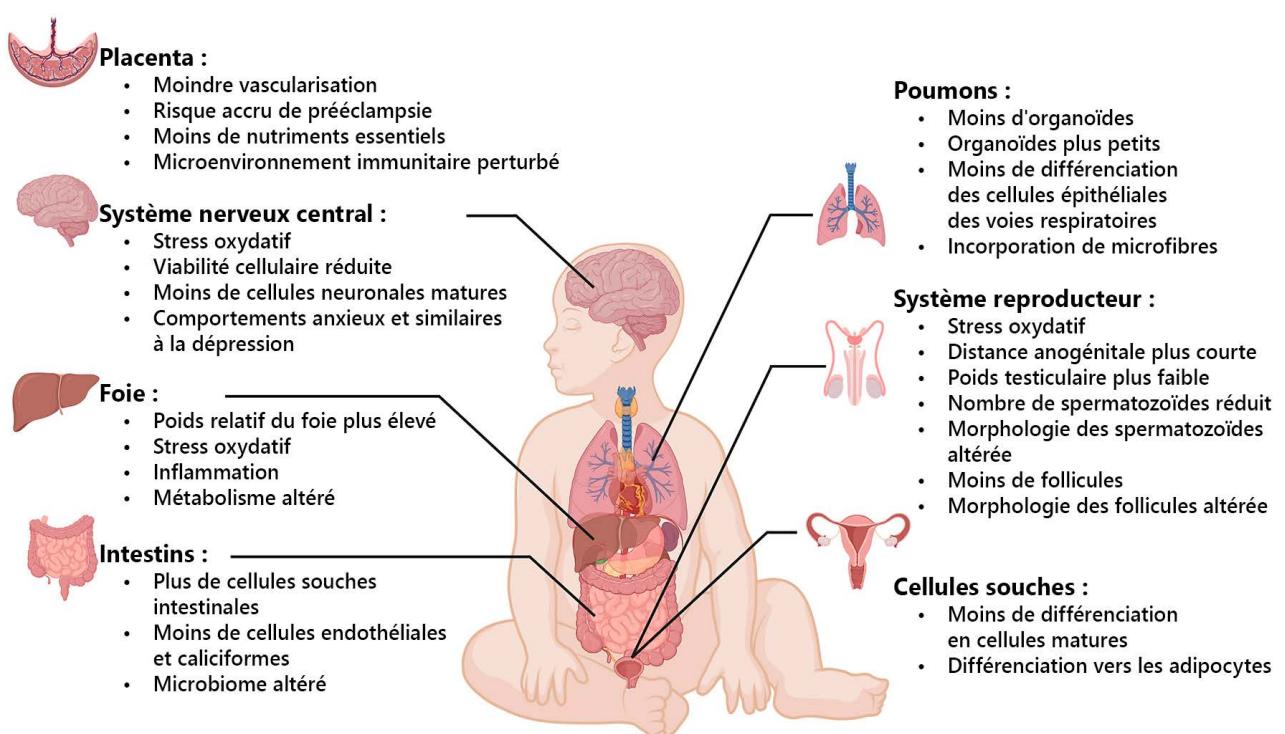


Image 109. Effets des microplastiques sur les différents organes et tissus du fœtus en développement

Source : Hofstede, L. T., Vasse, G. F. & Melgert, B. N. *Microplastics: A threat for developing and repairing organs?* Cambridge Prisms: Plastics 1, e19 (2023). <https://doi.org/10.1017/plc.2023.19>

Une étude menée par l'Université du Nouveau-Mexique a montré que la concentration de micro- et nanoplastiques dans les placentas de bébés prématurés était plus élevée que chez les bébés nés à terme. L'analyse de 158 placentas à l'aide de la spectrométrie de masse a révélé que les femmes ayant accouché prématurément avaient accumulé davantage de particules plastiques.²⁹⁵

66

« Les nanoparticules semblent avoir un effet indirect sur le fœtus, en inhibant la formation de vaisseaux sanguins via des médiateurs chimiques », explique la biologiste Tina Bürki.²⁹⁶

Les particules de polystyrène de taille nanométrique peuvent perturber le développement cérébral du fœtus, en particulier en causant des déficits cognitifs.²⁹⁷

Selon plusieurs études, l'exposition aux microplastiques pendant la grossesse et les premiers mois de la vie peut entraîner des altérations irréversibles du système reproducteur et du système nerveux central chez la progéniture de différentes espèces.²⁹⁸

Exposition postnatale aux micro- et nanoplastiques chez les nourrissons

Les nouveau-nés sont exposés en continu aux MNP provenant de l'environnement.

Selon une étude menée en 2020,²⁹⁹ les nourrissons peuvent ingérer jusqu'à 4,5 millions de particules plastiques par jour rien qu'en étant nourris au biberon en polypropylène – le type de biberon le plus couramment utilisé dans le monde.

Les bébés peuvent également avaler des microplastiques par le lait maternel. En 2022, une analyse du lait maternel de 34 femmes en bonne santé a révélé la présence de microplastiques dans 76 % des échantillons (Image 110).³⁰⁰ Les nanoparticules plastiques (MNP) peuvent avoir des effets différents, perturbant le développement des cellules reproductrices pendant l'enfance et l'adolescence, ce qui peut réduire la fertilité à l'âge adulte.

²⁹⁵Jochum, M. et al. Elevated Micro- and Nanoplastics Detected in Preterm Human Placentae. Preprint (2025). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5903715/v1>

²⁹⁶Federal Office of Public Health. Impact of pollution on embryonic development - Nanoparticles: Risk for babies in the womb. FOPH. (2024) <https://www.bpt.admin.ch/en/nsb?i=101285> (Accessed May 1, 2025).

²⁹⁷Jeong, B. et al. Maternal exposure to polystyrene nanoplastics causes brain abnormalities in progeny. Journal of Hazardous Materials 426, 127815 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127815>

²⁹⁸Sharma, R. K. et al. Impact of Microplastics on Pregnancy and Fetal Development: A Systematic Review. Cureus 16, e60712 (2024). <https://doi.org/10.7759/cureus.60712>

²⁹⁹Li, D., Shi, Y., Yang, L. et al. Microplastic release from the degradation of polypropylene feeding bottles during infant formula preparation. Nat Food 1, 746–754 (2020). <https://doi.org/10.1038/s43016-020-00171-y>

³⁰⁰Ragusa, A. et al. Raman Microspectroscopy Detection and Characterisation of Microplastics in Human Breastmilk. Polymers 14, 2700 (2022). <https://doi.org/10.3390/polym14132700>

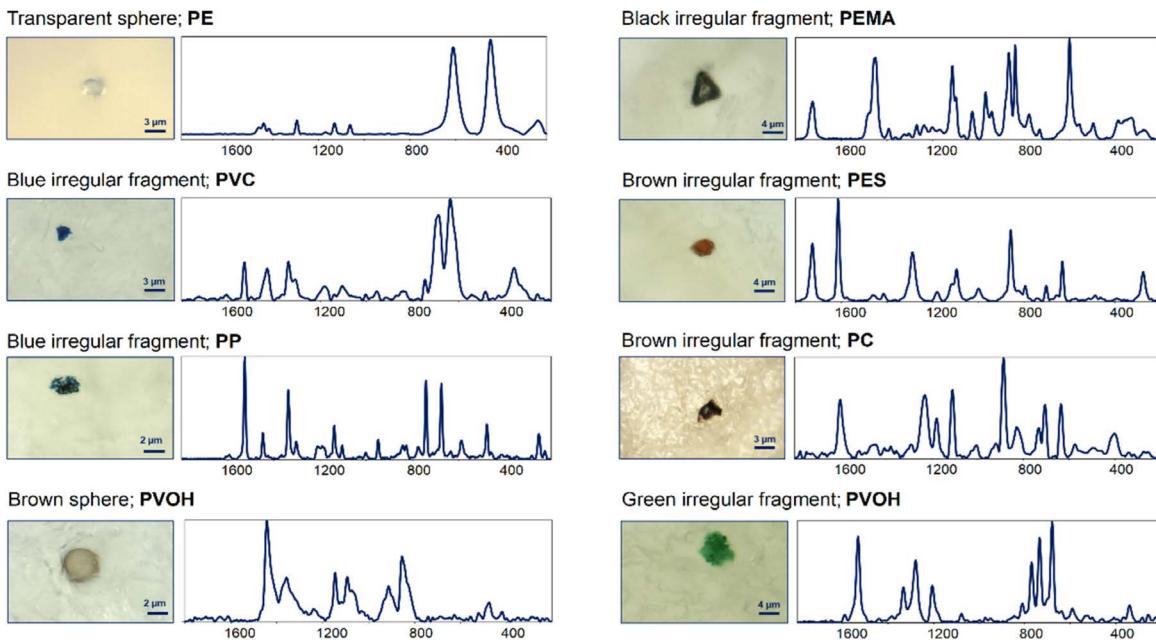


Image 110. Microphotographies et spectres Raman (nombres d'onde, cm^{-1}) de certains microplastiques identifiés dans les échantillons de lait maternel analysés. PE : polyéthylène ; PVC : polychlorure de vinyle ; PP : polypropylène ; PVOH : alcool polyvinyle ; PEVA : poly(éthylène-co-acétate de vinyle) ; PEMA : poly(éthylméthacrylate) ; PES : polyester ; PC : polycarbonate.

Source : Ragusa, A. et al. *Raman Microspectroscopy Detection and Characterisation of Microplastics in Human Breastmilk*. *Polymers* 14, 2700 (2022). <https://doi.org/10.3390/polym14132700>

Des données supplémentaires montrent que la concentration de MNP dans les selles des nourrissons est 14 fois plus élevée que chez les adultes.³⁰¹

Les nanoparticules plastiques, ainsi que les substances chimiques associées, altèrent les structures moléculaires et la fonctionnalité du lait maternel. Ces composés peuvent modifier les protéines présentes dans le lait humain et les laits infantiles, ce qui pourrait entraîner des troubles du développement.^{302, 303}

Des concentrations élevées de MNP ont un effet toxique cumulatif sur l'organisme en développement. En pénétrant dans les cellules, les nanoparticules plastiques peuvent provoquer des dommages structurels à l'ADN et perturber les processus métaboliques. Ces effets augmentent le risque de mutations génétiques et de pathologies à long terme, représentant une menace pour la santé des générations futures.

³⁰¹Zhang, J., Wang, L., Trasande, L. & Kannan, K. Occurrence of Polyethylene Terephthalate and Polycarbonate Microplastics in Infant and Adult Feces. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 8, 989–994 (2021). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00559>

³⁰²Yadav, A., Vuković, L. & Narayan, M. An Atomic and Molecular Insight into How PFOA Reduces α -Helicity, Compromises Substrate Binding, and Creates Binding Pockets in a Model Globular Protein. *J. Am. Chem. Soc.* 146, 12766–12777 (2024). <https://doi.org/10.1021/jacs.4c02934>

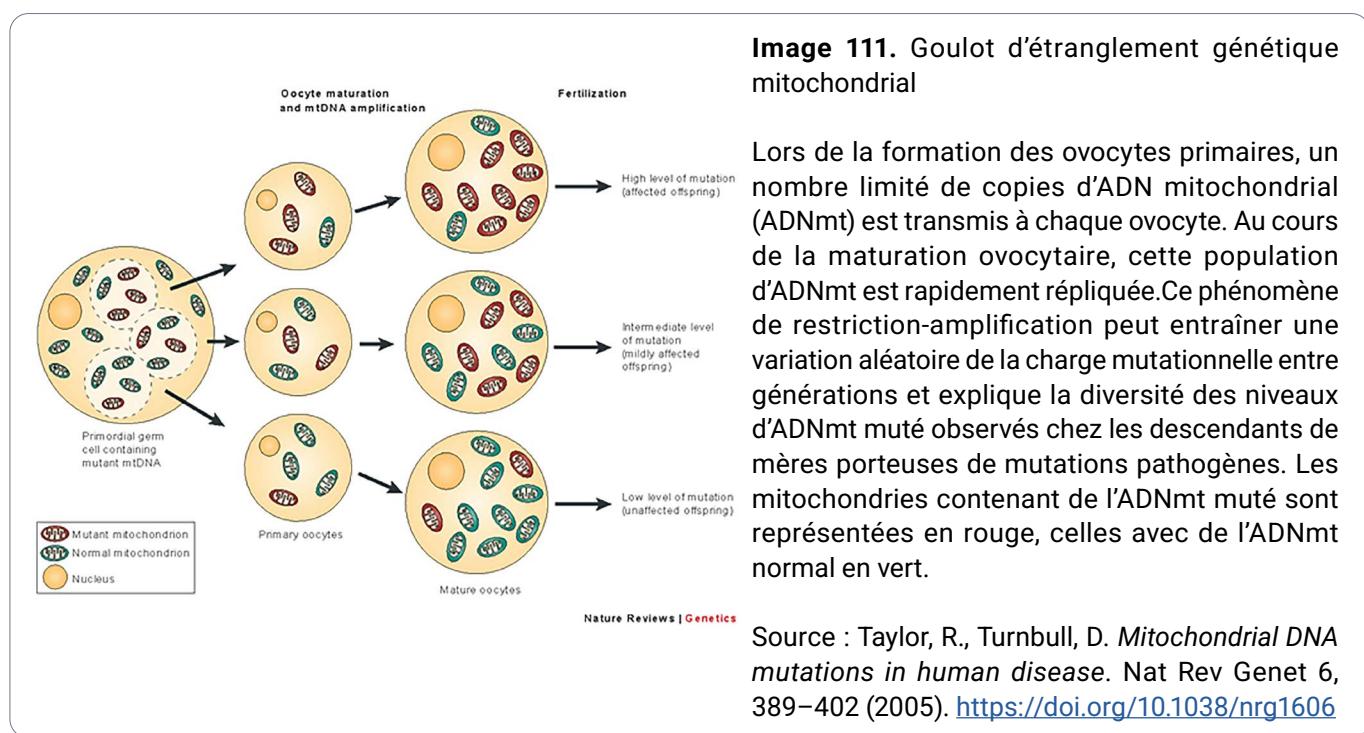
³⁰³Karim, A. et al. Interfacial Interactions between Nanoplastics and Biological Systems: toward an Atomic and Molecular Understanding of Plastics-Driven Biological Dyshomeostasis. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 16, 25740–25756 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsami.4c03008>

Conséquences de l'exposition aux MNP et lien avec les malformations congénitales

Outre leur capacité à infiltrer tous les tissus et cellules, les MNP possèdent une autre propriété préoccupante : celle d'être transmis « en héritage » aux générations futures. Lors de la division cellulaire, les fragments de micro- et nanoplastiques peuvent passer d'une cellule à l'autre. En raison de leur taille minuscule et de leur charge électrostatique, ils franchissent facilement la barrière hémato-placentaire, pénétrant dans les tissus et cellules foetaux, où ils exercent des effets délétères sur l'organisme en développement. Comme souligné à plusieurs reprises dans ce rapport, les micro- et nanoplastiques entraînent en premier lieu une dysfonction mitochondriale.

Une étude récente en randomisation mendélienne a apporté des preuves solides d'un lien causal entre l'expression des protéines mitochondrielles et le risque de malformations congénitales. En utilisant des variants génétiques comme variables instrumentales pour minimiser les biais des données observationnelles, l'étude a identifié des associations significatives entre 66 traits liés aux protéines mitochondrielles et des anomalies cardiaques, auriculaires, du système nerveux, de l'appareil génito-urinaire et des membres. Cela confirme l'hypothèse du rôle central de l'activité mitochondriale dans le morphogénèse embryonnaire.³⁰⁴

Les mutations de l'ADN mitochondrial, qu'elles soient héréditaires ou de novo, provoquent un large éventail de syndromes cliniques : MELAS, MERRF, NARP, syndrome de Leigh, entre autres. Ces pathologies affectent principalement les organes à forte demande énergétique – cœur, cerveau, muscles, yeux. La transmission se fait exclusivement par la lignée maternelle, en raison de l'origine mitochondriale de l'ovocyte (Image 111). Ces troubles apparaissent souvent dès la petite enfance et se manifestent par des atteintes neurologiques et métaboliques sévères.



³⁰⁴Li, X. et al. Mitochondrial proteins and congenital birth defect risk: a mendelian randomization study. BMC Pregnancy Childbirth 25, 444 (2025). <https://doi.org/10.1186/s12884-025-07562-8>

Les enfants atteints de troubles mitochondriaux présentent souvent un retard de développement, une faiblesse musculaire, des troubles cognitifs et des problèmes de coordination. Le syndrome de Kearns-Sayre, le syndrome de Barth, la maladie d'Alpers et d'autres affections similaires peuvent entraîner des conséquences graves, pouvant aller jusqu'à une invalidité lourde voire au décès.

Au cours des deux dernières décennies, on observe une augmentation alarmante des malformations congénitales chez les nouveau-nés. En Chine seulement, la fréquence de ces anomalies est passée de 99,15 pour 10 000 naissances en 2005 à 290,27 en 2022³⁰⁵ (Image 112). Des tendances similaires sont observées dans d'autres pays. Les causes sont multiples, mais de plus en plus d'études scientifiques désignent les micro- et surtout les nanoplastiques comme une menace émergente. Ces particules sont capables de pénétrer les tissus embryonnaires et d'interférer avec la formation des organes et des systèmes vitaux.

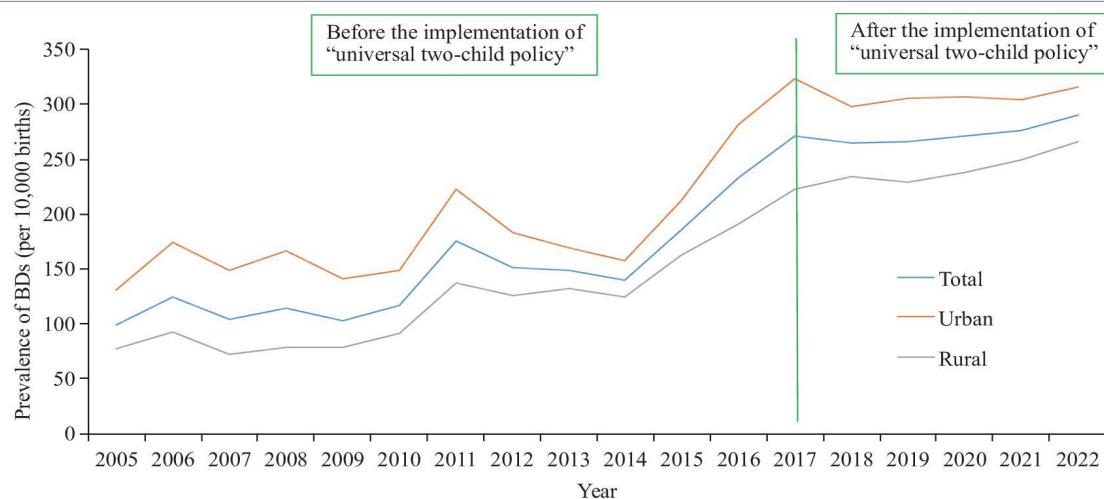


Image 112. Prévalence des malformations congénitales en zones urbaines et rurales de 2005 à 2020

Source : Wei, W. et al. *Analyzing the Trends and Causes of Birth Defects – Jinan City, Shandong Province, China, 2005–2022*. CCDCW 5, 978–983 (2023). <https://doi.org/10.46234/ccdcw2023.184>

La charge électrostatique portée par les nanoparticules plastiques est particulièrement dangereuse pour les tissus embryonnaires, où chaque erreur peut générer une anomalie majeure. Ces particules montrent une adhérence accrue aux membranes cellulaires, y compris aux cellules de la crête neurale, essentielles à la formation du cœur, des vaisseaux sanguins et des structures crano-faciales. Dans une expérience sur des embryons de poulet, les nanoparticules plastiques ont causé de graves malformations, notamment au niveau du cœur et des gros vaisseaux. L'une des anomalies les plus en progression rapide est la gastroschisis – un défaut de fermeture de la paroi abdominale antérieure, où les organes fœtaux sortent par un orifice dans la peau et les muscles (Images 113, 114, 115). Selon les données internationales, sa prévalence a augmenté de 161 % au cours des 30 dernières années, avec une incidence multipliée chez les mères de moins de 20 ans.³⁰⁶ On suppose que les nanoparticules plastiques perturbent le développement de la paroi abdominale dès les premières semaines de grossesse (4 à 8 semaines), en induisant une inflammation et un défaut de fermeture de la partie antérieure du corps.

³⁰⁵Wei, W. et al. *Analyzing the Trends and Causes of Birth Defects – Jinan City, Shandong Province, China, 2005–2022*. CCDCW 5, 978–983 (2023). <https://doi.org/10.46234/ccdcw2023.184>

³⁰⁶Feldkamp, M. L. et al. Gastroschisis prevalence patterns in 27 surveillance programs from 24 countries, International Clearinghouse for Birth Defects Surveillance and Research, 1980–2017. *Birth Defects Research* 116, e2306 (2024). <https://doi.org/10.1002/bdr2.2306>



Images 113-115. Gastroschisis

Une autre affection – l’hypospadias, une malformation congénitale dans laquelle l’urètre chez les garçons s’ouvre à un endroit anormal³⁰⁷ – a également montré une augmentation constante (Images 116, 117, 118). Par exemple, aux États-Unis, de 1997 à 2018, l’incidence de l’hypospadias a augmenté d’environ 1,06 cas pour 1 000 naissances vivantes de garçons (de 6,1 à 7,16 pour 1 000), ce qui représente une augmentation d’environ 17 %.³⁰⁸ Des études menées sur des modèles animaux ont montré que l’exposition aux phtalates – des produits chimiques couramment présents dans les microplastiques – perturbe la synthèse de la testostérone chez les fœtus mâles.



Images 116-118. Hypospadias

Ces substances, ancrées à la surface chargée des nanoplastiques, sont facilement transportées dans la circulation sanguine et le placenta, amplifiant ainsi les perturbations hormonales durant les périodes critiques de la différenciation sexuelle. Dans ce contexte, on observe une augmentation de l’incidence du syndrome de Down, des trisomies, des cardiopathies congénitales avec défaut du canal atrioventriculaire et d’autres malformations graves, passant de 12,78 pour 10 000 naissances vivantes sur la période 1999-2001 à 15,55 pour 10 000 naissances vivantes sur 2016-2020.³⁰⁹

Parallèlement, on note une hausse des troubles neuropsychiatriques chez l’enfant, notamment des troubles anxieux et des déficits cognitifs. Bien qu’un lien de causalité directe avec les microplastiques reste encore à établir, les mécanismes connus – inflammation, modulation épigénétique et dysfonction mitochondriale – constituent des arguments solides pour suspecter les microplastiques comme facteur contributif.^{307,310}

³⁰⁷Chen, M. J., Karaviti, L. P., Roth, D. R. & Schlomer, B. J. Birth prevalence of hypospadias and hypospadias risk factors in newborn males in the United States from 1997 to 2012. *Journal of Pediatric Urology* 14, 425.e1-425.e7 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jpurol.2018.08.024>

³⁰⁸Lavoie, C. et al. Comparing the incidence of hypospadias across the United States: A contemporary analysis. *Journal of Pediatric Urology* 21, 627–632 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.jpurol.2025.01.002>

³⁰⁹Stallings, E. B. et al. National population-based estimates for major birth defects, 2016–2020. *Birth Defects Research* 116, e2301 (2024). <https://doi.org/10.1002/bdr2.2301>

³¹⁰Zhang, Y., Wang, J., Yang, H. & Guan, Y. The potential mechanisms underlying phthalate-induced hypospadias: a systematic review of rodent model studies. *Front. Endocrinol.* 15, (2024). <https://doi.org/10.3389/fendo.2024.1490011>

Conclusions et perspectives. Est-il possible de réduire l'impact des micro- et nanoplastiques (MNP) sur la santé humaine ?

L'analyse des données disponibles montre que les micro- et nanoplastiques constituent un facteur de risque significatif et encore largement sous-estimé pour la santé humaine. Les connaissances scientifiques actuelles prouvent de manière convaincante que les MNP font désormais partie intégrante de la pression毒ique mondiale exercée sur l'organisme humain. Grâce à leur capacité à franchir les barrières biologiques et à s'accumuler dans divers tissus – y compris le cerveau, le cœur, les poumons et le placenta – les MNP exercent des effets toxiques aux niveaux moléculaire, cellulaire et systémique. Combinés aux additifs chimiques et aux polluants environnementaux qu'ils adsorbent, les plastiques deviennent des agents capables d'induire une inflammation chronique, un stress oxydatif, des dysfonctionnements mitochondriaux et des mutations de l'ADN – autant de processus à l'origine d'un large éventail de maladies, notamment neurodégénératives, oncologiques, cardiovasculaires, endocrinianes et auto-immunes. Ce qui est particulièrement préoccupant, c'est le fait que les particules de MNP sont pratiquement non éliminables de l'organisme, s'accumulant avec l'âge et aggravant l'effet cumulatif de leur toxicité.

Les données actuelles confirment qu'il est pratiquement impossible d'éviter le contact avec les micro- et nanoplastiques (MNP) : ils sont présents dans l'air, l'eau, les aliments et même à l'intérieur des cellules des animaux et des plantes que nous consommons. Ainsi, l'exposition aux particules plastiques devient omniprésente et continue – de la vie intra-utérine jusqu'aux dernières étapes de l'existence. La voie d'exposition par inhalation est particulièrement dangereuse : les nanoparticules peuvent franchir la barrière hémato-encéphalique et pénétrer directement dans les tissus cérébraux, faisant du système nerveux central l'une des cibles les plus vulnérables.

Un risque biologique supplémentaire est lié à l'activité électrostatique des particules de MNP, qui renforce leur interaction avec les structures biologiques et perturbe l'homéostasie. Leur rôle potentiel dans le transport de pathogènes et de micro-organismes résistants aux antibiotiques est également noté, conférant à la problématique des MNP un caractère interdisciplinaire, touchant à la fois l'écologie, la toxicologie, l'immunologie, la neurologie et la médecine reproductive.

Dans ce contexte, l'une des orientations stratégiques proposées par « ALLATRA » pour contrer la menace des MNP est le développement de méthodes de neutralisation ou de protection de leur charge électrostatique. Réduire cette activité électrostatique pourrait significativement diminuer leur nocivité et ralentir leur accumulation dans l'organisme. Selon les auteurs du rapport, ces techniques pourraient réduire le risque potentiel associé aux MNP d'au moins 50 %, ce qui permettrait de gagner un temps précieux pour élaborer des stratégies plus complètes de diagnostic, de prévention et d'élimination des MNP du corps humain. Dans ce cadre, des recherches approfondies en biophysique, nanotechnologie et toxicologie moléculaire deviennent particulièrement importantes.

Malgré le nombre croissant de publications scientifiques sur ce sujet, l'impact des micro- et nanoplastiques (MNP) sur la santé humaine reste encore insuffisamment étudié et faiblement pris en compte dans l'élaboration des stratégies de protection de la santé et de l'environnement. Compte tenu de l'ampleur de la pollution plastique, de l'activité biologique des particules et des effets potentiellement irréversibles de leur action, ce domaine nécessite une attention prioritaire de la part de la communauté scientifique et des autorités sanitaires. Il est essentiel de procéder à une systématisation des données, de développer des normes d'évaluation des risques et d'encourager la coopération scientifique interétatique et internationale.

ANALYSE DES STRATÉGIES ACTUELLES DE RÉDUCTION DE LA POLLUTION PLASTIQUE

Technologies d'élimination des gros déchets plastiques dans les éco-systèmes aquatiques

Les efforts visant à lutter contre la pollution des océans se sont principalement concentrés sur l'élimination des déchets visibles et volumineux de la surface de l'eau. L'un des projets les plus ambitieux à ce jour est l'initiative The Ocean Cleanup, qui vise à collecter les plastiques et autres types de déchets flottants. Ses systèmes flottants capturent les déchets à la surface (Image 119), qui sont ensuite triés et préparés pour être recyclés ou éliminés.

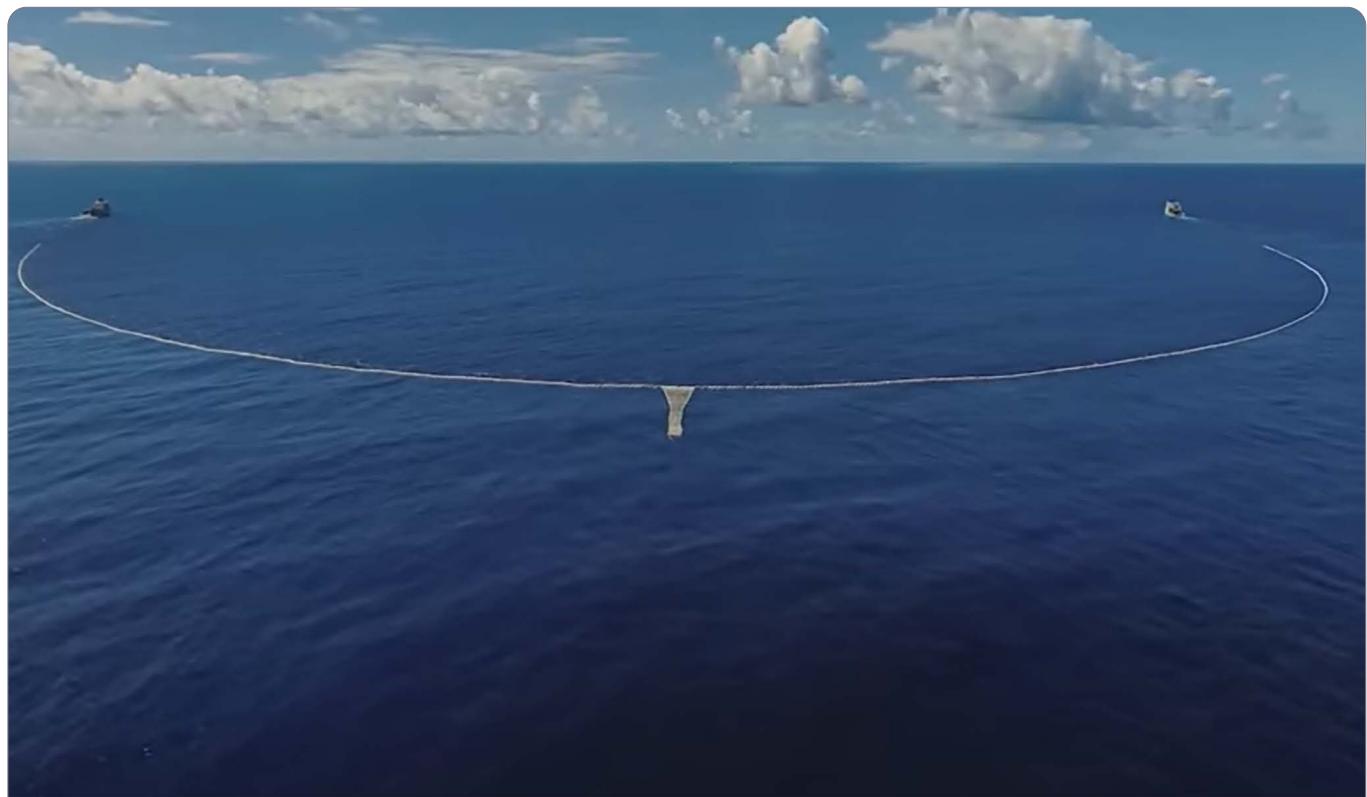


Image 119. L'image montre la technologie Ocean Cleanup en action. Une longue barrière flottante en forme de U, fabriquée dans un matériau durable, collecte les débris plastiques à la surface de l'océan

Source : The Ocean Cleanup. Cleaning up plastic pollution from the oceans. <https://theoceancleanup.com> (consulté le 1er mai 2025).

Bien que cette méthode soit prometteuse, plusieurs questions cruciales doivent être prises en considération :

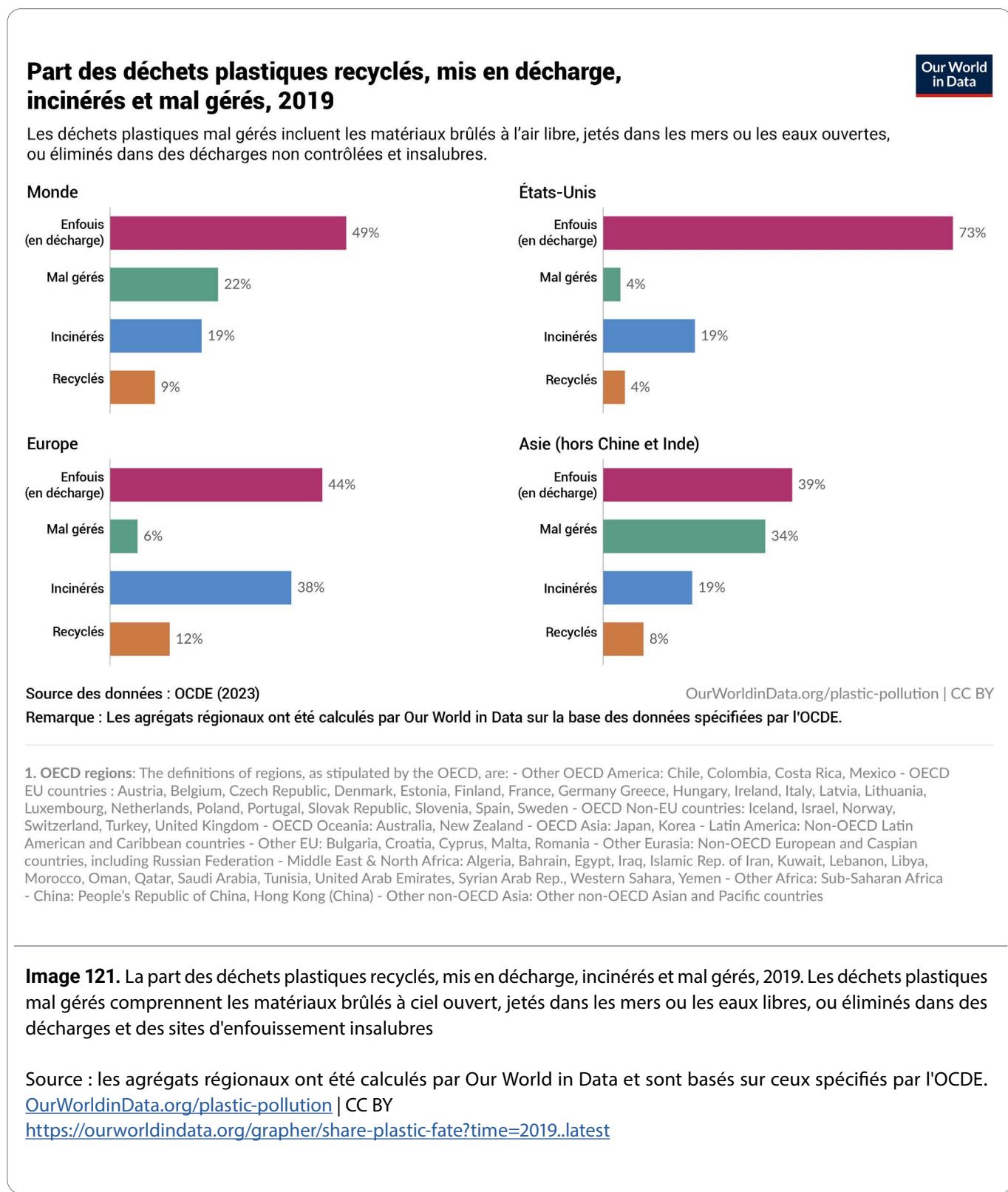
1. Le processus de collecte des débris n'est pas sélectif, ce qui signifie qu'outre les déchets plastiques, des organismes vivants – tels que des algues microscopiques, des larves de poissons et des méduses – peuvent également être capturés. À l'heure actuelle, il n'existe aucune évaluation quantitative du volume des prises accessoires, mais l'élimination à grande échelle de ces organismes pourrait avoir des conséquences néfastes pour les écosystèmes marins en perturbant les chaînes alimentaires naturelles. Malgré les mesures visant à protéger la vie marine, la question reste en suspens.

2. Les militants sont sincèrement engagés dans le nettoyage des océans, mais les efforts actuels restent insuffisants pour obtenir des résultats significatifs.

En novembre 2024, l'initiative The Ocean Cleanup avait retiré environ 20 000 tonnes de déchets plastiques des océans du monde entier. Il s'agit sans aucun doute d'une réalisation remarquable. Cependant, dans le contexte de la crise mondiale, cela ne représente que 0,01 % des 200 millions de tonnes de plastique qui polluent actuellement les océans. De plus, il est important de tenir compte de l'afflux continu de nouveaux déchets, qui s'élève à environ 11 millions de tonnes par an (Image 120). Ces chiffres soulignent la grande disproportion entre les efforts de nettoyage et l'ampleur du problème.



3. Le sort réservé au plastique collecté reste la question clé à résoudre. Les taux mondiaux actuels de recyclage des déchets plastiques ne dépassent pas 9 % (Image 121). Il est donc fort probable qu'une grande partie du plastique récupéré finisse dans des décharges, ce qui ne résout pas le problème de la pollution à long terme.



De plus, les opérations de nettoyage des océans entraînent des coûts financiers importants. Par exemple, l'éloignement de la Grande Plaque des déchets du Pacifique, située loin des eaux territoriales de tout pays, crée une situation où aucune nation n'est clairement responsable du financement ou de la mise en œuvre des efforts de nettoyage. Selon Charles Moore, océanographe et chercheur qui a découvert la Grande Plaque des déchets du Pacifique, un nettoyage à grande échelle de cette zone « ruinerait n'importe quel pays » qui tenterait une telle entreprise. Il est également important de noter que cinq zones similaires ont été identifiées dans les océans du monde entier (Image 122), ce qui aggrave encore le problème.

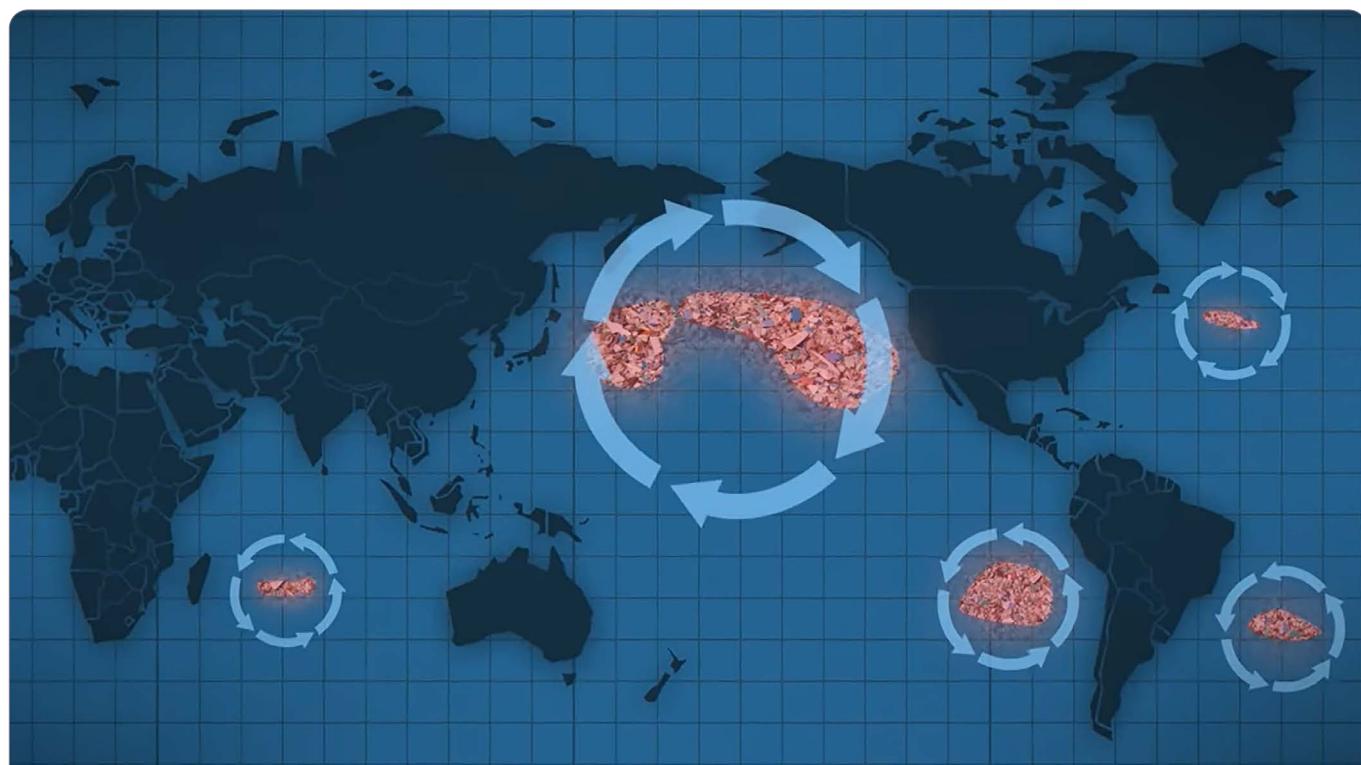


Image 122. Une illustration schématique de l'emplacement des cinq principaux amas de déchets dans les océans du globe

Il est important de noter que les débris visibles de grande taille ne constituent qu'une partie du problème plus large de la pollution plastique dans les océans. Selon la biologiste marine Melanie Bergmann, de l'Institut Alfred Wegener, « **cela ne concerne que le plastique présent à la surface de l'océan, qui ne représente qu'une petite partie, moins de 1 % de ce qui se trouve réellement dans l'océan** ».

À mesure que le plastique se décompose en microplastiques et nanoplastiques, la tâche de nettoyer les océans de ce type de pollution devient beaucoup plus difficile. Il existe déjà certaines technologies expérimentales permettant d'éliminer les microplastiques de l'eau. Par exemple, des chercheurs de l'université du Sichuan ont créé un minuscule robot-poisson (Image 123) capable de nager dans les milieux aquatiques et d'adsorber les microplastiques flottant à proximité.³¹¹ Ce robot bionique de 13 millimètres de long collecte efficacement les microplastiques grâce à de fortes liaisons chimiques et à des interactions électrostatiques entre les matériaux de son corps et les composants des microplastiques, tels que les colorants organiques, les antibiotiques et les métaux lourds.

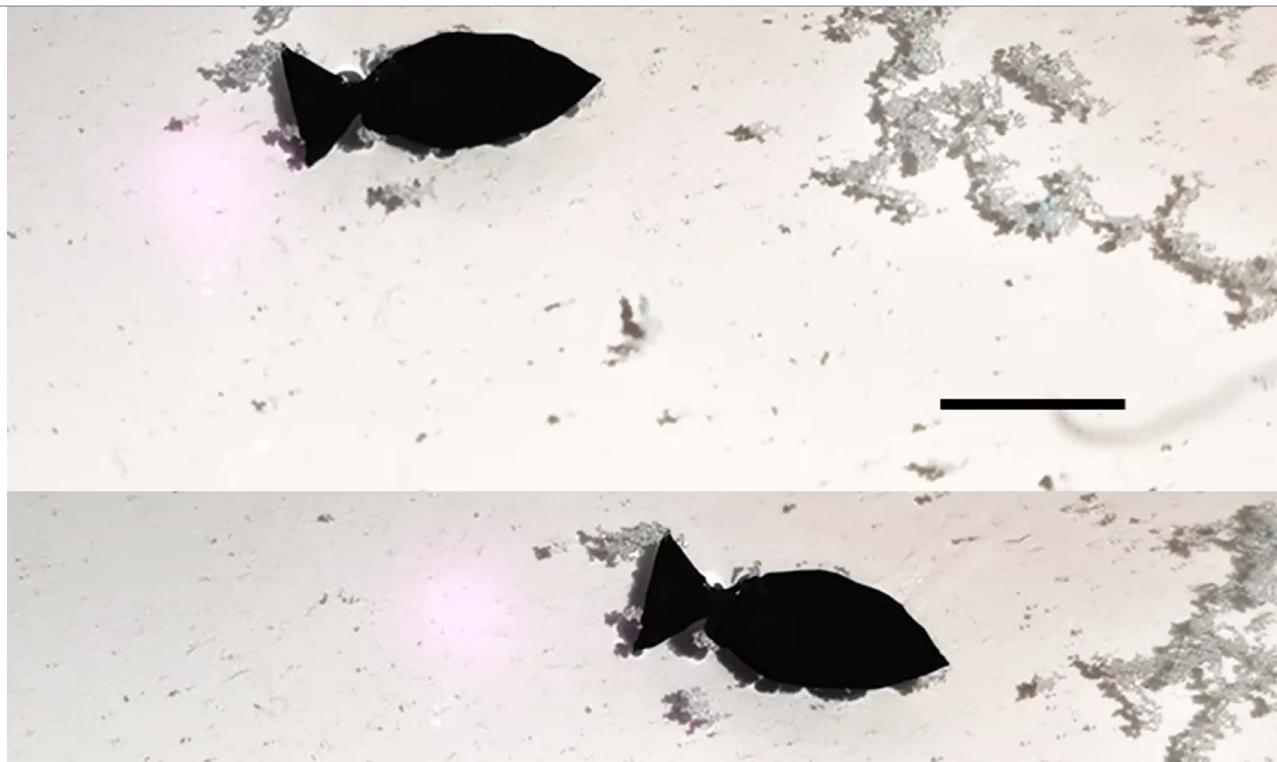


Image 123. L'image montre un minuscule poisson robotique créé par des chercheurs de l'université du Sichuan. Cet appareil compact, qui ressemble à un vrai poisson, peut nager et adsorber activement les microplastiques en suspension libre

<https://www.theguardian.com/environment/2022/jun/22/scientists-unveil-bionic-robo-fish-to-remove-microplastics-from-seas>

Cependant, malgré ces innovations, l'application pratique de ces technologies à l'échelle mondiale est actuellement limitée. Les minuscules robots n'adsorbent les microplastiques que dans leur environnement immédiat, ce qui rend le processus localisé. Même en grand nombre, ils ne sont pas en mesure de couvrir la vaste étendue de l'océan. De plus, ils pourraient entrer dans la chaîne alimentaire. Il existe également des incertitudes quant à la capacité des robots à fonctionner dans les conditions difficiles de l'océan, telles que les courants, la pression et la salinité. Par conséquent, les solutions existantes ne sont pas encore suffisamment efficaces et se heurtent à de sérieux obstacles pour être déployées à grande échelle.

³¹¹Wang, Y. et al. Robust, Healable, Self-Locomotive Integrated Robots Enabled by Noncovalent Assembled Gradient Nanostructure. *Nano Lett.* 22, 5409–5419 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.2c01375>

Méthodes actuelles de dépollution des micro- et nanoplastiques

L'intérêt pour l'utilisation potentielle de micro-organismes, en particulier de bactéries, dans la dégradation enzymatique des polymères synthétiques, notamment le polyéthylène téréphthalate (PET), ne cesse de croître. Cette technologie est souvent présentée comme une alternative écologique aux méthodes traditionnelles d'élimination des déchets plastiques, telles que l'incinération. Cependant, les données empiriques accumulées jusqu'à présent jettent le doute sur son efficacité, sa sécurité et sa scalabilité pour une utilisation industrielle.

En 2016, une équipe de scientifiques japonais dirigée par Shosuke Oda a découvert la bactérie *Ideonella sakaiensis*, capable de décomposer le PET grâce à la production de deux enzymes : la PETase et la MHETase. Cette découverte a constitué une avancée majeure en microbiologie.³¹² Cependant, des études en laboratoire ont montré que le processus de dégradation est extrêmement lent : il a fallu environ sept semaines à la bactérie pour décomposer un film plastique de 20 grammes dans des conditions optimales. Il est évident que ce taux de dégradation ne peut être considéré comme satisfaisant pour lutter contre l'ampleur de la pollution plastique. À l'échelle mondiale, où des millions de tonnes de plastique sont rejetées dans l'environnement chaque année, un rythme aussi lent revient à essayer de vider l'océan à l'aide d'une cuillère à café.

Les efforts scientifiques se sont concentrés sur la modification de l'enzyme PETase que certaines bactéries utilisent pour dégrader le plastique. Cependant, les chercheurs reconnaissent que l'enzyme provenant d'*Ideonella sakaiensis* n'en est encore qu'à ses débuts évolutifs. Son efficacité est faible, sa stabilité limitée, et l'accélération de la réaction nécessite des températures absentes des environnements naturels. Même le génie génétique ne permet pas encore de prévoir quelles mutations entraîneront une amélioration réelle. Comme l'a résumé Elizabeth Bell, du Laboratoire national des énergies renouvelables des États-Unis, les avancées ressemblent plutôt à « deux pas en avant, un pas en arrière ».

De plus, la dégradation enzymatique est loin d'être universelle. Seuls certains plastiques, comme le PET, peuvent théoriquement se dégrader de cette manière. Les plastiques courants comme le polyéthylène et le polypropylène restent pratiquement imperméables à la dégradation microbienne. Les scientifiques ont affirmé dans le journal *Nature* que la plupart des plastiques sont trop denses en énergie pour être efficacement décomposés par des moyens biochimiques.

Même si un microbe hautement efficace pouvait être développé, une question bien plus préoccupante se pose : pourrait-il être libéré sans danger dans l'environnement ? **Toute bactérie génétiquement modifiée présente un risque potentiel de catastrophe environnementale. Actuellement, presque tous les pays réglementent strictement ou interdisent complètement la libération de tels organismes dans la nature.**

³¹²Yoshida, S. et al. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *Science* 351, 1196–1199 (2016). <https://doi.org/10.1126/science.aad6359>

Les raisons sont claires : on ne sait pas comment ces bactéries pourraient se comporter après avoir «accompli leur mission». Pourraient-elles commencer à décomposer d'autres composés organiques essentiels ? Pourraient-elles supplanter des microbes essentiels ? Pourraient-elles déclencher des mutations aux conséquences encore plus imprévisibles ?

De cette manière, une crise environnementale pourrait facilement être remplacée par une autre, bien plus imprévisible et destructrice.

Bien que la recherche fondamentale sur la dégradation bactérienne du plastique ait une valeur indéniable, à ce stade, cette technologie ne peut être considérée comme une solution efficace, évolutive ou sûre au problème de la pollution plastique.

Étude sur l'effet de l'eau bouillante sur l'élimination des microplastiques : efficacité et risques

Des chercheurs en génie biomédical et en microplastiques de l'Université Médicale de Guangzhou et de l'Université de Jinan (Chine) ont mené une étude³¹³ visant à évaluer l'impact de l'eau bouillante à forte teneur en sel de calcium (c'est-à-dire l'eau dure) sur l'élimination des microplastiques.

Les chercheurs ont prélevé des échantillons d'eau du robinet de différents niveaux de dureté dans la ville de Guangzhou. Trois types de particules plastiques (polystyrène, polyéthylène et polypropylène) d'une taille comprise entre 0,1 et 150 micromètres ont été ajoutés aux échantillons. L'eau a été bouillie pendant cinq minutes, puis refroidie, et la concentration résiduelle en microplastiques a été mesurée.

Pendant le processus d'ébullition, l'eau dure riche en calcium a formé du carbonate de calcium insoluble (CaCO_3), communément appelé tartre. Les chercheurs ont émis l'hypothèse que les particules microplastiques pouvaient se lier aux cristaux de carbonate de calcium et précipiter, ce qui pourrait expliquer la réduction observée des concentrations de microplastiques après ébullition.

La plus grande efficacité de purification a été observée dans les échantillons présentant une dureté élevée de l'eau (300 mg de CaCO_3 par litre), où l'ébullition a permis d'éliminer jusqu'à 90 % des microplastiques. En revanche, dans les échantillons présentant une eau douce (moins de 60 mg de CaCO_3 par litre), l'effet était nettement plus faible, avec seulement environ 25 % des particules de plastique éliminées.

Cependant, malgré certains effets positifs de l'ébullition de l'eau dure, une préoccupation importante se pose : le rejet potentiel de particules microplastiques et nanoplastiques dans l'air. Lorsque l'eau bout, de la vapeur est produite et, avec elle, des particules microplastiques peuvent être aérosolisées. L'inhalation de ces particules présente un risque beaucoup plus grave pour la santé que leur ingestion par le biais des aliments ou de l'eau.

³¹³Yu, Z., Wang, J.-J., Liu, L.-Y., Li, Z. & Zeng, E. Y. Drinking Boiled Tap Water Reduces Human Intake of Nanoplastics and Microplastics. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 11, 273–279 (2024). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.4c00081>

Des études montrent qu'après inhalation, les nanoplastiques peuvent atteindre le cerveau en moins de deux heures. En revanche, lorsque les microplastiques pénètrent dans le système digestif, une partie d'entre eux est excrétée. L'accumulation de particules de plastique dans le cerveau est associée à des risques à long terme, car leur élimination des tissus cérébraux est pratiquement impossible.

Ainsi, si l'ébullition peut réduire la teneur en microplastiques de l'eau potable, elle augmente potentiellement le risque de contamination atmosphérique, ce qui représente une menace plus importante pour la santé humaine. Cela souligne le besoin urgent de méthodes de purification de l'eau plus sûres et plus efficaces.

La pyrolyse comme méthode de traitement des plastiques : efficacité et risques

La pyrolyse est l'une des technologies utilisées pour le traitement des déchets plastiques. Elle repose sur la décomposition thermique des matières plastiques à haute température dans un environnement où l'oxygène est limité. Le processus est généralement mené à des températures comprises entre 300 et 800 °C et aboutit à la production de composés hydrocarbonés gazeux et liquides, ainsi que d'un résidu carboné solide.

À des températures élevées, les chaînes polymères des matières plastiques se décomposent pour former un mélange d'hydrocarbures pouvant être utilisé comme combustible. Cependant, cette méthode, tout comme l'incinération classique des plastiques, comporte des risques environnementaux importants en raison du rejet de nanoplastiques.

Sous l'effet des températures élevées, le plastique se décompose en particules ultrafines, notamment en nanoplastiques (particules de moins de 100 nanomètres). Ces particules sont si petites que les systèmes de filtration modernes sont incapables de les capturer complètement, ce qui permet leur rejet dans l'atmosphère.

La combustion du plastique s'accompagne également de l'émission de dioxines et de furanes - des composés hautement toxiques connus pour leurs effets cancérogènes.³¹⁴

Ainsi, l'utilisation de la pyrolyse et de l'incinération du plastique pour la production de carburant comporte un risque considérable d'émissions atmosphériques, ce qui constitue une menace non seulement pour l'environnement, mais aussi pour la santé humaine. Cette méthode d'élimination du plastique ne peut être considérée comme une solution sûre ou durable à la crise de la pollution environnementale. Le véritable coût d'un tel carburant est la menace qu'il représente pour la vie et le bien-être humains.

³¹⁴Baca, D. et al. Dioxins and plastic waste: A scientometric analysis and systematic literature review of the detection methods. Environmental Advances 13, 100439 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100439>

APPROCHES DE LA COMMUNAUTÉ SCIENTIFIQUE « ALLATRA » POUR LUTTER CONTRE L'ÉPIDÉMIE DE MICRO- ET NANOPLASTIQUES

Technologies des générateurs d'eau atmosphérique (GEA) pour la dépollution des océans des MNPs

La restauration de l'équilibre écologique nécessite la mise en œuvre massive de technologies innovantes, telles que les générateurs d'eau atmosphérique (GEA). Aujourd'hui, ces installations existent dans une large gamme de modèles, allant des appareils domestiques aux modèles industriels. Ces dispositifs sont capables de produire de l'eau potable à partir de l'air, en éliminant efficacement les polluants, y compris les microplastiques (Image 124). Pour améliorer le goût et la qualité, l'eau peut également être minéralisée.

Le principe de fonctionnement des générateurs repose sur la condensation de l'humidité contenue dans l'air.

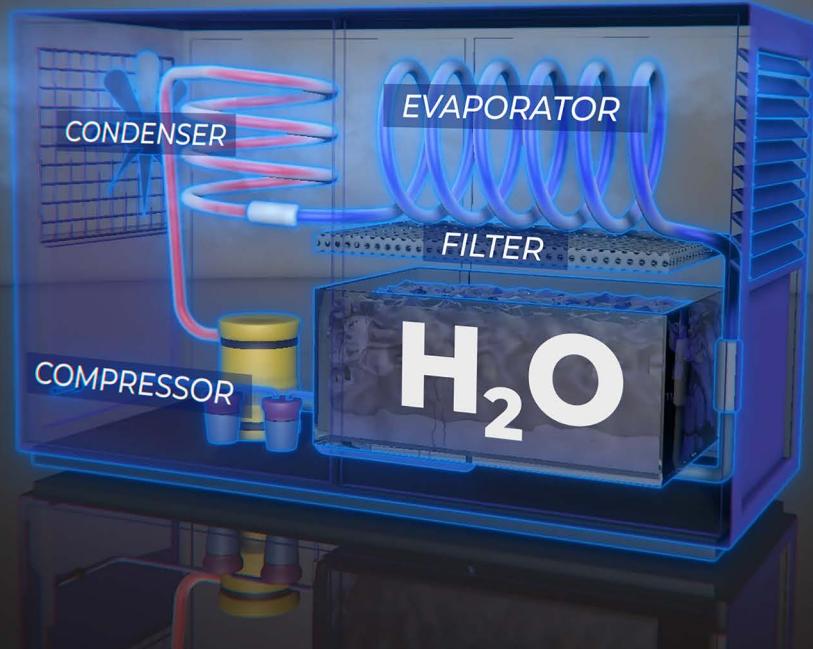


Image 124. L'image montre une illustration schématique d'un générateur d'eau atmosphérique, avec ses composants et son principe de fonctionnement

Les GEA fonctionnent selon deux technologies principales :

1. La technologie basée sur la condensation. Cette méthode aspire l'air ambiant dans l'appareil et le soumet à une surface froide ou à une spirale de refroidissement, entraînant la condensation de la vapeur d'eau en liquide. Ce processus est similaire à la formation de condensation sur un objet froid sorti d'un congélateur. Les GEA à condensation fonctionnent le mieux dans un environnement chaud et humide.

2. Technologie basée sur l'adsorption. Pour capturer l'humidité de l'air, des matériaux hygroscopiques tels que le gel de silice, les zéolites ou les cadres organométalliques sont utilisés. L'eau absorbée est ensuite libérée lors du chauffage du matériau.

Actuellement, ces installations sont utilisées localement pour fournir de l'eau potable à la population, y compris en situation de catastrophes climatiques.

L'utilisation à grande échelle des GEA pour satisfaire les besoins de l'industrie et de la population, pourrait entraîner une réduction significative de la pollution des océans en quelques années.

Actuellement, l'eau destinée à des besoins domestiques, y compris pour la préparation des repas, provient des réservoirs d'eau qui contiennent souvent des niveaux élevés de micro- et nano-plastiques. Cette eau contribue à l'accumulation de plastique dans le corps humain. Passer à l'extraction de l'eau de l'air plutôt que des sources polluées pourrait améliorer de manière significative la qualité de l'eau consommée.

Restauration des écosystèmes grâce à la filtration naturelle et aux générateurs d'eau atmosphérique

Pour éliminer efficacement les microplastiques de l'eau usée, il est nécessaire d'appliquer des technologies innovantes, des systèmes de filtration et d'assimilation modernes. De plus, il est essentiel de rééquiper les stations d'épuration de manière à ce que l'eau usée, une fois purifiée, ne soit pas rejetée dans les réservoirs d'eau, mais dirigée vers le sol, car il existe des microorganismes dans le sol capables de décomposer naturellement le plastique.³¹⁵

Ces microorganismes diffèrent de manière significative des organismes génétiquement modifiés ou artificiellement créés en laboratoire. Leur présence dans les écosystèmes reste naturelle et ils ne présentent pas de signes d'espèces invasives dans cet environnement.

³¹⁵Park, S. Y. & Kim, C. G. Biodegradation of micro-polyethylene particles by bacterial colonization of a mixed microbial consortium isolated from a landfill site. *Chemosphere* 222, 527–533 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.159>

Les recherches³¹⁶ montrent qu'un certain nombre de microbes du sol, vivant dans un environnement nature,³¹⁷ démontrent une grande efficacité dans la dégradation des polymères,³¹⁸ tels que le polyéthylène³¹⁹ et le polyéthylène téréphthalate.³²⁰ Par exemple, l'activité la plus importante de dégradation fongique – une réduction moyenne de la masse de polyéthylène de 36,4±5,53 % en 16 semaines – a été observée pour la souche *Aspergillus oryzae* A5, 1.

La capacité des microbes à biodégrader les polymères est due à leur production d'enzymes permettant de décomposer les structures moléculaires complexes des plastiques.³¹⁷

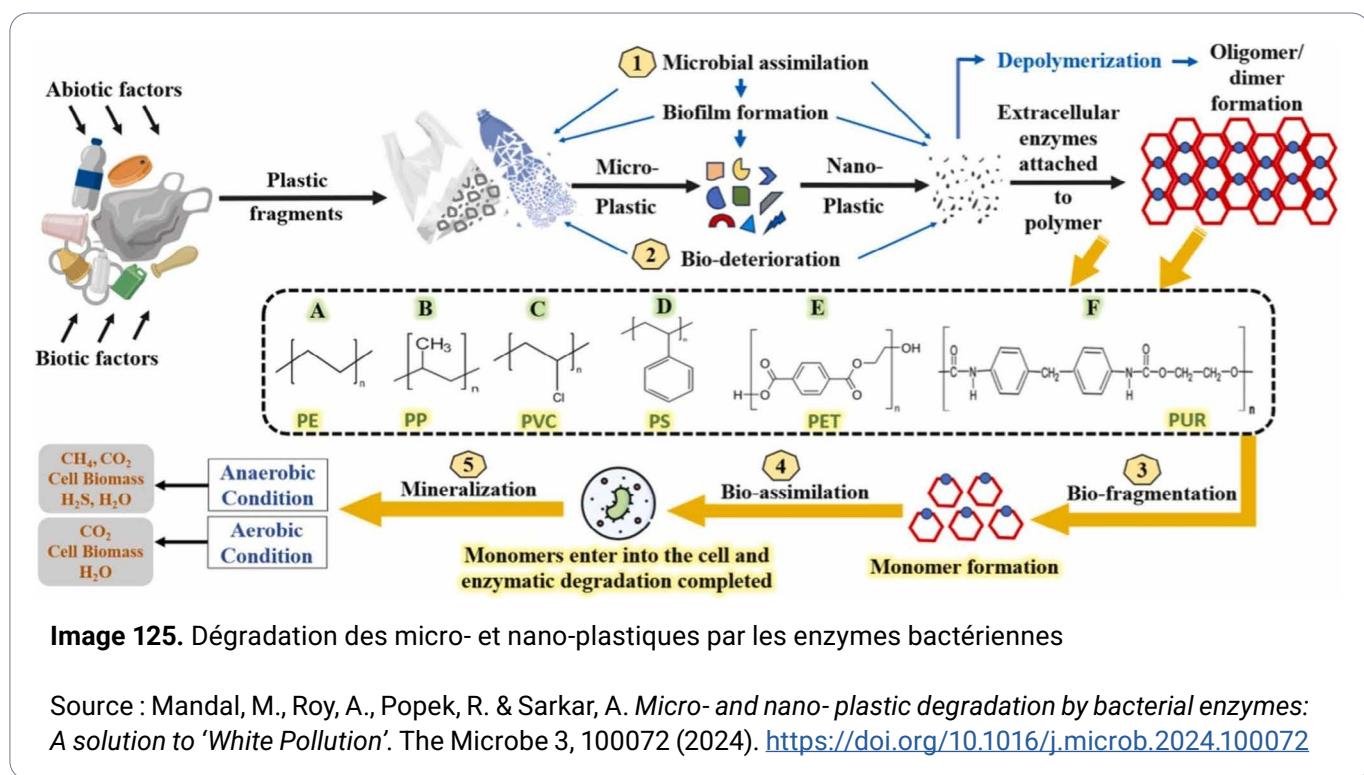


Image 125. Dégradation des micro- et nano-plastiques par les enzymes bactériennes

Source : Mandal, M., Roy, A., Popek, R. & Sarkar, A. *Micro- and nano- plastic degradation by bacterial enzymes: A solution to 'White Pollution'*. The Microbe 3, 100072 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.microb.2024.100072>

Ces données, confirmées par des observations expérimentales, indiquent le potentiel d'utilisation des communautés microbiennes naturelles pour réduire la pollution environnementale par les micro- et nanoplastiques.

« *Parmi les diverses méthodes de réhabilitation disponibles aujourd'hui, la réhabilitation microbienne montre les meilleures perspectives pour la dégradation ou l'élimination durable des microplastiques de l'environnement* », indique une revue des chercheurs indiens.³¹⁸

³¹⁶Auta, H. S. et al. Enhanced microbial degradation of PET and PS microplastics under natural conditions in mangrove environment. Journal of Environmental Management 304, 114273 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114273>

³¹⁷Mandal, M., Roy, A., Popek, R. & Sarkar, A. Micro- and nano- plastic degradation by bacterial enzymes: A solution to 'White Pollution'. The Microbe 3, 100072 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.microb.2024.100072>

³¹⁸Auta, H. S., Emenike, C. U., Jayanthi, B. & Fauziah, S. H. Growth kinetics and biodeterioration of polypropylene microplastics by *Bacillus* sp. and *Rhodococcus* sp. isolated from mangrove sediment. Marine Pollution Bulletin 127, 15–21 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.11.036>

³¹⁹Muhonja, C. N., Makonde, H., Magoma, G. & Imbuga, M. Biodegradability of polyethylene by bacteria and fungi from Dandora dumpsite Nairobi-Kenya. PLOS ONE 13, e0198446 (2018). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198446>

³²⁰Yoshida, S. et al. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). Science 351, 1196–1199 (2016). <https://doi.org/10.1126/science.aad6359>

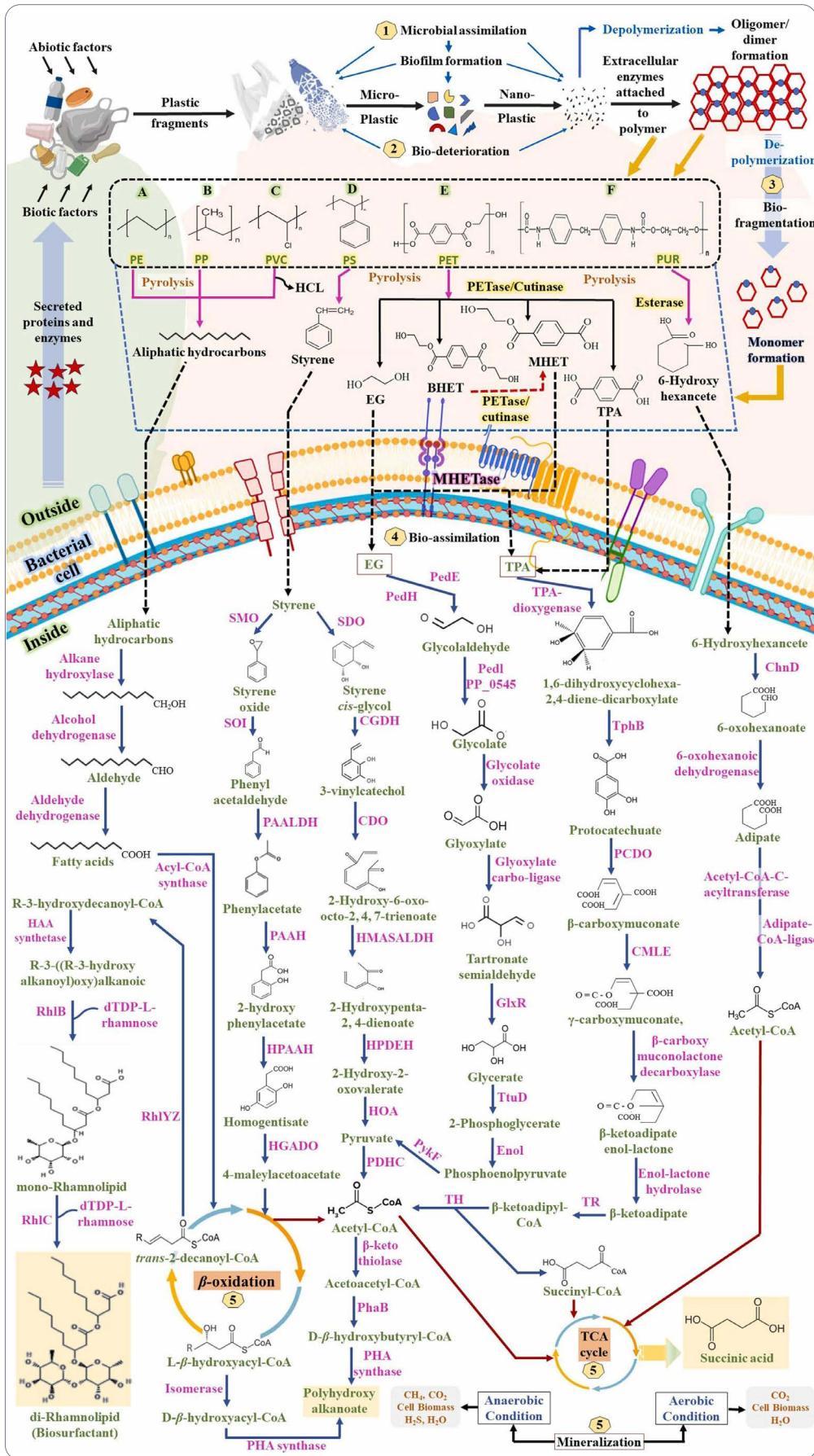


Image 126. Les déchets plastiques se dégradent en MNP en raison de divers facteurs abiotiques et biotiques

Source : Mandal, M., Roy, A., Popek, R. & Sarkar, A. *Micro- and nano- plastic degradation by bacterial enzymes: A solution to 'White Pollution'*. The Microbe 3, 100072 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.microb.2024.100072>

Ainsi, le passage à la technologie d'extraction d'eau de l'air améliorera considérablement la qualité de l'eau consommée, et, combinée à la technologie de réhabilitation microbienne, cela contribuera à une réduction significative de la pollution par les micro- et nano-plastiques dans l'environnement.

Dans les couches superficielles du sol, tout comme dans les réservoirs d'eau, la concentration de plastique restera élevée pendant un certain temps. Cependant, à mesure que l'eau pénètre plus profondément, un auto-nettoyage aura lieu (Image 127). Les microorganismes vivant dans le sol favoriseront la dégradation des petites particules de nano-plastiques.

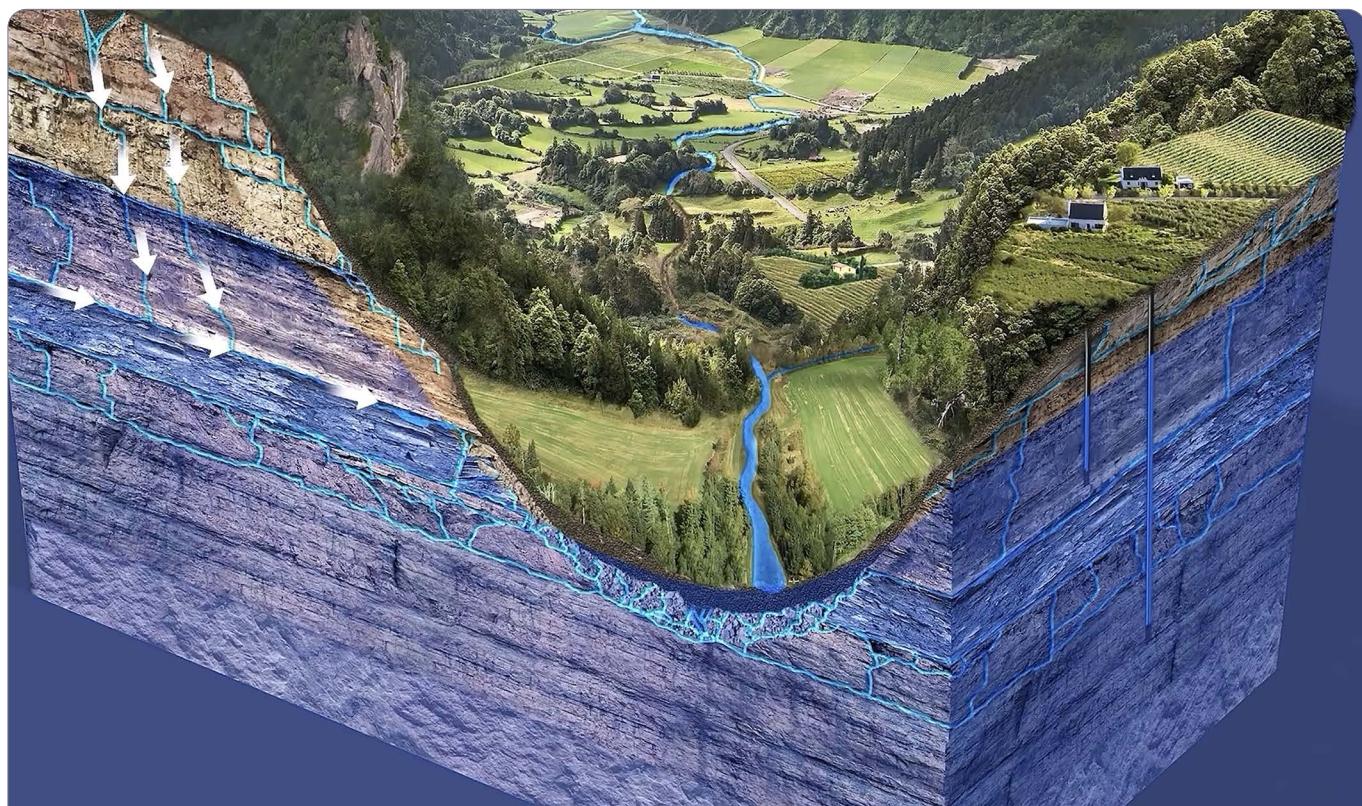


Image 127. L'image montre de manière schématique le processus de traitement biologique final de l'eau rejetée dans le sol à travers les formations géologiques. Les flèches indiquent le chemin des eaux usées traversant les couches du sol et des roches, où des microorganismes et des matériaux filtrants éliminent les polluants. Les couches du sol sont représentées par différentes couleurs : marron pour le sol, gris pour le sable et le gravier

Le fait d'augmenter le volume d'eau utilisée et filtrée par les stations d'épuration qui est ensuite déversée dans le sol, favorise la prolifération des microorganismes, y compris des bactéries, des champignons et des archées, qui jouent un rôle fondamental dans la formation d'un sol sain, le cycle des nutriments et la résilience des écosystèmes. Par la suite, l'eau purifiée s'infiltrera dans des couches plus profondes et retournera dans les océans.

L'installation de générateurs d'eau atmosphérique dans les régions désertiques, ainsi que le retour de l'eau usée dans le sol, semble être une solution prometteuse pour surmonter la crise de l'eau et lutter contre la désertification, car cela active des processus favorisant la restauration de la végétation

et des écosystèmes.³²¹ L'utilisation des GEA améliorera la qualité de vie des populations locales en résolvant le problème du manque d'eau potable.

Combinée à la réhabilitation microbienne, l'application des GEA pourrait devenir un pas important vers une gestion durable des ressources en eau et la restauration des terres dégradées.

Le passage complet aux GEA suppose l'utilisation de l'eau atmosphérique pour tous les besoins de la population, y compris domestiques, industriels et agricoles. L'introduction de cette technologie à l'échelle mondiale entraînera une évaporation plus intense, ce qui provoquera un refroidissement des océans et accélérera leur purification. De plus, la réduction de l'humidité excessive dans l'atmosphère par les GEA diminuera la quantité de précipitations extrêmes et de vents, ce qui pourrait atténuer les effets destructeurs des catastrophes naturelles (plus de détails dans le film « *L'eau à partir de l'air : la voie pour sauver l'humanité* »).

Les défis et les risques liés à l'utilisation des générateurs d'eau atmosphérique

Cependant, il existe un inconvénient à un déploiement massif des GEA. Le principal problème réside dans l'absence d'évaluation suffisante de leur impact direct sur la santé humaine. Bien que cette technologie puisse contribuer à la purification des eaux océaniques et améliorer la conductivité thermique du système climatique, son utilisation à grande échelle pourrait entraîner une augmentation significative de la concentration de microplastiques dans l'atmosphère. Le fonctionnement des GEA repose sur la condensation de l'humidité présente dans l'air, qui est ensuite régénérée par évaporation à partir des eaux océaniques. Ces eaux contenant de fortes concentrations de microplastiques et de nanoparticules plastiques, la vapeur qui s'en dégage peut transporter des particules plastiques ultrafines. En conséquence, dans les régions équipées de systèmes GEA - y compris les grandes zones métropolitaines - la concentration de nanoplastiques en suspension dans l'air pourrait atteindre des niveaux comparables à ceux observés dans les zones côtières. Cela constitue un risque sérieux : les nanoplastiques atmosphériques, une fois inhalés, peuvent s'accumuler dans le corps humain, y compris dans le cerveau.

Et c'est là le point crucial. Il est essentiel de comprendre que l'idée initiale d'utiliser les GEA pour contribuer à la purification des eaux océaniques a été proposée par des scientifiques de l'organisation ALLATRA il y a plus de vingt ans, à une époque où les concentrations atmosphériques de microplastiques étaient encore très faibles. À cette époque, la mise en œuvre de telles technologies aurait pu apporter des bénéfices environnementaux concrets sans présenter de risques sérieux pour la santé humaine. Or la situation a radicalement changé. Dans les conditions actuelles, un déploiement massif des GEA est plus susceptible d'aggraver les concentrations de micro- et nanoplastiques (MNP) dans l'air. Avec des niveaux déjà élevés, introduire davantage de MNP dans l'atmosphère via les GEA pourrait être fatal pour la santé humaine.

³²¹Islam, W., Zeng, F., Alotaibi, M. O. & Khan, K. A. *Unlocking the potential of soil microbes for sustainable desertification management*. Earth-Science Reviews 252, 104738 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104738>

Ainsi, une technologie autrefois perçue comme innovante et prometteuse a aujourd’hui perdu toute sa pertinence. En tant que société mondiale, nous avons manqué une fenêtre cruciale durant laquelle les GEA auraient pu être une solution viable. Dans le contexte des enjeux climatiques et de la pollution environnementale, le facteur temps est déterminant. Ce qui aurait pu préserver la santé de millions de personnes et véritablement aider à nettoyer la planète il y a deux décennies représente désormais un danger potentiel. Les GEA ne sont plus une technologie d’avenir - ils sont le rappel d’une occasion manquée. Dans les circonstances actuelles, la priorité doit être donnée au développement de méthodes capables de retirer les MNP de l’air et du corps humain. Plus que jamais, il est urgent de gagner du temps.

Approche scientifique innovante pour réduire la toxicité des micro- et nanoplastiques

Compte tenu des données présentées sur les effets multi-niveaux et cumulatifs des microplastiques, et en particulier des nano-plastiques, sur la santé humaine, il devient évident que la civilisation moderne fait face à un défi écologique et biomédical qui dépasse les conceptions traditionnelles de la pollution de l’environnement. Ce problème touche non seulement certaines biosphères, mais aussi la durabilité de la population de *Homo sapiens* à long terme.

À ce jour, presque tout le plastique produit – plus de 9 milliards de tonnes – continue de s’accumuler dans l’environnement, se fragmentant en micro- et nanoparticules démontrant une activité chimique et biologique élevée. Les micro- et nano-plastiques sont retrouvés dans le sol, l’eau, l’air, et dans toutes les principales catégories d’aliments – des légumes et fruits à la viande, le poisson, le miel, le lait et le sel. Cela indique une pénétration totale des particules plastiques dans les chaînes alimentaires, ce qui transforme considérablement la notion de « nourriture sûre » ou « saine ».

Le chemin par lequel les particules pénètrent dans l’organisme humain détermine en grande partie leur comportement biologique et leur distribution. Alors que le plastique ingéré via le tractus gastro-intestinal peut être partiellement éliminé, la voie inhalée présente un risque bien plus élevé. Le nanoplastique inhalé se dépose dans les tissus pulmonaires, franchit les barrières hémato-céphliques et peut atteindre directement le cerveau, où il peut s’accumuler sur une longue période. En outre, les mécanismes naturels de détoxication (foie, reins) ne sont pas efficaces pour reconnaître et éliminer ces particules.

La densité la plus élevée de microplastiques est observée près des réservoirs d'eau, des zones côtières et des forêts – en particulier dans des conditions d'humidité et de température élevées.

Dans ces paysages, le plastique reste plus longtemps, participe au transport par aérosols, provoque un stress oxydatif chez les plantes et réduit l'efficacité des processus photosynthétiques. Le repos sur la côte, autrefois considéré comme bénéfique pour la santé, est aujourd'hui associé à une charge inhalatoire supplémentaire : selon les estimations, le volume de plastique inhalé près des plans d'eau ouverts peut largement dépasser celui des environnements urbains.

Les études épidémiologiques montrent une corrélation constante entre les niveaux de pollution par les MNP et la prévalence des maladies chroniques non infectieuses, y compris l'hypertension, le diabète, les AVC, les troubles dépressifs et cognitifs. En raison de leur capacité à franchir les barrières biologiques et à s'accumuler dans divers tissus, y compris le cerveau, le cœur, les poumons et le placenta, les MNP exercent une toxicité au niveau moléculaire, cellulaire et organique. Le plastique, s'accumulant dans l'organisme, exerce des effets immunsupresseurs, inflammatoires et génotoxiques. Malgré les progrès dans la détection des risques, des mécanismes efficaces pour neutraliser et éliminer les MNP du corps humain n'ont pas encore été développés.

L'une des propriétés les plus critiques des nanoplastiques, qui a un impact biologique systémique, est leur capacité à retenir une charge électrostatique. Contrairement aux particules inertes, le nanoplastique interagit activement avec les surfaces cellulaires, les protéines, les récepteurs et même le matériel génétique, formant des liaisons stables au niveau moléculaire. Non seulement cette propriété renforce-t-elle la pénétration des particules de nanoplastique à travers les barrières biologiques, y compris la barrière hémato-encéphalique, mais elle complique également leur élimination, favorisant leur maintien à long terme dans les tissus, en particulier dans le cerveau. L'interaction électrostatique initie une cascade de perturbations cellulaires, y compris la dépolarisation des membranes, des dysfonctionnements mitochondriaux, le stress oxydatif et l'apoptose, ce qui augmente considérablement la toxicité même à de faibles concentrations de nanoplastiques.

Les auteurs de ce rapport émettent l'hypothèse que la solution à ce problème – la neutralisation de ou le blindage contre la charge électrostatique des micro- et nanoplastiques – pourrait constituer une avancée fondamentale, capable de réduire considérablement l'activité biologique des nanoplastiques et de ralentir leur accumulation dans les organes critiques. Selon les estimations des auteurs du rapport, le blindage ou la neutralisation de la charge électrostatique pourrait réduire le danger potentiel des MNP d'au moins 50 %, ce qui rend cette voie de recherche cruciale. Cela donnerait à la communauté scientifique un répit nécessaire pour développer des approches plus complexes pour le diagnostic, la détoxication et la prévention des effets des MNP. Dans ce domaine, les recherches en bio-physics, en nanomatériaux et en toxicologie moléculaire prennent une importance prioritaire. Tout retard dans ce domaine pourrait accélérer les processus de dégradation.

Parallèlement aux solutions biomédicales, une stratégie scientifiquement fondée pour la gestion sûre des déchets plastiques est nécessaire. Le système actuel de recyclage ne parvient pas à empêcher la fragmentation continue et l'entrée de microplastiques dans la biosphère. Dans un contexte de mondialisation, il est nécessaire de développer une plateforme technologique internationale pour la création, l'introduction et l'extension de méthodes sûres pour la collecte et le recyclage du plastique. Ces mesures ne pourront être mises en œuvre qu'en présence de soutien institutionnel, de régulations transfrontalières et de diplomatie scientifique.

Une attention particulière doit être accordée à l'augmentation de la sensibilisation de la communauté scientifique, des professionnels de la santé et du grand public. À ce jour, la majorité des gens ne réalisent pas l'ampleur de l'impact des micro- et nanoplastiques (MNP) et continuent de contribuer inconsciemment à leur propagation.

Ainsi, le problème des micro- et nanoplastiques ne constitue plus une menace potentielle, mais s'est transformé en un facteur de risque systémique. Ce domaine nécessite une attention prioritaire de la part de la communauté scientifique et des autorités sanitaires, une systématisation des données, l'élaboration des normes d'évaluation des risques, ainsi que l'élargissement de la coopération intergouvernementale et internationale. Pour élaborer des solutions efficaces garantissant la sécurité biologique à court et à long terme, une approche interdisciplinaire, une reconnaissance institutionnelle et une consolidation des efforts internationaux sont nécessaires.

FACTEUR X. L'IMPACT DES MICRO- ET NANOPLASTIQUES SUR LA DYNAMIQUE DU CYCLE DES CATASTROPHES NATURELLES

Comme mentionné dans le chapitre « L'impact des micro- et nanoplastiques sur le climat », les particules de micro- et nanoplastiques réduisent la fonction conductrice de chaleur des eaux océaniques, ce qui entraîne l'accumulation de chaleur dans l'océan et, par conséquent, une augmentation critique des températures océaniques. Cependant, les micro- et nanoplastiques eux-mêmes ne sont pas la source de la chaleur de l'océan.

Depuis le printemps 2023, et pendant plus d'un an, la température moyenne de la surface de l'océan mondial a battu des records historiques chaque jour, ce qui constitue un phénomène sans précédent dans l'histoire des observations (Image 128). Les scientifiques du monde entier expriment de vives inquiétudes face à cette hausse anormale.

66

Le Dr Brian McNoldy, chercheur principal à l'École d'océanologie de l'Université de Miami, souligne : « ***Il ne s'agit pas seulement de températures océaniques record qui sont observées depuis toute une année, mais il est important de noter à quel point ces nouveaux records surpassent les précédents. Les valeurs actuelles ne sont même pas proches des anciens records*** ».³²²

66

Cette inquiétude est partagée par le Dr Rob Larter, géophysicien marin britannique : « ***Cela suscite vraiment de l'inquiétude, d'autant plus que je n'entends aucun scientifique donner une explication convaincante pour expliquer pourquoi un tel écart est observé. Mais il semble maintenant que tout évolue beaucoup plus rapidement et de manière plus forte que ce que nous attendions*** ».³²³

Selon les recherches climatiques, les modèles actuels prévoient une augmentation progressive de la température de la surface de l'océan, mais la vitesse observée de ce processus dépasse largement toutes les prévisions. Les scientifiques estiment que le changement climatique anthropique joue un rôle, mais cela ne peut pas expliquer entièrement le phénomène observé.

³²²NBC News. '12 months of record ocean heat has scientists puzzled and concerned'. (2024)
<https://www.nbcnews.com/science/environment/oceans-record-hot-rca143179>

³²³The New York Times. Scientists are freaking out about ocean temperatures. (2024)
<https://www.nytimes.com/2024/02/27/climate/scientists-are-freaking-out-about-ocean-temperatures.html>. (Accessed May 1, 2025).

Le professeur John Abraham de l'Université de Saint-Thomas, spécialisé dans l'étude de la température de l'océan, a émis l'hypothèse qu'il existe des facteurs jusqu'ici inconnus qui pourraient influencer les changements à long terme de la température de la surface de l'océan³²². Il a noté que ces facteurs n'avaient pas été pris en compte dans les prévisions précédentes. Les auteurs de ce rapport émettent l'hypothèse de l'existence d'un « facteur X » qui pourrait être responsable du réchauffement supplémentaire de l'océan et de l'atmosphère.

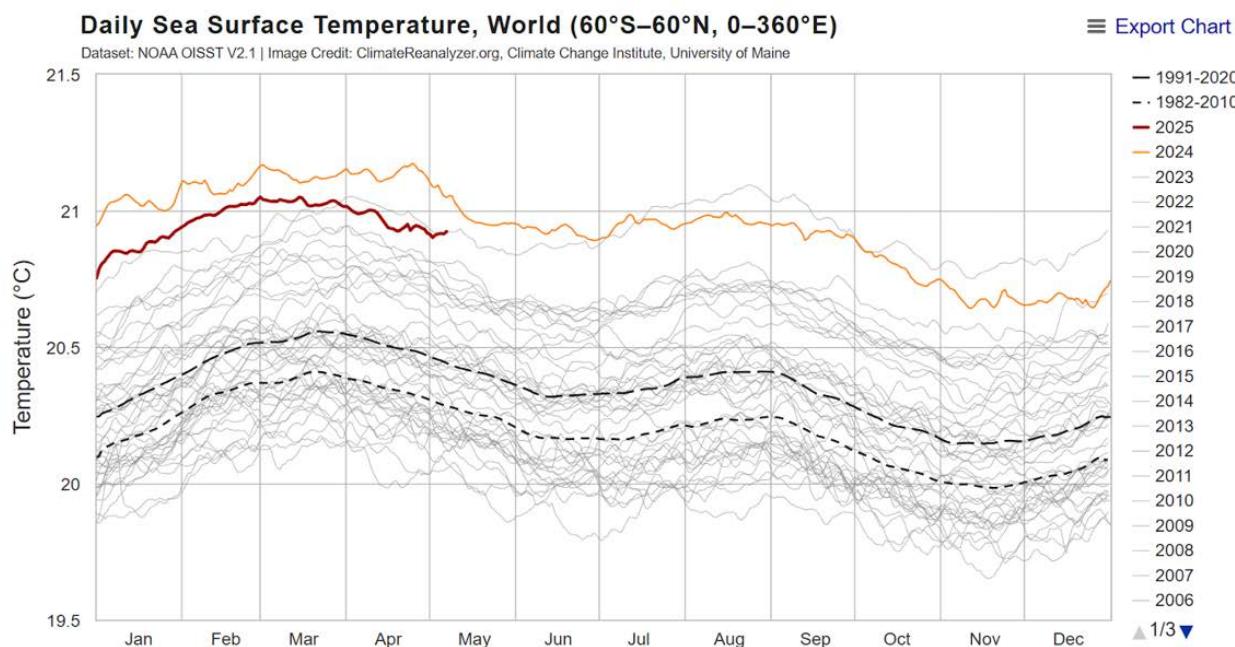


Image 128. Température moyenne quotidienne de la surface de l'océan, 1981-2025

Source des données : Dataset NOAA OISST V2.1 | Source de l'image : [ClimateReanalyzer.org](https://climatereanalyzer.org/clim/sst_daily/?dm_id=world2), Climate Change Institute, University of Maine, Dataset NOAA OISST. https://climatereanalyzer.org/clim/sst_daily/?dm_id=world2

³²²NBC News. '12 months of record ocean heat has scientists puzzled and concerned'. (2024)
<https://www.nbcnews.com/science/environment/oceans-record-hot-rcna143179>

Le microplastique et le nanoplastique dans l'océan, peuvent-ils être un facteur X inexploré ?

L'analyse de la possibilité que les micro- et nanoplastiques soient la principale cause du réchauffement actuel des océans met en évidence une contradiction majeure. Les nanoplastiques dégradent effectivement la capacité des océans à dissiper la chaleur. Cependant, ils ne génèrent pas d'énergie thermique – ils empêchent simplement la chaleur de s'échapper de l'océan.

Au cours des 60 dernières années, les profondeurs moyennes des océans se sont réchauffées 15 fois plus vite que durant les 10 000 années précédentes,^{324, 325} et ce processus ne fait qu'accélérer. Cette progression s'intensifie chaque année de plus en plus rapidement. Il faut une quantité colossale d'énergie pour augmenter la température à de telles profondeurs, là où les rayons du soleil ne pénètrent plus.^{326, 327}

De leur côté, les entrées massives de micro- et nanoplastiques dans l'océan ont commencé relativement récemment – il y a environ 30 ans, tandis que l'accélération du réchauffement des profondeurs océaniques est observée depuis les 60 dernières années. Ainsi, le plastique ne peut pas expliquer la tendance à long terme et croissante du réchauffement des couches profondes de l'océan, qui a commencé bien avant l'apparition importante de ces polluants dans l'océan.

La radiation solaire ne peut pas non plus expliquer ce réchauffement, car les rayons du soleil pénètrent dans les eaux jusqu'à une profondeur de 200 m. L'eau peut être réchauffée par le Soleil au maximum jusqu'à 700 m en raison du mélange des eaux.³²⁸

Pour réchauffer les couches profondes, là où les rayons solaires ne pénètrent pas, une quantité d'énergie énorme est nécessaire. Cela signifie que la chaleur accumulée dans l'océan doit provenir d'une autre source, et la présence de nanoplastiques empêche cette chaleur de s'échapper de l'intérieur de l'océan.

Étant donné que le réchauffement dû au soleil n'explique pas les causes de la croissance exponentielle des températures océaniques, l'hypothèse d'une source de chaleur supplémentaire dans différentes parties de l'océan a été avancée.

Distribution verticale des anomalies de température

L'analyse des données du système Argo sur les fluctuations globales de température à différentes profondeurs au cours des deux dernières décennies a révélé un certain nombre d'anomalies de

³²⁴Rosenthal, Y. et al. Pacific Ocean Heat Content During the Past 10,000 Years. *Science* 342, 617–621 (2013). <https://doi.org/10.1126/science.1240837>

³²⁵Columbia Climate School. 'Is Global Heating Hiding Out in the Oceans?'. (2013) <https://www.earth.columbia.edu/articles/view/3130> (Accessed May 10, 2025).

³²⁶NOAA Ocean Service. 'How far does light travel in the ocean?'. (n.d.) https://oceanservice.noaa.gov/facts/light_travel.html (Accessed May 10, 2025).

³²⁷NOAA Ocean Exploration. 'Marine Life'. (n.d.) <https://oceanexplorer.noaa.gov/explainers/marine-life.html> (Accessed May 10, 2025).

³²⁸Climate.gov. 'The role of the ocean in tempering global warming'. (2014)

<https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/role-ocean-tempering-global-warming> (Accessed May 10, 2025).

température qui ne sont pas compatibles avec le modèle traditionnel de transfert de chaleur descendant de la surface vers les couches profondes de l'océan.^{329, 330}

Des cas statistiquement significatifs d'inversion du gradient thermique ont été observés, où des masses d'eau plus chaudes se trouvent sous des couches superficielles relativement froides (Image 129). Une telle stratification de température est physiquement impossible avec un transfert de chaleur uniquement descendant, car, selon les lois de la physique, l'énergie thermique ne peut pas traverser une couche froide intermédiaire de haut en bas.

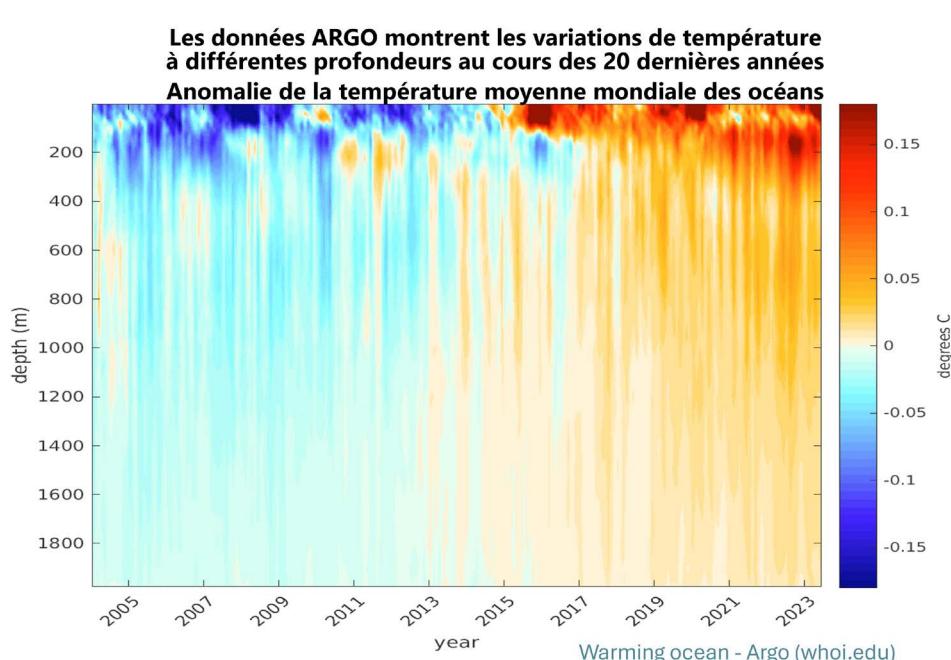


Image 129. Anomalies globales de température de l'océan à des profondeurs de 0 à 1 900 m depuis 2004

Source : Argo <https://www2.whoi.edu/site/argo/impacts/warming-ocean/>

De nouvelles recherches menées par des scientifiques de l'Université océanologique de Chine³³¹ confirment la présence d'anomalies thermiques dans les épaisseurs d'eau, qui ne se manifestent pas à la surface de l'océan. Les études ont prouvé qu'un tiers des vagues de chaleur marines ne se manifestent pas à la surface de l'océan, et environ la moitié d'elles ne se manifestent à aucun des stades de leur cycle de vie. Le volume annuel de ces vagues thermiques sous-marines a considérablement augmenté en raison du réchauffement de l'océan au cours des trois dernières décennies. Le fait qu'une grande partie des vagues de chaleur marines ne soit pas observée à la surface de l'océan, indique clairement qu'elles ne peuvent pas être causées par la chaleur provenant de l'atmosphère.

³²⁹Johnson, Gregory C., et al. "Argo-Two Decades: Global Oceanography, Revolutionized." *Annual Review of Marine Science*, vol. 14, 2022, pp. 379–403. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-022521-102008>.

³³⁰Wong, Annie P. S., et al. "Argo Data 1999–2019: Two Million Temperature-Salinity Profiles and Subsurface Velocity Observations From a Global Array of Profiling Floats." *Frontiers in Marine Science*, vol. 7, 2020, article 700. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00700>.

³³¹Sun, D., Li, F., Jing, Z., Hu, S., & Zhang, B. (2023). Frequent marine heatwaves hidden below the surface of the global ocean. *Nature Geoscience*, 16(12), 1099–1104. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01325-w>

L'étude des sources de chaleur au fond de l'océan

Les études et la surveillance régulière de la température au fond de l'océan sont actuellement extrêmement rares et limitées. Pendant longtemps, la science n'a pas cherché à suivre les changements spécifiquement à de telles profondeurs. Les systèmes de surveillance modernes, tels que le réseau de bouées ARGO, permettent de collecter des données sur seulement 0,03 % de la surface de l'océan, et la plupart des bouées ne plongent qu'à la moitié de la profondeur moyenne, sans atteindre le fond océanique.³³²

L'humanité a réellement étudié seulement environ 3 à 3,5 % du plancher océanique.³³³ Cela est dû à plusieurs raisons importantes. Tout d'abord, la majeure partie de l'océan mondial se trouve à des profondeurs de 3 000 à 6 000 m. La création d'appareils sous-marins capables de supporter la pression colossale à des profondeurs allant jusqu'à 6 000 m nécessite des ressources financières et technologiques énormes. Ensuite, les expéditions elles-mêmes sont extrêmement complexes et coûteuses : seulement huit appareils spécialisés ont été construits pour de telles recherches au cours de l'histoire. C'est pourquoi, dans certains aspects, nous avons exploré l'espace cosmique plus en détail que les coins les plus reculés de l'océan mondial.

Cependant, il devient de plus en plus évident que les processus géologiques au fond de l'océan peuvent jouer un rôle crucial dans le changement climatique et l'équilibre thermique des océans. Le fond océanique abrite des millions d'objets géologiques uniques – volcans, failles et sources hydrothermales, qui possèdent une énergie considérable. Cependant, en raison de leur inaccessibilité et du manque de surveillance, l'étendue de leur influence potentielle reste en grande partie un mystère pour la science.

Malgré cela, des recherches sur le plancher océanique sont menées, et plusieurs d'entre elles indiquent un réchauffement des eaux océaniques au fond de l'océan.

Ainsi, **dans deux zones profondes du bassin argentin**,³³⁴ à plus de 4 500 m de profondeur, des tendances importantes de réchauffement ont été observées : $0,02^{\circ}\text{C} \pm 0,01^{\circ}\text{C}$ par décennie, entre 2009 et 2019. Une quantité d'énergie colossale est nécessaire pour faire chauffer une telle quantité d'eau froide au fond.

Près des côtes de l'Antarctique de l'Ouest, un réchauffement abnormal des eaux profondes de la mer de Weddell a lieu,³³⁵ tandis que les 700 m supérieurs de l'eau ne se réchauffent pratiquement pas. Dans les zones plus profondes, on observe une élévation constante de la température. D'un côté, la mer de Weddell est entourée par la faille de l'Antarctique de l'Ouest, et de l'autre côté, elle est bordée par une crête volcanique sous-marine avec les îles Sandwich du Sud.

³³²Argo Program. 'Mission'. (n.d.) <https://argo.ucsd.edu/about/mission/> (Accessed May 10, 2025).

³³³Bell, Katherine L. C., et al. "How Little We've Seen: A Visual Coverage Estimate of the Deep Seafloor." *Science Advances*, vol. 11, no. 19, 2025, eadp8602. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adp8602>.

³³⁴Meinen, C. S., Perez, R. C., Dong, S., Piola, A. R. & Campos, E. Observed Ocean Bottom Temperature Variability at Four Sites in the Northwestern Argentine Basin: Evidence of Decadal Deep/Abyssal Warming Amidst Hourly to Interannual Variability During 2009–2019. *Geophysical Research Letters* 47, e2020GL089093 (2020). <https://doi.org/10.1029/2020GL089093>

³³⁵Strass, V. H., Rohardt, G., Kanzow, T., Hoppema, M. & Boebel, O. Multidecadal warming and density loss in the Deep Weddell Sea, Antarctica. *Journal of Climate* 33, 9863–9881 (2020). <https://doi.org/10.1175/jcli-d-20-0271.1>

Le rôle du flux de chaleur géothermique, des processus tectoniques et des éruptions volcaniques au fond de l'océan

Dans le contexte des anomalies de réchauffement observées dans les couches profondes, où l'influence de l'atmosphère est minimale, il est logique de considérer le flux géothermique provenant des profondeurs de la Terre comme une source potentielle de chaleur supplémentaire. Traditionnellement, dans les modèles climatiques, le flux géothermique venant du bas est considéré comme constant et d'environ $0,09 \text{ W/m}^2$ (ou 90 mW/m^2),³³⁶ ce qui est plusieurs ordres de grandeur inférieur au flux solaire.^{337,338}

Cependant, le volume croissant de données scientifiques pointe vers l'importance de cette source de chaleur sous-estimée. Des recherches géothermiques à grande échelle ont montré que l'énergie du flux thermique qui s'échappe par le fond de l'océan dépend de l'âge de la croûte océanique : elle est maximale dans les zones jeunes de divergence et minimale dans les anciens bassins océaniques³³⁹ (Image. 130). De telles anomalies locales peuvent influencer la structure verticale de la température de l'eau, affaiblir la thermocline et favoriser le mélange des masses d'eau, ce qui affecte la circulation, la productivité biologique et même la stabilité des glaciers dans les régions subpolaires.

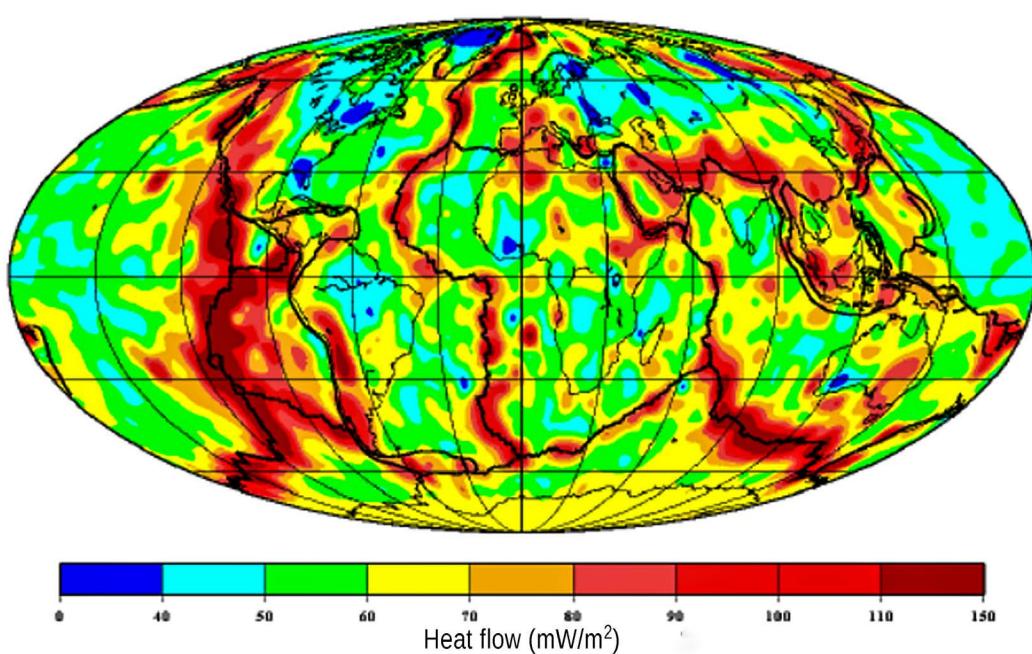


Image 130. Une représentation mondiale du flux de chaleur

Illustration extraite de l'article : Vieira F., Hamza V. M. *Global Heat Flow: New Estimates Using Digital Maps and GIS Techniques* // International Journal of Terrestrial Heat Flow and Applied Geothermics. 2018. Vol. 1, n. 1. pp. 6–13.

³³⁶Pollack, H. N., Hurter, S. J. & Johnson, J. R. Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set. Rev. Geophys. 31, 267–280 (1993).

<https://doi.org/10.1029/93RG01249>

³³⁷Kopp, G. & Lean, J. L. A New, Lower Value of Total Solar Irradiance: Evidence and Climate Significance. Geophysical Research Letters 38, L01706 (2011).

<https://doi.org/10.1029/2010GL045777>

³³⁸World Energy Council. World Energy Resources: Solar 2013. (2013) <https://www.worldenergy.org/publications> (Accessed May 10, 2025).

³³⁹Khutorskoy, M. D., & Polyak, B. G. (2014). Reflection of contrasting geodynamic settings in the thermal field. Georesources, (2), 24–43.

Le flux de chaleur géothermique est la quantité d'énergie thermique qui s'échappe des couches internes de la Terre par unité de surface par unité de temps, mesurée en milliwatts par mètre carré (mW/m²).

Alors que le flux thermique moyen pour les continents est de 40 à 60 mW/m² et pour le fond océanique d'environ 100 mW/m², certaines régions enregistrent des valeurs plusieurs fois supérieures à ces chiffres. Les valeurs les plus extrêmes du flux thermique géothermique ont été trouvées dans les zones géologiquement et volcaniquement actives : par exemple, dans les zones des dorsales médio-océaniques et dans les zones de rifts actifs, où le flux peut dépasser 200 à 1 000 mW/m².³⁴⁰

Un flux thermique particulièrement élevé est observé dans les zones des champs hydrothermaux – des zones où des fluides chauds remontent à la surface du fond océanique, où la température de l'eau peut atteindre 350–400 °C. Ces systèmes créent des écosystèmes uniques et provoquent des anomalies locales du flux thermique, influençant de manière significative le régime thermique des eaux profondes.

La principale zone de flux thermique géothermique bien étudiée sur le fond océanique est celle des dorsales médio-océaniques – des zones de divergence des plaques lithosphériques où une nouvelle croûte océanique se forme activement. Ce système global de chaînes sous-marines s'étend sur environ 60 000 km,³⁴¹ en ceinturant la Terre telle une couture sur une balle de baseball. Les dorsales médio-océaniques se caractérisent par une concentration élevée de sources hydrothermales, de volcans sous-marins et de failles actives, par lesquelles une quantité importante d'énergie thermique provenant du manteau terrestre atteint l'océan.³⁴²

Le flux thermique dans ces zones est de 10 à 100 fois supérieur à la moyenne des autres parties du fond océanique,³³² ce qui en fait des zones clés d'échange thermique entre les couches profondes de la Terre et l'océan mondial.

Le professeur de l'université du Maryland, Arthur Viterito, a établi une corrélation entre l'augmentation du nombre de tremblements de terre dans le fond océanique le long des dorsales médio-océaniques depuis 1995 (Image 131).³⁴³ Avec un coefficient de corrélation de 0,7, cette augmentation coïncide avec l'augmentation des températures mondiales. De plus, l'augmentation de la température survient avec un retard de deux ans après une intensification de l'activité sismique. Cette augmentation de l'activité sismique dans ces zones est liée à la remontée du magma formant la nouvelle croûte océanique.

³⁴⁰Polyak, B. G., & Khutorskoy, M. D. (2018). Heat flow from the Earth's interior as an indicator of deep-seated processes. *Georesources*, 20(4), Part 2, 366–376.
<https://doi.org/10.18599/grs.2018.4.366-376>

³⁴¹LaFemina, P. C. Plate Tectonics and Volcanism. in *The Encyclopedia of Volcanoes* (ed. Sigurdsson, H.) 65–92 (Academic Press, 2015).
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00003-1>

³⁴²Baker, E. T. & German, C. R. On the Global Distribution of Hydrothermal Vent Fields. in *Mid-Ocean Ridges: Hydrothermal Interactions Between the Lithosphere and Oceans* (eds German, C. R., Lin, J. & Parson, L. M.) 245–266 (American Geophysical Union, 2004).

³⁴³Viterito, A. 1995: An Important Inflection Point in Recent Geophysical History. *Int. J. Environ. Sci. Nat. Res.* 29, 556271 (2022).
<https://doi.org/10.19080/IJESNR.2022.29.556271>

Augmentation du nombre de tremblements de terre du plancher océanique le long des dorsales médio-océaniques

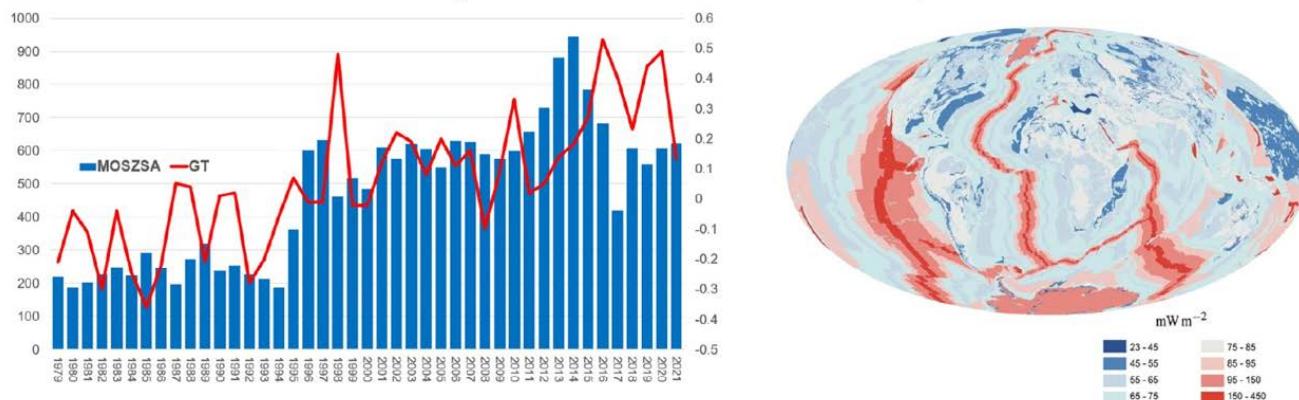


Image 131. Augmentation simultanée du nombre de tremblements de magnitude 4,0 à 6,0 dans le fond océanique et des températures mondiales de l'atmosphère

Source : Viterito, A. (2022). "1995: An Important Inflection Point in Recent Geophysical History." International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources, 29(5). <https://doi.org/10.19080/ijesnr.2022.29.556271>

Bien que les mesures directes des volumes de magma en remontée fassent défaut, le réseau mondial de surveillance sismique permet d'estimer l'ampleur de ces processus de manière indirecte, en se basant sur le nombre et l'intensité des événements sismiques, qui augmentent indépendamment du nombre de données sismiques. Selon l'hypothèse du Dr Viterito, l'activité sismique et volcanique le long des dorsales médio-océaniques conduit à un accroissement des émissions hydrothermales et au réchauffement des eaux, ce qui entraîne à son tour des émissions de gaz à effet de serre et le réchauffement de l'atmosphère. Ainsi, le Dr Viterito démontre que les océans se réchauffent non seulement par le haut, mais aussi par le bas – en raison des processus géologiques.

Le volcanisme sous-marin peut également jouer un rôle important dans la formation du régime thermique du plancher océanique. Les données récentes indiquent qu'environ 75 % de toutes les éruptions volcaniques terrestres se produisent sous l'eau.³⁴⁴ On pensait auparavant que les éruptions sous-marines se produisaient de manière calme, avec des coulées de lave, et que des éruptions explosives étaient impossibles en raison de la pression de la colonne d'eau. Il était donc supposé que les volcans sous-marins ne pouvaient pas réchauffer les masses d'eau – la lave en fusion se solidifiant presque instantanément. Cependant, des recherches récentes ont modifié la compréhension du mécanisme des éruptions sous-marines.

La pression du magma varie de 10 000 à 30 000 bars, tandis que la pression de la colonne d'eau dans les parties les plus profondes de l'océan ne dépasse pas 1 000 bars.

Lors de la percée du magma, l'eau bout instantanément, avec la décomposition des molécules H_2O , formant une cavité gazeuse et aqueuse avec une pression de plusieurs centaines ou plusieurs milliers de bars,³⁴⁵ ce qui conduit à des éruptions explosives puissantes.

³⁴⁴Crisp, J. A. Rates of magma emplacement and volcanic output. *J. Volc. Geotherm. Res.* 20, 177–211 (1984). [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(84\)90039-8](https://doi.org/10.1016/0377-0273(84)90039-8)

³⁴⁵Lyons, J.J., Haney, M.M., Fee, D. et al. Infrasound from giant bubbles during explosive submarine eruptions. *Nat. Geosci.* 12, 952–958 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0461-0>

Ces éruptions sont accompagnées de projections de téphra et d'hydrothermes – d'énormes jets d'eau superchauffée dont le volume peut atteindre l'équivalent de 40 millions de piscines olympiques. De telles émissions peuvent perturber l'équilibre thermique de l'océan non seulement de manière locale, mais aussi à l'échelle mondiale.

Des recherches de l'Université de Leeds ont révélé des champs de téphra volcaniques d'une longueur kilométrique au fond de l'océan Pacifique³⁴⁶ ce qui confirme des éruptions sous-marines explosives et puissantes. Une telle éruption peut libérer une puissance thermique d'environ 1 térawatt, soit deux fois la consommation énergétique des États-Unis.

66

L'impact des éruptions explosives sur le réchauffement de l'océan est confirmé par le professeur Bernd Zimanowski de l'Université de Julius-Maximilian en Bavière :³⁴⁷

« Lors des éruptions sous-marines de lave, la chaleur de la lave est transférée à l'eau assez lentement. Cependant, lors des éruptions explosives, le magma se décompose en petites particules. Cela peut créer des impulsions thermiques si fortes que les courants thermiques d'équilibre dans les océans soient perturbés localement, voire globalement ». ³⁴⁸

D'après les évaluations actuelles, il y aurait entre 100 000 et 10 millions de formations sous-marines géothermiquement actives,^{349, 350} ce qui suggère que l'impact de l'activité hydrothermale sur le bilan thermique de l'océan est probablement très sous-estimé. Les éruptions explosives du magma entraînent la formation d'impulsions thermiques puissantes, capables de perturber les courants thermiques dans les océans de manière locale. Cependant, compte tenu de la taille de l'océan, même ces puissantes éruptions sous-marines ne suffisent pas à le réchauffer. Les volcans ne sont pas présents partout et leurs éruptions sont épisodiques, leur énergie étant insuffisante pour réchauffer l'ensemble de l'océan. Toutefois, cette énergie pourrait être suffisante pour provoquer des vagues de chaleur locales dans l'océan.

Un exemple particulier de telles anomalies thermiques locales sont les vagues de chaleur marines, c'est-à-dire des zones de l'océan où l'eau reste chauffée de manière anormale pendant une période prolongée. Elles sont aussi appelées « blobs ». Ce sont de gigantesques zones d'eau de surface avec des températures anormalement élevées. Depuis 1995, le nombre de blobs a considérablement augmenté³⁵¹ et ils apparaissent plus fréquemment dans différentes parties de l'océan mondial, notamment au large des côtes de la Nouvelle-Zélande, du sud-ouest de l'Afrique et dans le sud de l'océan Indien.

³⁴⁶Pegler, S.S., Ferguson, D.J. Rapid heat discharge during deep-sea eruptions generates megaplumes and disperses tephra. Nat Commun 12, 2292 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22439-y>

³⁴⁷Dürig, T., White, J.D.L., Murch, A.P. et al. Deep-sea eruptions boosted by induced fuel-coolant explosions. Nat. Geosci. 13, 498–503 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0603-4>

³⁴⁸University of Würzburg. How Volcanoes Explode in the Deep Sea. (2020) <https://www.uni-wuerzburg.de/en/news-and-events/news/detail/news/how-volcanoes-explode-in-the-deep-sea> (accessed 1 May 2025).

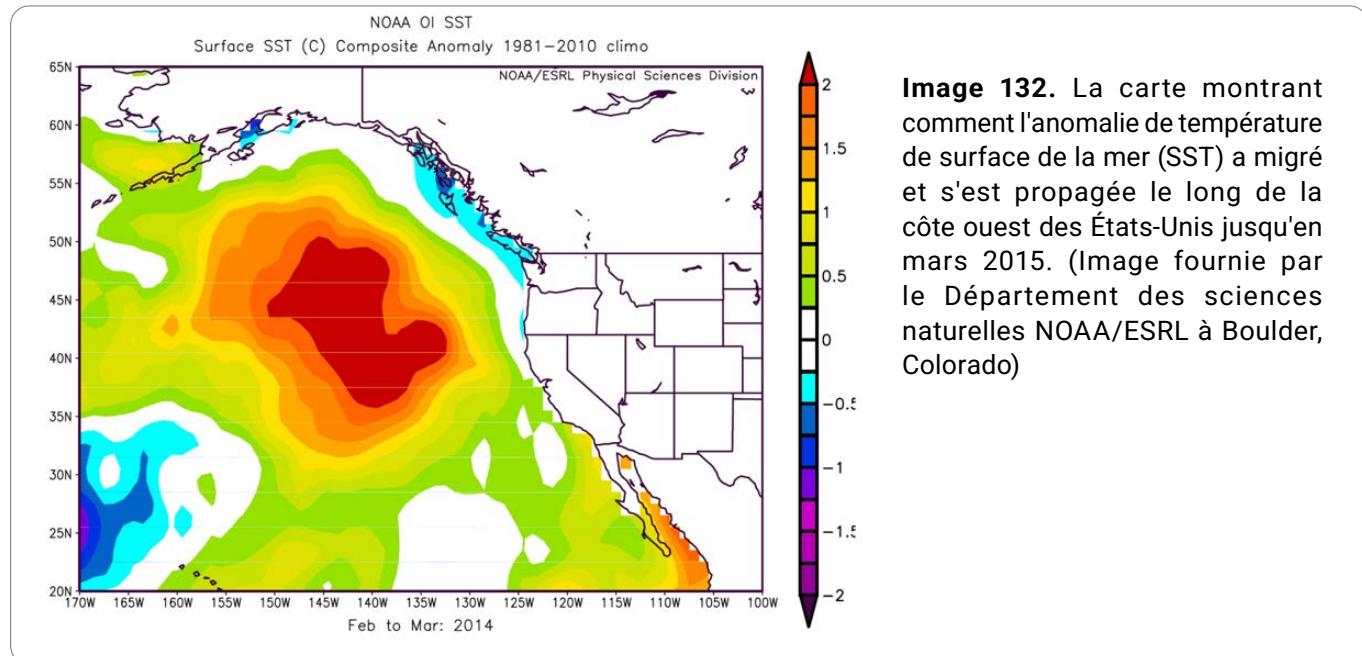
³⁴⁹Baker, E. T. et al. How many vent fields? New estimates of vent field populations on ocean ridges from precise mapping of hydrothermal discharge locations. Earth Planet. Sci. Lett. 449, 186–196 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.05.031>

³⁵⁰Science News Explores. Seafloor hosts surprising number of deep-sea vents. (2016) <https://www.sciencedaily.com/article/seafloor-hosts-surprising-number-deep-sea-vents> (Accessed May 10, 2025).

³⁵¹Laufkötter, C., Zscheischler, J. & Frölicher, T. L. High-impact marine heatwaves attributable to human-induced global warming. Science 369, 1621–1625 (2020). <https://doi.org/10.1126/science.aba0690>

L'un des blobs les plus connus et les plus vastes s'est formé dans la baie d'Alaska en 2013 et s'est rapidement propagé dans le Pacifique. Il avait une superficie de plus de 4 millions de km² (soit plus grande que l'Inde) et la température de l'eau dans certaines zones a dépassé la moyenne de 5-6 °C (Image 132). Ce blob s'est déplacé dans l'océan de l'Alaska jusqu'au Mexique pendant trois ans, jusqu'en 2016. Ce phénomène a eu un impact négatif sur l'écosystème marin et le climat de la région.

La cause probable de la formation du blob était le volcanisme actif au large des côtes de l'Alaska ainsi que le panache magmatique de Cobb,³⁵² qui ont réchauffé l'eau au fond de l'océan, laquelle est ensuite remontée à la surface en un volume aussi immense.



En décembre 2019, un blob est apparu à l'est de la Nouvelle-Zélande, dans le sud de l'océan Pacifique, et dont la température était, certains jours, plus élevée que la moyenne de 6 °C. Le blob couvrait une superficie de plus de 1 000 000 km², soit l'équivalent de 1,5 fois la superficie du Texas ou 4 fois celle de la Nouvelle-Zélande (Image 133). Selon les rapports, il s'agissait alors du plus grand blob jamais observé dans l'océan mondial. De plus, ce blob est devenu le deuxième plus grand événement de toute l'histoire des observations dans cette région.

³⁵²Chadwick, J., Keller, R., Kamenov, G., Yogodzinski, G. & Lupton, J. The Cobb hot spot: HIMU-DMM mixing and melting controlled by a progressively thinning lithospheric lid. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 15, 3107–3122 (2014). <https://doi.org/10.1002/2014gc005334>

66

James Renwick, professeur au département de géographie, écologie et sciences de la Terre de l'Université Victoria à Wellington, a noté que « **c'est la plus grande zone de réchauffement anormal de la planète. La température de l'eau y est normalement autour de 15 °C, mais elle est actuellement proche de 20 °C** ».³⁵³

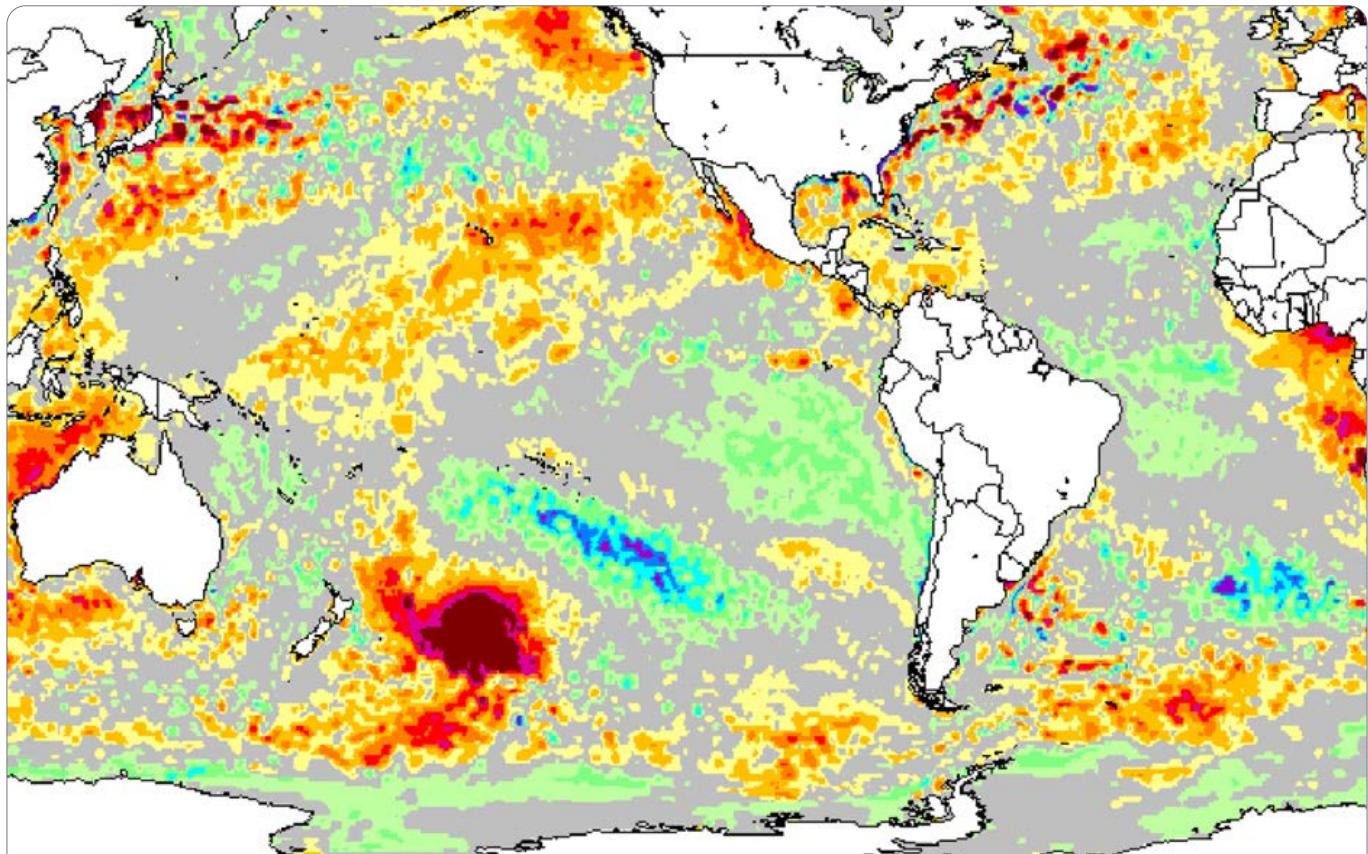


Image 133. L'anomalie de température de surface de la mer dans le sud de l'océan Pacifique, le 25 décembre 2019

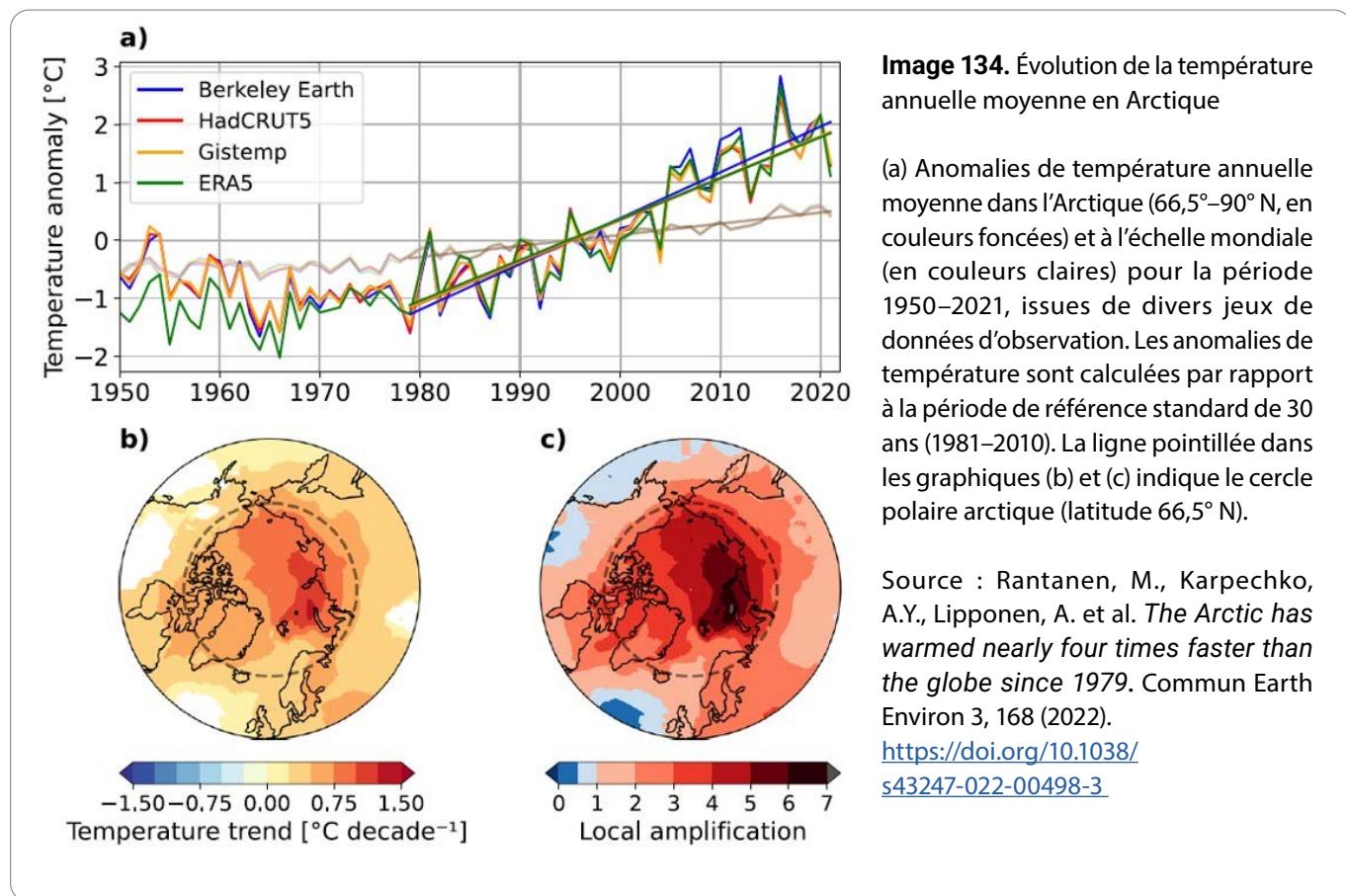
Source : The Guardian. Hot blob: vast patch of warm water off New Zealand coast puzzles scientists. (2019) <https://www.theguardian.com/world/2019/dec/27/hot-blob-vast-and-unusual-patch-of-warm-water-off-new-zealand-coast-puzzles-scientists> (consulté le 1er mai 2025)

La formation de ce blob serait probablement due à l'activité de l'ancien plateau volcanique situé au large des côtes de la Nouvelle-Zélande.³⁵⁴

³⁵³The Guardian. Hot blob: vast patch of warm water off New Zealand coast puzzles scientists. (2019) <https://www.theguardian.com/world/2019/dec/27/hot-blob-vast-and-unusual-patch-of-warm-water-off-new-zealand-coast-puzzles-scientists> (Accessed May 10, 2025).

³⁵⁴Gase, A. et al. Subducting volcaniclastic-rich upper crust supplies fluids for shallow megathrust and slow slip. Sci. Adv. 9, eadh0150 (2023). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh0150>

Un autre exemple notable de l'impact sur le réchauffement de l'océan de la chaleur géothermique venant des processus magmatiques, ce sont des anomalies de réchauffement observées dans les mers arctiques le long des côtes sibériennes. Selon des recherches menées en 2022, l'Arctique sibérien se réchauffe presque quatre fois plus vite que le reste de la planète, un rapport bien plus élevé que celui pris en compte dans les modèles climatiques précédents, ce qui a surpris les scientifiques (Image 134).³⁵⁵



C'est précisément dans cette région du monde, autour de la péninsule de Taïmyr, que l'on observe une réactivation du panache magmatique sibérien, qui remonte actuellement de manière rapide dans la même zone où s'étaient produits les gigantesques épisodes volcaniques des traps de Sibérie, il y a 250 millions d'années. Tout indique que la tête du panache est en train d'éroder activement le craton de Sibérie orientale, et que le magma s'étale sous toute sa surface (Image 135). Selon les premières estimations, la zone d'étalement du magma sous la Sibérie pourrait atteindre un diamètre de 2 500 à 3 000 km, soit une superficie comparable à celle de l'Australie.

³⁵⁵Rantanen, M., Karpechko, A.Y., Lipponen, A. et al. *The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979*. Commun Earth Environ 3, 168 (2022). <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>

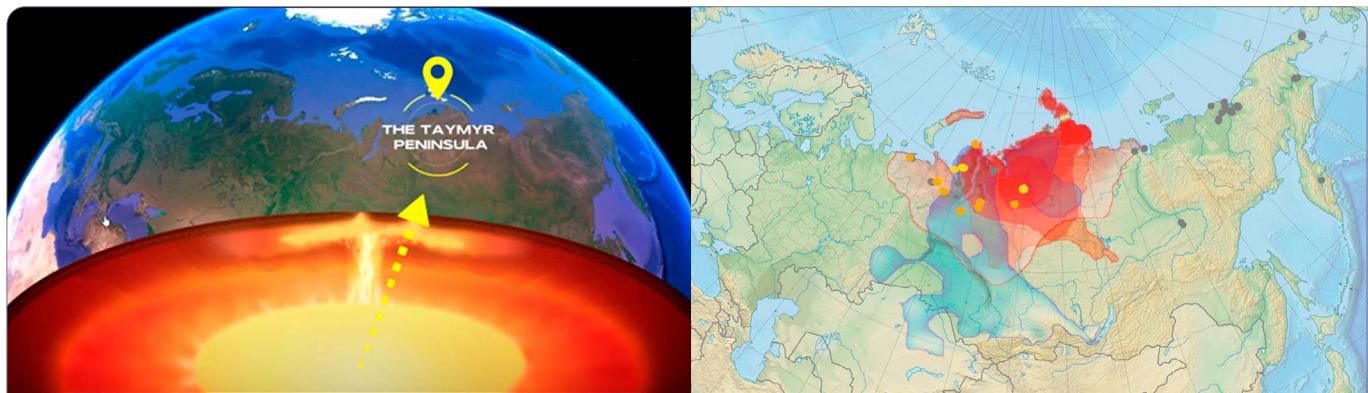


Image 135. Localisation estimée du panache selon différentes études

Il est important de noter que ce réchauffement aussi intense des mers arctiques se produit précisément dans la région de la péninsule de Taimyr. Cette anomalie thermique observée dans la zone maritime de la Sibérie pourrait s'expliquer par l'épaisseur moindre de la croûte océanique, qui conduit plus efficacement la chaleur, et par la capacité thermique élevée de l'eau, supérieure à celle de l'atmosphère. Ainsi, même si le panache magmatique s'élève sous la croûte continentale à une certaine distance des côtes, c'est l'eau océanique qui emmagasine et retient intensément cette chaleur.



Vous pouvez consulter des informations détaillées sur le panache magmatique sibérien, son impact sur le système climatique, les menaces qu'il représente ainsi que les pistes de solution proposées dans le rapport :

« SUR LA MENACE D'UNE ÉRUPTION DE PANACHE MAGMATIQUE EN SIBÉRIE ET LES STRATÉGIES POUR ABORDER CE PROBLÈME ».

L'ensemble de ces données indique que les processus géologiques au fond des océans constituent un facteur significatif du réchauffement climatique mondial. L'augmentation de l'activité sismique et volcanique sous-marine est corrélée à la hausse des températures globales, ce qui suggère une possible relation de cause à effet. Les éruptions sous-marines, en particulier celles de nature explosive, peuvent générer de puissantes impulsions thermiques perturbant l'équilibre thermique à l'échelle locale voire mondiale.

Les systèmes hydrothermaux et les processus volcaniques sous-marins créent des anomalies de grande ampleur, telles que les blobs, qui ont un impact notable sur les écosystèmes océaniques et le climat. De plus, les processus magmatiques sont responsables du réchauffement anormal des mers arctiques. Ainsi, l'océan se réchauffe non seulement par le haut, sous l'effet de l'atmosphère, mais aussi par le bas, à cause des processus dynamiques provenant des entrailles de la Terre. Cela implique la nécessité de revoir les modèles climatiques existants et d'étudier plus en profondeur l'activité géologique sous-marine en tant que composante essentielle du bilan thermique planétaire.

Mais une question clé demeure : pourquoi observe-t-on actuellement une intensification des processus magmatiques et tectoniques sur Terre ?

Résumé du modèle géodynamique des changements climatiques de la Terre à l'époque actuelle

Au cours des 30 dernières années, la Terre a connu une intensification sans précédent et synchronisée non seulement des changements climatiques, mais aussi d'anomalies dans toutes les couches de la planète ainsi que dans ses paramètres géophysiques. Cette croissance suit une progression exponentielle. Une analyse scientifique pluridisciplinaire indique que la cause principale de ces changements réside dans des cycles astronomiques qui se répètent tous les 12 000 ans.

L'hypothèse d'une influence des facteurs cosmiques est confirmée par des changements similaires qui se produisent, simultanément avec la Terre, sur d'autres planètes du Système solaire et leurs satellites. Par exemple, sur Uranus,³⁵⁶ Jupiter³⁵⁷ et Vénus,³⁵⁸ on observe une accélération des vents et une expansion des zones de tempêtes. Sur Mars, les calottes glaciaires polaires sont en train de fondre,³⁵⁹ et l'activité volcanique sur Vénus³⁶⁰ et Mars³⁶¹ continue d'augmenter. De plus, sur Mars – une planète considérée comme morte – les séismes deviennent plus fréquents,³⁶² signe d'une activité anormale dans ses entrailles.

Des changements critiques dans le système terrestre ont commencé à se manifester en 1995, avec la détection d'importantes anomalies géophysiques, telles qu'une accélération soudaine de la rotation de la Terre, un déplacement de son axe, et le début de la dérive du pôle magnétique nord (Image 136).

³⁵⁶de Pater, I. et al. Record-breaking storm activity on Uranus in 2014. *Icarus* 252, 121–128 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.01.008>

³⁵⁷Wong, M. H. et al. Evolution of the Horizontal Winds in Jupiter's Great Red Spot From One Jovian Year of HST/WFC3 Maps. *Geophysical Research Letters* 48, e2021GL093982 (2021). <https://doi.org/10.1029/2021GL093982>

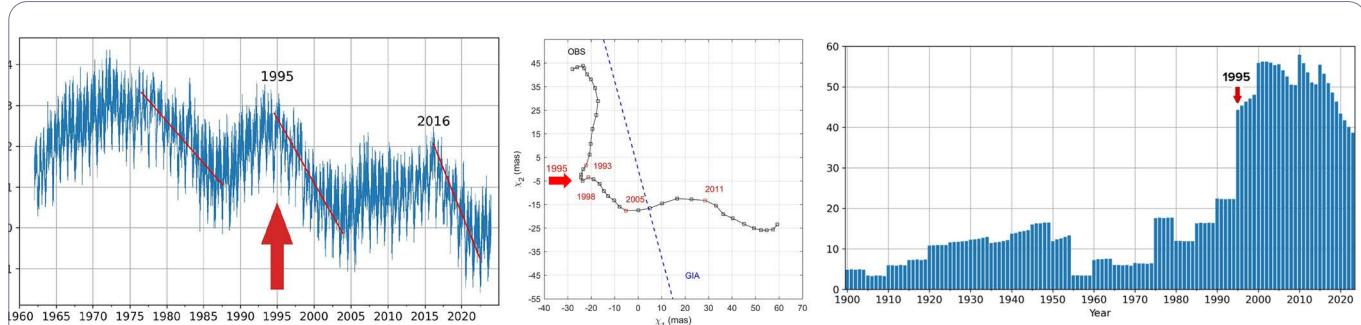
³⁵⁸Khatuntsev, I. V. et al. Cloud level winds from the Venus Express Monitoring Camera imaging. *Icarus* 226, 140–158 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.05.018>

³⁵⁹Sori, M. M. & Bramson, A. M. Water on Mars, With a Grain of Salt: Local Heat Anomalies Are Required for Basal Melting of Ice at the South Pole Today. *Geophysical Research Letters* 46, 1222–1231 (2019). <https://doi.org/10.1029/2018GL080985>

³⁶⁰Encrenaz, T. et al. HDO and SO₂ thermal mapping on Venus - IV. Statistical analysis of the SO₂ plumes. *A&A* 623, A70 (2019). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833511>

³⁶¹Broquet, A. & Andrews-Hanna, J. C. Geophysical evidence for an active mantle plume underneath Elysium Planitia on Mars. *Nat Astron* (2022). [doi:10.1038/s41550-022-01836-3](https://doi.org/10.1038/s41550-022-01836-3) <https://doi.org/10.1038/s41550-022-01836-3>

³⁶²Fernando, B. et al. A Tectonic Origin for the Largest Marsquake Observed by InSight. *Geophysical Research Letters* 50, e2023GL103619 (2023). <https://doi.org/10.1029/2023GL103619>



Une accélération soudaine et rapide de la rotation de la planète, enregistrée par le Centre d'orientation terrestre de l'Observatoire de Paris.

Source : IERS Earth Orientation Center of the Paris Observatory. Length of Day – Earth orientation parameters. https://datacenter.iers.org/singlePlot.php?plot-name=EOPC04_14_62-NOW_IAU1980-LOD&id=223

Des modifications anormales de l'axe de rotation de la Terre : brusque changement de direction de la dérive polaire et accélération du mouvement par un facteur de 17.

Source : Deng, S., Liu, S., Mo, X., Jiang, L., & Bauer Gottwein, P. *Polar Drift in the 1990s Explained by Terrestrial Water Storage Changes*. Geophysical Research Letters, 48, e2020GL092114 (2021). <https://doi.org/10.1029/2020GL092114>

Le déplacement du pôle magnétique nord, qui se faisait auparavant à une vitesse de 10 km/an, s'est soudainement accéléré jusqu'à 55 km/an et a changé de trajectoire en direction de la péninsule de Taimyr, en Sibérie.

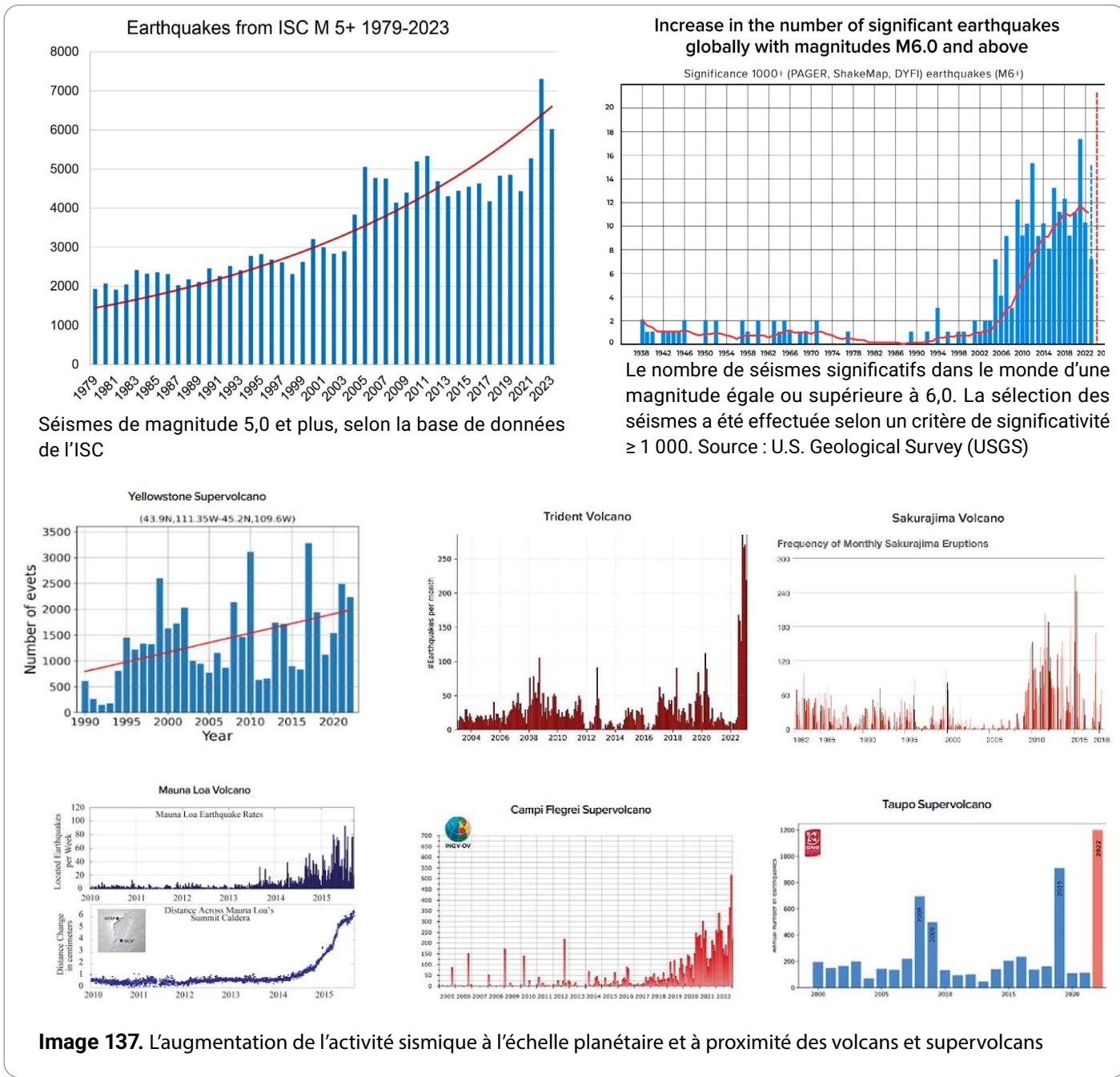
Source : NOAA – Données sur la position du pôle magnétique nord <https://www.ngdc.noaa.gov/products/wandering-geomagnetic-poles>

Image 136. Changements des paramètres géophysiques de la Terre en 1995

Ces anomalies témoignent de changements profonds au sein du noyau terrestre, nécessitant une quantité d'énergie de l'ordre de quadrillions de fois supérieure à celle produite par l'humanité durant toute son existence. La cause en est une influence cosmique externe affectant le noyau terrestre – tout comme ceux d'autres planètes du Système solaire. Cette influence renforce la fonte du manteau terrestre, entraînant son ascension vers la surface. Cela déclenche une réaction en chaîne : l'activité volcanique et sismique s'intensifie, la chaleur provenant des profondeurs augmente, et les catastrophes naturelles se multiplient à l'échelle mondiale.

Depuis 1995, on observe une augmentation notable de l'activité sismique, caractérisée par une fréquence, une magnitude et une énergie accrues des séismes. Cette tendance est perceptible tant sur les continents que dans les océans, y compris dans des régions où l'activité sismique était auparavant quasi inexistante. Cela indique l'ampleur globale des changements en cours. Il est important de souligner que l'augmentation du nombre de séismes de magnitude 5,0 et plus n'est pas due à une expansion du réseau de surveillance ou à une meilleure sensibilité des capteurs, mais reflète bel et bien des modifications réelles dans la géodynamique de la Terre. Selon les données globales du Centre sismologique international, le nombre de tels séismes a fortement augmenté au cours des 25 dernières années, et cette croissance se poursuit (Image 137).

Par ailleurs, l'activité sismique s'intensifie à proximité de volcans, y compris de supervolcans tels que Yellowstone (États-Unis), les Champs Phlégréens (Italie),³⁶³ et Taupō (Nouvelle-Zélande),³⁶⁴ ainsi que d'autres volcans ayant connu des éruptions durant les précédents cycles de 12 000 ans (Image 137).



Le nombre de jours par an avec des éruptions volcaniques augmente, et la lave émise présente souvent des propriétés anormales : elle est surchauffée et possède une composition chimique inhabituelle, caractéristique du magma provenant des couches profondes du manteau.

³⁶³Fanpage.it. At Campi Flegrei 675 earthquakes in April 2023: it is the month with the most tremors in the last 20 years. (2023) <https://www.fanpage.it/napoli/campi-flegrei-675-terremoti-aprile-2023> (Accessed May 1, 2025).

³⁶⁴GeoNet. Strong M5.6 earthquake consistent with continued minor volcanic unrest at Taupō. Volcanic Alert Level remains at Level 1. (2022) <https://www.geonet.org.nz/vabs/7tu66IDztDnlaYDG0LYSgl> (Accessed May 1, 2025).

Une inquiétude particulière concerne l'augmentation du nombre de séismes à foyer profond, survenant à des profondeurs supérieures à 300 km, atteignant parfois jusqu'à 750 km sous la surface de la Terre. Ces phénomènes se produisent non dans la croûte terrestre, mais dans le manteau, où les matériaux ne se fracturent pas, mais se déforment tels de la pâte à modeler, rendant la nature de ces séismes inhabituelle. Étant donné que ces séismes se produisent sous des pressions et des températures extrêmes, on peut conclure que ces puissantes explosions dans le manteau libèrent une énergie comparable à celle de plusieurs bombes atomiques explosant simultanément à l'intérieur de la Terre.

De plus, les séismes à foyer profond déclenchent souvent des secousses puissantes dans la croûte terrestre, amplifiant leur impact destructeur. Depuis 1995, le nombre de ces séismes profonds a connu une croissance rapide (Image 138), qui coïncide avec d'autres anomalies géodynamiques apparues à la même époque. Cette augmentation de la fréquence des explosions intra-mantelliques indique un renforcement de l'énergie dans les profondeurs de la planète, et un processus actif de la fonte du manteau, pouvant conduire à de vastes éruptions volcaniques.

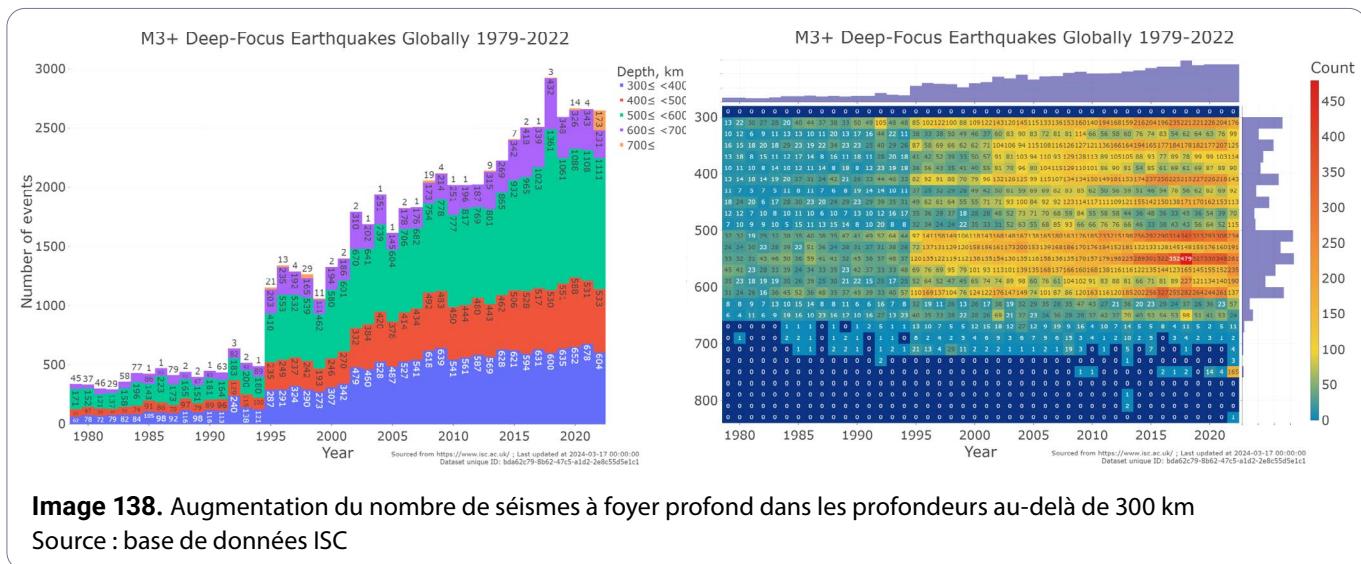


Image 138. Augmentation du nombre de séismes à foyer profond dans les profondeurs au-delà de 300 km

Source : base de données ISC

Sous l'effet des forces centrifuges, le magma en fusion dans le manteau a commencé, depuis 1995, à remonter activement vers la surface de la Terre, érodant la lithosphère et intensifiant son réchauffement par en dessous de manière plus marquée qu'auparavant. Cette remontée du magma entraîne une augmentation du flux géothermique depuis les profondeurs de la planète et active les panaches magmatiques situés sous les glaciers de l'Antarctique occidental, du centre du Groenland et de la Sibérie. En conséquence, les glaciers et le pergélisol commencent à fondre par le bas, de manière accélérée.^{365, 366, 367}

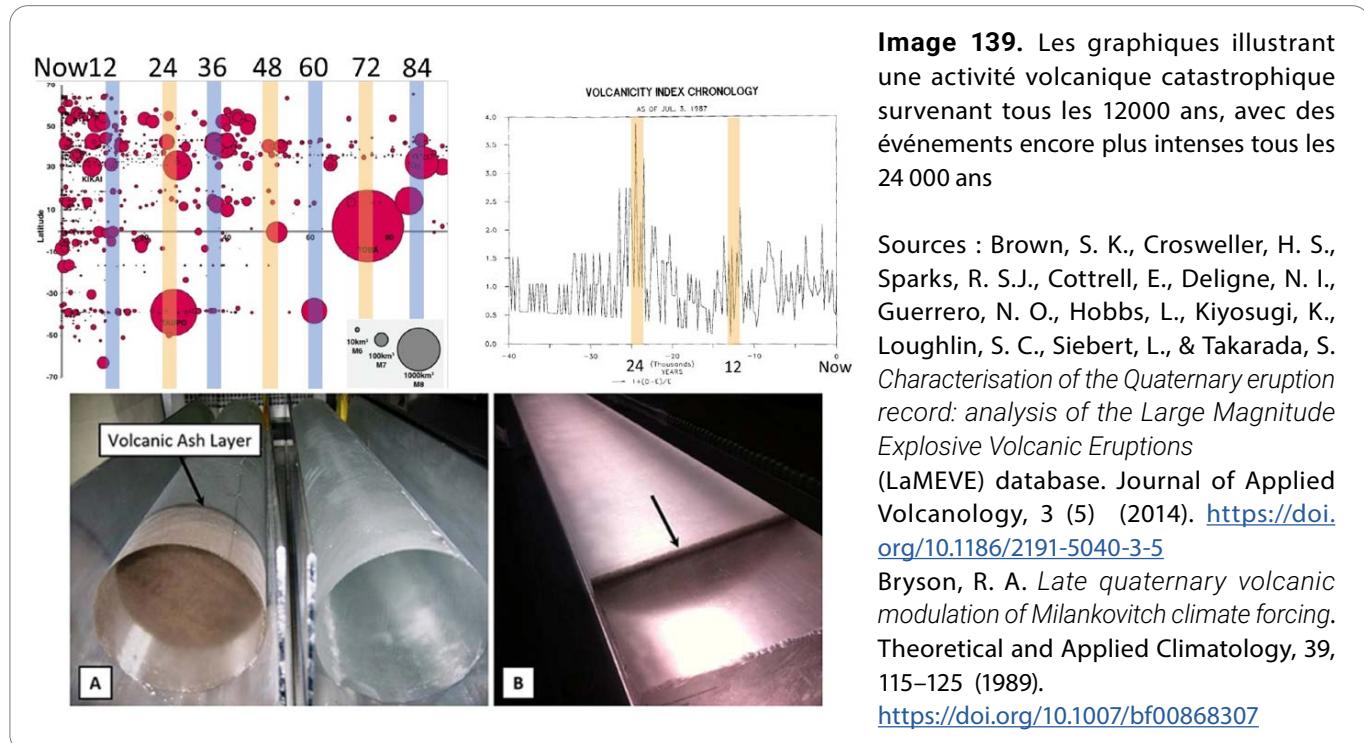
Ainsi, c'est la remontée du magma qui constitue l'une des principales causes du réchauffement des océans, ce qui a un impact particulier sur la croûte océanique, plus fine et vulnérable que la

³⁶⁵Rogozhina, I. et al. Melting at the base of the Greenland ice sheet explained by Iceland hotspot history. *Nature Geosci* 9, 366–369 (2016). <https://doi.org/10.1038/ngeo2689>

³⁶⁶Van Der Veen, C. J., Leftwich, T., Von Frese, R., Csatho, B. M. & Li, J. Subglacial topography and geothermal heat flux: Potential interactions with drainage of the Greenland ice sheet. *Geophysical Research Letters* 34, 2007GL030046 (2007). <https://doi.org/10.1029/2007GL030046>

³⁶⁷Dziadek, R., Ferraccioli, F. & Gohl, K. High geothermal heat flow beneath Thwaites Glacier in West Antarctica inferred from aeromagnetic data. *Commun Earth Environ* 2, 162 (2021). <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00242-3>

croûte continentale, car elle l'attaque par en-dessous. Les données historiques, issues des carottes géologiques et glaciaires, montrent que la Terre a déjà connu des cycles cataclysmiques similaires tous les 12 000 ans. Tous les deux cycles (c'est-à-dire à peu près tous les 24 000 ans), ces cataclysmes planétaires ont même été encore plus destructeurs (Image 139).



La Terre entre actuellement dans un tel cycle. Cependant, cette fois, la pollution anthropique des océans par les micro- et nanoplastiques a accentué le déséquilibre thermique dans le manteau, entraînant une augmentation du nombre de séismes profonds, la formation de nouveaux foyers magmatiques et une instabilité générale de la planète. C'est pourquoi les cataclysmes actuels progressent bien plus rapidement et intensément que lors des cycles précédents. En réalité, la pollution plastique des océans est devenue la principale cause qui pourrait empêcher la Terre de traverser ce cycle. Il est essentiel de comprendre que, bien que la résolution du problème de la pollution plastique marine puisse ralentir le développement de ces cataclysmes, elle ne pourra pas les arrêter.



Pour en savoir plus sur l'activation géodynamique des profondeurs de la Terre à l'époque actuelle, le cycle cataclysmique de 12 000 ans, ainsi que sur les solutions possibles à cette problématique, consultez le rapport :

« SUR LA PROGRESSION DES CATACLYSMES CLIMATIQUES SUR TERRE ET LEURS CONSÉQUENCES CATASTROPHIQUES ».

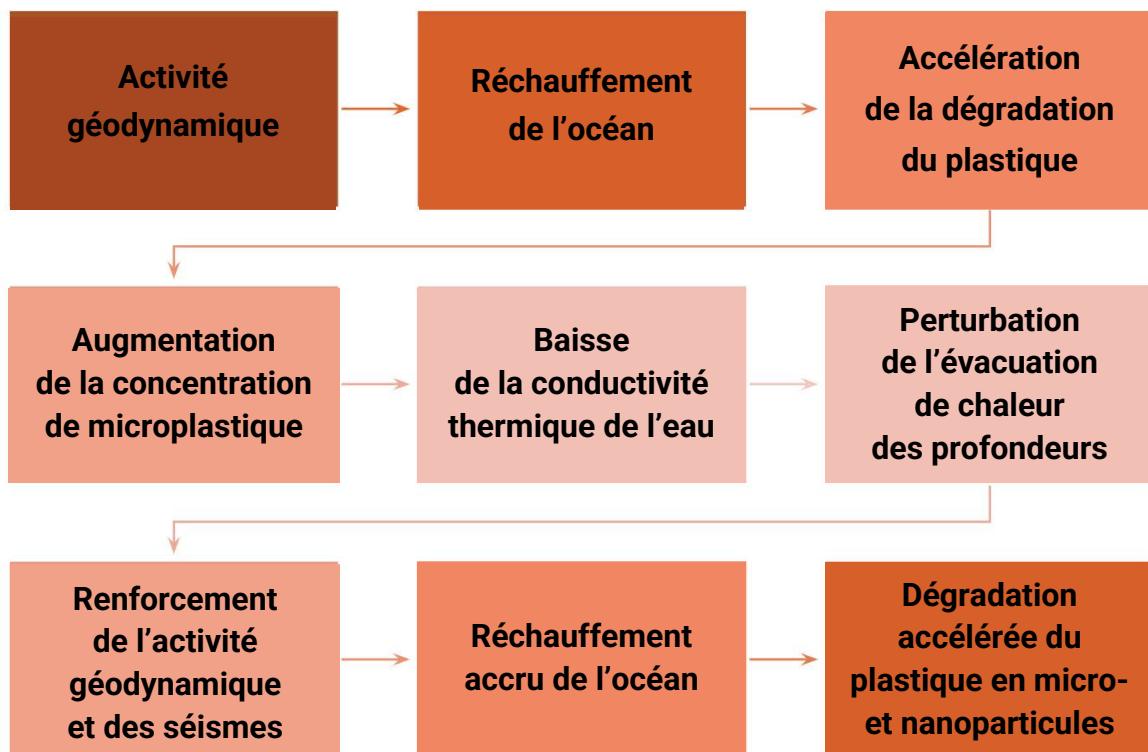
Comme des années de recherches interdisciplinaires sur les changements géodynamiques dans le cadre du cycle de 12 000 ans l'ont montré, la cause principale du réchauffement initial des océans est la remontée de magma, qui affecte particulièrement la croûte océanique, plus fine et plus vulnérable que la croûte continentale. La pollution des océans par le plastique et l'accumulation de particules de micro- et nanoplastiques devient un facteur critique modifiant les propriétés thermophysiques de l'océan.

La présence de ces particules synthétiques dans l'eau de mer réduit fortement sa conductivité thermique, ce qui perturbe non seulement les processus naturels d'échange de chaleur entre les couches profondes de l'océan et sa surface, mais surtout le refroidissement des plaques lithosphériques. Dans le contexte d'un cycle d'augmentation de l'activité géodynamique, propre au cycle de 12 000 ans, la perte de capacité conductrice de l'eau intensifie non seulement le réchauffement de l'océan et de l'atmosphère, mais aussi celui des profondeurs terrestres. Cela entraîne une fonte accrue du manteau, provoquant une activité géodynamique encore plus intense.

Ce processus déclenche une accumulation d'énergie excessive dans les entrailles de la Terre, ce qui se traduit par une hausse du nombre de séismes profonds et une formation accélérée de nouveaux foyers magmatiques. Ces phénomènes augmentent encore davantage l'instabilité de la planète et accélèrent le réchauffement des océans.

Une dangereuse boucle fermée se forme :

l'activité géodynamique réchauffe l'océan → ce réchauffement accélère la dégradation du plastique → l'augmentation de la concentration de microplastiques réduit la conductivité thermique de l'eau → l'évacuation de la chaleur depuis les profondeurs est perturbée → l'activité géodynamique et la fréquence des séismes s'intensifient → l'océan se réchauffe encore davantage, ce qui accélère encore plus la décomposition du plastique en micro- et nanoparticules.



Cela entraîne une augmentation de la fréquence et de l'intensité des phénomènes météorologiques extrêmes et des catastrophes naturelles telles que inondations, ouragans et cyclones tropicaux, qui atteignent aujourd'hui des niveaux sans précédent.

Ainsi, la pollution plastique des océans nuit non seulement à la santé humaine, aux écosystèmes, à la biosphère et au système climatique, mais elle contribue également et de manière significative au réchauffement des océans. Elle agrave en outre les catastrophes déjà bien destructrices du cycle de 24 000 ans dans lequel la Terre est actuellement entrée. Cela crée des risques sans précédent pour la survie non seulement de l'humanité, mais aussi de la planète elle-même.

La résolution de la crise écologique, climatique et géodynamique mondiale nécessite une coopération internationale urgente entre des scientifiques de différentes disciplines, afin de développer et de mettre en œuvre des mesures exhaustives. Ces actions doivent inclure le nettoyage des océans des micro- et nanoplastiques, la réduction de leur impact sur la santé humaine, ainsi que la recherche de solutions fondamentales pour éliminer les menaces géodynamiques.

Vous pouvez consulter les solutions proposées dans les rapports correspondants :



RAPPORT

« SUR LA PROGRESSION DES
CATACLYSMES CLIMATIQUES SUR
TERRE ET LEURS CONSÉQUENCES
CATASTROPHIQUES »



RAPPORT

« SUR LA MENACE D'UNE ÉRUPTION
DE PANACHE MAGMATIQUE EN
SIBÉRIE ET LES STRATÉGIES POUR
ABORDER CE PROBLÈME »

CONCLUSIONS : LE NANOPLASTIQUE EST UN DÉFI QU'IL NE FAUT PAS IGNORER

Le problème de la pollution plastique, en particulier sous forme de micro- et nanoplastiques, a dépassé les conséquences écologiques locales et est devenu une menace mondiale à multiples facettes. Les recherches modernes confirment l'impact direct et indirect des MNP (micro et nanoplastiques) sur le système climatique, la résilience des écosystèmes et la santé humaine. Les particules de microplastique peuvent pénétrer dans les organismes vivants, provoquer des réactions inflammatoires, perturber l'équilibre hormonal, les fonctions des systèmes immunitaire et reproducteur, et modifier les propriétés physico-chimiques de l'environnement, depuis l'eau de mer jusqu'à l'atmosphère.

Il y a plus de 10 ans, les membres de la communauté scientifique internationale ALLATRA ont émis l'hypothèse que la pollution plastique influence de plus en plus les anomalies climatiques et l'aggravation des problèmes de santé publique. Aujourd'hui, ces hypothèses trouvent une confirmation dans des recherches indépendantes menées par les principaux établissements scientifiques. L'accumulation rapide de données sur les effets écologiques et biologiques des MNP ouvre de nouveaux horizons d'analyse, y compris la transformation des modèles climatiques, les changements dans l'hydrosphère et l'augmentation des risques systémiques pour le développement durable. Ce qui suscite une inquiétude particulière, c'est le fait que même des concentrations microscopiques de nanoplastiques peuvent déclencher des effets en cascade dans la biosphère et le système du climat. Le plastique n'est plus simplement un déchet solide – il devient un agent actif de transformation de l'environnement et de l'organisme humain. Les conséquences de sa propagation deviennent déjà visibles. Le problème des MNP ne touche pas seulement l'écologie et la médecine, mais nécessite également une réflexion dans le contexte de la sécurité nationale, de la macroéconomie et des relations internationales.

Dans le cadre de la stratégie pour lutter contre cette menace, le mouvement ALLATRA a proposé deux axes principaux, qui ont à la fois un potentiel pratique et prédictif. Le premier consiste en la mise en œuvre à grande échelle des technologies de génération d'eau atmosphérique (GEA), capables à la fois de résoudre le problème du manque d'eau douce et de contribuer à la purification de l'atmosphère et des océans des particules de microplastique. Toutefois, la mise en œuvre des technologies GEA nécessite de prendre en compte les risques potentiels, en particulier l'augmentation de la concentration de MNP dans l'air et, par conséquent, l'intensification de l'impact sur les êtres humains lors d'inhalation. Cela dicte la nécessité de développer parallèlement des systèmes de filtration et de protection hautement efficaces.

Le deuxième axe stratégique proposé par ALLATRA est le développement de méthodes de neutralisation ou de protection contre la charge électrostatique des nanoplastiques, l'un des principaux facteurs de leur toxicité. Les particules chargées de nanoplastique interagissent activement avec les membranes cellulaires, les protéines et le matériel génétique, formant des liaisons moléculaires stables. Ces particules traversent les barrières biologiques, y compris la barrière hémato-encéphalique, s'accumulent dans les tissus et déclenchent un enchaînement de perturbations cellulaires – du stress

oxydatif à l'apoptose. La réduction de l'activité électrostatique des micro- et nanoplastiques pourrait considérablement diminuer leur nocivité et ralentir leur accumulation dans l'organisme.

Selon les auteurs du rapport, la protection ou la neutralisation de la charge électrostatique pourrait réduire le danger potentiel des MNP d'au moins 50 %, ce qui rend cette voie de recherche particulièrement importante. Cela offrirait un délai nécessaire au développement de stratégies plus complexes pour le diagnostic, la prévention et l'élimination des MNP du corps humain ainsi que pour le nettoyage de la biosphère. Dans ce contexte, les recherches dans les domaines de la bio-physique, des nanotechnologies et de la toxicologie moléculaire deviennent particulièrement pertinentes.

Ainsi, une réponse efficace à la menace des MNP nécessite non pas des mesures ponctuelles, mais une approche globale et pluridisciplinaire. Il est nécessaire de coordonner des efforts dans les domaines de recherche scientifique, de solutions technologiques, de régulation normative et de coopération internationale. La pollution plastique ne doit pas être considérée comme un simple problème écologique, mais comme un défi systémique qui affecte la santé, la sécurité, la sécurisation des ressources et la durabilité de l'infrastructure sociale.

L'originalité de ce rapport réside dans son approche pluridisciplinaire intégrée, qui combine des données de la physique, de la chimie, de la biologie et de la médecine. Cette synthèse permet de considérer la problématique des MNP comme un défi civilisationnel nécessitant des solutions à plusieurs niveaux. Actuellement, la communauté mondiale commence seulement à prendre progressivement conscience de l'ampleur réelle de cette menace. Malgré l'absence d'une solution universelle, c'est précisément la quête de cette solution et le développement de la coopération scientifique qui pourront définir le chemin pour surmonter la crise. Le défi initial réside non pas dans l'absence de solution, mais dans la capacité à la découvrir avant d'atteindre le point critique.

Références

Agence France-Presse. Japan's famous Nara deer dying from eating plastic bags. The Guardian. <https://www.theguardian.com/world/2019/jul/10/japans-famous-nara-deer-dying-from-eating-plastic-bags> (Accessed May 1, 2025).

Ahern, T. P. et al. Medication–Associated Phthalate Exposure and Childhood Cancer Incidence. JNCI: Journal of the National Cancer Institute 114, 885–894 (2022). <https://doi.org/10.1093/jnci/djac045>

Al Malki, J. S., Hussien, N. A., Tantawy, E. M., Khattab, Y. & Mohammadein, A. Terrestrial Biota as Bioindicators for Microplastics and Potentially Toxic Elements. Coatings 11, 1152 (2021). <https://doi.org/10.3390/coatings11101152>

Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research. Micro- and nanoplastic from the atmosphere is polluting the ocean. <https://www.awi.de/en/about-us/service/press/single-view/mikro-und-nanoplastik-aus-der-atmosphaere-belastet-meere.html> (Accessed May 1, 2025)

Alijagic, A. et al. The triple exposure nexus of microplastic particles, plastic-associated chemicals, and environmental pollutants from a human health perspective. Environment International 188, 108736 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108736>

AllatRa TV. Anthropogenic factor in the oceans' demise: Popular science film. Time 55:00, (2025). <https://allatra.tv/en/video/anthropogenic-factor-in-the-oceans-demise-popular-science-film> (Accessed May 1, 2025).

Allen, S. et al. Examination of the ocean as a source for atmospheric microplastics. PLoS ONE 15, e0232746 (2020). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232746>

Alqahtani, S., Alqahtani, S., Saquib, Q. & Mohiddin, F. Toxicological impact of microplastics and nanoplastics on humans: understanding the mechanistic aspect of the interaction. Front. Toxicol. 5, 1193386 (2023). <https://doi.org/10.3389/ftox.2023.1193386>

Amato-Lourenço, L. F. et al. Microplastics in the Olfactory Bulb of the Human Brain. JAMA Netw Open 7, e2440018 (2024). <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2024.40018>

Amato-Lourenço, L. F. et al. Presence of airborne microplastics in human lung tissue. Journal of Hazardous Materials 416, 126124 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126124>

American College of Cardiology. New evidence links microplastics with chronic disease. (2025) <https://www.acc.org/About-ACC/Press-Releases/2025/03/25/10/19/New-Evidence-Links-Microplastics-with-Chronic-Disease> (Accessed May 1, 2025).

Animal Survival International. Sri Lankan Elephants Die After Eating Plastic From Rubbish Dumps. (2020) <https://animalsurvival.org/habitat-loss/sri-lankan-elephants-die-after-eating-plastic-from-rubbish-dumps> (Accessed May 1, 2025).

- Argo Program. 'Mission'. (n.d.) <https://argo.ucsd.edu/about/mission/> (Accessed May 10, 2025).
- Arrigo, F., Impellitteri, F., Piccione, G. & Faggio, C. Phthalates and their effects on human health: Focus on erythrocytes and the reproductive system. Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology 270, 109645 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2023.109645>
- Ask a Scientist Blog. If molecules in colder things get denser, why does ice float? WordPress. <https://askascientistblog.wordpress.com/2015/11/04/if-molecules-in-colder-things-get-denser-why-does-ice-float> (Accessed May 1, 2025).
- Auta, H. S. et al. Enhanced microbial degradation of PET and PS microplastics under natural conditions in mangrove environment. Journal of Environmental Management 304, 114273 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114273>
- Auta, H. S., Emenike, C. U., Jayanthi, B. & Fauziah, S. H. Growth kinetics and biodeterioration of polypropylene microplastics by *Bacillus* sp. and *Rhodococcus* sp. isolated from mangrove sediment. Marine Pollution Bulletin 127, 15–21 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.11.036>
- Autism Parenting Magazine. Autism Statistics You Need To Know in 2024. (2025) <https://www.autismparentingmagazine.com/autism-statistics> (Accessed May 1, 2025).
- Avio, C. G., Gorbi, S. & Regoli, F. Experimental development of a new protocol for extraction and characterization of microplastics in fish tissues: First observations in commercial species from Adriatic Sea. Marine Environmental Research 111, 18–26 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.marenres.2015.06.014>
- Aykut, B., Pushalkar, S., Chen, R. et al. The fungal mycobiome promotes pancreatic oncogenesis via activation of MBL. Nature 574, 264–267 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1608-2>
- Azeem, I. et al. Uptake and Accumulation of Nano/Microplastics in Plants: A Critical Review. Nanomaterials 11, 2935 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11112935>
- Azim Premji University. The Biology of Electricity: How electricity is critical to the functioning of the human body. (2022) <https://azimpremjiuniversity.edu.in/news/2022/the-biology-of-electricity> (Accessed May 1, 2025).
- Baker, B. H. et al. Ultra-processed and fast food consumption, exposure to phthalates during pregnancy, and socioeconomic disparities in phthalate exposures. Environment International 183, 108427 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108427>
- Baker, E. T. & German, C. R. On the Global Distribution of Hydrothermal Vent Fields. in Mid-Ocean Ridges: Hydrothermal Interactions Between the Lithosphere and Oceans (eds German, C. R., Lin, J. & Parson, L. M.) 245–266 (American Geophysical Union, 2004).
- Baker, E. T. et al. How many vent fields? New estimates of vent field populations on ocean ridges from precise mapping of hydrothermal discharge locations. Earth Planet. Sci. Lett. 449, 186–196 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.05.031>

Bandmann, V., Müller, J. D., Köhler, T. & Homann, U. Uptake of fluorescent nano beads into BY2-cells involves clathrin-dependent and clathrin-independent endocytosis. *FEBS Letters* 586, 3626–3632 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2012.08.008>

Baribo, L. E., Avens, J. S. & O'Neill, R. D. Effect of Electrostatic Charge on the Contamination of Plastic Food Containers by Airborne Bacterial Spores. *Applied Microbiology* 14, 905–913 (1966). <https://doi.org/10.1128/am.14.6.905-913.1966>

Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C. & Barlaz, M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Phil. Trans. R. Soc. B* 364, 1985–1998 (2009). <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>

Basaran, B. et al. Microplastics in honey from Türkiye: Occurrence, characteristic, human exposure, and risk assessment. *Journal of Food Composition and Analysis* 135, 106646 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106646>

Alma, A. M., de Groot, G. S. & Buteler, M. Microplastics incorporated by honeybees from food are transferred to honey, wax and larvae. *Environmental Pollution* 320, 121078 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121078>

Pasquini, E. et al. Microplastics reach the brain and interfere with honey bee cognition. *Science of The Total Environment* 912, 169362 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169362>

Behrenfeld et al. 2009 Роберта Симмона <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Phytoplankton> (Accessed May 1, 2025).

Bell, Katherine L. C., et al. "How Little We've Seen: A Visual Coverage Estimate of the Deep Seafloor." *Science Advances*, vol. 11, no. 19, 2025, eadp8602. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adp8602>.

Bengalli, R. et al. Characterization of microparticles derived from waste plastics and their bio-interaction with human lung A549 cells. *Journal of Applied Toxicology* 42, 2030–2044 (2022). <https://doi.org/10.1002/jat.4372>

Berger Bioucas, F. E. et al. Effective Thermal Conductivity of Nanofluids: Measurement and Prediction. *Int J Thermophys* 41, 55 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10765-020-2621-2>

Beriot, N., Peek, J., Zornoza, R., Geissen, V. & Huerta Lwanga, E. Low density-microplastics detected in sheep faeces and soil: A case study from the intensive vegetable farming in Southeast Spain. *Science of The Total Environment* 755, 142653 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142653>

Bhuiyan, M. M. U. et al. Oxygen declination in the coastal ocean over the twenty-first century: Driving forces, trends, and impacts. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 9, 100621 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100621>

Bopp, L. et al. Multiple stressors of ocean ecosystems in the 21st century: projections with CMIP5 models. *Biogeosciences* 10, 6225–6245 (2013). <https://doi.org/10.5194/bg-10-6225-2013>

Borreani, G. & Tabacco, E. 9 - Plastics in Animal Production. in *A Guide to the Manufacture, Performance, and Potential of Plastics in Agriculture* (ed. Orzolek, M. D.) 145–185 (Elsevier, 2017). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102170-5.00009-9>

- Bosker, T., Bouwman, L. J., Brun, N. R., Behrens, P. & Vijver, M. G. Microplastics accumulate on pores in seed capsule and delay germination and root growth of the terrestrial vascular plant *Lepidium sativum*. *Chemosphere* 226, 774–781 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.163>
- Boyce, D. G., Lewis, M. R. & Worm, B. Global phytoplankton decline over the past century. *Nature* 466, 591–596 (2010). <https://doi.org/10.1038/nature09268>
- Brahney, J., Hallerud, M., Heim, E., Hahnenberger, M. & Sukumaran, S. Plastic rain in protected areas of the United States. *Science* 368, 1257–1260 (2020). <https://doi.org/10.1126/science.aaz5819>
- Brennecke, D., Duarte, B., Paiva, F., Caçador, I. & Canning-Clode, J. Microplastics as vector for heavy metal contamination from the marine environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 178, 189–195 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.12.003>
- Breton, J. L. Visitation patterns of African elephants (*Loxodonta africana*) to a rubbish dumpsite in Victoria Falls, Zimbabwe. *Pachyderm* 60, 45–54 (2019). <https://doi.org/10.69649/pachyderm.v60i.30>
- Broquet, A. & Andrews-Hanna, J. C. Geophysical evidence for an active mantle plume underneath Elysium Planitia on Mars. *Nat Astron* (2022). <https://doi.org/10.1038/s41550-022-01836-3>
- Broszeit, S., Hattam, C. & Beaumont, N. Bioremediation of waste under ocean acidification: Reviewing the role of *Mytilus edulis*. *Marine Pollution Bulletin* 103, 5–14 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.12.040>
- Brown, S. K., Crosweller, H. S., Sparks, R. S.J., Cottrell, E., Deligne, N. I., Guerrero, N. O., Hobbs, L., Kiyosugi, K., Loughlin, S. C., Siebert, L., & Takarada, S. Characterisation of the Quaternary eruption record: analysis of the Large Magnitude Explosive Volcanic Eruptions (LaMEVE) database. *Journal of Applied Volcanology*, 3 (5) (2014). <https://doi.org/10.1186/2191-5040-3-5>
- Brynzak-Schreiber, E. et al. Microplastics role in cell migration and distribution during cancer cell division. *Chemosphere* 353, 141463 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141463>
- Bryson, R. A.. Late quaternary volcanic modulation of Milankovitch climate forcing. *Theoretical and Applied Climatology*, 39, 115–125 (1989). <https://doi.org/10.1007/bf00868307>
- Busse, H. L., Ariyasena, D. D., Orris, J. & Freedman, M. A. Pristine and Aged Microplastics Can Nucleate Ice through Immersion Freezing. *ACS EST Air* 1, 1579–1588 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsestair.4c00146>
- Campanale, C., Massarelli, C., Savino, I., Locaputo, V. & Uricchio, V. F. A Detailed Review Study on Potential Effects of Microplastics and Additives of Concern on Human Health. *IJERPH* 17, 1212 (2020). <https://doi.org/10.3390/ijerph17041212>
- Casella, C. & Ballaz, S. J. Genotoxic and neurotoxic potential of intracellular nanoplastics: A review. *Journal of Applied Toxicology* 44, 1657–1678 (2024). <https://doi.org/10.1002/jat.4598>
- Centers for Disease Control and Prevention. Autism Prevalence Higher, According to Data from 11 ADDM Communities. <https://www.cdc.gov/media/releases/2023/p0323-autism.html> (Accessed May 1, 2025).

Chadwick, J., Keller, R., Kamenov, G., Yogodzinski, G. & Lupton, J. The Cobb hot spot: HIMU-DMM mixing and melting controlled by a progressively thinning lithospheric lid. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 15, 3107–3122 (2014). <https://doi.org/10.1002/2014gc005334>

Chen, M. J., Karaviti, L. P., Roth, D. R. & Schlomer, B. J. Birth prevalence of hypospadias and hypospadias risk factors in newborn males in the United States from 1997 to 2012. *Journal of Pediatric Urology* 14, 425.e1-425.e7 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jpurol.2018.08.024>

Chen, Y. et al. Electrolytes induce long-range orientational order and free energy changes in the H-bond network of bulk water. *Sci. Adv.* 2, e1501891 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501891>

Cheng, L. et al. Another Year of Record Heat for the Oceans. *Adv. Atmos. Sci.* 40, 963–974 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00376-023-2385-2>

Cheng, L., Abraham, J., Zhu, J. et al. Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. *Adv. Atmos. Sci.* 37, 137–142 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>

Chew, T., Daik, R. & Hamid, M. Thermal Conductivity and Specific Heat Capacity of Dodecylbenzenesulfonic Acid-Doped Polyaniline Particles—Water Based Nanofluid. *Polymers* 7, 1221–1231 (2015). <https://doi.org/10.3390/polym7071221>

China Environment News. Microplastics "secretly attack" the human body, how much damage can they cause? (2025) <https://cenews.com.cn/news.html?aid=1205048> (Accessed May 1, 2025).

[Climate.gov](#). 'The role of the ocean in tempering global warming'. (2014) <https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/role-ocean-tempering-global-warming> (Accessed May 10, 2025).

[ClimateReanalyzer.org](#), Climate Change Institute, University of Maine, Dataset. NOAA OISST. https://climatereanalyzer.org/clim/sst_daily/?dm_id=world2 (Accessed May 1, 2025).

Columbia Climate School. 'Is Global Heating Hiding Out in the Oceans?'. (2013) <https://www.earth.columbia.edu/articles/view/3130> (Accessed May 10, 2025).

Corinaldesi, C., Canensi, S., Dell'Anno, A. et al. Multiple impacts of microplastics can threaten marine habitat-forming species. *Commun Biol* 4, 431 (2021). <https://doi.org/10.1038/s42003-021-01961-1>

Crisp, J. A. Rates of magma emplacement and volcanic output. *J. Volc. Geotherm. Res.* 20, 177–211 (1984). [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(84\)90039-8](https://doi.org/10.1016/0377-0273(84)90039-8)

Da Costa Filho, P. A. et al. Detection and characterization of small-sized microplastics ($\geq 5 \mu\text{m}$) in milk products. *Sci Rep* 11, 24046 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03458-7>

Dante, S. et al. Selective Targeting of Neurons with Inorganic Nanoparticles: Revealing the Crucial Role of Nanoparticle Surface Charge. *ACS Nano* 11, 6630–6640 (2017). <https://doi.org/10.1021/acsnano.7b00397>

Dawson, A. L. et al. Turning microplastics into nanoplastics through digestive fragmentation by Antarctic krill. *Nat Commun* 9, 1001 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03465-9>

De Falco, F., Di Pace, E., Cocca, M. & Avella, M. The contribution of washing processes of synthetic clothes to microplastic pollution. *Sci Rep* 9, 6633 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43023-x>

De Jersey, A. M. et al. Seabirds in crisis: Plastic ingestion induces proteomic signatures of multiorgan failure and neurodegeneration. *Sci. Adv.* 11, eads0834 (2025). <https://doi.org/10.1126/sciadv.ads0834>

De Pater, I. et al. Record-breaking storm activity on Uranus in 2014. *Icarus* 252, 121-128 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.01.008>

De Souza Machado, A. A. et al. Impacts of Microplastics on the Soil Biophysical Environment. *Environ. Sci. Technol.* 52, 9656–9665 (2018). <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02212>

De Souza Machado, A. A., Kloas, W., Zarfl, C., Hempel, S. & Rillig, M. C. Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. *Global Change Biology* 24, 1405–1416 (2018). <https://doi.org/10.1111/gcb.14020>

Deike, L., Reichl, B. G. & Paulot, F. A Mechanistic Sea Spray Generation Function Based on the Sea State and the Physics of Bubble Bursting. *AGU Advances* 3, e2022AV000750 (2022). <https://doi.org/10.1029/2022AV000750>

Deng, S., Liu, S., Mo, X., Jiang, L., & Bauer Gottwein, P. Polar Drift in the 1990s Explained by Terrestrial Water Storage Changes. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL092114 (2021). <https://doi.org/10.1029/2020gl092114>

Derraik, J. G. B. The pollution of the marine environment by plastic debris: a review. *Marine Pollution Bulletin* 44, 842–852 (2002). [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00220-5](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00220-5)

Dick, L. et al. The adsorption of drugs on nanoplastics has severe biological impact. *Sci Rep* 14, 25853 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75785-4>

Dohlman, A. B. et al. A pan-cancer mycobiome analysis reveals fungal involvement in gastrointestinal and lung tumors. *Cell* 185, 3807-3822.e12 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cell.2022.09.015>

Dris, R. et al. A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments. *Environmental Pollution* 221, 453–458 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.013>

Dugershaw-Kurzer, B. et al. Nanoparticles Dysregulate the Human Placental Secretome with Consequences on Angiogenesis and Vascularization. *Advanced Science* 11, 2401060 (2024). <https://doi.org/10.1002/advs.202401060>

Duncan, E. M. et al. Microplastic ingestion ubiquitous in marine turtles. *Global Change Biology* 25, 744–752 (2019). <https://doi.org/10.1111/gcb.14519>

Dürig, T., White, J.D.L., Murch, A.P. et al. Deep-sea eruptions boosted by induced fuel-coolant explosions. *Nat. Geosci.* 13, 498–503 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0603-4>

[EarthDay.org](https://www.earthday.org/babies-vs-plastics-what-every-parent-should-know). Babies vs. Plastics Report. (2023) <https://www.earthday.org/babies-vs-plastics-what-every-parent-should-know> (Accessed May 1, 2025).

Encrenaz, T. et al. HDO and SO₂ thermal mapping on Venus - IV. Statistical analysis of the SO₂ plumes. A&A 623, A70 (2019). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833511>

Encyclopædia Britannica. Neuron. Britannica. (2025) <https://www.britannica.com/science/neuron> (Accessed May 1, 2025).

Enders, K., Lenz, R., Stedmon, C. A. & Nielsen, T. G. Abundance, size and polymer composition of marine microplastics ≥ 10 µm in the Atlantic Ocean and their modelled vertical distribution. Marine Pollution Bulletin 100, 70–81 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.09.027>

Eriksen, M. et al. A growing plastic smog, now estimated to be over 170 trillion plastic particles afloat in the world's oceans—Urgent solutions required. PLoS ONE 18, e0281596 (2023). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281596>

Eriksen, M. et al. Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea. PLoS ONE 9, e111913 (2014). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913>

Eriksen, M., Lusher, A., Nixon, M. & Wernery, U. The plight of camels eating plastic waste. Journal of Arid Environments 185, 104374 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104374>

Eunomia. Plastics in the Marine Environment. <https://eunomia.eco/reports/plastics-in-the-marine-environment> (Accessed May 1, 2025)

European Severe Storms Laboratory. Hailstorms of 2024 <https://www.essl.org/cms/hailstorms-of-2024> (Accessed May 1, 2025).

[Fanpage.it](#). At Campi Flegrei 675 earthquakes in April 2023: it is the month with the most tremors in the last 20 years. (2023) <https://www.fanpage.it/napoli/campi-flegrei-675-terremoti-aprile-2023> (Accessed May 1, 2025).

Federal Office of Public Health. Impact of pollution on embryonic development - Nanoparticles: Risk for babies in the womb. FOPH. (2024) <https://www.bit.admin.ch/en/nsb?id=101285> (Accessed May 1, 2025).

Feldkamp, M. L. et al. Gastroschisis prevalence patterns in 27 surveillance programs from 24 countries, International Clearinghouse for Birth Defects Surveillance and Research, 1980–2017. Birth Defects Research 116, e2306 (2024). <https://doi.org/10.1002/bdr2.2306>

Fernando, B. et al. A Tectonic Origin for the Largest Marsquake Observed by InSight. Geophysical Research Letters 50, e2023GL103619 (2023). <https://doi.org/10.1029/2023GL103619>

Financial Times. Have humans passed peak brain power? <https://www.ft.com/content/a8016c64-63b7-458b-a371-e0e1c54a13fc> (Accessed May 1, 2025).

Frazier, T. W., Georgiades, S., Bishop, S. L. & Hardan, A. Y. Behavioral and Cognitive Characteristics of Females and Males With Autism in the Simons Simplex Collection. Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry 53, 329-340.e3 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.jaac.2013.12.004>

Galyon, H. et al. Long-term in situ ruminal degradation of biodegradable polymers in Holstein dairy cattle. *JDS Communications* 4, 70–74 (2023). <https://doi.org/10.3168/jdsc.2022-0319>

Gao, Y., Fang, H. & Ni, K. A hierarchical clustering method of hydrogen bond networks in liquid water undergoing shear flow. *Sci Rep* 11, 9542 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88810-7>

Gao, Y., Fang, H., Ni, K. & Feng, Y. Water clusters and density fluctuations in liquid water based on extended hierarchical clustering methods. *Sci Rep* 12, 8036 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11947-6>

Garbage Patches. Marine Debris Program. NOAA <https://marinedebris.noaa.gov/discover-marine-debris/garbage-patches> (Accessed May 1, 2025)

Gase, A. et al. Subducting volcaniclastic-rich upper crust supplies fluids for shallow megathrust and slow slip. *Sci. Adv.* 9, eadh0150 (2023). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh0150>

GeoNet. Strong M5.6 earthquake consistent with continued minor volcanic unrest at Taupō. Volcanic Alert Level remains at Level 1. (2022) <https://www.geonet.org.nz/vabs/7tu66IDztDnlaYDG0LYSgl> (Accessed May 1, 2025).

Geueke, B. et al. Evidence for widespread human exposure to food contact chemicals. *J Expo Sci Environ Epidemiol* 1–12 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41370-024-00718-2>

Geyer, R., Jambeck, J. R. & Law, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci. Adv.* 3, e1700782 (2017). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>

Gigault, J. et al. Current opinion: What is a nanoplastic? *Environmental Pollution* 235, 1030–1034 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.024>

Glausiusz, J. Toxicology: The plastics puzzle. *Nature* 508, 306–308 (2014). <https://doi.org/10.1038/508306a>

Glorio Patrucco, S., Rivoira, L., Bruzzoniti, M. C., Barbera, S. & Tassone, S. Development and application of a novel extraction protocol for the monitoring of microplastic contamination in widely consumed ruminant feeds. *Science of The Total Environment* 947, 174493 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174493>

Gou, Z., Wu, H., Li, S., Liu, Z. & Zhang, Y. Airborne micro- and nanoplastics: emerging causes of respiratory diseases. *Particle and Fibre Toxicology* 21, 50 (2024). <https://doi.org/10.1186/s12989-024-00613-6>

Grechi, N. et al. Microplastics are present in women's and cows' follicular fluid and polystyrene microplastics compromise bovine oocyte function in vitro. *eLife* 12, (2023). <https://doi.org/10.7554/eLife.86791.1>

Guo, X. et al. Discovery and analysis of microplastics in human bone marrow. *Journal of Hazardous Materials* 477, 135266 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135266>

Hale, R. C., Seeley, M. E., La Guardia, M. J., Mai, L. & Zeng, E. Y. A Global Perspective on Microplastics. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 125, e2018JC014719 (2020). <https://doi.org/10.1029/2018JC014719>

Hall-Spencer, J. M. & Harvey, B. P. Ocean acidification impacts on coastal ecosystem services due to habitat degradation. *Emerging Topics in Life Sciences* 3, 197–206 (2019). <https://doi.org/10.1042/ETLS20180117>

Harrison, R. G. Atmospheric electricity and cloud microphysics <https://cds.cern.ch/record/557170/files/p75.pdf> (Accessed May 1, 2025).

Hasan, M. M. et al. Impact of microplastics on terrestrial ecosystems: A plant-centric perspective. *Environmental Pollution and Management* 1, 223–234 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.epm.2024.11.002>

Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ. Environmental Impacts of Plastics: Moving beyond the perspective on waste. https://www.ufz.de/index.php?en=36336&webc_pm=44/2024 (Accessed May 1, 2025)

Ho, W.-K. et al. Sorption Behavior, Speciation, and Toxicity of Microplastic-Bound Chromium in Multisolute Systems. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 10, 27–32 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689>

Ho, W.-K. et al. Sorption Behavior, Speciation, and Toxicity of Microplastic-Bound Chromium in Multisolute Systems. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 10, 27–32 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689>

Hoffman, M. J. & Hittinger, E. Inventory and transport of plastic debris in the Laurentian Great Lakes. *Marine Pollution Bulletin* 115, 273–281 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.11.061>

Hofstede, L. T., Vasse, G. F. & Melgert, B. N. Microplastics: A threat for developing and repairing organs? *Cambridge Prisms: Plastics* 1, e19 (2023). <https://doi.org/10.1017/plc.2023.19>

How Much of the World's Plastic Waste Actually Gets Recycled? <https://www.visualcapitalist.com/how-much-plastic-gets-recycled> (Accessed May 1, 2025)

Huang, H. et al. Microplastics in the bloodstream can induce cerebral thrombosis by causing cell obstruction and lead to neurobehavioral abnormalities. *Sci. Adv.* 11, eadr8243 (2025). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adr8243>

Huang, S. et al. Detection and Analysis of Microplastics in Human Sputum. *Environ. Sci. Technol.* 56, 2476–2486 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03859>

Huang, S. et al. Plastic Waste Management Strategies and Their Environmental Aspects: A Scientometric Analysis and Comprehensive Review. *IJERPH* 19, 4556 (2022). <https://doi.org/10.3390/ijerph19084556>

IERS Earth Orientation Center of the Paris Observatory. Day length – Earth orientation parameters: https://datacenter.iers.org/singlePlot.php?plotname=EOPC04_14_62-NOW_IAU1980-LOD&id=223 (Accessed May 1, 2025).

Iizuka, T. et al. Mono-(2-ethyl-5-hydroxyhexyl) phthalate promotes uterine leiomyoma cell survival through tryptophan-kynurenine-AHR pathway activation. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 119, e2208886119 (2022). <https://doi.org/10.1073/pnas.2208886119>

Institute of Marine Sciences (ICM-CSIC). Plastic degradation in the ocean contributes to its acidification. <https://www.icm.csic.es/en/news/plastic-degradation-ocean-contributes-its-acidification> (Accessed May 1, 2025).

IPCC. Global Warming of 1.5°C. (Cambridge University Press, 2022). <https://doi.org/10.1017/9781009157940> (Accessed May 1, 2025).

Irigoién, X. et al. Large mesopelagic fishes biomass and trophic efficiency in the open ocean. *Nat Commun* 5, 3271 (2014). <https://doi.org/10.1038/ncomms4271>

Islam, W., Zeng, F., Alotaibi, M. O. & Khan, K. A. Unlocking the potential of soil microbes for sustainable desertification management. *Earth-Science Reviews* 252, 104738 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104738>

Ivar Do Sul, J. A. & Costa, M. F. The present and future of microplastic pollution in the marine environment. *Environmental Pollution* 185, 352–364 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.036>

Ivleva, N. P. Chemical Analysis of Microplastics and Nanoplastics: Challenges, Advanced Methods, and Perspectives. *Chem. Rev.* 121, 11886–11936 (2021). <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00178>

James P. Barry, Stephen Widdicombe, and Jason M. Hall-Spencer. Effects of ocean acidification on marine biodiversity and ecosystem function. *Ocean acidification*, edited by Jean-Pierre Gattuso, Lina Hansson. Oxford, Oxford University Press, 2011. <https://books.google.com.ua/books?id=8y-jNFxkALjIC&pg=PA192>

Jamieson, D. T. & Tudhope, J. S. Physical properties of sea water solutions: thermal conductivity. *Desalination* 8, 393–401 (1970). [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)80240-4](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)80240-4)

Jeffrey, G. A. An Introduction to Hydrogen Bonding (Oxford University Press, New York, 1997). <https://books.google.com/books?vid=ISBN0195095499>

Jenna R. Jambeck et al., Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science* 347, 768-771 (2015). <https://doi.org/10.1126/science.1260352>

Jeong, B. et al. Maternal exposure to polystyrene nanoplastics causes brain abnormalities in progeny. *Journal of Hazardous Materials* 426, 127815 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127815>

Jiefang Daily. Intestine is the second brain? It can also communicate with multiple organs in both directions | New People - Health News. (2025) <https://www.jfdaily.com/staticsg/res/html/web/newsDetail.html?id=866347> (Accessed May 1, 2025).

Jochum, M. et al. Elevated Micro- and Nanoplastics Detected in Preterm Human Placentae. Preprint (2025). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5903715/v1>

Johnson, Gregory C., et al. "Argo-Two Decades: Global Oceanography, Revolutionized." *Annual Review of Marine Science*, vol. 14, 2022, pp. 379–403. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-022521-102008>.

Kahane-Rapport, S. R. et al. Field measurements reveal exposure risk to microplastic ingestion by filter-feeding megafauna. *Nat Commun* 13, 6327 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33334-5>

Karim, A. et al. Interfacial Interactions between Nanoplastics and Biological Systems: toward an Atomic and Molecular Understanding of Plastics-Driven Biological Dyshomeostasis. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 16, 25740–25756 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsami.4c03008>

Karlsruhe Institute of Technology. Blind spots in the monitoring of plastic waste https://www.kit.edu/kit/english/pi_2022_097_blind-spots-in-the-monitoring-of-plastic-waste.php (Accessed May 1, 2025)

Kaushik, A., Singh, A., Kumar Gupta, V. & Mishra, Y. K. Nano/micro-plastic, an invisible threat getting into the brain. *Chemosphere* 361, 142380 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142380>

Khan, A. & Jia, Z. Recent insights into uptake, toxicity, and molecular targets of microplastics and nanoplastics relevant to human health impacts. *iScience* 26, 106061 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106061>

Khatuntsev, I. V. et al. Cloud level winds from the Venus Express Monitoring Camera imaging. *Icarus* 226, 140–158 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.05.018>

Khutorskoy, M. D., & Polyak, B. G. (2014). Reflection of contrasting geodynamic settings in the thermal field. *Georesources*, (2), 24–43.

Kim, D. Y. et al. Effects of Microplastic Accumulation on Neuronal Death After Global Cerebral Ischemia. *Cells* 14, 241 (2025). <https://doi.org/10.3390/cells14040241>

Kim, N.-H., Choo, H.-I. & Lee, Y.-A. Effect of nanoplastic intake on the dopamine system during the development of male mice. *Neuroscience* 555, 11–22 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2024.07.018>

Kiyama, Y., Miyahara, K. & Ohshima, Y. Active uptake of artificial particles in the nematode *Caenorhabditis elegans*. *Journal of Experimental Biology* 215, 1178–1183 (2012). <https://doi.org/10.1242/jeb.067199>

Kopatz, V. et al. Micro- and Nanoplastics Breach the Blood–Brain Barrier (BBB): Biomolecular Corona's Role Revealed. *Nanomaterials* 13, 1404 (2023). <https://doi.org/10.3390/nano13081404>

Kopp, G. & Lean, J. L. A New, Lower Value of Total Solar Irradiance: Evidence and Climate Significance. *Geophysical Research Letters* 38, L01706 (2011). <https://doi.org/10.1029/2010GL045777>

Kosuth, M., Mason, S. A. & Wattenberg, E. V. Anthropogenic contamination of tap water, beer, and sea salt. *PLoS ONE* 13, e0194970 (2018). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194970>

Laage, D., Elsaesser, T. & Hynes, J. T. Water Dynamics in the Hydration Shells of Biomolecules. *Chem. Rev.* 117, 10694–10725 (2017). <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00765>

- LaFemina, P. C. Plate Tectonics and Volcanism. in *The Encyclopedia of Volcanoes* (ed. Sigurdsson, H.) 65–92 (Academic Press, 2015). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00003-1>
- Lamb, J. B. et al. Plastic waste associated with disease on coral reefs. *Science* 359, 460–462 (2018). <https://doi.org/10.1126/science.aar3320>
- Laufkötter, C., Zscheischler, J. & Frölicher, T. L. High-impact marine heatwaves attributable to human-induced global warming. *Science* 369, 1621–1625 (2020). <https://doi.org/10.1126/science.aba0690>
- Lax, J. Y., Price, C. & Saaroni, H. On the Spontaneous Build-Up of Voltage between Dissimilar Metals Under High Relative Humidity Conditions. *Sci Rep* 10, 7642 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64409-2>
- Lear, G., Kingsbury, J.M., Franchini, S. et al. Plastics and the microbiome: impacts and solutions. *Environmental Microbiome* 16, 2 (2021). <https://doi.org/10.1186/s40793-020-00371-w>
- Lebreton, L. et al. Seven years into the North Pacific garbage patch: legacy plastic fragments rising disproportionately faster than larger floating objects. *Environ. Res. Lett.* 19, 124054 (2024). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad78ed>
- Lebreton, L., Egger, M. & Slat, B. A global mass budget for positively buoyant macroplastic debris in the ocean. *Sci Rep* 9, 12922 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49413-5>
- Lebreton, L., Slat, B., Ferrari, F. et al. Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. *Sci Rep* 8, 4666 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22939-w>
- Lépine, J.-P. & Briley, M. The increasing burden of depression. *NDT* 7, 3–7 (2011). <https://doi.org/10.2147/NDT.S19617>
- Levine, H. et al. Male reproductive health statement (XIIITH international symposium on Spermatology, may 9th–12th 2018, Stockholm, Sweden. *Basic Clin. Androl.* 28, 13 (2018). <https://doi.org/10.1186/s12610-018-0077-z>
- Levine, H. et al. Temporal trends in sperm count: a systematic review and meta-regression analysis of samples collected globally in the 20th and 21st centuries. *Human Reproduction Update* 29, 157–176 (2023). <https://doi.org/10.1093/humupd/dmac035>
- Li, D., Shi, Y., Yang, L. et al. Microplastic release from the degradation of polypropylene feeding bottles during infant formula preparation. *Nat Food* 1, 746–754 (2020). <https://doi.org/10.1038/s43016-020-00171-y>
- Li, H. et al. Detection of microplastics in domestic and fetal pigs' lung tissue in natural environment: A preliminary study. *Environmental Research* 216, 114623 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114623>
- Li, N. et al. Prevalence and implications of microplastic contaminants in general human seminal fluid: A Raman spectroscopic study. *Science of The Total Environment* 937, 173522 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173522>
- Li, W. et al. Uptake and effect of carboxyl-modified polystyrene microplastics on cotton plants. *Journal of Hazardous Materials* 466, 133581 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133581>

Li, X. et al. Mitochondrial proteins and congenital birth defect risk: a mendelian randomization study. BMC Pregnancy Childbirth 25, 444 (2025). <https://doi.org/10.1186/s12884-025-07562-8>

Li, Y. et al. Potential Health Impact of Microplastics: A Review of Environmental Distribution, Human Exposure, and Toxic Effects. Environ. Health 1, 249–257 (2023). <https://doi.org/10.1021/envhealth.3c00052>

Lian, J. et al. Do polystyrene nanoplastics affect the toxicity of cadmium to wheat (*Triticum aestivum* L.)? Environmental Pollution 263, 114498 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114498>

Lide, D. R. (ed.) CRC Handbook of Chemistry and Physics, 85th edn (CRC Press, 2004).

Liebezeit, G. & and Liebezeit, E. Non-pollen particulates in honey and sugar. Food Additives & Contaminants: Part A 30, 2136–2140 (2013). <https://doi.org/10.1080/19440049.2013.843025>

Liu, S. et al. Microplastics in three types of human arteries detected by pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry (Py-GC/MS). Journal of Hazardous Materials 469, 133855 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133855>

Lusher, A. (2015). Microplastics in the Marine Environment: Distribution, Interactions and Effects. In: Bergmann, M., Gutow, L., Klages, M. (eds) Marine Anthropogenic Litter. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_10

Lyons, J.J., Haney, M.M., Fee, D. et al. Infrasound from giant bubbles during explosive submarine eruptions. Nat. Geosci. 12, 952–958 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0461-0>

Maganti, S. S. & Akkina, R. C. Detection and characterisation of microplastics in animal feed. ojafr 13, 348–356 (2023). <https://doi.org/10.51227/ojafr.2023.50>

Mandal, M., Roy, A., Popek, R. & Sarkar, A. Micro- and nano- plastic degradation by bacterial enzymes: A solution to ‘White Pollution’. The Microbe 3, 100072 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.microb.2024.100072>

Manzi, F., Schlösser, P., Owczarz, A. & Wolinska, J. Polystyrene nanoplastics differentially influence the outcome of infection by two microparasites of the host *Daphnia magna*. Phil. Trans. R. Soc. B 378, 20220013 (2023). <https://doi.org/10.1098/rstb.2022.0013>

Marfella, R. et al. Microplastics and Nanoplastics in Atheromas and Cardiovascular Events. N Engl J Med 390, 900–910 (2024). <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2309822>

Martin-Folgar, R. et al. Molecular effects of polystyrene nanoplastics on human neural stem cells. PLOS ONE 19, e0295816 (2024). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295816>

Medindia. Study unravels how mitochondrial dysfunction leads to premature aging. (2022) <https://www.medindia.net/news/study-unravels-how-mitochondrial-dysfunction-leads-to-premature-aging-208364-1.htm> (Accessed May 1, 2025).

Meinen, C. S., Perez, R. C., Dong, S., Piola, A. R. & Campos, E. Observed Ocean Bottom Temperature Variability at Four Sites in the Northwestern Argentine Basin: Evidence of Decadal Deep/Abyssal Warming Amidst Hourly to Interannual Variability During 2009–2019. *Geophysical Research Letters* 47, e2020GL089093 (2020). <https://doi.org/10.1029/2020GL089093>

Microplastics pose risk to ocean plankton, climate, other key Earth systems. Mongabay. (2023) <https://news.mongabay.com/2023/10/microplastics-pose-risk-to-ocean-plankton-climate-other-key-earth-systems> (accessed 1 May 2025).

Moiniafshari, K. et al. A perspective on the potential impact of microplastics and nanoplastics on the human central nervous system. *Environmental Science: Nano* 12, 1809–1820 (2025). <https://doi.org/10.1039/D4EN01017E>

Montano, L. et al. First evidence of microplastics in human ovarian follicular fluid: An emerging threat to female fertility. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 291, 117868 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.117868>

Moore, C. J., Moore, S. L., Leecaster, M. K. & Weisberg, S. B. A Comparison of Plastic and Plankton in the North Pacific Central Gyre. *Marine Pollution Bulletin* 42, 1297–1300 (2001). [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(01\)00114-X](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(01)00114-X)

Moresco, V. et al. Binding, recovery, and infectiousness of enveloped and non-enveloped viruses associated with plastic pollution in surface water. *Environmental Pollution* 308, 119594 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119594>

Morishige, C., Donohue, M. J., Flint, E., Swenson, C. & Woolaway, C. Factors affecting marine debris deposition at French Frigate Shoals, Northwestern Hawaiian Islands Marine National Monument, 1990–2006. *Marine Pollution Bulletin* 54, 1162–1169 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.04.014>

Muhonja, C. N., Makonde, H., Magoma, G. & Imbuga, M. Biodegradability of polyethylene by bacteria and fungi from Dandora dumpsite Nairobi-Kenya. *PLOS ONE* 13, e0198446 (2018). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198446>

Murano, C., Bergami, E., Liberatori, G., Palumbo, A. & Corsi, I. Interplay Between Nanoplastics and the Immune System of the Mediterranean Sea Urchin *Paracentrotus lividus*. *Front. Mar. Sci.* 8, 647394 (2021). <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.647394>

Murazzi, M. E., Pradel, A., Schefer, R. B., Gessler, A. & Mitrano, D. M. Uptake and physiological impacts of nanoplastics in trees with divergent water use strategies. *Environ. Sci.: Nano* 11, 3574–3584 (2024). <https://doi.org/10.1039/D4EN00286E>

Nanthini devi, K., Raju, P., Santhanam, P. & Perumal, P. Impacts of microplastics on marine organisms: Present perspectives and the way forward. *Egyptian Journal of Aquatic Research* 48, 205–209 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2022.03.001>

Nanthini devi, K., Raju, P., Santhanam, P. & Perumal, P. Impacts of microplastics on marine organisms: Present perspectives and the way forward. Egyptian Journal of Aquatic Research 48, 205–209 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2022.03.001>

NASA. NASA Analysis Shows Unexpected Amount of Sea Level Rise in 2024 <https://sealevel.nasa.gov/news/282/nasa-analysis-shows-unexpected-amount-of-sea-level-rise-in-2024> (Accessed May 1, 2025).

NASA. Steamy relationships: How atmospheric water vapor amplifies Earth's greenhouse effect. (2022) <https://science.nasa.gov/earth/climate-change/steamy-relationships-how-atmospheric-water-vapor-amplifiesearths-greenhouse-effect> (Accessed May 1, 2025).

NASA. Tracking 30 Years of Sea Level Rise <https://earthobservatory.nasa.gov/images/150192/tracking-30-years-of-sea-level-rise> (Accessed May 1, 2025).

NASA. What are Phytoplankton? <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Phytoplankton> (Accessed May 1, 2025).

National Center for Biotechnology Information. Bisphenol A, 2D Structure. PubChem. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/1017#section=2D-Structure> (Accessed May 1, 2025).

National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases. Overweight & obesity statistics. NIDDK. (2021) <https://www.niddk.nih.gov/health-information/health-statistics/overweight-obesity> (Accessed May 1, 2025).

Nava, V., Chandra, S., Aherne, J. et al. Plastic debris in lakes and reservoirs. Nature 619, 317–322 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06168-4>

NBC News. '12 months of record ocean heat has scientists puzzled and concerned'. (2024) <https://www.nbcnews.com/science/environment/oceans-record-hot-rcna143179> (Accessed May 10, 2025).

NBC News. Oceans hit record-hot temperatures. (2024) <https://www.nbcnews.com/science/environment/oceans-record-hot-rcna143179> (Accessed May 1, 2025).

New Atlas. Autism in boys linked to common plastic exposure in the womb. (2024) <https://newatlas.com/health-wellbeing/prenatal-bisphenol-a-bpa-autism-boys> (Accessed May 1, 2025).

News-Medical. Plasticizers can impair important brain functions in humans. (2021) <https://www.news-medical.net/news/20210412/Plasticizers-can-impair-important-brain-functions-in-humans.aspx> (Accessed May 1, 2025).

Ng, E.-L. et al. An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems. Science of The Total Environment 627, 1377–1388 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.341>

Nihart, A.J., Garcia, M.A., El Hayek, E. et al. Bioaccumulation of microplastics in decedent human brains. Nat Med 31, 1114–1119 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03453-1>

Nippon.com. Japan's aging society. <https://www.nippon.com/en/features/h00194> (Accessed May 1, 2025).

NOAA Ocean Exploration. 'Marine Life'. (n.d.) <https://oceanexplorer.noaa.gov/explainers/marine-life.html> (Accessed May 10, 2025).

NOAA Ocean Service. 'How far does light travel in the ocean?'. (n.d.) https://oceanservice.noaa.gov/facts/light_travel.html (Accessed May 10, 2025).

NOAA. Data on the position of the North Magnetic Pole. <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/data/poles/NP.xy> (Accessed May 1, 2025).

NOAA. Earth had its warmest year on record; Upper-ocean heat content was record high while Antarctic sea ice was record low. <https://www.ncei.noaa.gov/news/global-climate-202312> (Accessed May 1, 2025).

NOAA. How much oxygen comes from the ocean? <https://oceanservice.noaa.gov/facts/ocean-oxygen.html> (Accessed May 1, 2025).

NOAA. Ocean heat content. www.nodc.noaa.gov/OC5/3M_HEAT_CONTENT (Accessed May 1, 2025).

O'Hanlon, N. J., James, N. A., Masden, E. A. & Bond, A. L. Seabirds and marine plastic debris in the northeastern Atlantic: A synthesis and recommendations for monitoring and research. Environmental Pollution 231, 1291–1301 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.101>

Obbard, R. W. et al. Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic Sea ice. Earth's Future 2, 315–320 (2014). <https://doi.org/10.1002/2014EF000240>

Ocean Blue Project. Plastic Pollution in the Ocean: How Many Animals Die from Pollution? (2021) <https://oceanblueproject.org/wp-content/uploads/2023/02/how-many-animals-die-from-plastic-pollution-ocean-blue-report.pdf> (Accessed May 1, 2025).

OECD (2023) Note: Regional summary data was calculated by Our World in Data based on OECD-provided data. [OurWorldinData.org/plastic-pollution](https://ourworldindata.org/plastic-pollution) | CC BY <https://ourworldindata.org/grapher/share-plastic-fate?time=2019..latest> (Accessed May 1, 2025).

Oliveri Conti, G. et al. Micro- and nano-plastics in edible fruit and vegetables. The first diet risks assessment for the general population. Environmental Research 187, 109677 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109677>

Organisation for Economic Co-operation and Development. Do adults have the skills they need to thrive in a changing world? OECD Publications. (2024) https://www.oecd.org/en/publications/do-adults-have-the-skills-they-need-to-thrive-in-a-changing-world_b263dc5d-en.html (Accessed May 1, 2025).

Oßmann, B. E. et al. Small-sized microplastics and pigmented particles in bottled mineral water. Water Research 141, 307–316 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.027>

Ostle, C. et al. The rise in ocean plastics evidenced from a 60-year time series. Nat Commun 10,

Our World in Data. Annual plastic waste by disposal method, World, 2000 to 2019. <https://ourworldindata.org/grapher/plastic-fate> (Accessed May 1, 2025).

Our World in Data. Cancer deaths by type, World. <https://ourworldindata.org/grapher/cancer-deaths-by-type-grouped> (Accessed May 1, 2025).

Our World in Data. Deaths from diabetes by type 1980-2021. <https://ourworldindata.org/grapher/deaths-from-diabetes-by-type> (Accessed May 1, 2025).

Our World in Data. Microplastics in the ocean. <https://ourworldindata.org/grapher/microplastics-in-ocean> (Accessed May 1, 2025).

Our World in Data. Number of deaths from cardiovascular diseases by age, worldwide. <https://ourworldindata.org/grapher/cardiovascular-disease-deaths-by-age> (Accessed May 1, 2025).

Panisi, C. & Marini, M. Dynamic and Systemic Perspective in Autism Spectrum Disorders: A Change of Gaze in Research Opens to A New Landscape of Needs and Solutions. *Brain Sciences* 12, 250 (2022). <https://doi.org/10.3390/brainsci12020250>

Pantos, O. Microplastics: impacts on corals and other reef organisms. *Emerging Topics in Life Sciences* 6, 81–93 (2022). <https://doi.org/10.1042/ETLS20210236>

Park, S. Y. & Kim, C. G. Biodegradation of micro-polyethylene particles by bacterial colonization of a mixed microbial consortium isolated from a landfill site. *Chemosphere* 222, 527–533 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.159>

Pauling, L. *The Nature of the Chemical Bond*, 3rd edn, Chapter 12-2 (Cornell Univ. Press, 1960).

Pegler, S.S., Ferguson, D.J. Rapid heat discharge during deep-sea eruptions generates megaplumes and disperses tephra. *Nat Commun* 12, 2292 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22439-y>

Peking University Center for Environmental Science and Engineering. Prof. Yi Huang's team made new progress in atmospheric microplastic distribution and its human health risk. CESE. (2022) <https://cese.pku.edu.cn/kycg/156506.htm> (Accessed May 1, 2025).

Peng, X. et al. Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean. *Geochem. Persp. Let.* 9, 1–5 (2018). <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1829>

Perini, D. A. et al. Surface-Functionalized Polystyrene Nanoparticles Alter the Transmembrane Potential via Ion-Selective Pores Maintaining Global Bilayer Integrity. *Langmuir* 38, 14837–14849 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.2c02487>

Polyak, B. G., & Khutorskoy, M. D. (2018). Heat flow from the Earth's interior as an indicator of deep-seated processes. *Georesources*, 20(4), Part 2, 366–376. <https://doi.org/10.18599/grs.2018.4.366-376>

[Phys.org](https://phys.org). Quantum effects in proteins: How tiny particles coordinate energy transfer inside cells. (2025) <https://phys.org/news/2025-05-quantum-effects-proteins-tiny-particles.html> (Accessed May 10, 2025).

Plastics News. Study highlights health hazards of microplastics. (2019) <https://www.plasticsnews.com/news/study-highlights-health-hazards-microplastics> (Accessed May 1, 2025).

Pinheiro, H. T. et al. Plastic pollution on the world's coral reefs. Nature 619, 311–316 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06113-5>

Pollack, H. N., Hurter, S. J. & Johnson, J. R. Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set. Rev. Geophys. 31, 267–280 (1993). <https://doi.org/10.1029/93RG01249>

Prata, J. C. et al. Microplastics in Internal Tissues of Companion Animals from Urban Environments. Animals 12, 1979 (2022). <https://doi.org/10.3390/ani12151979>

Ragusa, A. et al. Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. Environment International 146, 106274 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106274>

Ragusa, A. et al. Raman Microspectroscopy Detection and Characterisation of Microplastics in Human Breastmilk. Polymers 14, 2700 (2022). <https://doi.org/10.3390/polym14132700>

Rahman, A. M. N. A. A. et al. A review of microplastic surface interactions in water and potential capturing methods. Water Science and Engineering 17, 361–370 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.11.008>

Rai, P. K., Sonne, C., Brown, R. J. C., Younis, S. A. & Kim, K.-H. Adsorption of environmental contaminants on micro- and nano-scale plastic polymers and the influence of weathering processes on their adsorptive attributes. Journal of Hazardous Materials 427, 127903 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127903>

Rajendran, D. & Chandrasekaran, N. Journey of micronanoplastics with blood components. RSC Adv. 13, 31435–31459 (2023). <https://doi.org/10.1039/D3RA05620A>

Ramsperger, A. F. R. M. et al. Environmental exposure enhances the internalization of microplastic particles into cells. Sci. Adv. 6, eabd1211 (2020). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd1211>

Rantanen, M., Karpechko, A.Y., Lipponen, A. et al. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. Commun Earth Environ 3, 168 (2022). <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>

Reichert, J., Schellenberg, J., Schubert, P. & Wilke, T. Responses of reef building corals to microplastic exposure. Environmental Pollution 237, 955–960 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.006>

Riazi, H. et al. Specific heat control of nanofluids: A critical review. International Journal of Thermal Sciences 107, 25–38 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.03.024>

Ribe, E., Cezaud, G. I., Marshall, A. & Keenan, K. Younger but sicker? Cohort trends in disease accumulation among middle-aged and older adults in Scotland using health-linked data from the Scottish Longitudinal Study. European Journal of Public Health 34, 696–703 (2024). <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckae062>

Rillig, M. C., Ingraffia, R. & De Souza Machado, A. A. Microplastic Incorporation into Soil in Agroecosystems. Front. Plant Sci. 8, 1805 (2017). <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01805>

Rogers, T. The political economy of autism. Substack. <https://tobyrogers.substack.com/p/the-political-economy-of-autism> (Accessed May 1, 2025).

Roman, L., Hardesty, B. D., Hindell, M. A. & Wilcox, C. A quantitative analysis linking seabird mortality and marine debris ingestion. *Sci Rep* 9, 3202 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36585-9>

Romera-Castillo, C. et al. Abiotic plastic leaching contributes to ocean acidification. *Science of The Total Environment* 854, 158683 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158683>

Romps, D. M., Seeley, J. T., Vollaro, D. & Molinari, J. Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming. *Science* 346, 851–854 (2014). <https://doi.org/10.1126/science.1259100>

Rosenthal, Y. et al. Pacific Ocean Heat Content During the Past 10,000 Years. *Science* 342, 617–621 (2013). <https://doi.org/10.1126/science.1240837>

Rosenthal, Y., Linsley, B. K., & Oppo, D. W. (2013). Pacific Ocean Heat Content During the Past 10,000 Years. *Science*, 342(6158), 617–621. <https://doi.org/10.1126/science.1240837>; Oppo, D. (2013, October 31). Is Global Heating Hiding Out in the Oceans? <https://www.earth.columbia.edu/articles/view/3130> (Accessed May 1, 2025)

Rubin, B. S. Bisphenol A: An endocrine disruptor with widespread exposure and multiple effects. *The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology* 127, 27–34 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.jsbmb.2011.05.002>

Sajjad, M. et al. Microplastics in the soil environment: A critical review. *Environmental Technology & Innovation* 27, 102408 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102408>

Sarkar, P., Xavier, K. A. M., Shukla, S. P. & Rathi Bhuvaneswari, G. Nanoplastic exposure inhibits growth, photosynthetic pigment synthesis and oxidative enzymes in microalgae: A new threat to primary producers in aquatic environment. *Journal of Hazardous Materials Advances* 17, 100613 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100613>

Savoca, M. S., McInturf, A. G. & Hazen, E. L. Plastic ingestion by marine fish is widespread and increasing. *Global Change Biology* 27, 2188–2199 (2021). <https://doi.org/10.1111/gcb.15533>

Savoca, M. S., Wohlfeil, M. E., Ebeler, S. E. & Nevitt, G. A. Marine plastic debris emits a keystone infochemical for olfactory foraging seabirds. *Sci. Adv.* 2, e1600395 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600395>

Schmidt, C. et al. A multidisciplinary perspective on the role of plastic pollution in the triple planetary crisis. *Environment International* 193, 109059 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.109059>

Schmidt, C., Krauth, T. & Wagner, S. Export of Plastic Debris by Rivers into the Sea. *Environ. Sci. Technol.* 51, 12246–12253 (2017). <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b02368>

Schymanski, D., Goldbeck, C., Humpf, H.-U. & Fürst, P. Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy: Release of plastic particles from different packaging into mineral water. *Water Research* 129, 154–162 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.11.011>

Science News Explores. Seafloor hosts surprising number of deep-sea vents. (2016) <https://www.snewsexplores.org/article/seafloor-hosts-surprising-number-deep-sea-vents> (Accessed May 10, 2025).

ScienceDirect. Food allergy. ScienceDirect Topics. <https://www.sciencedirect.com/topics/pharmacology-toxicology-and-pharmaceutical-science/food-allergy> (Accessed May 1, 2025).

ScienceDirect. Inflammatory bowel disease. ScienceDirect Topics. <https://www.sciencedirect.com/topics/pharmacology-toxicology-and-pharmaceutical-science/inflammatory-bowel-disease> (Accessed May 1, 2025).

ScienceDirect. Ingestion. ScienceDirect Topics. <https://www.sciencedirect.com/topics/biochemistry-genetics-and-molecular-biology/ingestion> (Accessed May 1, 2025).

Scott C. Doney, D. Shallin Busch, Sarah R. Cooley and Kristy J. Kroeker. The Impacts of Ocean Acidification on Marine Ecosystems and Reliant Human Communities. Annual Review of Environment and Resources 45, 83–112 (2020). <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-083019>

Senathirajah, K. et al. Estimation of the mass of microplastics ingested – A pivotal first step towards human health risk assessment. Journal of Hazardous Materials 404, 124004 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124004>

Shafea, L. et al. Microplastics in agroecosystems: A review of effects on soil biota and key soil functions. J. Plant Nutr. Soil Sci. 186, 5–22 (2023). <https://doi.org/10.1002/jpln.202200136>

Shanwei Government. Content on environmental health. Microplastics found in the human body for the first time, are they harmful to health? Here's the answer. https://www.shanwei.gov.cn/swhbj/467/503/content/post_550539.html (Accessed May 1, 2025).

Shapiro-Mendoza, C. K. et al. Sudden Unexpected Infant Deaths: 2015–2020. Pediatrics 151, e2022058820 (2023). <https://doi.org/10.1542/peds.2022-058820>

Sharma, R. K. et al. Impact of Microplastics on Pregnancy and Fetal Development: A Systematic Review. Cureus 16, e60712 (2024). <https://doi.org/10.7759/cureus.60712>

Sharqawy, M. H., Lienhard, J. H. & Zubair, S. M. Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data. Desalination and Water Treatment 16, 354–380 (2010). <https://doi.org/10.5004/dwt.2010.1079>

Shaw, D. B., Li, Q., Nunes, J. K. & Deike, L. Ocean emission of microplastic. PNAS Nexus 2, pgad296 (2023). <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad296>

Smith, A. L. M., Whitehall, J. C. & Greaves, L. C. Mitochondrial DNA mutations in ageing and cancer. Molecular Oncology 16, 3276–3294 (2022). <https://doi.org/10.1002/1878-0261.13291>

Sofield, C. E., Anderton, R. S. & Gorecki, A. M. Mind over Microplastics: Exploring Microplastic-Induced Gut Disruption and Gut-Brain-Axis Consequences. Current Issues in Molecular Biology 46, 4186–4202 (2024). <https://doi.org/10.3390/cimb46050256>

Sori, M. M. & Bramson, A. M. Water on Mars, With a Grain of Salt: Local Heat Anomalies Are Required for Basal Melting of Ice at the South Pole Today. *Geophysical Research Letters* 46, 1222–1231 (2019). <https://doi.org/10.1029/2018GL080985>

Stallings, E. B. et al. National population-based estimates for major birth defects, 2016–2020. *Birth Defects Research* 116, e2301 (2024). <https://doi.org/10.1002/bdr2.2301>

Strass, V. H., Rohardt, G., Kanzow, T., Hoppema, M. & Boebel, O. Multidecadal warming and density loss in the Deep Weddell Sea, Antarctica. *Journal of Climate* 33, 9863–9881 (2020). <https://doi.org/10.1175/jcli-d-20-0271.1>

Su, M. et al. Toxicity Mechanisms of Microplastic and Its Effects on Ruminant Production: A Review. *Biomolecules* 15, 462 (2025). <https://doi.org/10.3390/biom15040462>

Sun, D., Li, F., Jing, Z., Hu, S., & Zhang, B. (2023). Frequent marine heatwaves hidden below the surface of the global ocean. *Nature Geoscience*, 16(12), 1099–1104. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01325-w>

Sun, Q. et al. Association of Urinary Concentrations of Bisphenol A and Phthalate Metabolites with Risk of Type 2 Diabetes: A Prospective Investigation in the Nurses' Health Study (NHS) and NHSII Cohorts. *Environ Health Perspect* 122, 616–623 (2014). <https://doi.org/10.1289/ehp.1307201>

Sun, R. et al. Preliminary study on impacts of polystyrene microplastics on the hematological system and gene expression in bone marrow cells of mice. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 218, 112296 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112296>

Sun, XD., Yuan, XZ., Jia, Y. et al. Differentially charged nanoplastics demonstrate distinct accumulation in *Arabidopsis thaliana*. *Nat. Nanotechnol.* 15, 755–760 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41565-020-0707-4>

Sunaga, N., Okochi, H., Niida, Y. & Miyazaki, A. Alkaline extraction yields a higher number of microplastics in forest canopy leaves: implication for microplastic storage. *Environ Chem Lett* 22, 1599–1606 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01725-3>

Susanti, R., Yuniastuti, A. & Fibriana, F. The Evidence of Microplastic Contamination in Central Javanese Local Ducks from Intensive Animal Husbandry. *Water Air Soil Pollut* 232, 178 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05142-y>

Sustainable Plastics. Scientists find microplastics in clouds above Mount Fuji. Sustainable Plastics. <https://www.sustainableplastics.com/news/scientists-find-microplastics-clouds-above-mount-fuji> (Accessed May 1, 2025).

Symeonides, C., Vacy, K., Thomson, S. et al. Male autism spectrum disorder is linked to brain aromatase disruption by prenatal BPA in multimodal investigations and 10HDA ameliorates the related mouse phenotype. *Nat Commun* 15, 6367 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48897-8>

Taylor, R., Turnbull, D. Mitochondrial DNA mutations in human disease. *Nat Rev Genet* 6, 389–402 (2005). <https://doi.org/10.1038/nrg1606>

The Cool Down. 'Experts raise concerns about record-breaking phenomenon observed in Atlantic Ocean: 'It's just astonishing". (2024) <https://www.thecoldown.com/outdoors/ocean-temperature-pollution-sudden-spike/> (Accessed May 10, 2025)

The European Space Agency (ESA). <https://www.esa.int> (Accessed May 1, 2025).

The Guardian. Autism could be diagnosed with stool sample, scientists say. <https://www.theguardian.com/science/article/2024/jul/08/autism-could-be-diagnosed-with-stool-sample-microbes-research> (Accessed May 1, 2025).

The Guardian. Hot blob: vast patch of warm water off New Zealand coast puzzles scientists. (2019) <https://www.theguardian.com/world/2019/dec/27/hot-blob-vast-and-unusual-patch-of-warm-water-off-new-zealand-coast-puzzles-scientists> (Accessed May 10, 2025).

The Guardian. Mental health overtakes cancer and obesity as Britons' biggest health worry. (2024) <https://www.theguardian.com/society/2024/sep/20/mental-health-overtakes-cancer-and-obesity-as-britons-biggest-health-worry> (Accessed May 1, 2025).

The Guardian. Scientists unveil bionic robo-fish to remove microplastics from seas. <https://www.theguardian.com/environment/2022/jun/22/scientists-unveil-bionic-robo-fish-to-remove-microplastics-from-seas> (Accessed May 1, 2025).

The Guardian. Shanna Swan: 'Most couples may have to use assisted reproduction by 2045'. (2021) <https://www.theguardian.com/society/2021/mar/28/shanna-swan-fertility-reproduction-count-down> (Accessed May 1, 2025).

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1> (Accessed May 1, 2025).

The International Union for Conservation of Nature (IUCN). Ocean deoxygenation. <https://iucn.org/resources/issues-brief/ocean-deoxygenation> (Accessed May 1, 2025).

The Ocean Foundation. Ocean conservation. The Ocean Foundation. <https://oceantfdn.org> (Accessed May 1, 2025).

The Pennsylvania State University Research. Microplastics impact cloud formation, likely affecting weather and climate. (2024) <https://www.psu.edu/news/research/story/microplastics-impact-cloud-formation-likely-affecting-weather-and-climate> (Accessed May 1, 2025).

Thompson, R. C. et al. Twenty years of microplastic pollution research—what have we learned? Science 386, eadl2746 (2024). <https://doi.org/10.1126/science.adl2746>

Tikhonova, D. A., Karetnikov, S. G., Ivanova, E. V. & Shalunova, E. P. The Vertical Distribution of Microplastics in the Water Column of Lake Ladoga. Water Resour 51, 146–153 (2024). <https://doi.org/10.1134/S009780782370063X>

Trasande, L. et al. Prenatal phthalate exposure and adverse birth outcomes in the USA: a prospective analysis of births and estimates of attributable burden and costs. The Lancet Planetary Health 8, e74–e85 (2024). [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(23\)00270-X](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(23)00270-X)

Tsujimura, A. et al. Erectile Function and Sexual Activity Are Declining in the Younger Generation: Results from a National Survey in Japan. *The World Journal of Men's Health* 43, 239–248 (2025). <https://doi.org/10.5534/wjmh.240137>

Tuna, A., Taş, B.M., Başaran Kankılıç, G. et al. Detection of microplastics in patients with allergic rhinitis. *Eur Arch Otorhinolaryngol* 280, 5363–5367 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00405-023-08105-7>

U.S. Department Of Health And Human Services. 2022 National Healthcare Quality and Disparities Report. Rockville, MD: Agency for Healthcare Research and Quality. (2022) <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK587174> (Accessed May 1, 2025).

United Nations Development Programme. Ocean hypoxia: Dead zones. <https://www.undp.org/publications/issue-brief-ocean-hypoxia-dead-zones> (Accessed May 1, 2025).

United Nations Environment Programme (2021). From Pollution to Solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution. Nairobi. <https://www.unep.org/resources/pollution-solution-global-assessment-marine-litter-and-plastic-pollution> (Accessed May 1, 2025)

United Nations Environment Programme (UNEP) Beat plastic pollution <https://www.unep.org/interactives/beat-plastic-pollution> (accessed: 1 May 2025)

United Nations Environment Programme. Chemicals in Plastics - A Technical Report (2023). <https://www.unep.org/resources/report/chemicals-plastics-technical-report> (Accessed May 1, 2025)

United Nations Environment Programme. Monitoring Plastics in Rivers and Lakes: Guidelines for the Harmonization of Methodologies. (2020) <https://www.unep.org/resources/report/monitoring-plastics-rivers-and-lakes-guidelines-harmonization-methodologies> (Accessed May 1, 2025)

United Nations Environment Programme (UNEP). Beat plastic pollution <https://www.unep.org/interactives/beat-plastic-pollution> (accessed: 1 May 2025)

United Nations Malaysia. Policy brief on solid waste management. UN Malaysia. https://malaysia.un.org/sites/default/files/2022-02/POLSOLSum_1.pdf (Accessed May 1, 2025).

University of Newcastle. Plastic ingestion by people could be equating to a credit card a week. <https://www.newcastle.edu.au/newsroom/featured/plastic-ingestion-by-people-could-be-equating-to-a-credit-card-a-week> (Accessed May 1, 2025)

University of Stirling. Hitch-hiking viruses can survive on microplastics in freshwater, new study finds. (2022) <https://www.stir.ac.uk/news/2022/june-2022-news/hitch-hiking-viruses-can-survive-on-microplastics-in-freshwater-new-study-finds> (Accessed May 1, 2025).

Valero, D., Belay, B. S., Moreno-Rodenas, A., Kramer, M. & Franca, M. J. The key role of surface tension in the transport and quantification of plastic pollution in rivers. *Water Research* 226, 119078 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119078>

Van der Veen, I., van Mourik, L.M., van Velzen, M.J.M., Groenewoud, Q.R., & Leslie, H.A. Plastic particles in livestock feed, milk, meat and blood: A pilot study. Report EH22-01, 29 April 2022. <https://vakbladvoedingsindustrie.nl/storage/app/media/Rapporten/rapporten%202022/07-juli/VOE-2022-JUL-PLASTICSOUPl.pdf> (Accessed May 1, 2025)

Van Schependom, J. & D'haeseleer, M. Advances in Neurodegenerative Diseases. *Journal of Clinical Medicine* 12, 1709 (2023). <https://doi.org/10.3390/jcm12051709>

Van Sebille, E., England, M. H. & Froyland, G. Origin, dynamics and evolution of ocean garbage patches from observed surface drifters. *Environ. Res. Lett.* 7, 044040 (2012). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044040>

Vanuytsel, T., Bercik, P. & Boeckxstaens, G. Understanding neuroimmune interactions in disorders of gut–brain interaction: from functional to immune-mediated disorders. *Gut* 72, 787–798 (2023). <https://doi.org/10.1136/gutjnl-2020-320633>

Vieira, F., & Hamza, V. M. Global heat flow: New estimates using digital maps and GIS techniques. *Int. J. Terr. Heat Flow Appl. Geotherm.* 1, 6–13 (2018).

Villarrubia-Gómez, P., Carney Almroth, B., Eriksen, M., Ryberg, M. & Cornell., S. E. Plastics pollution exacerbates the impacts of all planetary boundaries. *One Earth* 7, 2119–2138 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.10.017>

Viterito, A. 1995: An Important Inflection Point in Recent Geophysical History. *Int. J. Environ. Sci. Nat. Res.* 29, 556271 (2022). <https://doi.org/10.19080/IJESNR.2022.29.556271>

Völker, J., Ashcroft, F., Vedøy, Å., Zimmermann, L. & Wagner, M. Adipogenic Activity of Chemicals Used in Plastic Consumer Products. *Environ. Sci. Technol.* 56, 2487–2496 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c06316>

VRT NWS. Brain contains “full plastic spoonful” of microplastics. (2025) <https://www.vrt.be/vrtnws/nl/2025/02/04/microplastics-in-de-hersen> (Accessed May 1, 2025).

Wan, Y., Wu, C., Xue, Q. & Hui, X. Effects of plastic contamination on water evaporation and desiccation cracking in soil. *Science of The Total Environment* 654, 576–582 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.123>

Wang, Y. et al. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation. *Environ Chem Lett* 21, 3055–3062 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x>

Wang, Y. et al. Robust, Healable, Self-Locomotive Integrated Robots Enabled by Noncovalent Assembled Gradient Nanostructure. *Nano Lett.* 22, 5409–5419 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.2c01375>

Wang, Y., Okochi, H., Tani, Y. et al. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation. Environ Chem Lett 21, 3055–3062 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x>

Wei, W. et al. Analyzing the Trends and Causes of Birth Defects – Jinan City, Shandong Province, China, 2005–2022. CCDCW 5, 978–983 (2023). <https://doi.org/10.46234/ccdcw2023.184>

Welch, B. M. et al. Associations Between Prenatal Urinary Biomarkers of Phthalate Exposure and Preterm Birth: A Pooled Study of 16 US Cohorts. JAMA Pediatrics 176, 895–905 (2022). <https://doi.org/10.1001/jamapediatrics.2022.2252>

Windheim, J. et al. Micro- and Nanoplastics' Effects on Protein Folding and Amyloidosis. International Journal of Molecular Sciences 23, 10329 (2022). <https://doi.org/10.3390/ijms231810329>

Winiarska, E., Jutel, M. & Zemelka-Wiacek, M. The potential impact of nano- and microplastics on human health: Understanding human health risks. Environmental Research 251, 118535 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118535>

Wong, A. P. S. et al. Argo Data 1999–2019: Two Million Temperature-Salinity Profiles and Subsurface Velocity Observations From a Global Array of Profiling Floats. Front. Mar. Sci. 7, 00700 (2020). <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00700>

Wong, M. H. et al. Evolution of the Horizontal Winds in Jupiter's Great Red Spot From One Jovian Year of HST/WFC3 Maps. Geophysical Research Letters 48, e2021GL093982 (2021). <https://doi.org/10.1029/2021GL093982>

Woods Hole Oceanographic Institution. Warming ocean. WHOI Argo. <https://www2.whoi.edu/site/argo/impacts/warming-ocean> (Accessed May 1, 2025).

World Energy Council. World Energy Resources: Solar 2013. (2013) <https://www.worldenergy.org/publications> (Accessed May 10, 2025).

World Health Organization. 1 in 10 babies worldwide are born early, with major impacts on health and survival. (2023) <https://www.who.int/news/item/06-10-2023-1-in-10-babies-worldwide-are-born-early--with-major-impacts-on-health-and-survival> (Accessed May 1, 2025).

World Health Organization. 1 in 6 people globally affected by infertility. (2023) <https://www.who.int/news/item/04-04-2023-1-in-6-people-globally-affected-by-infertility> (Accessed May 1, 2025).

World Health Organization. Global cancer burden growing, amidst mounting need for services. (2024) <https://www.who.int/news/item/01-02-2024-global-cancer-burden-growing--amidst-mounting-need-for-services> (Accessed May 1, 2025).

World Health Organization. Mental disorders. WHO Fact Sheets. (2022) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/mental-disorders> (Accessed May 1, 2025).

World Health Organization. Obesity and overweight. WHO Fact Sheets. (2025) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight> (Accessed May 10, 2025).

World Health Organization. The top 10 causes of death. WHO Fact Sheets. (2024) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death> (Accessed May 1, 2025).

World Health Organization. WHO releases first-ever list of health-threatening fungi. (2022) <https://www.who.int/news/item/25-10-2022-who-releases-first-ever-list-of-health-threatening-fungi> (Accessed May 1, 2025).

World Meteorological Organization (WMO) confirms 2024 as warmest year on record at about 1.55°C above pre-industrial level. <https://wmo.int/news/media-centre/wmo-confirms-2024-warmest-year-record-about-155degc-above-pre-industrial-level> (Accessed May 1, 2025).

World Meteorological Organization (WMO). State of the Global Climate 2024. <https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate-2024> (Accessed May 1, 2025).

Wu, Y. et al. Effect of microplastics exposure on the photosynthesis system of freshwater algae. Journal of Hazardous Materials 374, 219–227 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.04.039>

WWF-Australia. How many birds die from plastic pollution? <https://wwf.org.au/blogs/how-many-birds-die-from-plastic-pollution> (Accessed May 1, 2025).

Xu, G., Strathearn, L., Liu, B., Yang, B. & Bao, W. Twenty-Year Trends in Diagnosed Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder Among US Children and Adolescents, 1997-2016. JAMA Network Open 1, e181471 (2018). <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2018.1471>

Xu, M. et al. Internalization and toxicity: A preliminary study of effects of nanoplastic particles on human lung epithelial cell. Science of The Total Environment 694, 133794 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133794>

Yadav, A., Vuković, L. & Narayan, M. An Atomic and Molecular Insight into How PFOA Reduces α-Helicity, Compromises Substrate Binding, and Creates Binding Pockets in a Model Globular Protein. J. Am. Chem. Soc. 146, 12766–12777 (2024). <https://doi.org/10.1021/jacs.4c02934>

Yee, M. S.-L. et al. Impact of Microplastics and Nanoplastics on Human Health. Nanomaterials 11, 496 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11020496>

Yöntem, F. D. & Ahbab, M. A. Mitochondria as a target of micro- and nanoplastic toxicity. Cambridge Prisms: Plastics 2, e6 (2024). <https://doi.org/10.1017/plc.2024.6>

Yoshida, S. et al. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). Science 351, 1196–1199 (2016). <https://doi.org/10.1126/science.aad6359>

Yu, H., Zhang, Y., Tan, W. & Zhang, Z. Microplastics as an Emerging Environmental Pollutant in Agricultural Soils: Effects on Ecosystems and Human Health. Front. Environ. Sci. 10, 855292 (2022). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.855292>

Yu, R.-S. & Singh, S. Microplastic Pollution: Threats and Impacts on Global Marine Ecosystems. *Sustainability* 15, 13252 (2023). <https://doi.org/10.3390/su151713252>

Zaheer, J. et al. Pre/post-natal exposure to microplastic as a potential risk factor for autism spectrum disorder. *Environment International* 161, 107121 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107121>

Zajac, M. et al. Exposure to polystyrene nanoparticles leads to changes in the zeta potential of bacterial cells. *Sci Rep* 13, 9552 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36603-5>

Zeidan, J. et al. Global prevalence of autism: A systematic review update. *Autism Research* 15, 778–790 (2022). <https://doi.org/10.1002/aur.2696>

Zhang, J., Wang, L., Trasande, L. & Kannan, K. Occurrence of Polyethylene Terephthalate and Polycarbonate Microplastics in Infant and Adult Feces. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 8, 989–994 (2021). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00559>

Zhang, W. et al. The mechanism for adsorption of Cr(VI) ions by PE microplastics in ternary system of natural water environment. *Environmental Pollution* 257, 113440 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113440>

Zhang, Y. et al. Selective bioaccumulation of polystyrene nanoplastics in fetal rat brain and damage to myelin development. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 278, 116393 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116393>

Zhang, Y., Wang, J., Yang, H. & Guan, Y. The potential mechanisms underlying phthalate-induced hypospadias: a systematic review of rodent model studies. *Front. Endocrinol.* 15, (2024). <https://doi.org/10.3389/fendo.2024.1490011>

Zhang, Y.-W. et al. Bridging relevance between microplastics, human health and bone metabolism: Emerging threats and research directions. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology* 6, 422–435 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2024.08.006>

Zhong, Y. et al. Global, regional and national burdens of bipolar disorders in adolescents and young adults: a trend analysis from 1990 to 2019. *Gen Psych* 37, e101255 (2024). <https://doi.org/10.1136/gpsych-2023-101255>

Zhu, R. et al. A global estimate of multiecosystem photosynthesis losses under microplastic pollution. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 122, e2423957122 (2025). <https://doi.org/10.1073/pnas.2423957122>

Zuin, M. et al. Trends in Sudden Cardiac Death Among Adults Aged 25 to 44 Years in the United States: An Analysis of 2 Large US Databases. *JAHA* 14, e035722 (2025). <https://doi.org/10.1161/JAHA.124.035722>