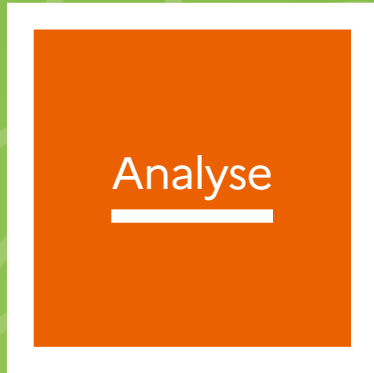




MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE
ET DE LA COHÉSION
DES TERRITOIRES

*Liberté
Égalité
Fraternité*



La France face aux neuf limites planétaires

OCTOBRE 2023

sommaire

La France face aux neuf limites planétaires

4 - Avant-propos

5 - Synthèse

13 - Introduction

15 - Les limites : perspective historique et cadre général

Présentation de l'origine et du cadre général du concept des limites planétaires depuis la parution du rapport Meadows *Les limites à la croissance*.

23 - Les neuf limites planétaires

Description des phénomènes planétaires, de leurs enjeux, de la responsabilité de la France et des moyens mis en œuvre pour éviter le franchissement des limites.

61 - Quelles utilisations du cadre des limites planétaires à l'échelle locale ?

Application du cadre des limites planétaires à l'échelle d'une entreprise et d'un territoire dans une optique de développement durable.

71 - Annexes

81 - Table des matières

Document édité par :
**Le service des données
et études statistiques (SDES)**



Publication disponible en HTML sur
www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr

coordinatrice



rédacteurs

Manuel Baude (CGDD)
Alexis Cerisier-Auger (CGDD)
Quentin Dassibat (université de Lyon)
Valérie Dossa-Thauvin (CGDD)
Natacha Gondran (Mines Saint-Étienne)
Anne Jacod (CGDD)*
Christelle Larrieu (CGDD)
Manuel Marquis (CGDD)
Maud Marsauche (Epures)
Loïc Mochel (CGDD)*
Emmanuelle Pagès (CGDD)
Sandrine Parisse (CGDD)
Éric Tromeur (CGDD)*

**En poste au moment de la rédaction.*

avant-propos



n 2019, dans son rapport quadriennal sur l'état de l'environnement en France, le Commissariat général au développement durable (CGDD) a fait le choix d'utiliser pour la première fois le cadre d'analyse des limites planétaires pour élargir le diagnostic environnemental de la France au-delà de ses frontières.

Ce cadre d'analyse, proposé en 2009 par le *Stockholm Resilience Centre* (SRC), révisé en 2015 (Steffen *et al.*) puis en septembre 2023 (Richardson *et al.*), vise à définir un « espace de fonctionnement sûr pour l'humanité » qui repose sur l'évolution de neuf phénomènes complexes et interconnectés. Par la suite, les discussions suscitées par les propositions de la Convention citoyenne pour le climat ont révélé le besoin de revenir sur le concept de limites planétaires en l'explicitant davantage et en s'interrogeant sur ses utilisations possibles, notamment à d'autres échelles géographiques.

C'est à cet objectif que répond cette publication. Elle s'attache ainsi à répondre aux questions suivantes : à quelles problématiques renvoient les limites planétaires ? quels enjeux leur sont associés ? où en est-on au niveau mondial vis-à-vis de ces limites ? quelle est la responsabilité de la France dans le dépassement de ces limites ? quelles sont les mesures déjà mises en œuvre pour éviter leur franchissement ou pour revenir en dessous de celles-ci ?

Cette publication a aussi pour objectif de montrer comment ce cadre conceptuel des neuf limites planétaires peut être utile pour une réflexion à une échelle nationale, mais aussi locale. Pour l'illustrer, le CGDD a sollicité l'expertise de Natacha Gondran, professeure en évaluation environnementale et co-auteure de la publication *Les limites planétaires*, afin de présenter un panorama des utilisations possibles de ce cadre à l'échelle d'une entreprise ou d'un territoire, en collaboration avec l'agence d'urbanisme de la région stéphanoise Epures.

Les travaux et réflexions sur les limites planétaires se poursuivent. En témoignent deux nouvelles publications parues en 2023. En juin, une communauté de chercheurs réunie autour de la « Commission de la Terre » (Rockström *et al.*) a défini des seuils de sécurité et de justice entre communautés humaines et entre générations, en proposant huit limites d'habitabilité sûres et justes pour le système Terre. En septembre, le SRC a publié une mise à jour du cadre des neuf limites planétaires avec quelques nouvelles variables et des valeurs actualisées.

— **Thomas Lesueur**

COMMISSAIRE GÉNÉRAL AU DÉVELOPPEMENT DURABLE

Synthèse



Le concept des limites planétaires, proposé en 2009, révisé en 2015 (Steffen *et al.*), puis en 2023 (Richardson *et al.*), vise à définir un « espace de fonctionnement sûr pour l'humanité » qui repose sur l'évolution de neuf phénomènes complexes et interconnectés : *le changement climatique, l'érosion de la biodiversité, la perturbation des cycles biogéochimiques de l'azote et du phosphore, le changement d'usage des sols, l'utilisation de l'eau douce, l'acidification des océans, l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique, l'augmentation des aérosols dans l'atmosphère, l'introduction d'entités nouvelles dans la biosphère.*

Pour étudier l'évolution de ces phénomènes, une ou plusieurs « variables de contrôle » sont définies à l'échelle globale, voire régionale. Un « seuil » critique est fixé pour chacune de ces variables avec une « zone d'incertitude » constituée de deux valeurs : une valeur basse (« frontière planétaire ») et une valeur haute (« limite planétaire »). La frontière représente la zone de danger qui précède la limite au-delà de laquelle les écosystèmes pourraient basculer dans un état inconnu et probablement défavorable à l'homme.

Cette publication donne une vue d'ensemble de l'approche des limites planétaires telle qu'elle a été proposée en 2015, soit avant la dernière révision de septembre 2023¹. Elle montre comment ce cadre conceptuel peut être utile à une échelle nationale ou locale, même si le concept est avant tout planétaire. Le dépassement de la plupart des limites planétaires étudiées souligne la nécessité d'une planification écologique ambitieuse et concertée. À cet égard, cette publication illustre les principales politiques publiques permettant de répondre aux enjeux identifiés par la notion de limite planétaire. Les principaux messages tirés de l'analyse des neuf limites planétaires sont décrits ci-après.

CHANGEMENT CLIMATIQUE : UNE FRONTIÈRE PLANÉTAIRE DÉPASSÉE

En 2023, avec une concentration de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère de 425 parties par million (ppm), la planète se rapproche de la limite

planétaire de 450 ppm (seuil haut de la zone d'incertitude). En 2009, la frontière planétaire (seuil bas) était déjà dépassée avec 387 ppm.

La France contribue avec le reste du monde à l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère par ses émissions de CO₂. Responsable de 2,3 % des émissions historiques cumulées de CO₂ dans l'atmosphère entre 1850 et 2021, ses émissions moyennes annuelles de CO₂ par habitant sont aujourd'hui similaires à celles de la moyenne, soit 4,7 tonnes (t) en 2021. Une fois tenu compte des émissions importées, l'empreinte carbone (*voir glossaire*) moyenne des Français (CO₂ uniquement) est estimée à 7 t en 2021², un niveau inférieur à la moyenne de l'Organisation de coopération et de développement économique (OCDE), mais supérieur à l'empreinte mondiale (4,7 t).

Pour contenir le réchauffement en deçà de + 2 °C, les objectifs mondiaux de lutte contre le changement climatique sont déclinés dans les outils de programmation de la France au niveau national (loi relative à l'énergie et au climat, stratégie nationale bas-carbone, programmation pluriannuelle de l'énergie) et, au niveau local, dans les schémas régionaux d'aménagement du territoire, ainsi que dans les plans climat-air-énergie territoriaux.

ÉROSION DE LA BIODIVERSITÉ : UNE LIMITE PLANÉTAIRE DÉPASSÉE

Chaque année, entre 100 et 1 000 extinctions sur un million d'espèces sont enregistrées. La limite planétaire de 10 extinctions par an sur un million d'espèces est donc dépassée. En France, l'indice de risque d'extinction est plus faible qu'à l'échelle européenne ou mondiale mais il augmente plus rapidement (+ 99 % entre 2000 et 2022 contre + 67 % en Europe et + 36 % dans le reste du monde).

L'abondance moyenne des espèces originelles, comprise entre 0 (écosystème détruit) et 1 (écosystème intact non perturbé), est estimée en France à 0,36 en 2020, soit en dessous de la moyenne mondiale (0,56) et *a fortiori* de la limite planétaire de 0,72.

¹ La dernière mise à jour du cadre des limites planétaires de septembre 2023 (Richardson *et al.*) introduit quelques nouvelles variables de contrôle et présente la situation actualisée de chaque limite. Ces évolutions sont résumées en annexe.

² Lorsque l'on ajoute au CO₂ les deux autres principaux gaz à effet de serre, le CH₄ et le N₂O, l'empreinte carbone moyenne des Français en CO₂ équivalent est estimée à 8,9 t/hab. de CO₂eq en 2021.

De nombreux outils de protection des espèces et des habitats naturels existent déjà en France. La stratégie nationale pour les aires protégées (2022-2030) et la stratégie nationale pour la biodiversité 2030 visent toutefois à intensifier les efforts, en cohérence avec le nouveau cadre mondial pour la biodiversité de 2022 qui fixe l'objectif de « vivre en harmonie avec la nature » d'ici 2050.

PERTURBATION DES CYCLES BIOGÉOCHIMIQUES DE L'AZOTE ET DU PHOSPHORE : UNE LIMITE PLANÉTAIRE DÉPASSÉE POUR L'AZOTE

La quantité d'azote rejetée dans l'environnement par les activités humaines au niveau mondial (150 millions de tonnes par an – Mt/an) est largement supérieure aux seuils fixés (62-82 Mt/an). Les flux de phosphore émis à l'échelle mondiale par les systèmes d'eau douce vers les océans (22 Mt) sont sous la valeur haute de la zone d'incertitude (100 Mt) mais dépassent la valeur basse (11 Mt). À l'échelle continentale, les quantités d'engrais phosphorés épandues sur les sols sont supérieures quant à elles à la valeur haute de la zone d'incertitude (14,2 Mt au lieu de 11,2 Mt).

En France, le surplus d'azote (*voir glossaire*) apporté aux cultures par les engrais s'élève à 55 kilogrammes par hectare (kg/ha) de surface agricole cultivée, en moyenne sur la période 2010-2019. Il se situe au-dessus du seuil bas de la limite planétaire (41 kg/ha) et au niveau du seuil haut (55 kg/ha) en le dépassant certaines années. Les flux de phosphore rejetés en mer par la France restent, pour leur part, en dessous de la limite : après avoir nettement diminué entre 2000 et 2020 (- 57 %), ils s'élèvent en moyenne à 0,23 kg/hab./an, soit nettement en dessous du seuil bas de la limite (1,5 kg/hab./an).

Conformément à la directive européenne « nitrates » de 1991, la France met en place des programmes d'actions nitrates dans l'ensemble des zones vulnérables de son territoire afin d'apporter « la bonne dose, au bon moment et au bon endroit »

et limiter toujours plus les fuites d'azote. La loi Climat et Résilience de 2021 contribue à cet objectif en restreignant l'utilisation d'engrais de synthèse dans les terrains qui n'ont pas une vocation agricole.

CHANGEMENT D'USAGE DES SOLS : UNE DÉFORESTATION MONDIALE QUI CONDUIT LA PLANÈTE DANS UNE ZONE D'INCERTITUDE

Avec 62 % des surfaces forestières d'avant 1700 encore boisées dans le monde en 2015, la limite basse de la zone d'incertitude (75 %) est dépassée mais la limite planétaire (54 %) n'est pas franchie. En zone tempérée, 50 % de la superficie occupée par les forêts avant 1700 subsiste, ce qui correspond à la limite basse de la zone d'incertitude (entre 50 et 30 %).

Si la surface forestière française tend à s'accroître, nos consommations (soja, cacao, huile de palme, etc.) contribuent à la déforestation des forêts tropicales. On estime qu'entre 12 et 14,8 millions d'hectares de surfaces agricoles et forestières sont mobilisés chaque année hors de nos frontières (« empreinte terre ») pour produire des biens consommés en France. La déforestation associée (« empreinte forêt ») est estimée entre 26 300 et 64 400 ha par an. Si tous les humains avaient une empreinte forêt identique à celle d'un Français, le seuil haut de la limite (40 % de la superficie originelle des forêts tropicales et boréales détruites) serait dépassé dans une soixantaine d'années.

En France, la stratégie nationale de lutte contre la déforestation importée de 2018 vise à éliminer d'ici 2030 l'importation de produits forestiers ou agricoles non durables contribuant à la déforestation. Au niveau européen, le règlement relatif à la déforestation et à la dégradation des forêts, adopté en 2023, vise à interdire la mise sur le marché européen ou l'exportation à partir de celui-ci de matières premières et de produits ayant engendré de la déforestation ou de la dégradation des forêts.

UTILISATION MONDIALE DE L'EAU DOUCE : UNE FRONTIÈRE PLANÉTAIRE NON FRANCHIE MAIS DES SITUATIONS LOCALES NON SOUTENABLES

Les prélèvements nets d'eau douce (« eau bleue ») à l'échelle mondiale (2 600 km³) demeurent en deçà de la frontière planétaire (4 000 km³). Toutefois, des dépassements à l'échelle locale (bassins-versants) existent. Selon certains chercheurs, 25 % des bassins fluviaux de la planète s'assècheraient avant d'atteindre les océans en raison de l'utilisation des ressources en eau douce des bassins.

En France, la limite locale concernant l'eau bleue est dépassée dans certains sous-bassins au cours des étés secs. Du fait de son climat tempéré, la France contribue pour 0,2 % au prélèvement annuel net mondial d'eau douce (volumes d'eau prélevés dans le milieu qui ne sont pas directement restitués aux milieux aquatiques), soit une proportion inférieure à son poids démographique (0,85 %) et économique (2,33 %). En période estivale, la non-soutenabilité des prélèvements peut toutefois se poser.

Au-delà des schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux (Sdage) qui planifient la gestion de l'eau à l'échelle des bassins en France, les projets de territoire pour la gestion de l'eau (PTGE) visent à adapter au mieux les besoins à la ressource disponible. Afin de garantir de l'eau pour tous, préserver les écosystèmes et organiser la sobriété des usages, un plan d'action pour une gestion résiliente et concertée de l'eau a été adopté en mars 2023, avec un objectif de diminution de 10 % des prélèvements d'ici 2030.

ACIDIFICATION DES OCÉANS : UNE FRONTIÈRE PLANÉTAIRE AUJOURD'HUI NON DÉPASSÉE, MAIS POUR COMBIEN DE TEMPS ?

Depuis la révolution industrielle, l'augmentation du niveau de CO₂ émis dans l'atmosphère par les activités humaines perturbe les équilibres biogéochimiques

des océans. L'océan s'acidifie, menaçant les écosystèmes et les organismes marins (coquillages, coraux, etc.), notamment dans la fabrication de leur squelette calcaire en aragonite (*voir glossaire*). En 2015, l'état de saturation de l'eau de mer de surface en aragonite est estimé à 84 % du niveau préindustriel, soit en deçà de la frontière planétaire fixée à 80 %. En poursuivant au même rythme jusqu'en 2050, il pourrait l'atteindre à cet horizon.

La France est le quatrième pays corallien au monde, et porte à ce titre une grande responsabilité quant à la préservation de ces écosystèmes. La stratégie nationale des aires protégées propose d'inclure 100 % de ces récifs coralliens dans une aire protégée d'ici 2025.

APPAUVRISSMENT DE L'OZONE STRATOSPHERIQUE : UNE LIMITE PLANÉTAIRE NON FRANCHIE, GRÂCE À L'ENGAGEMENT DE LA COMMUNAUTÉ INTERNATIONALE

À la suite de l'adoption du Protocole de Montréal en 1987 visant à lutter contre la destruction de la couche d'ozone, la production et la consommation de substances appauvrissant la couche d'ozone (chlorofluorocarbures - CFC - notamment) se sont fortement réduites. Depuis les années 2000, la situation de la couche d'ozone s'est stabilisée. La concentration d'ozone dans la stratosphère est estimée à 285 unités Dobson (DU) en moyenne, ce qui signifie que la limite planétaire (275 DU) est respectée.

En France, au-delà de l'interdiction de certaines substances qui appauvrissent la couche d'ozone, la réglementation prévoit un ensemble de règles de certification et de surveillance des équipements tributaires de gaz à effet de serre fluorés. Des dispositifs d'aides sont également mis en place pour accompagner les entreprises qui souhaitent utiliser des alternatives aux hydrofluorocarbures (HFC).

AUGMENTATION DES AÉROSOLS DANS L'ATMOSPHÈRE : UNE LIMITE PLANÉTAIRE ENCORE NON QUANTIFIÉE

Les aérosols désignent des particules solides ou liquides en suspension dans l'air, dont la taille peut varier de quelques nanomètres à quelques dizaines de micromètres. Si la majorité d'entre eux est d'origine naturelle, une quantité croissante est rejetée dans l'atmosphère par les activités humaines depuis l'ère préindustrielle, ce qui constitue un enjeu majeur pour le climat et la santé humaine. Compte tenu de la variabilité spatio-temporelle de ces particules et de la diversité des sources et des impacts, l'identification d'un seuil global n'a pas été possible à ce stade. Seule une limite locale spécifique à la zone Asie du Sud-Est a été proposée.

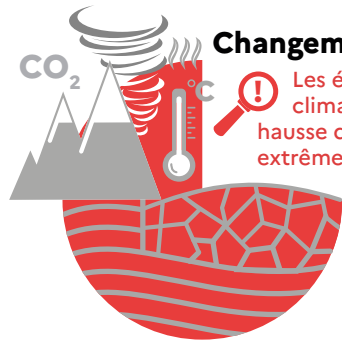
En France, la mise en place de stratégies et plans d'action depuis plusieurs années a favorisé la forte baisse des émissions polluantes dans l'air. Le nouveau plan national de réduction des émissions de polluants atmosphériques (PREPA) adopté en 2022 permettra d'aller plus loin, notamment vis-à-vis des particules fines et des oxydes d'azote (NO_x). Le PREPA combine des mesures réglementaires, fiscales et incitatives, ainsi que des outils de planification à destination des collectivités et de sensibilisation des acteurs.

INTRODUCTION D'ENTITÉS NOUVELLES DANS LA BIOSPHÈRE : UNE LIMITE PLANÉTAIRE NON PRÉCISÉMENT QUANTIFIÉE MAIS CONSIDÉRÉE DÉPASSÉE

Les entités nouvelles désignent l'ensemble des entités, au sens géologique, produites, mises en circulation et rejetées dans l'environnement par les activités humaines. Ces entités (substances de synthèse, nouvelles formes de substances existantes, formes de vie modifiées) peuvent être persistantes et se déplacer sur de grandes zones géographiques. La production et le rejet de ces entités, ainsi que la diversité des substances concernées, augmentent à un rythme tel qu'il dépasse la capacité des sociétés à effectuer des évaluations et des contrôles de sécurité, avant la mise en circulation de produits potentiellement dangereux pour la planète. Aujourd'hui, 350 000 produits chimiques sont ainsi commercialisés sur le marché mondial, soit une production multipliée par 50 depuis 1950. Parmi toutes ces substances, la pollution plastique fait l'objet d'une attention particulière.

En France, des dispositions permettant de réguler la dissémination d'entités nouvelles ont été adoptées en vertu du principe de précaution inscrit à l'article 5 de la Charte constitutionnelle de l'environnement. La loi anti-gaspillage pour une économie circulaire de 2020 prévoit la fin de la mise sur le marché des emballages de plastique à usage unique d'ici 2040, ainsi que des objectifs de réduction, réutilisation ou réemploi, et de recyclage. Au niveau international, la France porte fortement le projet de traité international contre la pollution plastique.

Les 9 limites planétaires*

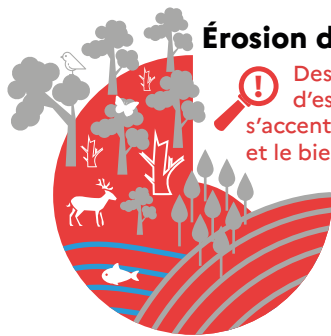


Changement climatique

Les émissions anthropiques perturbent l'équilibre climatique avec de multiples conséquences : hausse des températures, événements climatiques extrêmes, montée des océans, disparition d'espèces...

Augmentation constante de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère : 425 ppm en 2023 contre 280 ppm en 1850.

L'empreinte CO₂ moyenne des Français dépasse de 48 % l'empreinte CO₂ moyenne mondiale.



Érosion de la biodiversité

Destruction d'habitats, exploitation d'espèces, pollution... le déclin de la nature s'accroît, menaçant la santé des écosystèmes et le bien-être humain.

Entre 100 et 1 000 extinctions d'espèces par an sur 1 million d'espèces.

L'indice de risque d'extinction d'espèces a augmenté de 99 % entre 2000 et 2022, contre 36 % dans le reste du monde.

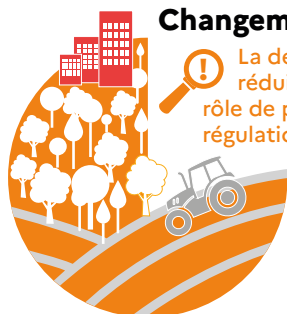


Perturbation des cycles biogéochimiques de l'azote et du phosphore

L'excès d'azote et de phosphore apporté aux cultures (engrais) dégrade les milieux aquatiques : eutrophisation des rivières et anoxie des océans.

150 Mt d'azote rejetées dans la nature (seuils limites : 62-82 Mt) et 22 Mt de phosphore arrivant en mer par les cours d'eau chaque année (limites : 11-100 Mt).

L'excès d'azote atteint la limite planétaire (55 kg/ha). L'excès de phosphore (2 kg/ha) respecte la limite.



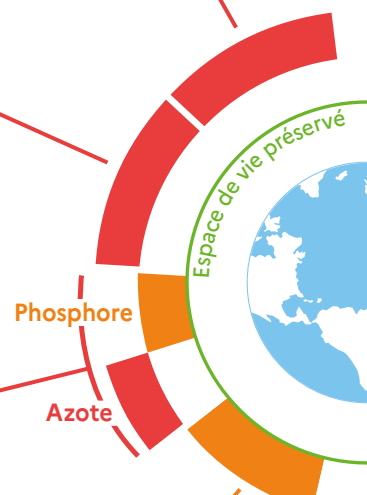
Changement d'usage des sols

La déforestation au profit de l'agriculture réduit la capacité des forêts à jouer leur rôle de puits de carbone indispensable à la régulation du climat.

Seulement 62 % de la surface occupée par des forêts avant 1700 est toujours boisée en 2015.

Par ses importations de matières premières, la France exerce une pression forte sur la ressource foncière étrangère.

* La situation décrite est celle connue avant la dernière publication du *Stockholm Resilience Centre* de septembre 2023.

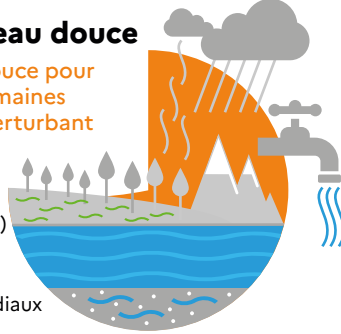


Utilisation et cycle de l'eau douce

! Les prélèvements en eau douce pour les besoins des activités humaines affectent les écosystèmes en perturbant le cycle de l'eau.

🌍 Eau bleue : 2 600 km³/an prélevés (seuils limites : 4 000-6000 km³/an)
Eau verte : anomalie d'humidité pour 18 % des sols (limite : 10 %)

🇫🇷 0,2 % des prélèvements nets mondiaux annuels pour l'eau bleue, avec localement des tensions saisonnières.



Acidification des océans

? La dissolution de CO₂ dans l'océan réduit le pH de l'eau de mer, entraînant une diminution des carbonates nécessaires à la formation des coquillages en aragonite.

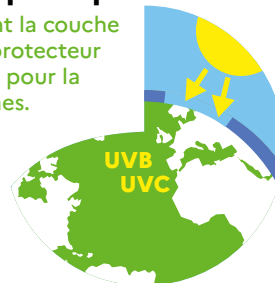
🌍 En 2015, l'état de saturation de l'eau de mer en aragonite est estimé à 84 % du niveau préindustriel.



Appauvrissement de l'ozone stratosphérique

? Les substances appauvrissant la couche d'ozone réduisent son rôle protecteur face aux rayons du soleil, nocifs pour la santé humaine et les écosystèmes.

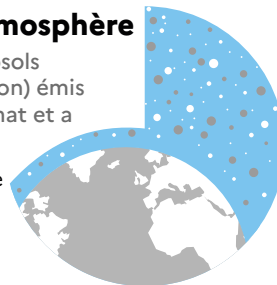
🌍 La concentration d'ozone dans la stratosphère est estimée à 285 DU (unités Dobson) en 2015 (limite : 275 DU).



Augmentation des aérosols dans l'atmosphère

? Une quantité croissante d'aérosols (petites particules en suspension) émis dans l'atmosphère perturbe le climat et a des effets sur la santé humaine.

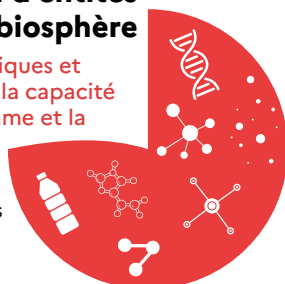
🌍 Pas de seuil global défini en l'absence de connaissances suffisantes.



Introduction d'entités nouvelles dans la biosphère

! La production de produits chimiques et plastiques augmente si vite que la capacité d'évaluation des risques pour l'homme et la biosphère est dépassée.

🌍 Produits chimiques : production multipliée par 50 depuis 1950. Produits plastiques : + 79 % entre 2000 et 2015



Limite

- 🔴 dépassée (risque élevé)
- 🟠 forte incertitude (risque croissant)
- 🟢 non dépassée
- 🟡 non quantifiée

Introduction



introduction

De tout temps, en Occident comme en Asie, scientifiques, naturalistes et philosophes ont étudié la nature, ses composantes et son évolution. La prise de conscience de la fragilité des équilibres naturels planétaires et de la raréfaction des ressources est ainsi très ancienne. Toutefois, si l'homme, par son action, a toujours modifié son environnement (sélection d'espèces par la chasse, défrichage pour la mise en place de cultures, etc.), c'est depuis la révolution industrielle que l'intensification des activités humaines dans les domaines agricoles, industriels ou des transports, a bouleversé l'environnement et le monde vivant à un rythme jamais observé auparavant et à grande échelle.

À l'échelle mondiale, les conséquences du changement climatique s'accroissent et s'intensifient : hausse des températures, vagues de chaleur, sécheresses, inondations, tempêtes, etc. Ce dérèglement génère des risques de manque d'eau et de nourriture, des menaces pour la santé de l'homme (émergence de nouvelles maladies) et des écosystèmes (diminution des aires de répartition des espèces animales et végétales, etc.) - (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat - Giec, 2023³).

Si les effets de cette « grande accélération » n'ont pas toujours été perceptibles, la prise de conscience des enjeux est pourtant apparue très tôt. Il y a cinquante ans déjà, les scientifiques alertaient l'opinion publique sur les risques d'épuisement des ressources naturelles et de dégradation des écosystèmes, induits par une croissance économique illimitée. En 1972, le rapport Meadows⁴ décrivait ainsi la dynamique de systèmes complexes et aboutissait à des scénarios d'évolution possibles pour le futur mettant en lumière les limites écologiques de la planète.

En 2009, dans la continuité de ces travaux, des chercheurs du *Stockholm Resilience Centre* identifiaient neuf limites planétaires à ne pas franchir pour préserver un « espace de

développement sûr et juste pour l'humanité ». Ces neuf limites se fondent sur l'évolution de neuf phénomènes complexes et interconnectés : le changement climatique, l'érosion de la biodiversité, la perturbation des cycles biogéochimiques de l'azote et du phosphore, le changement d'usage des sols, l'utilisation de l'eau douce, l'acidification des océans, l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique, l'augmentation des aérosols dans l'atmosphère, et l'introduction d'entités nouvelles dans la biosphère. Le dépassement des limites de « fonctionnement sûr » pour chacun de ces phénomènes peut provoquer des transformations en chaîne, potentiellement irréversibles, et déstabiliser l'équilibre planétaire, jusqu'à rendre la planète invivable pour l'homme.

En 2019, dans son rapport quadriennal sur l'état de l'environnement en France, le CGDD a fait le choix d'utiliser pour la première fois le cadre d'analyse des limites planétaires pour élargir le diagnostic environnemental de la France au-delà de ses frontières. À la suite de ces travaux, et dans une optique de sensibilisation du public à ces notions insuffisamment connues, il a semblé important d'approfondir cet exercice et de réaliser une publication entièrement dédiée au concept des limites planétaires.

Dans cette perspective, cette publication s'attache à donner une vue d'ensemble de l'approche des limites planétaires à travers trois parties complémentaires pour en appréhender au mieux les enjeux : la première partie porte sur l'origine et le cadre général du concept des limites planétaires ; la deuxième partie présente les neuf limites planétaires avec un focus sur la contribution de la France au dépassement de cinq d'entre elles (en référence aux publications du *Stockholm Resilience Centre* antérieures à 2023) ; la troisième partie s'intéresse à l'usage qui peut être fait de ce cadre, à l'échelle d'une entreprise et d'un territoire, dans une perspective de développement durable.

³ Giec, 2023. *AR6 Synthesis Report. Climate Change 2023*.

⁴ Meadows D. et al., 1972. *The Limits to Growth - A Report for the Club de Rome's Project on the Predicament of Mankind*. New York: Universe Books.

partie 1

Les limites : perspective historique et cadre général

— Cette première partie présente l'origine et le cadre général du concept des limites planétaires, proposé en 2009 par une équipe internationale de chercheurs réunis autour du *Stockholm Resilience Centre*. Les limites planétaires s'inscrivent dans la continuité du rapport Meadows *Les limites à la croissance*, paru en 1972 et considéré comme l'un des premiers textes majeurs alertant sur les conséquences destructrices pour la planète d'une croissance économique illimitée dans un monde aux ressources finies. Le cadre conceptuel des limites planétaires vise à définir un « espace de fonctionnement sûr pour l'humanité » qui repose sur l'évolution de neuf phénomènes complexes et interconnectés. Les contours de ce cadre évolutif sont ici définis et présentés dans sa version de 2015. Les possibilités de déclinaison de ce cadre à une échelle plus petite sont ensuite questionnées.



LES LIMITES À LA CROISSANCE

Le concept des limites planétaires (Rockström *et al.*, 2009) n'est pas la première tentative menée pour éclairer l'impact des activités humaines sur l'environnement et le bien-être humain. Plusieurs décennies auparavant déjà, en 1972, à la demande du Club de Rome, un groupe de scientifiques du *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) aux États-Unis, réunis autour du professeur Dennis Meadows, publiait un rapport resté célèbre, *The Limits to Growth* (*Les limites à la croissance*), également connu sous l'appellation *Rapport Meadows* ou *Rapport du Club de Rome*. Parce qu'il a marqué de son empreinte le mouvement environnemental (Vieille Blanchard, 2011) et suscité de nombreux débats ayant permis d'éclairer en partie le positionnement adopté dans l'élaboration des limites planétaires, ce rapport, première initiative historique, mérite que l'on s'y attarde.

Publié il y a cinquante ans, le rapport *Les limites à la croissance* est l'un des premiers textes à alerter sur les conséquences destructrices pour la planète d'une croissance illimitée dans un monde aux ressources finies. Ce rapport vise à expliquer que le dépassement des limites physiques du système Terre aura une influence importante sur le développement mondial d'ici les cent prochaines années.

À l'aide de modélisations informatiques inédites pour l'époque (premiers ordinateurs), Dennis Meadows et son équipe représentent le système Terre à partir de quelques variables décrivant la population mondiale, la croissance industrielle, la production alimentaire, la consommation de ressources naturelles et la pollution (*voir glossaire*).

Plusieurs dizaines de relations lient les évolutions de ces variables entre elles. Appelées « boucles de rétroaction », ce sont des chaînes de relations de cause à effet susceptibles d'entraîner un changement ou d'avoir un effet stabilisant. On parle de « boucle de rétroaction positive » lorsqu'une chaîne de réactions amplifie un phénomène et de « boucle de rétroaction négative » lorsqu'elle tend à réguler un phénomène ou à le ramener à un état stable.

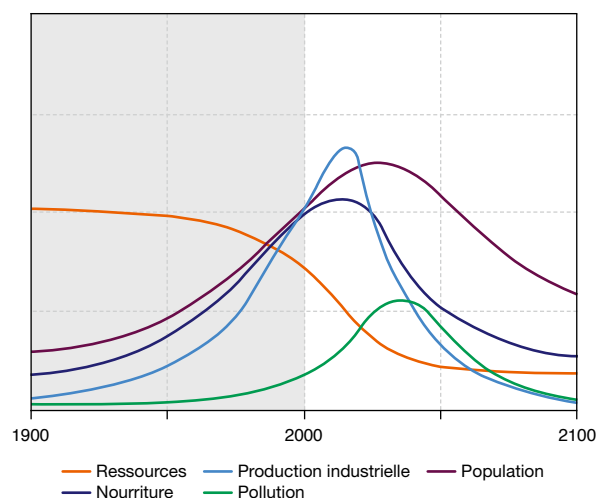
Le modèle de Meadows identifie ainsi la croissance de la pollution qui influe de manière négative sur l'espérance de vie, et donc sur la taille de la population, ce qui en retour agit dans le sens d'une pollution moins importante ; la croissance du produit industriel par tête contribue à la croissance du capital industriel, qui lui-même engendre une augmentation de la production agricole, mais aussi de la pollution, etc. Chaque boucle correspond à une relation causale qui peut être linéaire (c'est-à-dire que l'effet est proportionnel à la cause) ou non linéaire, c'est-à-dire s'exercer de manière immédiate ou différée, être positive ou négative, et sujette ou non à des effets de seuil.

À partir de ces modélisations, les scientifiques ont identifié douze scénarios possibles pour le XXI^e siècle et en ont tiré les principales conclusions suivantes :

- Si les tendances actuelles de croissance se poursuivent, les limites physiques de la planète seront atteintes au cours des cent prochaines années. Cela pourrait conduire à un déclin soudain et non-contrôlé des systèmes et du bien-être humain.
- Il est encore possible de modifier ces tendances de croissance et d'établir des conditions de stabilité écologique et économique qui soient durables sur le long terme.
- Plus vite les populations mondiales se mobiliseront pour atteindre cette stabilité écologique et économique, plus grandes seront leurs chances d'y parvenir.

Le *graphique 1* illustre le scénario 1 considéré comme point de départ et élément de comparaison. Ce scénario décrit le « probable mode de comportement général du système ». La moitié gauche du graphique montre une évolution des courbes jusqu'en 2000 : la population mondiale et la production industrielle augmentent, puis leur croissance est stoppée par des ressources non renouvelables de plus en plus inaccessibles. Au tournant du XXI^e siècle, la pollution augmente, la production industrielle décline par manque de ressources. La hausse du coût des ressources non renouvelables se répercute alors sur tous les secteurs économiques, et notamment sur le secteur de la production agricole.

Graphique 1 : scénario 1, un point de repère – État du monde



Source : Dennis L. Meadows et al., 1972. *Les limites à la croissance*, traduction de *The Limits to Growth*. New-York: Universe Books

Lors de son actualisation en 1992 puis en 2004, le rapport tire les mêmes conclusions qu'en 1972, confirmant l'impact destructeur des activités humaines sur les ressources naturelles et sur la pollution générale de la planète. D'autres études montreront par la suite qu'il existe de fortes similarités entre le premier scénario établi en 1972 et l'évolution du « monde réel » (Turner, 2008).

Les limites à la croissance ont ainsi permis de passer de discours environnementaux axés sur les pollutions locales, à un discours englobant l'ensemble des problématiques environnementales à une échelle planétaire.

L'EMPREINTE ÉCOLOGIQUE

En 1996, Mathis Wackernagel et William Rees⁵ mettent au point un nouvel indicateur appelé « empreinte écologique » (*voir glossaire*) pour mesurer la pression exercée sur les ressources naturelles par les activités humaines, plus précisément par la consommation de biens et services d'une population : alimentation, transport, logement, services. L'empreinte écologique estime les surfaces biologiquement productives nécessaires pour régénérer les ressources naturelles utilisées, et assimiler les déchets générés (typiquement, absorber les émissions de gaz à effet de serre). Ces surfaces sont comptabilisées en hectares globaux (hag). Depuis 2003, l'empreinte écologique est calculée par le *Global Footprint Network* (GFN).

Cette empreinte peut alors être comparée à la surface productive réellement disponible (*voir glossaire*). Lorsque l'empreinte mondiale dépasse la biocapacité de la planète, cela signifie que pour satisfaire la consommation de tous les hommes, la totalité des ressources naturelles produites par la Terre en une année ne suffisent pas et qu'il est nécessaire de puiser dans le « capital naturel ». On parle alors de « dépassement écologique » ou de « déficit écologique » — ce qui rejoint la notion de limite planétaire.

Le « jour du dépassement » fixé par le GFN correspond à la date à partir de laquelle l'humanité a consommé l'ensemble des ressources que la planète est capable de régénérer en une année. Si l'empreinte écologique fait l'objet de diverses critiques d'ordre méthodologique⁶, cet indicateur, très communicant, présente l'intérêt de mettre en évidence le rôle des modes de consommation dans l'épuisement des ressources de la planète et de pouvoir être décliné par pays. Ainsi, si en 1999, le jour du dépassement mondial avait été calculé au 29 septembre, il est intervenu le 28 juillet en 2022, soit deux mois plus tôt. En France, le jour du dépassement est intervenu le 5 mai en 2022.

LES LIMITES PLANÉTAIRES

Dans la continuité des travaux entrepris par Dennis Meadows et son équipe, et afin de susciter une prise de conscience accrue des risques de changements brusques globaux de l'environnement, une nouvelle approche a vu le jour en 2009 : le concept des limites planétaires (Rockström *et al.*). Ce concept définit un « espace de fonctionnement sûr pour l'humanité » qui repose sur le suivi de l'évolution de neuf phénomènes complexes et interconnectés : le changement climatique, l'érosion de la biodiversité, la perturbation des cycles biogéochimiques de l'azote et du phosphore, le changement d'usage des sols, l'utilisation de l'eau douce, l'acidification des océans, l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique, l'augmentation des aérosols dans l'atmosphère, l'introduction d'entités nouvelles dans la biosphère. Ce concept s'attache à décrire et à observer le système Terre, et non les facteurs socio-économiques à l'origine de son évolution. Le dépassement des limites de « fonctionnement sûr » pour chacun de ces phénomènes peut provoquer des transformations en chaîne, potentiellement irréversibles, et déstabiliser l'équilibre planétaire, jusqu'à rendre la planète invivable pour l'homme.

En se concentrant sur les processus physiques, climatiques, biogéochimiques et écologiques de la planète (carbone, azote, phosphore, biodiversité, eau, sols), le cadrage des limites planétaires vise à :

- s'extraire du débat sur les limites à la croissance ancré autour de deux visions, celle du « pessimisme des contraintes liées aux ressources », et celle de « l'optimisme du progrès technologique » conduisant à ne proposer que deux modèles d'action possibles pour le futur : limiter l'exploitation des ressources, ou favoriser l'innovation technologique ;
- « tendre vers l'estimation d'un espace sûr pour le développement humain ». Une multiplicité de chemins est alors possible dans cet espace de vie préservé pour l'humanité, dans lequel la croissance économique peut également trouver sa place ;
- « définir de manière plus précise des valeurs seuils associées à chacun des processus naturels ».

Le cadre des limites planétaires représente un changement stratégique par rapport au cadre des limites à la croissance, dans la mesure où les seuils critiques pris en compte « existent, indépendamment des préférences des humains, de leurs valeurs ou des compromis fondés sur une faisabilité politique et socio-économique, comme les attentes liées à des ruptures technologiques et les fluctuations de la croissance économique » (Folke, 2019).

⁵ Mathis Wackernagel et William Rees, 1999. Notre empreinte écologique. Éditions Écosociété.

⁶ Global Footprint Network, 2020. *Ecological Footprint Accounting: Limitations and Criticism*.

Quelques définitions propres au cadre des limites planétaires

Pour étudier l'évolution des neuf processus biophysiques permettant d'estimer les contours d'un espace de vie préservé pour l'humanité, le cadre des limites planétaires utilise différentes notions qu'il convient de définir pour mieux en appréhender les enjeux : variable de contrôle, seuil, frontière planétaire, limite planétaire.

Une « variable de contrôle » est un indicateur défini à l'échelle globale pour mesurer l'évolution de chacun des neuf processus. Certains processus peuvent faire l'objet de deux variables de contrôle pour appréhender de manière plus fine les enjeux biophysiques ou territoriaux qui les caractérisent. Par exemple, le processus « Utilisation mondiale de l'eau » est représenté, à l'échelle globale, par les prélèvements d'eau douce ; à l'échelle locale, par les prélèvements d'eau dans les bassins-versants et selon le régime hydrologique saisonnier.

Pour chacune des variables de contrôle, les chercheurs ont fixé un « seuil » critique à ne pas dépasser (point de bascule) pour garantir la stabilité du système Terre tel qu'on le connaît actuellement. Face à la complexité de l'exercice, ils ont défini une zone d'incertitude constituée de deux valeurs : une valeur basse (« frontière planétaire ») et une valeur haute (« limite planétaire »). La frontière représente la zone de danger qui précède la limite au-delà de laquelle les écosystèmes pourraient basculer dans un état inconnu et probablement défavorable à l'homme.

Par exemple, pour le processus « changement climatique », la variable de contrôle correspond à la « concentration de CO₂ dans l'atmosphère » pour laquelle une zone d'incertitude a été définie, située entre 350 ppm (frontière) et 450 ppm (limite).

Selon l'évolution de la variable de contrôle, le processus biophysique est susceptible d'être modifié et d'avoir des répercussions sur le fonctionnement du système terrestre. Certains processus peuvent avoir des effets directs à l'échelle planétaire, tandis que d'autres ont des impacts principalement locaux mais peuvent devenir globaux dans un second temps.

Un cadre conceptuel en évolution

La révision du cadre des limites planétaires (Steffen *et al.*, 2015) conduit à la conclusion que deux frontières planétaires sont franchies (changement climatique, changement d'usage des sols), ainsi que deux limites planétaires (érosion de la biodiversité, perturbation des cycles biogéochimiques de l'azote et du phosphore).

D'après les deux études fondatrices du cadre des limites planétaires (Rockström *et al.* 2009, Steffen *et al.* 2015), la responsabilité des activités humaines dans le dépassement des limites est majeure. Elle illustre le passage de l'Holocène à l'Anthropocène, nouvelle ère géologique au cours de laquelle l'homme serait devenu le principal moteur des changements qui affectent les équilibres naturels de la planète avec une ampleur sans précédent.

Depuis 2015, les chercheurs tentent de définir comment caractériser ou préciser certaines limites. En 2021, une nouvelle étude (Personn *et al.*) constate le dépassement d'une cinquième limite : l'introduction d'entités nouvelles dans la biosphère, et en particulier de produits chimiques de synthèse.

En 2022, une autre étude scientifique (Wang-Erlandsson *et al.*) annonce le franchissement d'une sixième frontière : la ressource en eau, et plus particulièrement, « l'eau verte », nouvelle variable prise en compte pour la première fois dans l'approche des limites planétaires (*schéma 1*).

En septembre 2023, une nouvelle publication du *Stockholm Resilience Centre* présente une version révisée du cadre des neuf limites planétaires (Richardson *et al.*). De nouvelles variables sont définies pour certaines limites (biodiversité fonctionnelle, eau bleue, aérosols dans l'atmosphère, entités nouvelles) et des valeurs sont actualisées. Pour la première fois, les neuf limites planétaires sont quantifiées, six des neuf limites étant considérées dépassées. Cette actualisation étant intervenue après la finalisation de cette publication, elle n'a pas pu être prise en compte ici. Une comparaison rapide entre les variables et les valeurs utilisées dans le présent document (celles connues début 2023) et celles de la publication de septembre du *Stockholm Resilience Centre* est toutefois proposée en annexe.

Des limites planétaires présentées séparément mais qui interagissent

Lors de la conception du cadre des limites planétaires, les scientifiques ont fait le choix de traiter les différentes problématiques séparément, en silo, tout en soulignant les nombreuses interactions qui existent entre elles. Ainsi, les limites planétaires forment un système complexe qu'il convient d'appréhender de manière globale et transversale. Cela revient à relier les problématiques entre elles, pour mieux étudier, dans un système, les causes d'un problème, et les conséquences qu'il peut avoir sur un autre système. L'exemple du CO₂ est particulièrement significatif. Il s'agit d'un indicateur du changement climatique, mais son augmentation dans l'atmosphère a un impact fort sur l'acidification des océans ou sur l'érosion de la biodiversité, par exemple.

Une approche planétaire avant tout

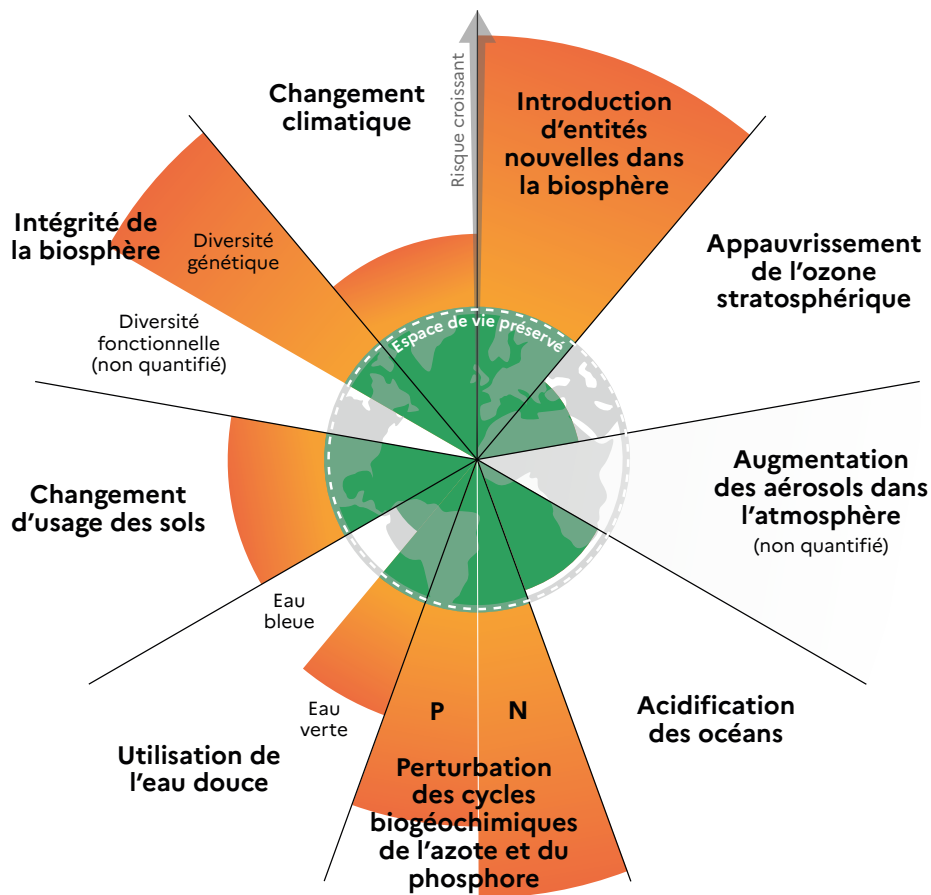
Le cadre des limites planétaires porte sur le système Terre et considère la planète dans sa globalité, fondée sur neuf processus biophysiques qui la maintiennent dans un état d'équilibre. Ce cadre comporte néanmoins des essais de territorialisation pour prendre en compte les enjeux locaux et être plus proche de la réalité. Lors de la révision du modèle en 2015, les auteurs ont complété la grille d'analyse avec des variables géographiques spécifiques selon les territoires. Dans le cas de la limite « changement d'usage des sols » par exemple, ils ont distingué la situation des forêts tempérées de celles des forêts tropicales ou boréales.

partie 1 : les limites - perspective historique et cadre général

Les auteurs soulignent également que le cadre des limites planétaires n'est pas conçu pour être décliné à des niveaux plus petits, comme les pays ou les collectivités locales (Steffen *et al.*, 2015). Toutefois, ils reconnaissent que c'est à l'échelle locale que l'action politique se produit le plus souvent. Ils

conviennent de l'intérêt d'une approche intégrée qui associe la définition de limites aux niveaux régional et mondial à des objectifs de développement, pour permettre l'application de la « pensée limites planétaires » au niveau local.

Schéma 1 : les neuf limites planétaires du cadre de 2015 actualisé en 2022



Sources : Steffen *et al.*, 2015 ; Personn *et al.*, 2021 ; Wang-Erlandsson *et al.*, 2022

partie 1 : les limites - perspective historique et cadre général

Le cadre d'analyse des limites planétaires constitue alors un nouveau référentiel pour les États, un outil méthodologique structurant de gouvernance de l'environnement. Il permet d'offrir une vision globale d'un système complexe avec des processus qui interagissent, à différentes échelles. C'est un cadre conceptuel évolutif, que les chercheurs s'emploient à ajuster et à définir continuellement au gré des données collectées.

Application des limites planétaires à une échelle infra-planétaire et principes d'allocation

Plusieurs pays⁷ ont fait l'exercice d'appliquer le cadre des limites planétaires à une échelle infra-planétaire. Compte tenu des disparités économiques, sociales et écologiques des pays, les travaux ont consisté à définir des parts nationales pour déterminer l'espace de fonctionnement sûr au sein des pays. Les limites planétaires sont alors interprétées comme des budgets globaux alloués chaque année aux pays sur la base de principes d'allocation.

Six modes d'allocation sont envisageables, basés sur six principes : l'égalité, les besoins, le droit au développement,

la souveraineté, la capacité, la responsabilité. Les principes « égalité », « besoins » et « droit au développement » font généralement référence aux personnes, tandis que « souveraineté », « capacité » et « responsabilité » sont discutées au niveau des pays.

Ces modes d'allocation peuvent se combiner avec une approche des pressions sous l'angle de la production ou de la consommation. Dans le cas de la consommation, on parlera d'une approche « empreinte » (tableau 1). L'empreinte vise à rendre compte des pressions environnementales induites dans un pays tiers pour satisfaire la demande finale de biens et services du pays, via les importations.

Par exemple, à l'instar d'autres empreintes (carbone, eau, forêt, etc.), « l'empreinte matières » permet de décrire l'ensemble des matières premières mobilisées pour satisfaire la consommation finale d'un pays. Les résultats reflètent de manière plus précise l'impact réel de l'utilisation des ressources, tant celles extraites du territoire national que celles mobilisées à l'étranger pour produire et transporter les produits importés.

Tableau 1 : approche territoriale versus « empreinte » (ou consommation)

		Consommation de biens et services		
		Pays	Reste du monde	
Production de biens et services	Pays	Pressions* environnementales induites dans un pays pour ses consommateurs	Pressions* environnementales induites dans un pays pour les consommateurs étrangers (exportations)	Approche territoriale
	Reste du monde	Pressions* environnementales induites à l'étranger pour les consommateurs d'un pays (importations)	Pressions* environnementales induites à l'étranger pour les consommateurs étrangers	
		Approche « empreinte »		

* Pressions environnementales liées à la production, à l'utilisation et à la mise en décharge.

Source : Hy Dao et al., 2018. *National environmental limits and footprints based on the Planetary Boundaries framework: The case of Switzerland*, *Global Environmental Change*, volume 52, pp. 49-57

Plusieurs publications analysent l'impact d'un mode d'allocation par rapport à un autre sur les seuils à fixer au niveau d'un pays (Lucas *et al.*, 2020). Dans la partie 2 de cette publication, lorsqu'une approche territoriale au niveau français est possible, la contribution française est analysée au regard de la limite planétaire allouée de façon égalitaire (avec un raisonnement par nombre d'habitants) ou de façon souveraine (en proportion de notre territoire).

De nombreuses publications proposent également des méthodes « d'évaluation absolue de la soutenabilité

environnementale » (*Absolute Environmental Sustainability Assessment - AESA*) qui visent à évaluer la durabilité d'une activité donnée (service, produit, entreprise) ou d'un territoire, en s'appuyant notamment sur l'utilisation du cadre des limites planétaires. Selon l'approche AESA retenue, elle nécessite de choisir des principes de partage pour répartir les impacts environnementaux planétaires entre différentes activités humaines. Cette approche est détaillée dans la partie 3 de cette publication.

⁷ Suède (Eriksson L., 2022), Suisse (Dao et al., 2015, 2018), Union européenne (Hoff et al., 2014).

Des frontières sûres et justes pour le système Terre

En juin 2023, une équipe pluridisciplinaire de chercheurs réunie autour de la « Commission de la Terre » (*Earth Commission*) publie une nouvelle étude : « Des frontières sûres et justes pour le système Terre » (*Safe and just Earth system boundaries - ESB*) - (Rockström *et al.*, 2023).

Considérant que la stabilité du système Terre et le bien-être humain sont indissociables, les chercheurs proposent un nouveau modèle fondé sur la définition de seuils de sécurité et de justice, à l'échelle mondiale et régionale, pour les domaines suivants : le climat, les écosystèmes naturels, l'intégrité fonctionnelle de la biosphère, les eaux de surface, les eaux souterraines, l'azote, le phosphore, les aérosols. Ces seuils visent à préserver l'équilibre du système Terre en évitant le franchissement de points de basculement, et à limiter l'exposition des populations à des dommages significatifs, en respectant la justice entre les espèces, entre les générations, et, au sein d'une même génération, entre les pays, les communautés et les individus. Cette nouvelle analyse s'appuie en partie sur des travaux précédemment menés, notamment en lien avec le cadre des limites planétaires (*Planetary boundaries - PB*), en reprenant la notion de limites biophysiques « sûres » (Rockström *et al.*, 2009).

Dans l'analyse de 2023, les auteurs font le choix d'abandonner certaines limites trop difficiles à quantifier (acidification des océans, ozone stratosphérique et entités nouvelles). Inversement, ils détaillent la limite « eau » en introduisant le sujet des eaux souterraines. La limite sur l'usage des sols n'est pas reprise en tant que telle, mais ses enjeux sont réintégrés dans la limite relative à l'intégrité fonctionnelle de la biosphère. Au total, les huit limites retenues par les chercheurs permettent de fixer plus facilement des cibles mondiales et locales pour s'assurer que les conditions d'habitabilité sûres et justes sont respectées.

POUR ALLER PLUS LOIN

- Boutaud, A., Gondran N., 2020. *Les limites planétaires*, collection Repères, Éditions La Découverte.
- DAO, H. *et al.*, 2018. *National environmental limits and footprints based on the Planetary Boundaries framework: The case of Switzerland*, Global Environmental Change, volume 52, pp. 49-57.
- European Commission. *Consumption Footprint Platform I EPLCA*.
- Folke, C., 2019. *The Planetary Boundaries Framework: How It All Come About*. Royal Swedish Academy of Sciences, October 1.
- Lucas, P. *et al.*, 2020. *Allocating planetary boundaries to large economies: Distributional consequences of alternative perspectives on distributive fairness*. Global Environmental Change 60 (2020) 102017.
- Meadows, D. *et al.*, 1972. *The Limits to Growth - A Report for the Club de Rome's Project on the Predicament of Mankind*. New York: Universe Books.
- Meadows, D. *et al.*, 2004. *The Limits to Growth: The 30-Year Update*. Reprint. London: Earthscan.
- Personn, L. *et al.*, 2021. *Outside the Safe Operating Space of the Planetary Boundary for Novel Entities*. Environmental Science & Technology 2022 56 (3), 1510-1521.
- Richardson, K. *et al.*, 2023. *Earth beyond six of nine planetary boundaries*. Sciences Advances. Vol. 9, Issue 37.
- Rockström, J. *et al.*, 2023. *Safe and just Earth system boundaries*. Nature, 1476-4687
- Rockström, J. *et al.*, 2009. *Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity*. Ecology and Society 14 (2): art32.
- Steffen, W. *et al.*, 2015. *Planetary Boundaries: Guiding Human Development on a Changing Planet*. Science 347 (6223): 1259855–55.
- Turner, G., 2008. *A Comparison of The Limits to Growth with 30 Years of Reality*. Global Environmental Change, Globalisation and Environmental Governance: Is Another World Possible? 18 (3): 397-411.
- Vieille Blanchard, Élodie. 2011. *Les Limites à la croissance dans un monde global – Modélisations, prospectives, réfutations*. Doctorat en sciences sociales, École des hautes études en sciences sociales.
- Wang-Erlandsson, L. *et al.*, 2022. *A planetary boundary for green water*. Nature Reviews Earth & Environment.

partie 2

Les neuf limites planétaires

— Cette deuxième partie présente les neuf limites planétaires, avec une description de chacun des phénomènes, leurs enjeux et leur situation à l'échelle globale. La contribution de la France au dépassement des limites planétaires est également mise en valeur pour cinq limites pouvant faire l'objet d'une analyse de portée nationale (changement climatique, érosion de la biodiversité, perturbation des cycles biogéochimiques de l'azote et du phosphore, changement d'usage des sols, utilisation de l'eau douce). Elle met également l'accent sur les politiques et les actions mises en œuvre en France pour éviter d'accélérer les phénomènes en cause pour chacune des limites.



Changement climatique

UNE FRONTIÈRE PLANÉTAIRE DÉPASSÉE

Pour comprendre les mécanismes du changement climatique, ses causes et ses effets, il convient de s'intéresser à un phénomène naturel, l'effet de serre. Certains gaz, comme le dioxyde de carbone ou le méthane, présents naturellement dans l'atmosphère, absorbent une partie du rayonnement thermique infrarouge émis par la surface de la Terre vers l'espace pour contrebalancer l'énergie solaire absorbée. Ces gaz, dits « à effet de serre » (GES), permettent ainsi de maintenir la température de la surface terrestre à 15 °C. Sans cet effet de serre naturel, la température moyenne serait d'environ - 18 °C, ce qui rendrait la planète inhospitalière.

Depuis la révolution industrielle, ce phénomène est bouleversé par l'apparition d'un « effet de serre additionnel » induit par l'influence humaine croissante, responsable en quasi-totalité du changement climatique. Les principaux gaz à effet de serre émis dans l'atmosphère par les activités humaines sont le dioxyde de carbone (CO₂) provenant de l'extraction et

de l'exploitation de combustibles fossiles (transports, industrie, chauffage) et de la mise en œuvre de procédés industriels (production de ciment, etc.) ; le méthane (CH₄) anthropique (*voir glossaire*) provenant essentiellement de la fermentation entérique des ruminants, de la culture du riz et du traitement des déchets ; le protoxyde d'azote (N₂O) dû notamment à l'utilisation d'engrais ou de certains procédés industriels.

Dans le cadre des travaux sur les limites planétaires, les chercheurs ont défini deux variables de contrôle pour appréhender l'évolution du changement climatique : la concentration de CO₂ dans l'atmosphère (en partie par million) et l'augmentation du forçage radiatif par rapport à l'ère préindustrielle (en watt par mètre carré) - (*tableau 2*). Le « forçage radiatif » correspond à un déséquilibre dans le bilan radiatif de la Terre (*voir glossaire*) induit par la concentration accrue de GES dans l'atmosphère, empêchant une partie du rayonnement infrarouge de partir vers l'espace. Ce déséquilibre est le processus qui induit le réchauffement de l'atmosphère.

Tableau 2 : variables de contrôle et limite planétaire pour le changement climatique

Variables de contrôle	Seuils et zone d'incertitude	Valeurs mondiales
Concentration de CO ₂ dans l'atmosphère en partie par million (ppm)	350 ppm CO ₂ (350 - 450 ppm)	425 ppm en avril 2023 379 ppm en 2005 ⁸
Augmentation du forçage radiatif en watt par mètre carré (W/m ²) par rapport à l'ère préindustrielle	+ 1,0 W/m ² (+ 1,0 - + 1,5 W/m ²)	+ 2,72 W/m ² en 2019 + 1,66 W/m ² en 2005

Source : d'après Steffen et al., 2015

Les valeurs présentées ci-dessus montrent un dépassement de la limite planétaire pour le forçage radiatif et une situation limite pour la concentration en CO₂ dans l'atmosphère, qui ne cesse d'augmenter depuis l'ère préindustrielle (280 ppm). En 2009, le seuil bas de la zone d'incertitude était déjà dépassé avec 387 ppm. En 2023⁹, avec 425 ppm, la planète se rapproche du seuil haut. Si une telle hausse se poursuit, des risques accrus d'instabilité et de vulnérabilité pourraient concerner de nombreux territoires, et avoir de lourdes incidences sur les conditions de vie des populations et sur les écosystèmes.

Conséquences et enjeux

Selon le premier volume du dernier rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec, 2021¹⁰), « les changements climatiques récents sont généralisés, rapides et ils s'intensifient. Ils sont sans précédent depuis des milliers d'années ». Chaque année, 25 millions de

personnes sont confrontées à des catastrophes naturelles plus nombreuses et plus intenses, contraintes de fuir leur pays pour survivre¹¹. L'Afrique subsaharienne et l'Asie du Sud-Est sont les zones géographiques les plus touchées actuellement. Les impacts du dérèglement climatique sont multiples :

- augmentation de la température à la surface du globe : environ 1,1°C par rapport à 1850-1900 ;
- élévation du niveau de la mer : de 15 cm à 20 cm depuis le début du XX^e siècle ;
- diminution de la surface de la banquise arctique en septembre : - 40 % depuis 1979 ;
- fonte des glaciers : sans précédent depuis au moins 2000 ans ;
- multiplication des événements climatiques extrêmes : vagues de chaleur, précipitations, sécheresses ; conditions météorologiques propices aux incendies, acidification des océans.

⁸ Giec, 2007. Changements climatiques 2007 : les éléments scientifiques.

⁹ Agence nationale américaine Earth Systems Research Laboratories (ESRL) – Relevés réalisés sur le site de Mauna Loa (Hawaii, États-Unis).

¹⁰ Giec, août 2021. 6^e Rapport Climat – Groupe de travail 1.

¹¹ Banque mondiale, 2021. Rapport Groundswell. Agir face aux migrations climatiques internes.

partie 2 : les neuf limites planétaires - changement climatique

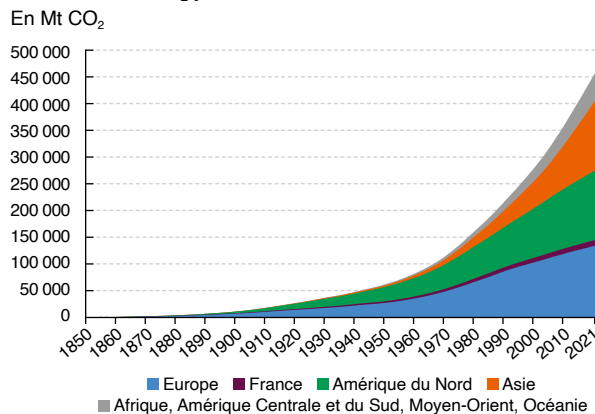
D'après ses projections, le Giec souligne qu'à cause de la baisse des rendements agricoles dans certaines régions, les sources d'alimentation pourraient manquer et affecter la santé des populations. Les événements climatiques extrêmes, plus fréquents et plus intenses, pourraient conduire au déplacement de 216 millions de migrants d'ici 2050 (Banque mondiale). La fonte des glaciers aura de lourdes conséquences sur les océans, les courants marins et le climat. La montée du niveau de la mer aura des répercussions sur certains fleuves, augmentant les risques d'inondations ou de submersions à leur embouchure. Ces événements auront également de lourdes conséquences sur la biodiversité et les écosystèmes.

LA CONTRIBUTION DE LA FRANCE AU DÉPASSEMENT DE LA FRONTIÈRE PLANÉTAIRE

Entre 1850 et 2021, la France a émis 2,3 % des émissions mondiales cumulées de CO₂ (hors émissions liées au changement d'affectation des sols). La proportion est faible mais elle identifie néanmoins la responsabilité historique de la France dans l'accumulation de CO₂ dans l'atmosphère, à l'origine du réchauffement climatique actuel (*graphique 2*).

Plus de 75 % du cumul des émissions mondiales de CO₂ proviennent des USA (25 %), de l'Union européenne (UE) - (17 %), de la Chine (15 %), de la Russie (7 %), du Royaume-Uni (4 %), du Japon (4 %), de l'Inde (3 %) et du Canada (2 %). Cependant, depuis deux décennies, les émissions de CO₂ diminuent aux USA et en Europe, alors qu'elles augmentent dans le reste du monde, et en particulier en Asie. Entre 2000 et 2021, les émissions annuelles de CO₂ ont diminué en moyenne de 1,2 % en Europe et de 0,9 % aux USA, contre un taux de croissance moyen de 5,6 % par an en Chine.

Graphique 2 : évolution des émissions historiques cumulées de CO₂ par continent et en France



Champ : CO₂ issu des combustibles fossiles et du ciment, hors utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie ; hors sources internationales.

Source : Global Carbon Project. Traitements : SDES, février 2023

¹² Lorsque l'on ajoute au CO₂ les deux autres principaux gaz à effet de serre, le CH₄ et le N₂O, l'empreinte carbone moyenne des Français en CO₂ équivalent est estimée à 8,9 t/hab. de CO₂eq en 2021.

Comment se situe la France au regard des émissions contemporaines ?

La frontière planétaire étant dépassée, les émissions mondiales de CO₂, diminuées de celles absorbées par les puits de carbone artificiels, devraient être désormais nulles afin de pas ajouter de molécules additionnelles de CO₂ dans l'atmosphère. Cette situation où les émissions sont compensées par les absorptions caractérise le concept de « neutralité carbone » (*voir glossaire*). Si la neutralité carbone était atteinte, la concentration atmosphérique de GES diminuerait progressivement pour se situer en deçà des seuils limites.

Deux approches permettent d'estimer les émissions de GES de la France :

- L'inventaire national comptabilise les quantités de GES physiquement émises à l'intérieur du pays (approche territoriale). Il constitue le jeu de données officiel retenu pour les politiques climatiques internationales et nationales.
- L'empreinte carbone est une estimation des GES induits par la demande finale intérieure du pays (consommation finale et investissements). L'empreinte est constituée des émissions nationales (hors émissions liées aux exportations) et des émissions associées aux importations de biens et services consommés par les Français.

En 2021, hors utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie, les émissions de CO₂ de la France présentées dans l'inventaire national représentent 0,82 % des émissions mondiales. Selon l'approche empreinte carbone, en tenant compte des émissions importées, cette proportion s'élève à 1,27 %. La contribution annuelle de la France à l'effet de serre est à mettre en perspective avec le poids démographique (0,85 %) et économique (2,33 %) de la France dans le monde.

Dans l'inventaire, les émissions moyennes annuelles de CO₂ (hors autres gaz à effet de serre) par habitant de France sont similaires à celles de la moyenne mondiale (4,7 t en 2021). Ainsi, pour 2021, en moyenne, les Français ont contribué autant que les autres habitants du monde au maintien des émissions au-dessus de la frontière planétaire. Dans cette optique, les efforts à produire pour descendre en deçà des seuils limites sont les mêmes en France, qu'en moyenne, dans le reste du monde.

L'approche empreinte carbone accentue la pression climatique relative de la France. L'empreinte carbone moyenne annuelle des Français (CO₂ uniquement) est estimée à 7,0 tonnes en 2021¹². L'empreinte CO₂ des Français dépasse de 48 % l'empreinte CO₂ moyenne mondiale.

LES POLITIQUES ET ACTIONS EN FAVEUR DU CLIMAT

Depuis l'adoption en 1992 de la convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques, une coordination mondiale visant à lutter contre le changement climatique s'est constituée. En particulier, l'Accord de Paris, conclu en 2015 lors de la conférence de Paris sur les changements climatiques, fixe un objectif de limitation du réchauffement mondial bien en dessous de 2 °C par rapport à l'ère préindustrielle, et de poursuite des efforts pour ne pas dépasser 1,5 °C. Les pays signataires s'engagent à contribuer à cet objectif mondial en définissant des efforts nationaux de réduction des émissions, qui doivent présenter une progression dans le temps.

Au niveau européen, dans le cadre du Pacte vert publié fin 2019, un « paquet climat », c'est-à-dire un ensemble de législations permettant de lutter contre les changements climatiques, a été proposé en 2021. L'objectif de ce paquet, également nommé « Ajustement à l'objectif 55 » ou *Fit for 55*, est de réduire les émissions de GES d'au moins 55 % d'ici 2030, pour atteindre la neutralité carbone d'ici 2050. Dans ce cadre, deux mesures importantes ont été actées fin 2022 : l'objectif d'une mobilité routière à émission nulle d'ici à 2035, et la mise en œuvre d'un mécanisme d'ajustement carbone aux frontières, souvent appelé « taxe carbone aux frontières », permettant d'éviter les fuites de carbone. Ce dernier dispositif imposera aux importateurs de produits fabriqués hors Europe d'acquiescer des certificats carbone correspondant au prix du carbone qui aurait été payé si le produit avait été fabriqué dans l'UE.

Le système européen d'échange de quotas d'émissions de GES, aussi appelé « marché du carbone », initié en 2005, est l'un des principaux outils permettant de réduire les émissions de GES. La quantité de quotas d'émissions est déterminée par les autorités publiques, puis les quotas sont distribués aux installations couvertes, qui peuvent les revendre ou en acheter de nouveaux sur un marché. Ces installations doivent ensuite restituer à l'autorité publique la même quantité de quotas d'émissions que d'émissions réelles. Ce marché couvre aujourd'hui près de 45 % des émissions de GES de

l'UE (11 000 installations assujetties dans les domaines de la production d'électricité, des réseaux de chaleur, de l'acier, du ciment, du raffinage, du verre, du papier, etc. et depuis 2012, de l'aviation). Le paquet *Fit for 55* prévoit de l'étendre à de nouveaux secteurs et de le compléter par un mécanisme d'ajustement carbone aux frontières, permettant de couvrir les émissions de GES des produits importés dans l'UE.

Ces objectifs internationaux sont déclinés dans des outils de programmation français (loi relative à l'énergie et au climat, stratégie nationale bas-carbone, programmation pluriannuelle de l'énergie).

Au niveau régional, les objectifs de lutte contre le changement climatique sont déclinés dans les schémas régionaux d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires (SRADDET) – (*voir glossaire*), les schémas régionaux climat-air-énergie (SRCAE) et au niveau intercommunal dans les plans climat-air-énergie territoriaux (PCAET). Dans les départements d'outre-mer, le document de planification correspondant est le schéma d'aménagement régional (SAR).

Les stratégies, schémas et plans concernent tous les secteurs d'activité. Ils ont vocation à mobiliser les acteurs économiques, sociaux et environnementaux et à lancer des actions, notamment pour accélérer la rénovation énergétique des bâtiments, favoriser le changement des systèmes de chauffage vers des systèmes plus efficaces, agir sur l'éclairage public, favoriser une mobilité plus sobre (covoiturage, mobilité douce, reports modaux, télétravail, lutte contre l'étalement urbain, etc.), améliorer les systèmes logistiques territoriaux (circuits courts, etc.), et aider au développement des énergies renouvelables.

Les acteurs privés peuvent également se mobiliser en faveur de la lutte contre le changement climatique, à travers notamment le label bas-carbone, créé en 2019. Ce label permet de certifier des projets de réduction des gaz à effet de serre ou des projets de séquestration de carbone¹³. Ces projets certifiés peuvent ensuite être financés sur une base volontaire par des organismes privés ou publics, par exemple pour compenser leurs émissions résiduelles.

¹³ Mi-2022, 168 projets bénéficient du label bas-carbone et représentent plus de 450 000 tonnes de CO₂ potentielles (260 000 pour les projets financés), l'objectif étant d'atteindre 1 million de tonnes CO₂. Ces projets concernent notamment des projets forestiers (reboisement, boisement sur des terrains non forestiers, transformation de taillis bien venants en futaies) ou des projets agricoles (augmentation du stockage du carbone dans les sols, gestion durable des haies, plantation de vergers).

Où en est la France dans l'atteinte des objectifs politiques internationaux ?

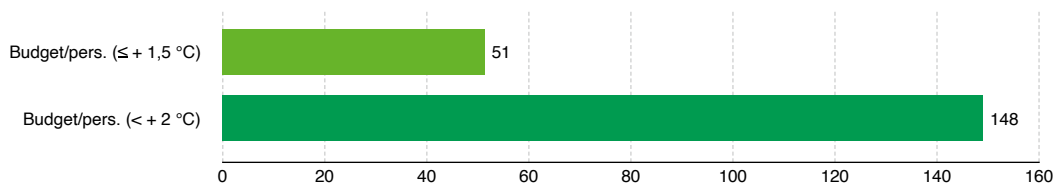
Avec pour objectif l'atteinte de la neutralité carbone à l'horizon 2050, la politique climatique française, déclinée dans la stratégie nationale bas-carbone, se cale sur la trajectoire d'émissions mondiales permettant de limiter l'augmentation de la température moyenne mondiale d'ici la fin du siècle à + 1,5 °C et de respecter la limite planétaire (concentration en CO₂) d'ici la fin du siècle.

Le 6^e rapport d'évaluation des travaux scientifiques sur le climat, produit par le Giec, présente les résultats des modélisations climatiques. En tenant compte de la quantité de CO₂ déjà émise dans l'atmosphère, les scientifiques estiment les émissions que les activités humaines peuvent encore émettre tout en limitant l'élévation de température à + 1,5 °C ou + 2 °C, à l'horizon 2100 par rapport à l'ère préindustrielle. Ce « budget carbone » (*voir glossaire*) s'élève respectivement à 400 gigatonnes (Gt) pour + 1,5 °C et 1 150 Gt de CO₂ pour + 2 °C (67 % de confiance dans l'estimation).

Dans l'hypothèse d'une répartition strictement égalitaire entre tous les habitants de la planète, du budget carbone qu'il reste à émettre, chaque être humain, et ses éventuels descendants à naître, dispose, pour le restant de ses jours, d'une fourchette située entre 51 t (+ 1,5 °C) et 148 t de CO₂ (+ 2 °C) - (*graphique 3*). Pour la seule année 2021, les émissions moyennes annuelles des Français sont de 4,7 t de CO₂ par personne et de 7,0 t de CO₂ dans l'approche empreinte (*graphique 4*). Cette hypothèse d'une répartition strictement égalitaire des budgets carbone n'inclut pas d'éventuelles répartitions intra-générationnelles ou géographiques qui tiendraient compte de l'âge des populations ou des responsabilités historiques de chaque pays.

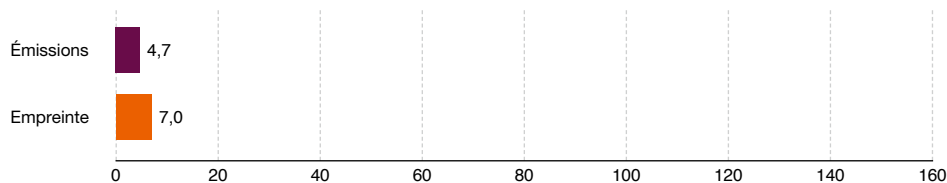
Graphique 3 : budget CO₂ total attribué à chaque être humain en 2021, compatible avec l'Accord de Paris

En tonnes de CO₂



Graphique 4 : émissions et empreinte moyennes annuelles de CO₂ des Français en 2021

En tonnes de CO₂ par personne et par an



Note : le budget carbone du Giec correspond aux émissions de CO₂ totales qu'il reste à émettre pour limiter le réchauffement à + 1,5 °C et + 2 °C, réparties équitablement entre tous les êtres humains en 2021.

Champ : émissions de CO₂ uniquement, hors utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie.

Sources : Citepa ; SDES ; Giec, AR6 WG août 2021. Traitements : SDES, février 2023



partie 2 : les neuf limites planétaires - changement climatique

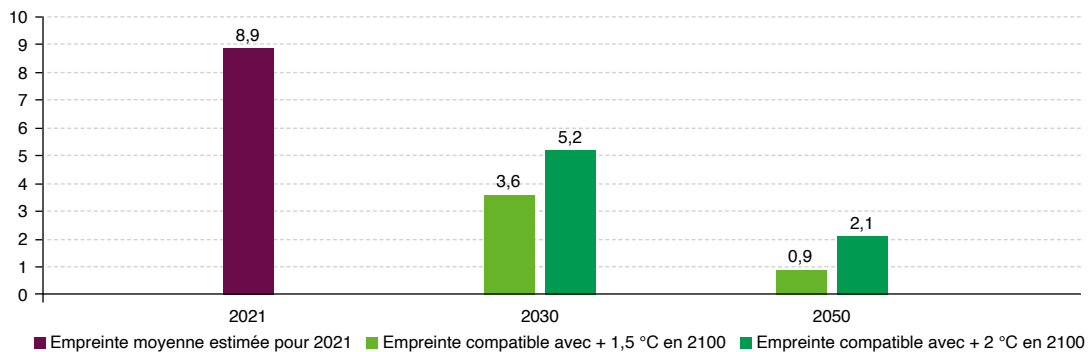


Les scientifiques ont défini des trajectoires de consommation de ces budgets carbone entre 2021 et 2100. Le respect d'une limitation du réchauffement à + 1,5 °C en 2100 impose une neutralité carbone vers 2050 et vers 2075 pour limiter le réchauffement à + 2 °C. La neutralité carbone définit un solde nul entre émissions et stockage par les terres, la forêt ou la technologie.

En tenant compte des prévisions moyennes d'évolution de la population mondiale et des projections de réduction des émissions pour limiter le réchauffement climatique, il est possible d'estimer ce que devraient être les émissions moyennes annuelles jusqu'en 2100. D'ici 2030, dans une perspective de limiter le réchauffement à + 2 °C, les émissions moyennes territoriales devraient diminuer d'environ 42 % et l'empreinte carbone être presque divisée par 2. À l'horizon 2050, l'empreinte carbone moyenne d'un Français devrait diminuer d'un facteur 4 à 5 pour contenir le réchauffement à + 2 °C (*graphique 5*). Le *graphique 5* présente les empreintes GES, alors que les données d'émissions présentées précédemment (*graphiques 3 et 4*) portent uniquement sur le CO₂ (qui représente 75 % de l'ensemble des GES).

Graphique 5 : empreinte GES* moyenne annuelle des Français en 2021 et objectifs estimatifs des émissions** moyennes annuelles par personne dans le monde en 2030 et 2050

En tonnes de GES/personne/an



* Empreinte GES : CO₂, CH₄, N₂O.

** Objectifs estimatifs des émissions : tous GES.

Champ : émissions de CO₂, CH₄, N₂O pour l'empreinte des Français en 2021, et tous GES pour les objectifs estimatifs des émissions dans le monde en 2030 et 2050.

Sources : Citepa ; SDES ; Giec, AR6 WG3 ; ONU. Traitements : SDES, février 2023

POUR ALLER PLUS LOIN

- MTECT, *Lutte contre le changement climatique*.
- MTECT, *Centre de ressources pour l'adaptation au changement climatique*.
- MTECT, *Marchés du carbone*.
- MTECT, *Actions des entreprises et des collectivités pour le climat*.
- Steffen, W. et al., 2015. *Planetary Boundaries: Guiding Human Development on a Changing Planet*. Science 347 (6223): 1259855–55.

POUR AGIR

- Ademe, *Guide PCAET – Comprendre, construire et mettre en œuvre*.
- Cerema, *La boussole de la résilience – Repères pour la résilience territoriale*.
- France Relance, *volet Transition agricole, alimentation et forêt*.
- France'Renov, *pour rénover son habitat*.

Érosion de la biodiversité

UNE CRISE MONDIALE DE LA BIODIVERSITÉ, CONDUISANT AU DÉPASSEMENT DE LA LIMITE PLANÉTAIRE

La biodiversité désigne la variété du monde vivant organisée selon trois niveaux (la diversité des gènes, celle des espèces et celle des écosystèmes), ainsi que les interactions au sein de ces trois niveaux, et entre ces niveaux. Cette diversité biologique est associée à un ensemble de fonctions écologiques qui peuvent être utilisées par l'homme à son avantage. Ces utilisations constituent des services dits « écosystémiques », regroupant les services d'approvisionnement (en produits alimentaires, eau, matériaux, ressources naturelles, etc.), les services de régulation (pollinisation, séquestration du carbone, régulation du cycle de l'eau, etc.) et les services culturels (activités récréatives, éducatives, etc.). Cet ensemble, biologique et fonctionnel, assure l'intégrité de la biosphère, un des facteurs clés de régulation des équilibres naturels de la planète.

Depuis la révolution industrielle, de multiples pressions d'origine humaine menacent la biodiversité : la destruction des habitats liée aux changements d'usage des terres et des mers ; la surexploitation d'espèces sauvages et de ressources liée à la surpêche et à la déforestation ; le changement climatique ; la pollution de l'eau, de l'air et des sols, et

l'introduction d'espèces exotiques envahissantes.

En 2019, l'IPBES (*voir glossaire*) alertait sur le déclin de la nature « à un rythme sans précédent dans l'histoire humaine ». En 2022, la Liste rouge mondiale (*voir glossaire*) de l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) indique que sur les 150 388 espèces étudiées, 42 108 sont classées menacées d'extinction. Ces menaces s'expliquent notamment par la dégradation et la diminution des habitats (*voir glossaire*). Selon le rapport *Planète vivante 2020* du WWF, « environ 9 % des 5,9 millions d'espèces terrestres dans le monde ne disposent pas d'un habitat suffisant pour assurer leur survie à long terme et sont condamnées à s'éteindre pour la plupart ». Dans le même temps, parmi les services rendus par la nature, de nombreux se dégradent.

Évaluer le positionnement de la planète par rapport au point de basculement formalisé par la limite planétaire « Érosion de la biodiversité » demeure une tâche complexe. Deux variables de contrôle ont été retenues par la communauté scientifique : l'une est relative à la diversité spécifique des espèces (taux d'extinction d'espèces) ; l'autre est mesurée à l'aide de l'indice d'intégrité de la biodiversité pour suivre la diversité fonctionnelle des écosystèmes et estimer leur capacité à fournir durablement des services aux populations (*tableau 3*).

Tableau 3 : variables de contrôle et limite planétaire pour l'érosion de la biodiversité

Variables de contrôle	Seuils et zone d'incertitude	Valeurs mondiales
Diversité spécifique : taux d'extinction d'espèces (nombre d'extinctions sur un million d'espèces, par an)	10 extinctions par an sur 1 million d'espèces (10 - 100 extinctions par an sur 1 million d'espèces)	100 à 1000 extinctions par an sur 1 million d'espèces (Steffen <i>et al.</i> , 2015)
Diversité fonctionnelle : indice d'intégrité de la biodiversité – IIB (abondance des espèces dans un écosystème par rapport à leur abondance à l'ère préindustrielle), en pourcentage	Maintenir l'indice d'intégrité de la biodiversité (IIB) à 90 % (frontière) pour les biomes (<i>voir glossaire</i>), les grandes zones régionales (par exemple, l'Afrique du Sud), les principaux écosystèmes marins (par exemple, les récifs coralliens – <i>voir glossaire</i>) ou les grands groupes fonctionnels, et ne pas passer sous la barre des 30 % (limite)	Valeur moyenne mondiale de l'IIB : 77 % (WWF, 2022) IIB estimé à 84 % pour l'Afrique du Sud uniquement (Steffen <i>et al.</i> , 2015)

Source : d'après Steffen *et al.*, 2015

Les valeurs présentées ci-dessus montrent que la limite planétaire est largement dépassée pour les deux variables de contrôle. Cela signifie que le rythme d'érosion de la biodiversité

s'accroît rapidement, atteignant un niveau qui met en danger la santé des écosystèmes et des espèces.

partie 2 : les neuf limites planétaires - érosion de la biodiversité

La diminution ou la disparition d'écosystèmes terrestres et aquatiques, d'espèces animales et végétales, sous l'effet direct ou indirect des activités humaines, constitue une menace forte pour le bien-être humain, dans toutes les régions du monde, et *in fine* pour la stabilité des civilisations humaines. En effet, compte tenu de la complexité du monde vivant, l'extinction d'une seule espèce peut avoir des effets en cascade, conduire à la disparition d'autres espèces, perturber le fonctionnement des écosystèmes et à terme affecter fortement la qualité des services rendus par les écosystèmes à l'homme, notamment dans un contexte où le changement climatique exacerbe les dynamiques déjà à l'œuvre en matière d'érosion de la biodiversité.

LA CONTRIBUTION DE LA FRANCE AU DÉPASSEMENT DE LA LIMITE PLANÉTAIRE

Le risque d'extinction d'espèces tend à s'accroître en France

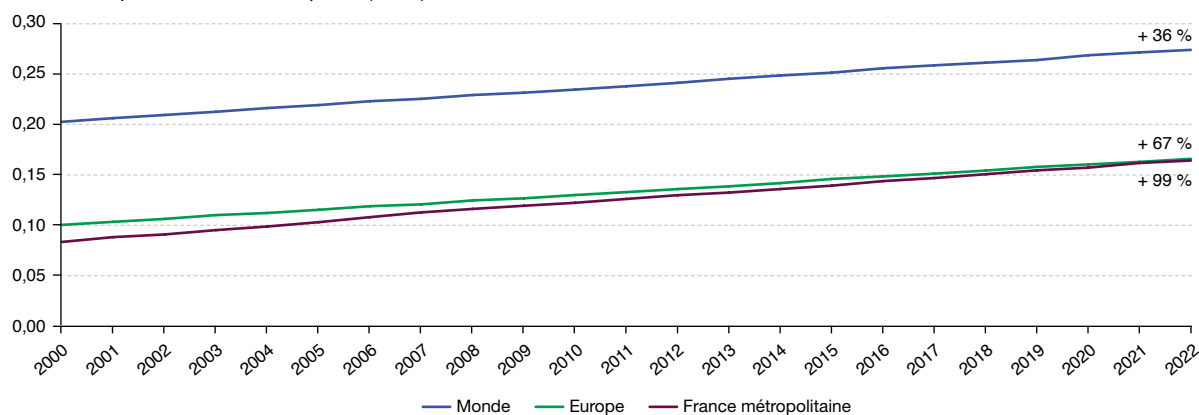
L'indice de risque d'extinction des espèces, élaboré à partir des données relatives aux catégories de menaces pesant

sur les espèces de la Liste rouge de l'UICN, permet de suivre l'évolution de l'état de la biodiversité (mammifères, oiseaux, amphibiens, coraux et cycadales - voir glossaire) présente sur un territoire à partir de critères qualitatifs (taille de la population, taux de déclin, répartition géographique). Compris entre 0 et 1, cet indice reflète la proportion d'espèces supposées être éteintes dans un futur proche à défaut d'actions conservatoires. Plus sa valeur est proche de 1, plus les populations évaluées sont dans une situation susceptible de conduire à leur disparition. À l'inverse, plus l'indice est proche de 0, plus les espèces concernées sont catégorisées dans un statut de « préoccupation mineure » (pas de disparition prévue dans un avenir proche).

Depuis la fin du XX^e siècle, cet indice augmente pour toutes les espèces, tous les milieux et tous les continents (graphique 6). En 2022, l'indice de risque d'extinction s'élève à 0,17 en France métropolitaine, ainsi qu'à l'échelle européenne, et à 0,28 au niveau mondial. Toutefois, c'est en France qu'il augmente le plus entre 2000 et 2022 (+ 99 % contre + 67 % en Europe et + 36 % dans le reste du monde).

Graphique 6 : évolution de l'indice de risque d'extinction des espèces entre 2000 et 2022

Indice de risque d'extinction des espèces (1-RLI)



Notes : l'indice de risque d'extinction des espèces est déduit de l'indice Liste rouge (RLI) de l'UICN (voir glossaire) : (1-RLI). La méthode RLI se trouve sur le site de l'UICN et notamment dans *Les lignes directrices pour l'application des critères de la liste rouge de l'UICN au niveau régional et national*.
 Source : UICN Red List Index, BirdLife International, plateforme de la Global SDG Indicators Database (extraction au 21 mars 2023).
 Traitements : SDES, mars 2023

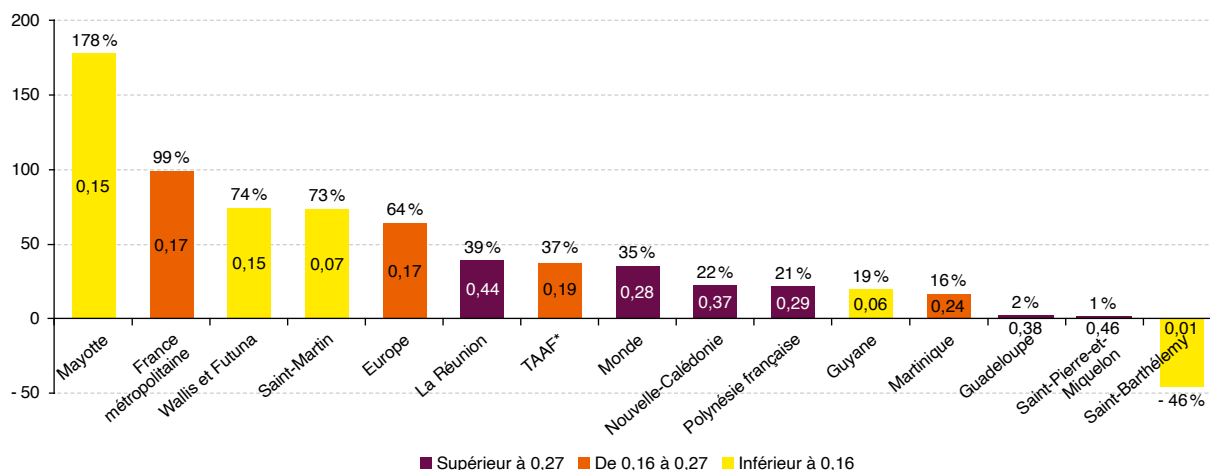
Les territoires français d'outre-mer se caractérisent par leur grande richesse en matière de biodiversité. Ils concentrent notamment 4/5^e des espèces endémiques (voir glossaire) présentes en France. Toutefois, en 2022, plus de la moitié d'entre eux affichent un indice de risque d'extinction des espèces supérieur à celui de la métropole.

Pour nombre d'entre eux, la situation s'est aggravée sur la période 2000-2022 (graphique 7). Les multiples pressions qui s'exercent sur ces territoires très souvent insulaires (urbanisation, pollutions diffuses, espèces exotiques envahissantes, aménagements touristiques, effets du changement climatique) peuvent expliquer cette situation préoccupante.

partie 2 : les neuf limites planétaires - érosion de la biodiversité

Graphique 7 : indice de risque d’extinction des espèces en France en 2022 et évolution entre 2000 et 2022

Indice de risque d’extinction des espèces et taux d’évolution en %



*TAAF = Terres australes et antarctiques françaises.

Note de lecture : en 2022, La Réunion présente l'indice de risque d'extinction des espèces le plus élevé (0,44), alors que Saint-Barthélemy affiche l'indice le plus bas (0,01). Sur la période 2000-2022, l'évolution de cet indice est la plus forte à Mayotte (178 %), alors qu'à Saint-Barthélemy, la tendance traduit la baisse de cet indice (- 46 %).

Note : l'indice de risque d'extinction des espèces varie de 0 à 1 (valeur comprise dans les barres). Plus sa valeur est proche de 1 plus les populations évaluées sont dans une situation susceptible de conduire à leur disparition. À l'inverse, plus l'indice est proche de 0, plus les espèces concernées sont catégorisées dans un statut de préoccupation mineure (pas de disparition prévue dans un avenir proche).

Source : UICN Red List Index, BirdLife International, plateforme de la Global SDG Indicators Database (extraction au 21 mars 2023).

Traitements : SDES, mars 2023

Bien qu'il ne permette pas de déterminer si le seuil planétaire est franchi pour la France, l'indice de risque d'extinction des espèces met en lumière la dynamique que suivent les populations et conduit à constater que le risque de perte de biodiversité au niveau national tend à s'accroître.

Pour une meilleure appréhension du phénomène d'érosion de la biodiversité, une deuxième variable de contrôle a été définie. Elle porte sur la diversité fonctionnelle des écosystèmes et est mesurée à l'aide de l'indice d'intégrité de la biodiversité (IIB ou BII – *Biodiversity Intactness Index*).

De multiples activités humaines (industrielles, urbanisation, construction d'infrastructures de transport, etc.) exercent des pressions qui sont de nature à affecter la biodiversité. La *Mean Species Abundance* (MSA) - (voir glossaire) est un indicateur qui traduit l'abondance

moyenne des espèces terrestres originelles (mammifères, oiseaux, amphibiens, reptiles, invertébrés et plantes vasculaires) d'un territoire, rapporté à leur abondance dans les écosystèmes originels non perturbés.

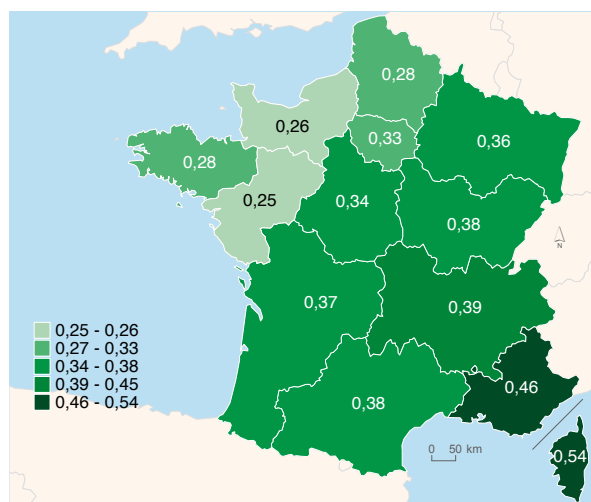
Le suivi de la MSA s'appuie notamment sur le modèle GLOBIO qui évalue l'impact de différentes pressions (utilisation des terres, réseau routier, fragmentation des milieux naturels, chasse, dépôts d'azote atmosphérique, changement climatique) sur l'abondance des espèces originelles. Pour un territoire donné, la MSA est comprise entre 0 (écosystème détruit) et 1 (écosystème intact non perturbé). Les chercheurs qui ont développé la MSA ont transcrit la limite planétaire « Érosion de la biodiversité » en termes de MSA et ont estimé celle-ci à 0,72¹⁴.

¹⁴ La MSA est un indicateur voisin du BII utilisé par le Stockholm Resilience Centre pour fixer une limite planétaire. La MSA effectue un calcul d'abondance pour chaque espèce, alors que le BII le fait au niveau du groupe d'espèces ; par ailleurs, le BII donne plus de poids aux zones riches en espèces et considère davantage de types d'écosystèmes que la MSA. Les augmentations de l'abondance des espèces individuelles entre la situation de référence et la situation impactée sont ignorées dans la MSA pour éviter que l'indicateur ne soit gonflé par des espèces opportunistes ou généralistes qui profitent de la perturbation de l'habitat. À un BII de 0,9 (90 %) correspond une MSA de 0,72 (voir page 46 du rapport *Using planetary boundaries to support national implementation of environment-related sustainable development goals*). La MSA a été utilisée ici car les données sont plus récentes et plus accessibles.

partie 2 : les neuf limites planétaires - érosion de la biodiversité

En 2020, alors que la MSA mondiale était de 0,56, celle de la France métropolitaine s'élevait à 0,36. Les atteintes à l'intégrité des écosystèmes, telles que mesurées par cet indicateur, sont variables selon les régions. Alors que certaines régions comme la Corse ou la région Provence-Alpes-Côte d'Azur présentent des valeurs nettement supérieures à la moyenne nationale (respectivement 0,54 et 0,46), d'autres comme les Pays de la Loire (0,25) et la Normandie (0,26) sont dans une situation beaucoup moins favorable (carte 1).

Carte 1 : abondance moyenne des espèces (MSA), par région, en 2020



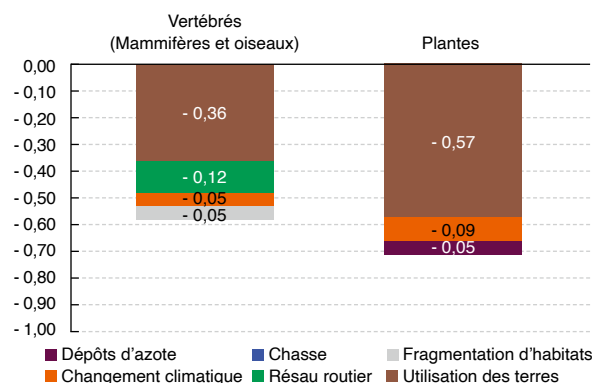
Note : les valeurs de la MSA vont de 0 à 1, 1 représentant un écosystème intact non perturbé.

Source : modèle GLOBIO, Agence néerlandaise d'évaluation environnementale, 2022. Traitements : SDES, septembre 2022

À l'échelle du territoire métropolitain, la perte d'intégrité de la biodiversité est estimée à 61 % pour les vertébrés en 2020 (1 - 0,39 où 0,39 est la MSA) et à 70 % (1 - 0,30) pour les plantes. L'utilisation des terres constitue la pression dominante contribuant à la perte d'abondance des espèces à la fois chez les vertébrés (- 0,36) et les plantes (- 0,57). Les perturbations liées au réseau routier (- 0,12 pour les vertébrés), ainsi que le changement climatique (- 0,05 pour les vertébrés et - 0,09 pour les plantes) affectent également cet indice (graphique 8).

Graphique 8 : pressions contribuant à la perte de l'abondance moyenne des espèces (MSA), en France métropolitaine, en 2020

Abondance moyenne perdue des espèces (1-MSA)



Source : modèle GLOBIO, Agence néerlandaise d'évaluation environnementale, 2022. Traitements : SDES, septembre 2022

Les données concernant les territoires d'outre-mer demeurent parcellaires, à l'exception de la Guyane française. Pour ce territoire constitué à plus de 90 % de forêt primaire, la MSA avoisine 0,73, ce qui correspond à un état proche de l'écosystème non perturbé. La chasse (- 0,24) et les dépôts azotés (- 0,11) constituent respectivement les principales pressions contribuant à la perte de MSA du territoire chez les vertébrés et les plantes.

Quelle évolution de l'abondance moyenne des espèces en France ?

Dans son 6^e rapport d'évaluation sur l'évolution du climat (2021), le Giec examine plusieurs scénarios¹⁵ socio-économiques (SSP - *Shared Socio-economic Pathways*) intégrant la démographie, l'éducation, l'urbanisation et le produit intérieur brut (PIB) pour esquisser différents futurs possibles.

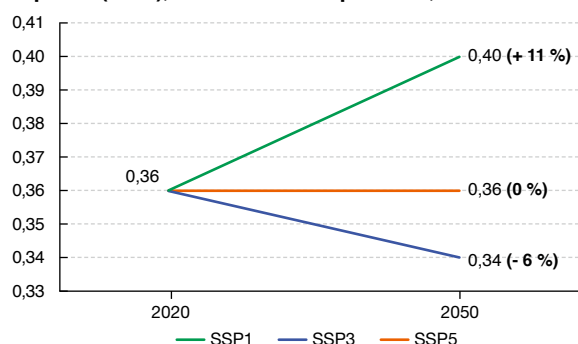
Chacun de ces scénarios montre, de manière différente, que la biodiversité est affectée, notamment en matière d'abondance des espèces. Ainsi, à l'horizon 2050, d'après le scénario SSP1 (scénario « optimiste »), la MSA de la France métropolitaine augmenterait et pourrait atteindre 0,40, soit une augmentation de 11 % par rapport à son niveau de 2020. À l'inverse, dans le cas du scénario SSP3 (le plus « pessimiste »), la MSA diminuerait (0,34, soit un déclin de 6 %). Le scénario SSP5 n'aurait quant à lui pas d'impact direct sur l'évolution de la MSA (graphique 9).

¹⁵ Scénario « optimiste » (SSP1) : un monde caractérisé par des investissements importants dans l'éducation et la santé, une croissance rapide et des institutions dont le fonctionnement est optimal donnant la priorité au développement de pratiques plus durables.

- Scénario « pessimiste » (SSP3) : des investissements limités dans l'éducation ou la santé, une croissance démographique rapide et des inégalités croissantes, ainsi que des politiques peu soucieuses de l'environnement et plutôt orientées vers la sécurité régionale et la production industrielle.

- Scénario SSP5 : une croissance rapide, basée sur une consommation élevée d'énergies fossiles avec une hausse du niveau de vie et notamment une baisse de l'extrême pauvreté qui permettrait en revanche d'augmenter la capacité d'adaptation.

Graphique 9 : évolution de l'abondance moyenne des espèces (MSA), en France métropolitaine, à l'horizon 2050



Notes : les valeurs de la MSA vont de 0 à 1, 1 représentant un écosystème intact non perturbé ; SSP1, SSP3, SSP5 : scénarios socio-économiques (SSP - Shared Socio-economic Pathways) examinés par le Giec dans son 6^e rapport d'évaluation (2021) pour esquisser différents futurs possibles. Source : modèle GLOBIO, Agence néerlandaise d'évaluation environnementale, 2022. Traitements : SDES, septembre 2022

Les valeurs présentées pour la France montrent que la limite planétaire « Érosion de la biodiversité » est largement dépassée eu égard à ces deux variables de contrôle. L'analyse met également en évidence que le changement climatique est encore susceptible d'aggraver la situation.

LES POLITIQUES ET ACTIONS EN FAVEUR DE LA BIODIVERSITÉ

Lors de la 15^e Conférence des Parties à la Convention sur la diversité biologique, en décembre 2022, les États ont adopté un nouveau cadre mondial pour la biodiversité. Celui-ci définit une trajectoire pour atteindre d'ici 2050, l'objectif principal de la Convention, à savoir « vivre en harmonie avec la nature ». L'Union européenne (UE) et la France disposent également de stratégies pour la biodiversité à horizon 2030, qui contribuent à la mise en œuvre de ce cadre mondial.

Réduction des pressions

Les politiques de protection de la biodiversité ont d'abord pour but de réduire les pressions menaçant la biodiversité. L'IPBES (2019) a identifié les cinq principales pressions suivantes, pour lesquelles des exemples de politiques

publiques associées sont donnés :

- Le changement d'utilisation des terres est la première pression pesant sur les écosystèmes terrestres (IPBES). Les politiques associées sont principalement traitées dans la fiche dédiée au changement d'usage des sols pp. 40-43. Les outils de planification de l'aménagement urbain, comme les SRADDET ou les plans locaux d'urbanisme (PLU), constituent l'un des principaux leviers de régulation de cette pression. La mise en œuvre de la séquence « éviter-réduire-compenser »¹⁶ doit également permettre d'atteindre l'objectif d'absence de perte nette de biodiversité, en réduisant au maximum l'impact résiduel des projets d'aménagement soumis à étude d'impact.
- L'exploitation directe des organismes : au niveau international, le commerce d'espèces sauvages menacées est encadré par la Convention CITES¹⁷, adoptée en 1973 à Washington. En France, l'exploitation directe de certaines espèces peut être interdite, en vertu de l'article L.411-1 du Code de l'environnement, en raison de leur intérêt écologique, scientifique ou patrimonial. Comme le souligne l'IPBES, l'exploitation directe est la principale pression pesant sur les écosystèmes marins, à travers notamment la pêche maritime professionnelle. Cette pratique est notamment encadrée au niveau international par les organisations régionales de gestion des pêches, comme la Commission internationale pour la conservation des thonidés de l'Atlantique, et au niveau européen par la politique commune des pêches.
- La pollution : dans le domaine agricole par exemple, de nombreux pesticides ont été successivement interdits (DDT¹⁸, atrazine, chlordécone, etc.) et le plan Écophyto II+ a pour objectif d'accélérer le retrait des substances les plus préoccupantes et d'accompagner la sortie du glyphosate.
- Les changements climatiques : les politiques publiques associées à cette limite sont traitées dans la fiche dédiée (cf. limite « Changement climatique » pp. 24-28).
- Les espèces exotiques envahissantes (EEE) : au niveau européen, la lutte contre les EEE est encadrée par le règlement du 22 octobre 2014 relatif à la prévention et à la gestion de l'introduction et de la propagation des espèces exotiques envahissantes. Dans ce cadre, la France a adopté en 2022 un plan d'action pour prévenir l'introduction et la propagation des EEE, accompagné d'un programme de 500 actions « coup de poing » qui seront mises en place entre 2022 et 2025.

¹⁶ Le « principe d'action préventive et de correction » a été introduit à l'article L110-1 II2 du Code de l'environnement en 2010 avec la loi Grenelle, puis précisé en 2016.

¹⁷ Convention sur le commerce international des espèces de faune et de flore sauvages menacées d'extinction, dite CITES, ou Convention de Washington.

¹⁸ Dichlorodiphényltrichloroéthane.

Atteinte du bon état de conservation des habitats et des espèces

Des politiques de protection de la biodiversité sont également dédiées à la protection d'écosystèmes ou d'espèces particuliers. Au niveau européen, c'est notamment le cas des directives « Oiseaux » (1979, révisée en 2009) et « Habitats-Faune-Flore » (1992), dont l'objectif est d'assurer le bon état de conservation des espèces et des habitats d'intérêt communautaire. Pour atteindre ces objectifs, ces directives instituent un réseau de sites écologiques nommé « Natura 2000 », ainsi que des plans d'action nationaux dédiés à des espèces d'intérêt communautaire. La directive-cadre sur l'eau (2000) et la directive-cadre « Stratégie pour le milieu marin » (2008) ont pour objectif d'atteindre le bon état écologique des milieux aquatiques continentaux et marins. Dans ce cadre, des cycles successifs de mise en œuvre, associés à des programmes de mesures, contribuent à améliorer l'état écologique de ces milieux, ainsi que l'état de conservation des espèces inféodées (*voir glossaire*), notamment en réduisant les pressions qui les menacent.

L'un des principaux outils permettant d'atteindre le bon état écologique des écosystèmes et des espèces d'intérêt est aujourd'hui le développement du réseau d'aires protégées. La deuxième cible du nouveau cadre mondial pour la biodiversité est ainsi d'atteindre 30 % d'aires protégées d'ici 2030. En France, la stratégie nationale pour les aires protégées (2022-2030) prévoit un objectif plus ambitieux encore : 30 % d'aires protégées d'ici 2030, dont un tiers en protection forte. L'objectif de 30 % d'aires protégées est quasi atteint, et le déploiement du réseau de protections fortes est en cours.

Le cadre mondial pour la biodiversité prévoit également de restaurer 30 % des milieux dégradés d'ici 2030. Le règlement européen sur la restauration de la nature doit permettre de rendre cet objectif opérationnel, en fixant des objectifs de restauration par milieu.

Mobilisation de la société

L'un des principaux enjeux de la stratégie nationale pour la biodiversité est de sensibiliser et mobiliser la société pour la protection de la biodiversité. Pour cela, les communes peuvent notamment entreprendre la réalisation d'un atlas de la biodiversité communale, avec l'ensemble des parties prenantes du territoire. Les sciences participatives (*voir glossaire*) constituent également un important levier de sensibilisation à la protection de la biodiversité.

Les propriétaires de biens immobiliers peuvent aussi contribuer à la protection de la biodiversité en contractant des obligations réelles environnementales, qui ont pour finalité le maintien, la conservation, la gestion ou la restauration

d'éléments de la biodiversité ou de fonctions écologiques. Ces obligations, qui peuvent durer jusqu'à 99 ans, s'appliquent également aux propriétaires ultérieurs du bien.

Des dispositifs volontaires permettent également aux entreprises et aux territoires de s'engager dans la protection de la biodiversité. C'est particulièrement le cas des programmes « Entreprises engagées pour la nature », qui accompagnent les entreprises tout au long de leurs chaînes de valeur ou dans leurs décisions d'investissement, et « Territoires engagés pour la nature ». Ces programmes portés par l'Office français de la biodiversité (OFB) comptent à ce jour 89 entreprises et 451 territoires engagés¹⁹.

POUR ALLER PLUS LOIN

- CGDD, 2020. *Rapport de première phase de l'évaluation française des écosystèmes et services écosystémiques (Efese)*.
- Commission européenne, 2020. *Stratégie en faveur de la biodiversité à l'horizon 2030*.
- Giec, 2021. Sixième rapport d'évaluation sur l'évolution du climat – Premier volet.
- Giec, IPBES, 2021. Biodiversité et changement climatique – Résultats scientifiques.
- GLOBIO. *Global biodiversity model for policy support*.
- IPBES, 2019. Rapport sur l'évaluation mondiale de la biodiversité et des services écosystémiques.
- MTECT, *Stratégie nationale biodiversité 2030*.
- ONB, Indicateur *Proportion en France d'espèces menacées à l'échelle mondiale*.
- ONU, Department of Economic and Social Affairs, *indicateur 15.5.1*.
- SDES, 2021. *Les protections des espaces naturels terrestres et marins en France en 2021, Datalab essentiel*, septembre 2021, 4 p.
- Steffen, W. *et al.*, 2015. *Planetary Boundaries: Guiding Human Development on a Changing Planet*. Science 347 (6223): 1259855–55.
- UICN, 2021. Liste rouge mondiale des espèces menacées. Inventaire mondial de l'état de conservation global des espèces végétales et animales.
- WWF, 2020. Rapport Planète vivante 2020. *Infléchir la courbe de la perte de biodiversité*.
- Site Notre-environnement. Séquence « Éviter, réduire, compenser ».

POUR AGIR

- Site OFB. *Il est urgent d'agir pour la biodiversité*.

¹⁹ Chiffres consultés sur le site « Engagés pour la nature : et si vous passiez à l'action », OFB, le 18 janvier 2023.

Perturbation des cycles biogéochimiques de l'azote et du phosphore

DES CYCLES VITAUX PERTURBÉS, CONDUISANT À UN DÉPASSEMENT DE LA LIMITE PLANÉTAIRE POUR L'AZOTE

L'azote et le phosphore, éléments nutritifs essentiels, jouent un rôle central dans la croissance des végétaux. Compte tenu de leurs fortes interactions et des enjeux qu'ils représentent dans le maintien des équilibres naturels du système Terre, les scientifiques ont fait le choix de les considérer comme une seule limite planétaire. Depuis la révolution industrielle, l'utilisation de l'azote et du phosphore par les activités humaines à des fins principalement agricoles, perturbe leur cycle naturel. Si cette utilisation a permis d'accroître considérablement le rendement des cultures et de nourrir une population mondiale toujours croissante, elle n'est pas sans conséquences sur l'environnement.

L'azote est un gaz particulièrement abondant dans l'atmosphère (78 % du volume). Par une succession de processus naturels, il est transformé en ammonium ou en nitrate. On parle alors d'« azote réactif » (*voir glossaire*), directement assimilable par les plantes. Depuis le début du XX^e siècle, ce cycle naturel est bouleversé par l'apparition de procédés industriels produisant de l'azote réactif, ainsi qu'à certains endroits par une densité d'élevages intensifs produisant des effluents azotés en excès par rapport à ce que peut

absorber la surface en cultures arables. De grandes quantités d'engrais ou effluents azotés sont ainsi produites et utilisées de manière intensive dans l'agriculture, et se retrouvent dans l'environnement (eaux de surface et souterraines notamment).

Le phosphore est un élément rare à la surface de la Terre. Il est principalement stocké sous forme de phosphate dans l'eau, le sol, les roches et les sédiments. Le phosphore issu de l'industrie minière est utilisé pour produire principalement des engrais, mais également des détergents. Depuis le XIX^e siècle, des quantités importantes de phosphore sont mobilisées pour augmenter la productivité agricole, ce qui contribue à déséquilibrer le cycle naturel du phosphore.

Pour appréhender ces problématiques, les auteurs des limites planétaires ont retenu comme variable de contrôle, la « quantité d'azote réactif rejetée chaque année dans la nature par les activités humaines », à l'échelle mondiale (*tableau 4*). Dans le cas du phosphore, ils ont défini une approche à deux niveaux pour une meilleure prise en compte des enjeux locaux, avec deux seuils géographiques :

- à l'échelle mondiale, il s'agit de la quantité annuelle de phosphore émis par les systèmes d'eau douce vers les océans ;
- à l'échelle continentale, il s'agit de la quantité annuelle de phosphore résultant d'apports excessifs lors de la fertilisation des sols agricoles (Steffen *et al.*, 2015).

Tableau 4 : variables de contrôle et limite planétaire pour la perturbation des cycles biogéochimiques de l'azote et du phosphore

Nutriments	Variables de contrôle	Seuils et zones d'incertitude	Valeurs mondiales
Azote	Quantité d'azote réactif rejetée par les activités humaines en millions de tonnes (Mt), par an, à l'échelle mondiale	62 Mt par an (62 - 82 Mt par an, soit 41 - 55 kg/an par hectare de surface en culture)	150 Mt
Phosphore	Échelle mondiale : quantité de phosphore émis par les systèmes d'eau douce vers les océans, en Mt par an	11 Mt par an (11 - 100 Mt par an, soit 1,5 - 13,5 kg/an par habitant ²⁰)	22 Mt
	Échelle continentale : quantité de phosphore dans les engrais épandus sur les sols agricoles, en Mt par an	6,2 Mt par an (6,2 - 11,2 Mt par an, soit 4,1 - 7,5 kg/an par hectare de surface en culture)	14,2 Mt

Source : d'après Steffen *et al.*, 2015

Les valeurs présentées ci-dessus montrent un dépassement de la limite planétaire pour l'azote : la quantité d'azote réactif rejetée dans l'environnement par les activités humaines au niveau mondial (150 Mt/an) est largement supérieure aux seuils fixés (62-82 Mt/an). Concernant le phosphore, les flux émis à l'échelle mondiale par les systèmes

d'eau douce vers les océans (22 Mt) dépassent la valeur basse de la zone d'incertitude (11 Mt), tout en restant en dessous de la limite haute (100 Mt). Mais à l'échelle continentale, les quantités d'engrais phosphorés épandues sur les sols sont supérieures à la valeur haute de la zone d'incertitude (14,2 Mt au lieu de 11,2 Mt).

²⁰ Population mondiale 2015 : 7,4 milliards d'habitants. Surface en culture mondiale (moyenne depuis 1970) : 1,496 milliard d'hectares.



partie 2 : les neuf limites planétaires - perturbation des cycles biogéochimiques de l'azote et du phosphore

Conséquences et enjeux des utilisations agricoles

L'utilisation massive de l'azote et du phosphore sous forme d'engrais peut conduire à une série d'effets délétères sur l'environnement. Issus après transformation de l'azote épandu en excès dans les sols par des bactéries en présence d'oxygène, les nitrates peuvent atteindre les eaux souterraines et les eaux de surface par lessivage et les polluer. Ce lessivage peut également entraîner un surplus de nitrates dans les eaux continentales qui génèrent des proliférations végétales (algues vertes). Ce phénomène est appelé eutrophisation (voir glossaire).

L'utilisation d'engrais minéraux issus de roches phosphatées peut entraîner un surplus de phosphore dans les eaux douces. L'excès de phosphore contribue également au phénomène d'eutrophisation, qui conduit à une dégradation de la qualité de l'eau, à une accumulation de phosphore dans les sédiments et à une perte de biodiversité. De surcroît, le phosphore rejeté des systèmes d'eau douce dans les océans peut entraîner à très long terme une diminution de la quantité d'oxygène dissous (anoxie des océans). L'enjeu est d'éviter la généralisation d'un tel phénomène risquant de provoquer un événement anoxique océanique, susceptible de menacer une grande part de la vie océanique.

Au-delà des enjeux cruciaux de pollution des milieux

aquatiques et des océans par les rejets de nitrate et de phosphore, demeure la problématique particulière de la ressource mobilisable en phosphore. L'utilisation croissante d'engrais phosphorés nécessite l'exploitation de mines de phosphate qui pourraient venir à s'épuiser d'ici environ 320 ans d'après les données de l'enquête « Extractions-réserves mondiales » (U.S. Geological Survey, 2022), alors que l'humanité dépend pour sa sécurité alimentaire de ces engrais utilisés de façon raisonnée.

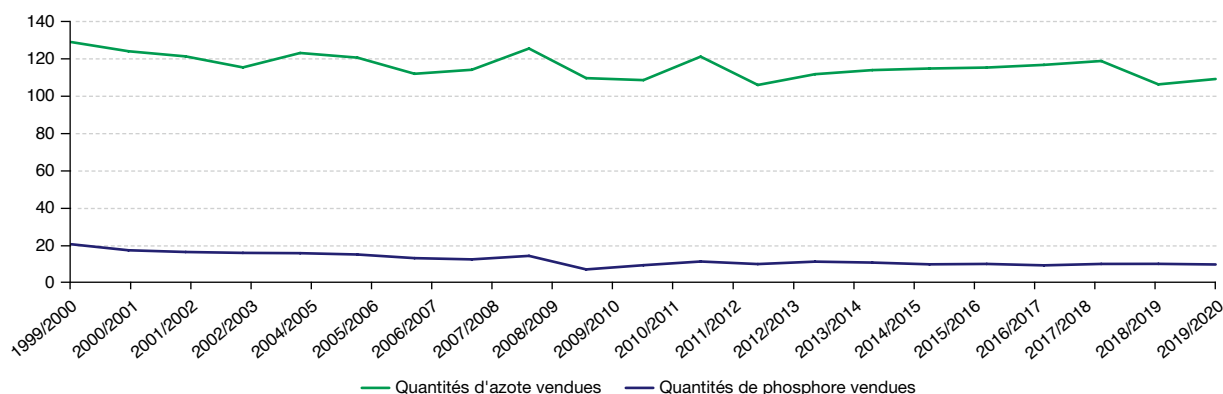
LA CONTRIBUTION DE LA FRANCE AU DÉPASSEMENT DE LA LIMITE PLANÉTAIRE

Les quantités d'azote et de phosphore vendues en France diminuent

En France, selon l'Union des industries de la fertilisation (Unifa), la quantité d'azote vendue par hectare cultivé, à savoir les terres arables et les cultures permanentes, tend à diminuer au fil des décennies. Elle s'élève à 108 kg par hectare (kg/ha) de terres cultivées pour la campagne 2019-2020, contre 121 kg/ha pour la campagne 2010-2011 et 124 kg/ha pour la campagne 2000-2001 (graphique 10). La vente de phosphore, quant à elle, reste stable depuis une dizaine d'années, autour de 10 kg/ha.

Graphique 10 : évolution des quantités d'azote et de phosphore vendues en France entre 2000 et 2020

En kg/ha de terres cultivées* par campagne culturale



* Terres cultivées = terres arables + cultures permanentes hors surface toujours en herbe.

Note : les données Unifa 2019-2020 concernent la campagne 2019-2020 et le calcul est effectué avec les surfaces agricoles de l'année 2020.

Sources : Unifa ; SSP, 2022. Traitements : SDES, 2023

Toutefois, l'indicateur des ventes de fertilisants minéraux ne constitue pas une mesure des excédents d'azote ou de phosphore de nature à dégrader l'environnement. Un autre indicateur est alors utilisé : le bilan nutritif brut, qui vise à estimer le solde entre les entrées et les sorties de chaque élément nutritif dans le sol agricole. La méthode Eurostat permettant d'estimer les bilans nutritifs bruts tient compte

pour les entrées : des apports minéraux et organiques, de la fixation symbiotique de l'azote gazeux, de la déposition atmosphérique et de l'apport par les graines ; et pour les sorties : des prélèvements, lors de la récolte des cultures, des retraits par la récolte et le pâturage du fourrage ainsi que des résidus de culture retirés du champ. Lorsque le bilan nutritif brut est positif, on parle de « surplus ».

partie 2 : les neuf limites planétaires - perturbation des cycles biogéochimiques de l'azote et du phosphore

Mais le surplus d'azote en France reste au-dessus de la limite planétaire

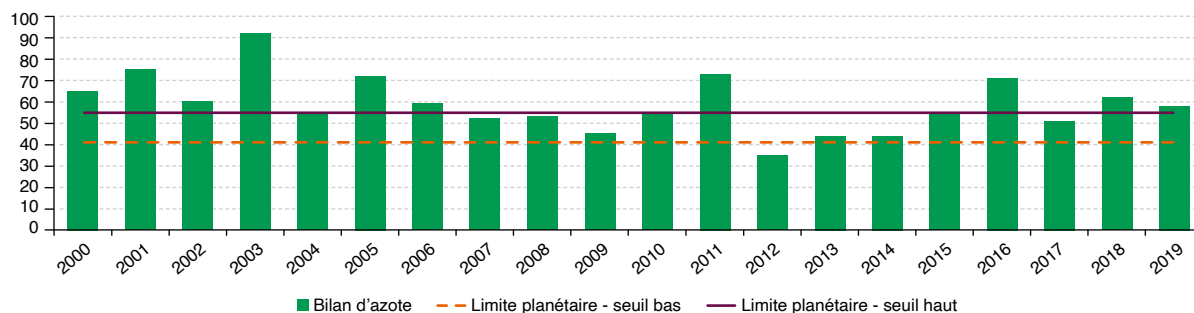
En France, sur la période 2010-2019, le bilan nutritif brut en azote s'élève en moyenne à 55 kg/ha de surface agricole cultivée, contre 63 kg/ha pour la période 2000-2009. La France reste ainsi au-dessus du seuil bas de la limite planétaire de 41 kg/ha au cours de la décennie 2010 et se situe au seuil haut de la limite planétaire de 55 kg/ha fixé par le cadre des limites planétaires, en moyenne sur la période, en le dépassant

certaines années (*graphique 11*). Ce chiffre ne donne toutefois qu'une information partielle de l'impact de la France sur cette limite. En effet, il ne tient pas compte du surplus d'azote généré hors de France pour produire des biens agricoles qui seront consommés en France.

En 2019, le surplus d'azote appliqué en France métropolitaine est de 1,1 million de tonnes, soit 0,75 % du surplus estimé dans le monde, alors que la France cultive 0,6 % des terres agricoles mondiales.

Graphique 11 : bilan nutritif brut d'azote en France, de 2000 à 2019

En kg/ha de terres cultivées*



*Terres cultivées = terres arables + cultures permanentes hors surface toujours en herbe.
Champ : France métropolitaine.

Sources : Eurostat - données mises à jour le 14 mars 2022 et extraites le 26 janvier 2023 ; Agreste, statistique agricole annuelle, 2022. Traitements : SDES, 2023

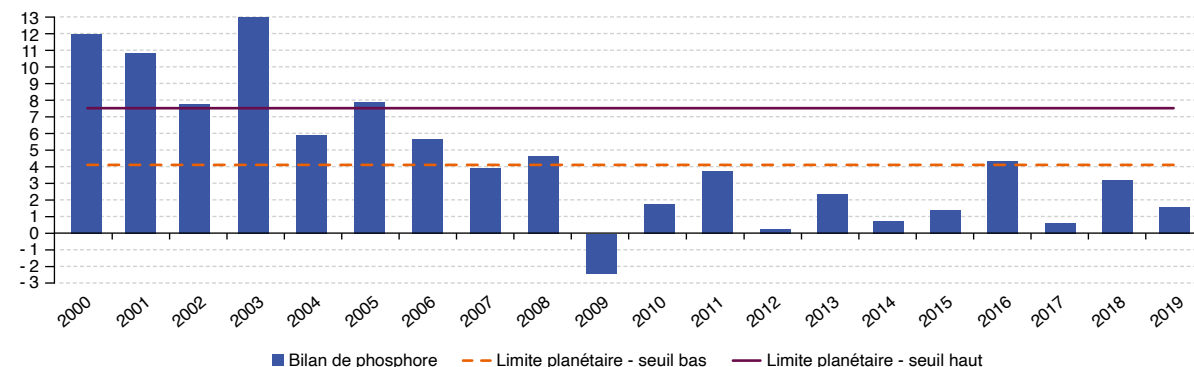
Le surplus de phosphore en France est en dessous de la limite planétaire

Sur la période 2010-2019, le bilan nutritif brut en phosphore s'élève en moyenne à 2,0 kg/ha de terres cultivées contre

6,9 kg/ha pour la période 2000-2009. La France est donc passée depuis 2009 en dessous du seuil bas de la limite planétaire de 4,1 kg/ha fixé par le cadre des limites planétaires (*graphique 12*).

Graphique 12 : bilan nutritif brut de phosphore en France, de 2000 à 2019

En kg/ha de terres cultivées*



*Terres cultivées = terres arables + cultures permanentes hors surface toujours en herbe.

Note : La valeur négative de 2009 s'explique par des livraisons de phosphore plus faibles (- 54 % par rapport à la campagne précédente) dues à des chutes de prix des céréales combinées à des prix d'achat du phosphore très élevés, ce qui a conduit certains exploitants à faire l'impasse sur cet élément.

Champ : France métropolitaine.

Sources : Eurostat - données mises à jour le 14 mars 2022 et extraites le 26 janvier 2023 ; Agreste, Statistique agricole annuelle, 2022. Traitements : SDES, 2023

En 2015, le bilan nutritif en phosphore en France s'élève à 27 000 tonnes (30 600 tonnes en 2019), ce qui représente une part de 0,2 % du volume mondial, tandis que la France utilise 0,6 % des terres cultivées mondiales.

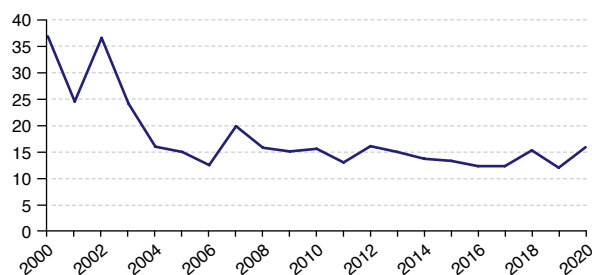
Comme pour l'azote, l'estimation des pressions environnementales se fait à partir de la production (utilisation de phosphore par les cultures), et ne tient pas compte des impacts environnementaux de la consommation par les Français de biens importés.

Les flux de phosphore rejetés en mer diminuent

En 2020, 15 800 tonnes de phosphore ont été rejetées en mer en France métropolitaine. Entre 2000 et 2020, les flux de phosphore vers la mer ont diminué de 57 % (graphique 13). Cette diminution est liée notamment à l'amélioration des performances des stations d'épuration, à l'interdiction de l'utilisation de phosphate dans les lessives et à l'augmentation du nombre d'habitants raccordés à un assainissement collectif. Ramené à la population métropolitaine de 2020, le flux rejeté en mer est de 0,23 kg/hab./an, soit en dessous de la limite planétaire de 1,5 kg/hab./an.

Graphique 13 : évolution des flux de phosphore total arrivant en mer en France de 2000 à 2020

En milliers de tonnes de phosphore total par an



Champ : territoires métropolitains, dont les exutoires correspondent aux espaces maritimes suivis dans le cadre des conventions Oskar et Medpol.
Source : système d'information sur l'eau, base des données Naiades et banque hydro (extraction des données en juin 2022).
Traitements : SDES, 2022

LES POLITIQUES ET ACTIONS POUR LUTTER CONTRE LA POLLUTION PAR L'AZOTE ET LE PHOSPHORE

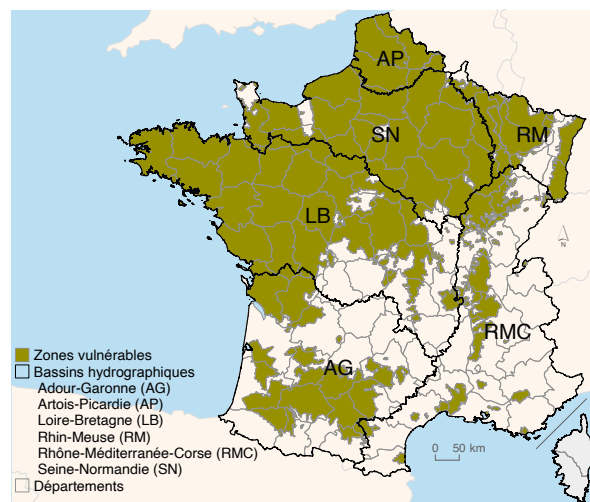
Face aux pollutions des eaux par les nitrates d'origine agricole et au phénomène d'eutrophisation des écosystèmes, l'UE s'est dotée dès 1991 d'une législation visant à réduire les pertes de nitrates d'origine agricole et à limiter les phénomènes d'eutrophisation. Appelée directive « nitrates », cette directive prévoit notamment de mettre en place une surveillance de la concentration en nitrates des eaux, de désigner des zones vulnérables à la pollution par les nitrates d'origine agricole ou à l'eutrophisation, et d'établir un programme d'action, dont

l'application est obligatoire dans les zones vulnérables.

L'enjeu de ce dispositif réglementaire est la recherche d'un apport optimal des fertilisants azotés, selon la formule « la bonne dose, au bon moment et au bon endroit », de façon à limiter les fuites de nitrates vers les eaux souterraines et les eaux de surface (interdiction d'épandage à certaines périodes, dispositifs de stockage des effluents d'élevage, distance aux cours d'eau, plan de fertilisation, dose maximale, etc.). La loi Climat et Résilience de 2021 contribue à cet objectif en restreignant l'utilisation d'engrais de synthèse dans les terrains qui n'ont pas une vocation agricole.

En 2021, 73 % de la surface agricole française est classée en zone vulnérable, ce qui correspond à 281 000 exploitations agricoles. Les apports d'azote minéral sont en moyenne deux fois plus élevés en zone vulnérable que hors zone vulnérable (carte 2).

Carte 2 : zones vulnérables en France en 2021, définies en application de la directive « nitrates » de 1991



Source : OFB, site EauFrance, Zones vulnérables – Métropole, 2022

Depuis les années 2000, la politique agricole commune (PAC) a évolué vers une prise en compte croissante des enjeux environnementaux. L'écoconditionnalité des aides de la PAC permet de conditionner les aides à la mise en œuvre de pratiques contribuant à éviter le relargage de nitrates, comme des bandes tampons le long des cours d'eau, la couverture minimale des sols, ou la protection des prairies permanentes. Le paiement vert prévu par la PAC 2015-2020 a ainsi mis l'accent sur le suivi au niveau régional de la part de la surface agricole utile (SAU) – (voir glossaire) en prairies ou en pâturages permanents, et la protection des prairies et pâturages permanents dits sensibles (en lien avec Natura 2000).

partie 2 : les neuf limites planétaires - perturbation des cycles biogéochimiques de l'azote et du phosphore

De la même manière, la PAC 2023-2027 prévoit de renforcer la conditionnalité des aides aux bonnes pratiques agricoles et environnementales mentionnées ci-dessus. En particulier, les exigences relatives à la couverture des sols et à l'absence de sols nus sont renforcées en dehors des zones vulnérables.

Les programmes d'action nitrates en France s'articulent en deux niveaux. Le premier est celui du programme d'action national (PAN) qui comprend huit mesures à mettre en œuvre dans l'ensemble des zones vulnérables afin de :

- fertiliser au bon moment dans de bonnes conditions (périodes d'interdiction, stockage des effluents, conditions d'épandage) ;
- limiter les surfertilisations (équilibre de la fertilisation, documents prévisionnels de fumure et d'enregistrement des pratiques, plafond d'apports pour les effluents d'élevage) ;
- limiter les fuites de l'azote présent dans les parcelles (couverture des sols et bandes enherbées le long des cours).

Le second est celui des programmes d'action régionaux (PAR) qui renforcent et complètent les mesures du PAN dans les zones vulnérables en fonction des spécificités régionales et locales.

Le septième programme d'action national est entré en vigueur le 30 janvier 2023. Les huit mesures s'appliqueront dès l'entrée en vigueur des PAR révisés et au plus tard le 1^{er} janvier 2024.

Le phénomène d'eutrophisation peut également être dû à des excès de phosphore dans les eaux douces, principalement issus de l'utilisation d'engrais minéraux. Autrefois, les eaux résiduaires urbaines étaient la principale source de contamination par le phosphore. À la suite de la mise en œuvre de la directive sur les eaux résiduaires urbaines de 1991 et de l'interdiction du phosphate dans les lessives domestiques depuis 2007, les rejets ont fortement diminué.

Il n'existe pas de réglementation générale nationale concernant la pollution par le phosphore d'origine agricole (OIEau, 2018). Toutefois, des réglementations locales s'appliquent en fonction des enjeux locaux, là où des problèmes liés au phosphore d'origine agricole ont été identifiés (notamment en Bretagne). La réglementation locale sur le phosphore agricole est principalement définie dans le cadre des schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux (Sdage) institués par la loi sur l'eau de 1992. Ainsi, le Sdage de Seine-Normandie inclut une disposition visant à « maîtriser les apports de phosphore en amont des masses d'eau de surface eutrophisées ou menacées d'eutrophisation ».

Par ailleurs, plusieurs réglementations contraignantes contribuent à réduire le risque de contamination des eaux par les phosphates. C'est notamment le cas de la réglementation relative aux installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) qui définit les conditions applicables au stockage et à l'épandage des effluents d'élevage. C'est également le cas du règlement sanitaire départemental, qui peut être adapté au contexte local.

Les excès de nitrates impactant fortement les écosystèmes marins, plusieurs conventions de mers régionales cherchent à limiter ce phénomène. Par exemple, la convention internationale pour la protection du milieu marin de l'Atlantique Nord-Est (Ospar) et le programme d'évaluation et de maîtrise de la pollution marine dans la région méditerranéenne (Medpol), qui dépend de la Convention de Barcelone pour la mer Méditerranée, prévoient un suivi des flux d'azote et de phosphore rejetés à la mer via les cours d'eau. Bien qu'aucune valeur seuil n'ait été fixée, ces programmes de suivi contribuent à une meilleure connaissance, ainsi qu'à une prise de conscience internationale de cet enjeu.

POUR ALLER PLUS LOIN

- [Décret n° 2023-241](#) du 31 mars 2023 relatif à la protection des zones de captages et des bassins connaissant d'importantes marées vertes sur les plages contre la pollution par les nitrates d'origine agricole et aux dérogations préfectorales dans le cas de situations exceptionnelles.
- FAO, site [FAOSTAT](#). Données statistiques mondiales de l'agriculture et de l'alimentation.
- MASA, Agreste – Enquête sur les surfaces annuelles agricoles.
- MTECT, OFB, 2020. *Bilan de la mise en œuvre de la directive « nitrates » en France – période 2016-2019*.
- OCDE, 2019. *Accélération anthropique du cycle de l'azote - Gérer les risques et l'incertitude*.
- OIEAU, 2018. Réglementation sur le phosphore agricole en Europe – Partages d'expériences pour quatre pays européens.
- Steffen, W. *et al.*, 2015. *Planetary Boundaries: Guiding Human Development on a Changing Planet*. Science 347 (6223): 1259855–55.
- Unifa, 2021. Enquête sur les livraisons d'engrais minéraux en France métropolitaine. Campagne 2019-2020.
- U.S. Geological Survey, 2022. *Mineral commodity summaries 2022*.

Changement d'usage des sols

UNE DÉFORESTATION MONDIALE QUI CONDUIT LA PLANÈTE DANS UNE ZONE D'INCERTITUDE

L'usage et l'état des sols ont profondément évolué à travers le temps sous l'effet des activités humaines (agriculture, construction de logements, urbanisation, artificialisation, industrie) avec d'importantes conséquences sur l'environnement à l'échelle planétaire.

Comme le signale l'évaluation globale de l'IPBES de 2019, les changements d'utilisation des sols et les dégradations associées figurent parmi les principales pressions qui pèsent sur la biodiversité terrestre et sur l'ensemble des services écosystémiques (voir *glossaire*). Si le défrichement des forêts au profit de l'agriculture a fait augmenter la production d'aliments destinés à la consommation humaine ou animale et d'autres biens matériels importants pour les populations (tels que les fibres naturelles), il a dans le même temps fait reculer des contributions telles que la pollinisation, la régulation du climat, la régulation de la qualité de l'eau ou les

possibilités d'apprentissage et d'inspiration.

Considérant que la présence de forêt est indispensable à la régulation du climat et des flux d'eau entre terre et atmosphère, les chercheurs ont défini deux variables de contrôle pour appréhender le changement d'usage des sols, et celles-ci concernent directement le couvert forestier. La première porte sur la superficie forestière dans son ensemble et la seconde sur la superficie forestière par biome (voir *glossaire*).

À l'échelle mondiale, la limite représente le rapport entre la superficie forestière actuelle et la superficie forestière d'avant 1700 (avant interventions humaines fortes sur l'ensemble du globe), dite « originelle » par les chercheurs du *Stockholm Resilience Centre*. Au niveau des trois principaux biomes de la forêt (forêts tempérées, tropicales et boréales), la limite correspond au rapport entre la superficie qu'ils occupent aujourd'hui et celle qu'ils occupaient avant 1700 (*tableau 5*).

Tableau 5 : variables de contrôle et limite planétaire pour le changement d'usage des sols

Variables de contrôle	Seuils et zones d'incertitude	Valeurs mondiales
Échelle mondiale : rapport entre la superficie forestière actuelle et la superficie forestière « originelle » (avant 1700)	75 % de la superficie forestière « originelle » doit rester boisée (frontière) et ne pas passer sous 54 % (limite).	62 % de la superficie forestière « originelle » sont encore des forêts.
Par biome forestier : rapport entre la superficie forestière actuelle du biome et la superficie forestière « originelle » du biome (avant 1700)	Forêts tempérées : 50 % de la superficie forestière « originelle » doit rester boisée (frontière) et ne pas passer sous 30 % (limite). Forêts tropicales et boréales : 85 % de la superficie forestière « originelle » doit rester boisée (frontière) et ne pas passer sous 60 % (limite).	50 % des forêts tempérées « originelles » sont encore boisées. 68 % des forêts tropicales et boréales « originelles » sont encore boisées.

Source : d'après Steffen et al., 2015

Les valeurs présentées ci-dessus montrent que seules 62 % des surfaces forestières d'avant 1700 sont encore boisées dans le monde en 2015, la frontière planétaire de 75 % est donc largement dépassée, tout en restant dans la zone d'incertitude. Concernant les forêts tempérées, 50 % de la superficie occupée par celles-ci avant 1700 est toujours présente en 2015, on se situe donc à la limite basse de la zone d'incertitude (entre 50 et 30 %). Le chiffre global de 50 % peut néanmoins cacher des disparités locales avec des menaces fortes pour la biodiversité et les écosystèmes en certains points.

Depuis 1990, selon l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), environ 420 millions

d'hectares (Mha) de forêts ont été perdus à cause de la déforestation. Même si le taux annuel de déforestation tend à diminuer, il représente encore 10 Mha/an de forêts sur la période 2015-2020, contre 12 Mha/an sur la période 2010-2015 (FAO, 2020).

Plus globalement, selon la FAO, en 2022, les forêts occupent 31 % de la superficie terrestre mondiale (4,06 milliards d'hectares). Les forêts tropicales représentent 45 % de l'ensemble des forêts, devant les forêts boréales, tempérées et sous-tropicales. Les forêts primaires (forêts vierges de toute intervention humaine) couvrent 1,11 milliard d'hectares. Depuis 1990, leur superficie a diminué de 81 Mha.

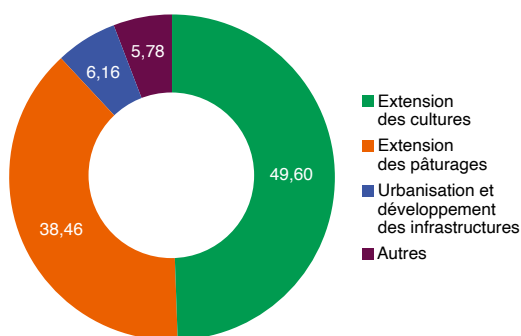
Causes et enjeux

La production agricole et l'élevage représentent la première cause de déforestation à l'échelle mondiale, et un tiers de cette production est destiné à l'export (soja, huile de palme, bœuf et ses coproduits, cacao, hévéa, bois et produits dérivés). Le commerce international est ainsi l'un des principaux déterminants de la déforestation mondiale.

Les déforestations réalisées entre 2000 et 2018 sont liées à l'extension des cultures (49,6 %), à l'extension des pâturages (38,46 %), à l'urbanisation et au développement des infrastructures (6,16 %), ainsi qu'à d'autres causes comme les mines (5,78 %). À lui seul, le palmier à huile a causé 7 % de la déforestation mondiale sur cette même période (FAO, 2021) - (graphique 14).

Graphique 14 : causes mondiales de la déforestation sur la période 2000-2018

En %



Source : FAO, 2021

Globalement, d'après l'OCDE, entre 1960 et 2010, pour répondre aux besoins d'une population mondiale qui a plus que doublé, la production alimentaire a plus que triplé, avec une augmentation de 15 % des surfaces agricoles et une intensification des modes de production (mécanisation, utilisation d'engrais de synthèse et de produits phytopharmaceutiques, amélioration variétale, irrigation).

La disparition d'une forêt ou son remplacement par des plantations en monoculture conduit directement à une perte de biodiversité. En effet, la forêt abrite plus de 80 % des espèces d'animaux, de plantes et d'insectes que compte la planète (FAO, 2020).

La disparition de forêts est également préjudiciable au maintien des capacités de stockage du CO₂ de certaines forêts et à leur rôle de puits de carbone (voir glossaire). C'est le cas des forêts tropicales et en particulier de la forêt amazonienne brésilienne. Sous l'effet du changement climatique, ces forêts rejettent maintenant plus de carbone

qu'elles n'en absorbent (Qin, 2021).

Entre déforestation, changement climatique et dégradations multiples, la forêt amazonienne est victime d'une perte de biodiversité importante qui entraîne une perturbation de la mésofaune (voir glossaire). Elle souffre également d'une sécheresse accrue risquant de favoriser des départs de feux et d'augmenter sa vulnérabilité (Boulton, 2022).

LA CONTRIBUTION DE LA FRANCE AU DÉPASSEMENT DE LA LIMITE PLANÉTAIRE

Sur le territoire français, la surface forestière augmente, d'environ 80 000 ha par an (IGN). Elle était de 17 Mha en 2020, contre 16,2 Mha en 2010. En revanche, les terres agricoles régressent de 65 900 ha/an depuis 1982, notamment sous l'effet de l'artificialisation des sols (+ 57 600 ha/an depuis 1982) - (SSP, 2021).

Malgré cette diminution de la surface agricole, la France reste exportatrice nette de matières premières agricoles (Solagro, 2022), mais elle consomme également et donc importe des quantités importantes de matières premières agricoles et forestières qui ne sont pas produites sur le territoire national. Elle utilise ainsi indirectement des terres situées dans d'autres régions du monde, dont certaines sont issues de la déforestation des forêts tropicales, et contribue à exercer une forte pression sur la ressource foncière étrangère.

L'UE serait responsable d'environ 10 % de la déforestation mondiale via sa consommation selon la FAO (2016). D'après le WWF, 16 % de la déforestation associée au commerce international est imputable à l'UE. Pour Pendrill *et al.*, la déforestation liée au commerce international représenterait 26 % de la déforestation totale.

À l'échelle française, plusieurs études ont cherché à estimer les surfaces agricoles et forestières nécessaires pour produire nos biens de consommation. La plupart de ces travaux utilisent la comptabilité des flux de matières en trois étapes :

- analyse des quantités de biens importés en France et estimation de leur origine concernant le pays de production ;
- détermination de la surface de terres utilisées pour produire ces biens, dite « empreinte terre » ;
- estimation de la surface déforestée pour cultiver ces terres, dite « empreinte forêt ».

L'empreinte terre

Si les choix méthodologiques – comme les commodités prises en compte dans l'analyse – ont une influence certaine sur les résultats obtenus, les ordres de grandeur des surfaces mobilisées hors de nos frontières sont cohérents, pour ce qui concerne l'empreinte terre, et s'établissent entre 12 et 14,8 Mha/an (Solagro, 2021).

L'empreinte forêt

Lier la surface agricole nécessaire aux biens importés à une surface déforestée est un exercice encore plus délicat. La mesure de la déforestation est une problématique complexe qui dépend de nombreux choix méthodologiques parmi lesquels :

- la définition de la forêt en fonction d'un seuil de couvert forestier, alors qu'il existe des forêts avec une grande densité d'arbres et d'autres avec un couvert plus clairsemé ;
- la date à partir de laquelle considérer la forêt comme déboisée ;
- le fait de considérer une déforestation nette, en déduisant les plantations forestières sans regarder les caractéristiques d'âge et de qualité de la forêt, ou une déforestation brute en mettant l'accent sur la perte de forêts primaires.

Les paramètres choisis ont une influence forte sur le résultat. Les travaux de l'UICN²¹ situent à 9,8 m² par habitant et par an la déforestation associée aux importations de la France sur la période 2010-2015 et ceux du WWF (2021) autour de 4 m² par habitant et par an en moyenne entre 2005 et 2017 (ce qui donne, pour la France, respectivement 64 400 et 26 300 ha par an).

Alors que le seuil bas de la limite planétaire relative au changement d'usage des sols par la déforestation est déjà dépassé, notre consommation de biens importés (soja, huile de palme, cacao, bœuf et cuirs, hévéa, bois, etc.) contribue à atteindre le seuil haut de la limite. Ainsi, si tous les humains avaient une empreinte forêt identique à celle d'un Français, le seuil haut de la limite (40 % de la superficie « originelle » des forêts tropicales et boréales détruites) serait également dépassé dans une soixantaine d'années²².

LES POLITIQUES ET ACTIONS POUR LIMITER LA DÉFORESTATION ET PROTÉGER LES SOLS

Pour faire face aux menaces pesant sur la biodiversité et parvenir à stocker le carbone, notamment par les sols et la végétation, la lutte contre la dégradation des forêts et la déforestation constitue une priorité internationale, qui transparaît notamment dans l'Objectif de développement durable n° 15.2²³. À l'occasion de la COP26 sur le climat, en novembre 2021, 100 pays abritant plus de 85 % de la forêt mondiale, dont le Brésil, le Canada, la Russie, la République démocratique du Congo, se sont engagés à mettre fin à la déforestation d'ici 2030.

Afin de limiter l'impact de sa consommation sur les forêts tropicales, la Commission européenne a proposé en novembre

2021 un règlement sur la déforestation importée, qui a été définitivement adopté en mai 2023. Ce règlement vise à interdire la mise sur le marché européen ou l'exportation à partir de celui-ci de matières premières et de produits ayant engendré de la déforestation ou de la dégradation des forêts. Pour cela, un système de diligence raisonnée obligatoire sera mis en place : il incombera aux entreprises concernées par le règlement de collecter certaines informations, notamment l'origine, et de remonter la chaîne d'approvisionnement jusqu'à la parcelle de production de leur produit. Ces informations doivent permettre de conclure qu'il existe un risque de déforestation nul ou négligeable sur cette parcelle et de prouver qu'aucune forêt n'y a été déboisée depuis 2020.

La France s'était saisie de la problématique de la déforestation importée dès 2018 en publiant une stratégie nationale de lutte contre la déforestation importée (SNDI)²⁴. Cette stratégie vise à éliminer d'ici 2030 l'importation de produits forestiers ou agricoles non durables contribuant à la déforestation dans les filières du cacao, de l'hévéa, du soja, de l'huile de palme, du bois et ses produits dérivés, et du bœuf et ses coproduits. Dans ce cadre, deux outils ont déjà été élaborés : un outil d'évaluation des risques de déforestation liés aux importations de soja et un guide relatif à la déforestation dans la politique d'achat public. Des initiatives privées sont également encouragées comme celle pour un *cacao durable* ou le *manifeste soja*.

Concernant sa propre forêt (métropolitaine ou en outremer et notamment en Guyane), la France dispose d'un outil très protecteur avec un Code forestier qui encadre la gestion forestière pour que celle-ci soit conduite de façon durable et multifonctionnelle. Ainsi, tout défrichement de plus de 0,5 ou 4 ha doit faire l'objet d'une demande d'autorisation et d'une mesure compensatoire.

Au-delà de la forêt, l'enjeu en France est de limiter au maximum la perte de terre par artificialisation. Cela s'est traduit dans le plan biodiversité de 2018 par un objectif de « zéro artificialisation nette », l'artificialisation étant définie comme « l'altération durable de tout ou partie des fonctions écologiques d'un sol, en particulier de ses fonctions biologiques, hydriques et climatiques, ainsi que de son potentiel agronomique par son occupation ou son usage »²⁵. La loi Climat et Résilience du 22 août 2021 a fixé l'objectif de diminuer de moitié le rythme de consommation du foncier d'ici 2031 pour amorcer la trajectoire de « zéro artificialisation nette » à l'horizon 2050. Celui-ci sera décliné localement dans les documents de planification à l'échelle des schémas de cohérence territoriale (SCoT) en 2026 et des PLU/PLUi et cartes communales en 2027.

²¹ Mittempergher D., Vergez A. et Puydarrieux P. (article soumis, en révision). Commerce international et déforestation : méthode et calcul d'une empreinte déforestation des Nations. *Revue d'économie du développement*.

²² Hypothèses prises : le seuil haut de la limite dépassé pour une déforestation supplémentaire de 344 millions d'hectares de forêts tropicales et boréales, une empreinte forêt moyenne par habitant et par an de 6,9 m² de forêt tropicale, une population mondiale constante de 7,9 Md d'habitants.

²³ ODD n° 15.2 : d'ici à 2020, promouvoir la gestion durable de tous les types de forêt, mettre un terme à la déforestation, restaurer les forêts dégradées et accroître considérablement le boisement et le reboisement au niveau mondial.

²⁴ Stratégie nationale de lutte contre la déforestation importée.

²⁵ Portail interministériel de l'artificialisation des sols.

POUR ALLER PLUS LOIN

- Ademe, Cirad, Cired, Inrae, Solagro, 2020. *Empreintes sol, énergie et carbone de l'alimentation*.
- Boulton, C.A., et al. 2022. *Pronounced loss of Amazon rainforest resilience since the early 2000s*. Nat. Clim. Chang. 12, 271–278.
- FAO, 2022. *La situation des forêts du monde 2022* – Des solutions forestières pour une relance verte et des économies inclusives, résilientes et durables.
- FAO, 2021. *Tropical rainforests under pressure as agricultural expansion drives global deforestation*.
- IGN, 2021. *Inventaire forestier national, état des lieux d'une forêt en pleine évolution !*
- IPBES, 2019. *Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services*.
- MASA, SSP, 2021. *L'occupation du sol entre 1982 et 2018*. Agreste, les Dossiers, n° 3.
- OCDE. Article web *Nourrir le monde aujourd'hui*.
- Pendrill F. et al. 2021. *Agricultural and forestry trade drives large share of tropical deforestation emissions*.
- Qin Y., et al. 2021. *Carbon loss from forest degradation exceeds that from deforestation in the Brazilian Amazon*. Nat. Clim. Chang. 11, 442–448 (2021).
- Solagro, 2022. *La face cachée de nos consommations : quelles surfaces agricoles et forestières importées ?*
- Steffen, W. et al., 2015. *Planetary Boundaries: Guiding Human Development on a Changing Planet*. Science 347 (6223): 1259855–55.
- WWF, 2021. *Quand les Européens consomment, les forêts se consomment*.

Utilisation mondiale de l'eau douce et cycle de l'eau

UNE FRONTIÈRE PLANÉTAIRE NON FRANCHIE MAIS DES SITUATIONS LOCALES NON SOUTENABLES

Élément essentiel à toute forme de vie, l'eau couvre 72 % de la surface de la Terre et représente un volume d'environ 1,4 milliard de km³. Malgré son abondance, seul 2,8 % de ce volume est constitué d'eau douce, propre à la consommation humaine. L'eau douce se trouve en grande partie dans les glaciers, mais également dans les nappes souterraines, les rivières et les lacs, ainsi que sous forme de vapeur d'eau dans l'air. La part de l'eau issue des précipitations atmosphériques qui s'écoule dans les cours d'eau jusqu'à la mer, ou qui est recueillie dans les lacs, les aquifères et les réservoirs, correspond à la ressource renouvelable. On parle alors d'« eau bleue » ; son volume mondial est estimé à 37 000 km³ par an (km³/an).

Au cours du XX^e siècle, les prélèvements d'eau douce pour les usages domestiques, agricoles ou industriels ont considérablement augmenté à l'échelle mondiale, passant de 600 km³/an au début du XX^e siècle à 3 880 km³/an en 2017. Avec l'accroissement de la population, ils devraient continuer de croître de 1 % par an d'ici 2050 (Unesco, 2022).

À l'échelle planétaire, le taux de prélèvement d'eau douce

représente 10,5 % du taux de renouvellement annuel moyen des ressources en eau douce. Il varie fortement d'un continent à l'autre du fait de la densité de population et de l'abondance ou non de la ressource : Asie (41,3 %), Amérique du Nord (8,8 %), Afrique (6,6 %), Europe (4,2 %), Australie et Océanie (2,9 %), Amérique du Sud (1,7 %) - (Unesco, 2022). Environ 69 % de l'eau prélevée est destinée à l'agriculture (principalement pour l'irrigation mais aussi pour l'élevage et pour l'aquaculture), 19 % à l'industrie (y compris la production d'énergie) et 12 % aux municipalités (Unesco, 2021).

Avec le changement climatique, la ressource en eau renouvelable intérieure par habitant a diminué d'environ 20 % entre 2000 et 2018. Cette évolution est plus marquée dans les pays où la ressource par habitant est la plus basse, tels que l'Afrique subsaharienne (- 41 %), l'Asie centrale (- 30 %), l'Asie de l'Ouest (- 29 %) et l'Afrique du Nord (- 26 %), avec des risques de pénurie d'eau (FAO, 2021).

Compte tenu des enjeux liés à l'utilisation de l'eau et aux besoins des écosystèmes, les auteurs du cadre des limites planétaires ont défini des seuils à ne pas dépasser en matière d'utilisation d'eau douce (« eau bleue ») à l'échelle globale et à l'échelle locale (bassins-versants) – (tableau 6).

Tableau 6 : variables de contrôle et limite planétaire pour l'utilisation mondiale de l'eau douce (eau bleue)

Variables de contrôle	Seuils et zones d'incertitude	Valeurs mondiales
Eau bleue - Échelle globale : volume total d'eau douce consommé, prélevé dans les eaux de surface et souterraines renouvelables	4 000 km ³ d'eau douce consommée par an (4 000 - 6 000 km ³ par an)	2 600 km ³ d'eau douce consommée par an (prélèvement net après rejet)
Eau bleue - Échelle locale : un seuil maximal de prélèvement de l'eau douce est proposé à l'échelle des bassins versants et en fonction du régime hydrologique saisonnier	25 % en période de basses eaux (25 - 55 %) 40 % en période intermédiaire (40 - 70 %) 55 % en période de hautes eaux (55 - 85 %)	

Source : d'après Steffen et al., 2015

Les prélèvements nets (voir glossaire) d'eau douce à l'échelle mondiale (2 600 km³) demeurent en deçà de la frontière planétaire (4 000 km³). Pour autant, des dépassements à l'échelle de certains bassins-versants (voir glossaire) existent. 25 % des bassins fluviaux de la planète s'assècheraient avant d'atteindre les océans en raison de l'utilisation des ressources en eau douce des bassins (Molden, 2007).

En 2022, une valeur seuil pour l'« eau verte », correspondant à l'eau des précipitations absorbées par les végétaux et les sols, a été ajoutée aux valeurs seuils « eau bleue » (Wang-Erlandsson et al., 2022). L'eau verte joue un rôle majeur dans la résilience de la biosphère. L'érosion des sols (diminution de la réserve utile) et la déforestation contribuent fortement à la diminution de l'eau verte. Les estimations provisoires pour l'eau verte indiquent que la limite planétaire serait déjà franchie (tableau 7).

partie 2 : les neuf limites planétaires - utilisation mondiale de l'eau douce et cycle de l'eau

Tableau 7 : variable de contrôle et limite planétaire pour le cycle de l'eau (eau verte)

Variable de contrôle	Seuil mondial	Valeur mondiale
Eau verte : pourcentage de la surface terrestre libre de glace dans laquelle l'humidité du sol de la zone racinaire s'écarte de la variabilité naturelle observée au cours des 11 000 dernières années (beaucoup plus humide ou beaucoup plus sec)	10 % des sols planétaires	18 % des sols planétaires seraient en déséquilibre.

Source : d'après Wang-Erlandsson et al., 2022

La perturbation du cycle de l'eau douce à l'échelle planétaire, conjuguée à la dégradation de la ressource sous l'effet des pressions humaines (prélèvements, déforestation, pollution), menace fortement la sécurité alimentaire et sanitaire, le fonctionnement écologique des écosystèmes (fourniture d'habitats, séquestration du carbone, humidité des sols, etc.) et la biodiversité.

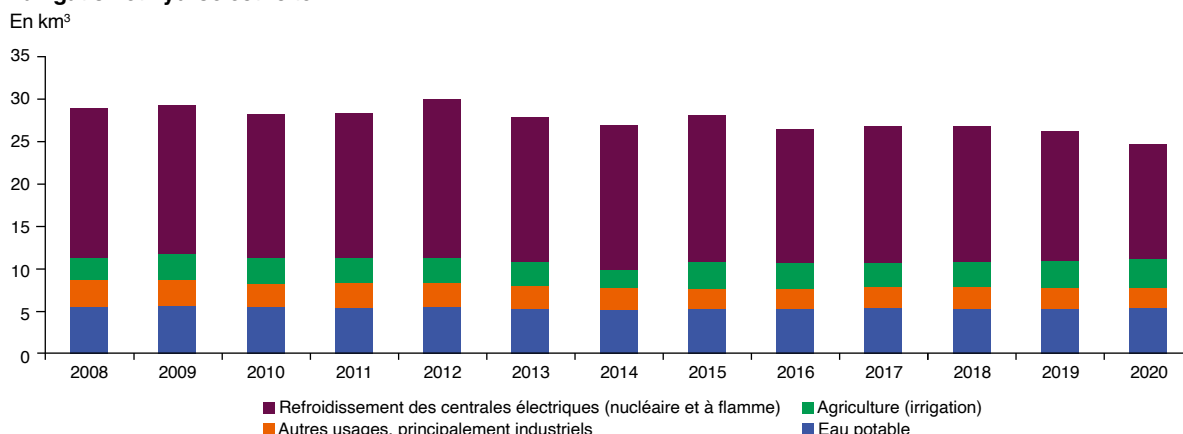
LA CONTRIBUTION DE LA FRANCE AU DÉPASSEMENT DE LA FRONTIÈRE PLANÉTAIRE

Sur la période 2008-2020, en France métropolitaine, les prélèvements annuels totaux, hors hydroélectricité et canaux de navigation, sont de 27,6 km³/an en moyenne (graphique 15). Si l'on tient compte de l'eau prélevée pour assurer la navigabilité des canaux, le total est plutôt de l'ordre de

32,9 km³/an en moyenne. Une tendance significative à la baisse des prélèvements est identifiée depuis le milieu de la décennie 2000, de l'ordre de 1,3 % par an en moyenne depuis 2008, alors que la population augmente. Cette diminution est essentiellement imputable à une moindre utilisation des centrales de production d'électricité, et donc à la diminution des prélèvements d'eau douce pour leur refroidissement. En comparaison, l'augmentation des prélèvements mondiaux est de 1 % par an depuis les années 1980 (FAO, 2021).

Le prélèvement net annuel d'eau douce en France est de l'ordre de 4,2 km³ en moyenne sur la période 2008-2020. Ce prélèvement net contribue pour 0,2 % au prélèvement net mondial estimé à 2 600 km³, à mettre en perspective avec le poids démographique (0,85 %) et économique (2,33 %) de la France dans le monde.

Graphique 15 : évolution des prélèvements d'eau douce en France de 2008 à 2020, hors alimentation des canaux de navigation et hydroélectricité



*Champ : France métropolitaine.
Sources : OFB, BNPE. Traitements : SDES, 2023*

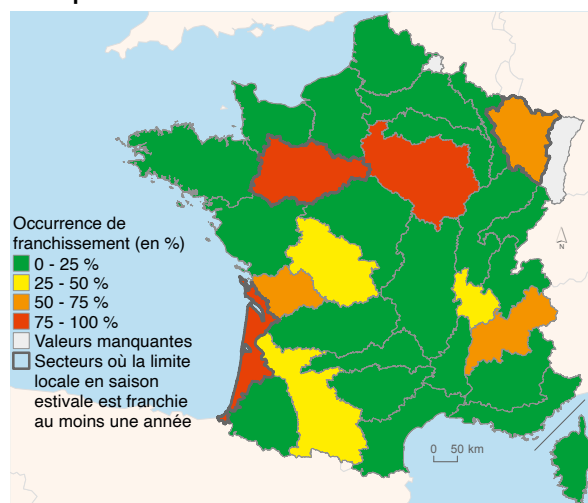
partie 2 : les neuf limites planétaires - utilisation mondiale de l'eau douce et cycle de l'eau

Pour identifier les tensions potentielles liées à l'utilisation de l'eau douce, cette vision globale doit être complétée par la prise en compte des limites à l'échelle locale (bassins-versants), exprimées en pourcentage du débit mensuel moyen naturel. Ces limites locales sont définies en fonction des flux environnementaux, quantité d'eau à laisser dans le cours d'eau pour assurer la vie des écosystèmes aquatiques. La méthode d'estimation des flux environnementaux est issue des travaux de Pastor *et al.* (2014). Elle considère la nécessité de maintenir la variabilité naturelle des régimes d'écoulement, et propose des seuils de débit à conserver dans le cours d'eau ajustés à l'abondance des écoulements. Ainsi, 60 % du débit moyen mensuel est alloué aux flux environnementaux pendant les périodes de basses eaux, 45 % pendant les périodes de moyennes eaux et 30 % pendant les périodes de hautes eaux. Pour tenir compte de la variété des valeurs des flux environnementaux obtenus par différentes méthodes, Steffen *et al.* ajoutent aux valeurs retenues par Pastor *et al.* une incertitude de plus ou moins 15 %, pour en déduire la zone d'incertitude entre frontière et limite. Pour la période de basses eaux, la zone d'incertitude commence lorsque les prélèvements dépassent 25 % du débit moyen mensuel, et la limite à ne pas dépasser est de 55 %. Ces seuils sont de 40 % et 70 % pour les périodes de moyennes eaux, et de 55 % à 85 % en période de hautes eaux.

Concernant la France, les prélèvements étant connus par année, la méthode proposée par Steffen *et al.* (2015) a été adaptée. Elle a été appliquée à la saison estivale (juin à août), en faisant l'hypothèse qu'à cette période de l'année, les prélèvements sont les plus importants du fait des besoins pour l'irrigation qui s'y concentrent. Dans le même temps, les écoulements dans les cours d'eau sont généralement faibles et représentent à l'échelle du territoire métropolitain seulement 16 % du volume annuel écoulé. Pour la répartition des volumes prélevés selon les saisons, il est fait l'hypothèse que la totalité de l'utilisation d'eau agricole est attribuée à la période estivale. Pour les autres usages de l'eau, un quart des prélèvements annuels est alloué à la période estivale. Pour être cohérent avec l'unité des prélèvements, les écoulements sont exprimés en volume, et ils sont naturalisés²⁶ par l'addition des volumes de prélèvement net. L'échelle géographique retenue est celle des 33 sous-bassins hydrographiques (voir glossaire) de la directive-cadre sur l'eau (DCE) pour la France hexagonale.

Sur la période 2008-2018, pour 15 sous-bassins métropolitains, les prélèvements en été se situent dans la zone de sécurité, avec des valeurs qui restent en-deçà de 25 % de l'écoulement moyen estival (carte 3).

Carte 3 : franchissement de la frontière locale « eau bleue » en saison estivale, par sous-bassin hydrographique DCE*, sur la période 2008-2018



*DCE = directive-cadre sur l'eau.

Note de lecture : sur le sous-bassin Mayenne-Sarthe-Loir, plus de 75 % des années, soit plus de 8 années sur 11, les prélèvements estivaux ont été supérieurs à 25 % des volumes écoulés « naturalisés » sur cette zone, et ils ont été supérieurs à 55 % des volumes écoulés « naturalisés », au moins une année sur 11.

Notes : « occurrence entre 25 % et 50 % » signifie que 3 à 5 années sur la période, la frontière locale en saison estivale est dépassée ; pour la saison estivale, le franchissement de la frontière locale ou de la limite locale « eau bleue » se produit lorsque respectivement les prélèvements représentent plus de 25 % ou plus de 55 % des volumes écoulés « naturalisés », à savoir les écoulements dans les cours d'eau auxquels sont ajoutés les volumes de prélèvement net (volumes « consommés », non restitués) pour tous les usages. La période estivale couvre les mois de juin à août inclus. Pour l'usage agricole, la totalité des prélèvements est attribuée à la période estivale considérée. Pour les autres usages de l'eau, le prélèvement estival est estimé à un quart du volume annuel.

Sources : Banque Hydro (débits des cours d'eau) ; Banque nationale des prélèvements quantitatifs en eau (volumes prélevés). Traitements : SDES, 2023

À l'inverse, la limite locale eau bleue est dépassée au moins une fois dans trois sous-bassins : Mayenne-Sarthe-Loir (1 fois), Moselle (2 fois) et Côtiers aquitains et charentais (7 fois). Dans les sous-bassins Mayenne-Sarthe-Loir, ainsi que Côtiers aquitains et charentais, les prélèvements se font essentiellement dans les eaux souterraines, y compris dans les nappes profondes, les eaux de surface étant moins abondantes. Par conséquent, le ratio prélèvement/écoulement est important et explique ces résultats.

²⁶ La naturalisation des écoulements consiste à corriger les débits observés de l'influence des utilisations humaines, pour obtenir une estimation du débit naturel. Ici, la naturalisation consiste à additionner au volume écoulé observé la part du volume prélevé non restituée aux milieux aquatiques (prélèvement net).

Pour 16 sous-bassins, dont les 3 qui franchissent la limite locale eau bleue, les prélèvements en été se situent au moins une fois dans la zone d'incertitude. Les années 2011 et 2017 sont celles pour lesquelles le plus grand nombre de franchissements du seuil de 25 % est détecté. Sur les territoires où ces dépassements sont les plus fréquents (au moins 3 années sur les 11 observées, soit 27 %), les causes en sont variées : faiblesse des écoulements estivaux (Charente) pouvant être associée à des prélèvements pour l'irrigation prédominants (Mayenne-Sarthe-Loir, Côtiers aquitains et charentais) ; forts prélèvements pour l'eau potable (Seine amont pour l'alimentation en eau de Paris) ; prélèvements élevés pour le refroidissement des centrales de production d'électricité (Moselle, Isère, Rhône moyen et Vienne-Creuse).

Si l'échelle géographique retenue masque des situations contrastées au sein même des sous-bassins, cette première analyse montre bien la nécessité de réduire les prélèvements d'eau, notamment en été, et ce d'autant plus que les écoulements estivaux tendent à se raréfier avec le changement climatique.

LES POLITIQUES ET ACTIONS EN FAVEUR DE LA PRÉSERVATION DE LA RESSOURCE EN EAU

L'eau est un bien commun de l'humanité nécessaire à toutes les formes de vie. Ressource vitale, l'eau fait l'objet de règles de prélèvement et d'utilisation très anciennes qui ont évolué avec le temps pour limiter les conflits possibles et préserver les milieux.

Avec le développement de l'hydroélectricité en France, le premier système d'autorisation de type « police de l'eau » voit le jour en 1898. La loi sur l'eau du 3 janvier 1992 introduit le système de déclaration et élargit celui d'autorisation à une liste d'installations et d'ouvrages (décret nomenclature du 29 mars 1993, codifié depuis au L214-1 et suivants du Code de l'environnement). Tout nouveau prélèvement ou renouvellement d'autorisation de prélèvement ayant un impact sur le milieu doit faire l'objet d'un dossier avec une étude d'incidence ou une étude d'impact. L'autorisation définit un débit et un volume maximum de prélèvement.

La loi sur l'eau et les milieux aquatiques de 2006 introduit la notion de débit réservé (L214-18 du Code de l'environnement) qui « ne doit pas être inférieur au dixième du module du cours d'eau en aval immédiat ou au droit de l'ouvrage correspondant au débit moyen interannuel ».

Au niveau européen, les premiers textes se sont focalisés sur la qualité de l'eau. La DCE du 23 octobre 2000 établit un cadre plus général pour une politique globale communautaire dans le domaine de l'eau. Cette directive vise à prévenir et réduire la pollution de l'eau, promouvoir son utilisation durable, protéger l'environnement, améliorer l'état des écosystèmes aquatiques (zones humides) et atténuer les effets des inondations et des sécheresses. L'objectif fixé est d'atteindre le bon état de l'ensemble des masses d'eau. Pour cela, la directive institue une planification au niveau du bassin hydrographique, c'est-à-dire la zone dans laquelle convergent toutes les eaux de ruissellement. Ainsi, tous les six ans, un état des lieux du bassin est établi, qui identifie notamment les masses d'eau en mauvais état²⁷, ainsi qu'un programme de mesures visant à maintenir ou rétablir le bon état des masses d'eau. Pour être qualifié de « bon état quantitatif », les prélèvements dans une eau souterraine ne doivent pas dépasser la capacité de renouvellement de la ressource disponible, compte tenu de la nécessaire alimentation des écosystèmes aquatiques.

La France compte 12 bassins hydrographiques, dont 5 en outre-mer. Dans chaque bassin, la gestion de l'eau est pilotée par les agences de l'eau en métropole, et les offices de l'eau en outre-mer. Les agences de l'eau sont notamment chargées, avec les services de l'État, de l'élaboration des schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux (Sdage), qui planifient la gestion de l'eau à l'échelle du bassin, et intègrent les programmes de mesures. Chaque Sdage aborde le sujet de la gestion des prélèvements d'eau pour le maintien, voire la reconquête, du bon état des cours d'eau et des eaux souterraines, ainsi que pour la préservation des écosystèmes qui leur sont liés : zones humides, masses d'eau de transition et côtières.

La gestion de la ressource en période de basses eaux s'appuie sur un ensemble de points nodaux et de zones nodales, objectifs de débit lorsqu'il s'agit de rivières, objectifs de hauteur d'eau dans certains marais littoraux ou de hauteurs piézométriques pour les nappes souterraines. Ces objectifs sont inscrits dans les Sdage. À une échelle plus locale, les schémas d'aménagement et de gestion des eaux (Sage) peuvent par ailleurs ajuster ces objectifs sur la base d'une analyse territoriale. Ces valeurs servent de référence pour la gestion en période de sécheresse, mais également pour l'attribution de nouvelles autorisations de prélèvements ou pour les renouvellements d'autorisation.

²⁷ Plus exactement des masses d'eau « en risque de non atteinte de l'objectif environnemental (RNAOE) ».

Quand la sécheresse survient, des restrictions d'usage de l'eau peuvent être décidées par les préfets de département²⁸. Les arrêtés sécheresse ne peuvent être prescrits que pour une durée limitée, sur un périmètre déterminé. Ils doivent assurer l'exercice des usages prioritaires, plus particulièrement la santé, la sécurité civile, l'approvisionnement en eau potable et la préservation des écosystèmes aquatiques, tout en respectant l'égalité entre usagers des différents départements et la nécessaire solidarité amont-aval des bassins-versants. L'objectif est d'adapter au mieux les besoins à la ressource disponible en encourageant la sobriété des usages et en recherchant des solutions adaptées aux besoins et aux contextes locaux. L'élaboration de projets de territoire pour la gestion de l'eau (PTGE) doit permettre d'atteindre cet objectif, à travers une démarche reposant sur une approche globale et co-construite de la ressource en eau sur un périmètre cohérent d'un point de vue hydrologique ou hydrogéologique. La démarche de PTGE est préconisée par l'État dans tous les territoires où la gestion quantitative de l'eau est un véritable enjeu, et partout où le dialogue entre acteurs est nécessaire pour s'emparer de cette question d'avenir.

Le plan d'action pour une gestion résiliente et concertée de l'eau, présenté en mars 2023, a pour objectif de garantir de l'eau pour tous, de qualité et des écosystèmes préservés. Ses 53 mesures visent à répondre à trois enjeux majeurs : sobriété des usages, qualité et disponibilité de la ressource. L'enjeu visant spécifiquement à organiser la sobriété des usages pour tous les acteurs se décline dans chaque territoire par une diminution de 10 % des prélèvements d'ici 2030. En outre, les filières doivent définir et mettre en œuvre des plans de sobriété en eau.

POUR ALLER PLUS LOIN

- FAO, 2021. *L'état des ressources en terres et en eau pour l'alimentation et l'agriculture dans le monde : des systèmes au bord de la rupture*.
- Molden, D. et al., 2007. *Trends in water and agricultural development*. Pages 57–89 in D. Molden, editor. *Water for food, water for life: a comprehensive assessment of water management in agriculture*. Earthscan, London, UK and International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka.
- Pastor, A. et al., 2014. *Accounting for environmental flow requirements in global water assessments*, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 5041–5059, <https://doi.org/10.5194/hess-18-5041-2014>.
- Unesco, 2022. *Rapport mondial des Nations unies sur la mise en valeur des ressources en eau – Eaux souterraines : rendre visible l'invisible*.
- Unesco, 2021. *Rapport mondial des Nations unies sur la mise en valeur des ressources en eau – La valeur de l'eau*.
- Wang-Erlandsson, L. et al., 2022. *A planetary boundary for green water*. *Nat Rev Earth Environ* 3, 380–392.

POUR AGIR

- Eaufrance. *Limiter les impacts liés aux usages domestiques de l'eau*.
- G-Eau. *Analyse économique des projets de territoire pour la gestion de l'eau (PTGE) à composante agricole*.

²⁸ Le suivi de ces arrêtés est disponible sous propluvia.developpement-durable.gouv.fr/propluvia/faces/index.jsp.

Acidification des océans

UNE FRONTIÈRE PLANÉTAIRE AUJOURD'HUI NON DÉPASSÉE, MAIS POUR COMBIEN DE TEMPS ?

L'océan est au cœur des enjeux du climat et de la biodiversité. Il est considéré, au même titre que la forêt, comme le « poumon » de la Terre. En effet, il produit plus de 50 % de l'oxygène que nous respirons et absorbe environ 25 % du dioxyde de carbone (CO₂) présent dans l'atmosphère. Il représente ainsi un important puits de carbone et joue un rôle majeur dans la régulation du climat. Cependant, depuis la révolution industrielle, l'augmentation du niveau de CO₂ émis dans l'atmosphère par les activités humaines (environ 40 %) perturbe les équilibres biogéochimiques des océans avec de lourdes conséquences sur les écosystèmes et la biodiversité marine.

À mesure que le CO₂ atmosphérique se dissout au contact de l'océan, une série de réactions chimiques se produit. En particulier, de l'acide carbonique se forme et des ions hydrogène (H⁺) sont libérés, ce qui réduit le potentiel hydrogène (pH) – (voir glossaire) de l'eau de mer. On parle alors « d'acidification des océans ». Les ions hydrogènes libérés se combinent ensuite avec des ions carbonate (voir glossaire) pour former du bicarbonate, ce qui réduit la

quantité d'ions carbonate à la disposition de nombreux organismes marins (coquillages, coraux, mollusques, planctons) pour fabriquer leur coquille ou leur squelette calcaire, en aragonite ou en calcite.

Depuis le début de la révolution industrielle, le pH moyen des eaux de surface de l'océan est passé de 8,2 à 8,1²⁹. L'échelle pH étant logarithmique, cette diminution en apparence modérée (- 0,1) s'est traduite dans les faits par une hausse de 30 % de l'acidité des océans depuis l'ère préindustrielle.

Dans le cadre des travaux sur les limites planétaires, les scientifiques ont retenu comme variable de contrôle « l'état de saturation de l'eau de mer de surface en aragonite » (Ω), l'une des formes de carbonate de calcium (CaCO₃) produites par les organismes marins. La limite planétaire fixée correspond à 80 % en moyenne de l'état de saturation de l'eau de mer de surface en aragonite de l'ère préindustrielle ($\Omega = 3,44$ en 1850). Lorsque l'état de saturation est inférieur à 1, cela signifie que l'eau de mer est sous-saturée et qu'elle peut devenir corrosive pour les coquilles calcaires et pour la plupart des systèmes coralliens (tableau 8).

Tableau 8 : variable de contrôle et limite planétaire pour l'acidification des océans

Variable de contrôle	Seuil et zone d'incertitude	Valeur mondiale
État de saturation de l'eau de mer de surface en aragonite (% de la valeur préindustrielle) - (Ω)	80 % en moyenne de l'état de saturation de l'eau de mer de surface en aragonite lors de l'ère préindustrielle ($\Omega = 3,44$ en 1850) - ($\geq 80 - \geq 70$ %)	84 % de la valeur préindustrielle ($\Omega = 2,9$)

Source : d'après Steffen et al., 2015

En 2015, l'état de saturation de l'eau de mer de surface en aragonite est estimé à 84 % ($\Omega = 2,9$) du niveau préindustriel ($\Omega = 3,44$), soit en deçà de la frontière planétaire. En poursuivant au même rythme jusqu'en 2050, il pourrait atteindre 2,80, soit environ 80 % du niveau préindustriel. Ce taux de saturation évolue avec les émissions en CO₂, mais également avec la température et la fonte des glaciers.

Conséquences et enjeu

L'acidification des océans est préjudiciable à plusieurs titres. Elle perturbe le développement d'une partie du plancton marin, comme les coccolithophores, dont le squelette calcaire est sensible à l'acidité du milieu. Pour les mêmes raisons, elle affecte également le développement et la survie des

coraux. Le plancton marin et les coraux sont à la base de nombreux écosystèmes marins dont les populations humaines sont fortement dépendantes. La disparition des récifs coralliens pourrait ainsi compromettre la protection du littoral contre les tempêtes, le développement de la faune aquatique³⁰ et de ce fait, l'approvisionnement en nourriture d'une partie importante de la population planétaire, ainsi que le tourisme et les loisirs sous-marins.

Au niveau mondial, plus d'un milliard de personnes tirent des bénéfices directs des récifs coralliens. L'initiative française pour les récifs coralliens (Ifreco) estime à 1,3 Md€ la valeur annuelle des services écosystémiques associés aux récifs coralliens, aux écosystèmes associés, mangroves et herbiers, dans les territoires français d'outre-mer.

²⁹ Le pH de l'océan étant supérieur à 7, l'océan est basique. Mais la diminution du pH indique qu'il est moins basique et on parle alors d'acidification.

³⁰ Les récifs coralliens couvrent moins de 1 % de la surface des océans, mais abritent un tiers des espèces marines connues.

Le Giec élabore des projections regroupées en quatre trajectoires possibles, appelées « scénarios RCP » (voir glossaire), pour le XXI^e siècle et au-delà, en fonction du profil d'évolution des émissions. D'après le scénario des émissions élevées de CO₂ (RCP 8,5), si la hausse des émissions de CO₂ se poursuit au même rythme, le pH de surface de l'océan pourrait diminuer de 0,3 unité pH avant la fin du siècle, conduisant à un pH voisin de 7,7 d'ici à 2100. De plus, le degré de saturation d'aragonite pourrait être inférieur à 3 dans les eaux de surface autour des récifs tropicaux d'ici à 2100. Plus précisément, en Antarctique, 60 % des eaux de surface pourraient devenir corrosives pour les organismes dont la coquille est constituée à partir d'aragonite, comme les ptéropodes. Certaines régions de l'Arctique sont déjà corrosives pour certaines espèces marines et la plupart le seront dans quelques décennies.

Plus généralement, alors que l'océan fait l'objet de multiples pressions (réchauffement, acidification, désoxygénation, élévation du niveau de la mer, surpêche, pollution, eutrophisation), un enjeu important est de parvenir à appréhender la capacité des organismes marins à s'adapter à ces conditions défavorables, en particulier sur de longues périodes. Bien que l'état des connaissances s'améliore, les données manquent encore dans ce domaine, d'autant que l'ampleur des changements survenus dans l'océan est récente. Au-delà des effets en chaîne sur le monde vivant, l'acidification des océans est en passe de réduire fortement ses capacités de séquestration du carbone, avec des risques d'aggravation du changement climatique dans les décennies à venir.

LES POLITIQUES ET ACTIONS EN FAVEUR DE LA PRÉSERVATION DES OCÉANS

La cause première de l'acidification des océans étant l'augmentation des émissions de CO₂ et le réchauffement des océans, toutes les actions qui permettront de limiter nos émissions de gaz à effet de serre ne peuvent être que bénéfiques. Celles-ci sont décrites dans la limite « changement climatique ».

Au-delà de ces actions, il est également possible d'atténuer les conséquences de l'acidification sur les écosystèmes marins, en réduisant les autres pressions affectant le développement et la survie des coraux, comme la pollution, les perturbations physiques, ou la surexploitation.

Au niveau mondial, la Convention sur la diversité biologique (CDB ou CBD - *Convention on Biological Diversity*) adoptée à l'issue de la Conférence des Nations unies sur l'environnement et le développement (le « Sommet de la Terre » de Rio) en 1992, insistait sur le rôle primordial des

écosystèmes marins pour la planète. À l'occasion de la 15^e réunion des Parties de la CDB en décembre 2022, l'Initiative internationale pour les récifs coralliens – un partenariat mondial comptant 93 membres, dont des gouvernements, des groupes de la société civile et des entreprises du secteur privé – a porté une recommandation visant à reconnaître les récifs coralliens comme des écosystèmes gravement menacés et à leur accorder la priorité dans le nouveau cadre mondial pour la biodiversité. Cette recommandation s'est notamment traduite par l'inclusion d'indicateurs de suivi des récifs coralliens dans le dispositif de rapportage du cadre mondial.

En 2020, les Nations unies ont lancé la Décennie des Nations unies pour les sciences océaniques au service du développement durable (2021-2030) et la Décennie des Nations unies pour la restauration des écosystèmes. Les campagnes de communication et de financement associées ont pour but de contribuer à protéger les océans grâce aux progrès scientifiques et de restaurer les écosystèmes dégradés de la planète.

En France, les efforts de protection des récifs coralliens sont coordonnés par les ministères chargés de l'Environnement et des Outre-mer, qui s'appuient sur les travaux de l'Ifremer. L'Ifremer permet en particulier de coordonner les actions de l'ensemble des territoires français, et notamment des territoires ultramarins disposant d'une compétence propre en matière de protection de l'environnement (Polynésie française, Nouvelle-Calédonie, Wallis et Futuna, et Saint-Barthélemy).

La France est le quatrième pays corallien au monde, et porte à ce titre une grande responsabilité quant à la préservation de ces écosystèmes. En conséquence, l'ambition nationale en matière de protection des récifs coralliens s'est peu à peu renforcée :

- En 2016, la loi pour la reconquête de la biodiversité fixe un objectif de protection de 75 % des récifs coralliens ultramarins d'ici 2021.
- En 2018, le plan biodiversité propose de protéger 100 % des écosystèmes coralliens français d'ici 2025, avec un objectif intermédiaire de protection de 75 % d'ici 2021.
- En 2019, le Comité interministériel de la mer adopte le plan national d'action pour la protection des récifs coralliens d'outre-mer.
- En 2021, la stratégie nationale des aires protégées propose d'inclure 100 % des récifs coralliens dans une aire protégée d'ici 2025.
- En 2022, la troisième stratégie nationale pour la biodiversité propose de renforcer le plan national d'action pour la protection des récifs coralliens d'outre-mer.

En 2022, 67 % des récifs coralliens sont effectivement protégés. Le parc naturel de la mer de Corail, créé en 2014 par la Nouvelle-Calédonie, s'étend à lui seul sur une superficie de 1,3 million de km² et constitue ainsi l'une des plus vastes aires marines protégées au monde. En protégeant 41 % des récifs coralliens de Nouvelle-Calédonie, il contribue significativement à l'objectif de protection de 100 % des récifs coralliens d'ici 2025. En particulier, le parc a créé en 2018 de vastes zones de protection forte sur plus de 28 000 km², qui couvrent essentiellement des zones de récifs abritant une biodiversité marine remarquable.

En métropole, cette ambition se traduit aussi par un ensemble d'actions prévues dans les documents stratégiques de façade, adoptés en 2022. Par exemple, la façade méditerranéenne prévoit de « renforcer les connaissances relatives à l'état écologique du corail rouge en Méditerranée et assurer, si nécessaire, sa préservation », ou encore de « renforcer la prise en compte de la sensibilité des habitats profonds en Méditerranée », notamment en réglementant les pratiques de pêche au niveau des récifs.

Des initiatives citoyennes contribuent également à la protection des écosystèmes coralliens. C'est notamment le cas de la plateforme de financement participatif « SOS Corail », soutenue par l'Ifremer et le ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, qui recueille et distribue des dons de particuliers pour des projets de protection des récifs coralliens.

POUR ALLER PLUS LOIN

- CBD, Unep, 2014, CBD Technical Series No. 75, *An Updated Synthesis of the Impacts of Ocean Acidification on Marine Biodiversity*.
- Fondation de la mer et Ifremer. Programme *SOS Corail*.
- GCRMN, ICRI, 2021. *Status of Coral Reefs of the World 2020*.
- Giec, 2019. Rapport spécial sur les océans et la cryosphère dans le contexte du changement climatique, Résumé à l'intention des décideurs.
- Giec, 2013. Contribution du groupe de travail 1 au cinquième rapport d'évaluation du Giec, *Changements climatiques 2013 : les éléments scientifiques*. Résumé à l'intention des décideurs.
- MTES, 2020. *Plan d'actions pour la protection des récifs coralliens des outre-mer français*.
- PIGB, COI, SCOR, 2013. Acidification des océans. Résumé à l'intention des décideurs. Troisième symposium sur *L'Océan dans un monde avec un taux élevé de CO₂*. Programme international sur la géosphère et la biosphère, Stockholm.
- Réseau Action Climat, 2018. *Acidification et réchauffement des océans : des dangers qui se démultiplient*.
- SDES, 2021. *Les protections des espaces naturels terrestres et marins en France en 2021, Datalab essentiel*, septembre 2021, 4 p.
- Steffen, W. et al., 2015. *Planetary Boundaries: Guiding Human Development on a Changing Planet*. Science 347 (6223): 1259855–55.

Appauvrissement de l'ozone stratosphérique

UNE LIMITE PLANÉTAIRE NON FRANCHIE, GRÂCE À L'ENGAGEMENT DE LA COMMUNAUTÉ INTERNATIONALE

L'ozone est un gaz présent naturellement à l'état de traces dans l'atmosphère et se forme à partir de l'action du rayonnement solaire sur l'oxygène. Sa concentration est plus élevée dans la stratosphère, couche de l'atmosphère située entre 10 et 50 km au-dessus de la surface terrestre environ, avec un maximum entre 20 et 30 km d'altitude. Cette partie de la stratosphère plus concentrée en ozone est communément appelée « couche d'ozone ».

La couche d'ozone joue un rôle essentiel pour les organismes vivants. Elle constitue un filtre de protection face aux rayons ultraviolets du soleil (UVB et UVC) particulièrement nocifs pour la santé humaine (risques de cancers de la peau, maladies oculaires, affaiblissement du système immunitaire) et pour les écosystèmes (ralentissement de la photosynthèse, de la croissance des végétaux et des cultures, baisse de productivité du phytoplancton).

À la suite de réactions chimiques complexes, l'épaisseur de la couche d'ozone varie naturellement en fonction des variations saisonnières de température et d'ensoleillement : elle diminue en hiver et au printemps dans les régions polaires. Dans les années 1980, des chercheurs ont mis en évidence un amincissement sensible, voire une destruction de la couche d'ozone (phénomène de « trou dans la couche d'ozone »), particulièrement prononcé au pôle Sud au-dessus de l'Antarctique, mais également au pôle Nord (Arctique). Ce phénomène est provoqué par l'introduction dans l'atmosphère de substances chimiques contenant des molécules chlorées

et bromées. Les substances appauvrissant la couche d'ozone (SAO) sont principalement :

- les chlorofluorocarbures (CFC), utilisés dans les systèmes réfrigérants et les climatiseurs, comme propulseurs dans les bombes aérosols, comme solvants ;
- les hydrochlorofluorocarbures (HCFC), utilisés comme substituts des CFC en raison de leur moindre durée de vie dans l'atmosphère ;
- les halons, utilisés dans les matériels d'extinction des incendies ;
- le tétrachlorure de carbone (CTC), utilisé pour produire des CFC, pour la synthèse du nylon, comme solvant ou encore comme agent nettoyant ;
- le trichloroéthane (TCA), utilisé principalement pour fabriquer des polymères fluorés qui servent d'isolants dans la fabrication des batteries au lithium ;
- le bromure de méthyle, utilisé dans la désinfection des sols contre les ravageurs, et pour la désinsectisation des locaux de stockage de produits agricoles et des infrastructures industrielles.

Dans le cadre des travaux sur les limites planétaires, les chercheurs ont retenu comme variable de contrôle la « concentration d'ozone dans la stratosphère » mesurée en unités Dobson. Une « unité Dobson » (*Dobson Unit* - DU) est définie comme une couche d'ozone de 0,01 mm d'épaisseur dans des conditions normales de température et de pression de l'atmosphère. La valeur moyenne de la colonne d'ozone est de 300 DU, aussi les chercheurs ont fixé la limite planétaire à 275 DU, soit 95 % de la valeur préindustrielle (290 DU) - (tableau 9).

Tableau 9 : variable de contrôle et limite planétaire pour l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique

Variable de contrôle	Limite planétaire	Valeur mondiale
Concentration d'ozone dans la stratosphère mesurée en unités Dobson (DU)	275 DU, soit 95 % de la valeur préindustrielle (290 DU)	285 DU

Source : d'après Steffen et al., 2015

Depuis les années 2000, grâce à une forte mobilisation internationale, la situation de la couche d'ozone s'est stabilisée. Ainsi, la concentration d'ozone dans la stratosphère est estimée depuis lors à 285 DU en moyenne, ce qui signifie

que la limite planétaire est respectée. Pour autant, on constate encore localement des valeurs de l'ordre de 200 DU au printemps au-dessus de l'Antarctique.

partie 2 : les neuf limites planétaires - appauvrissement de l'ozone stratosphérique

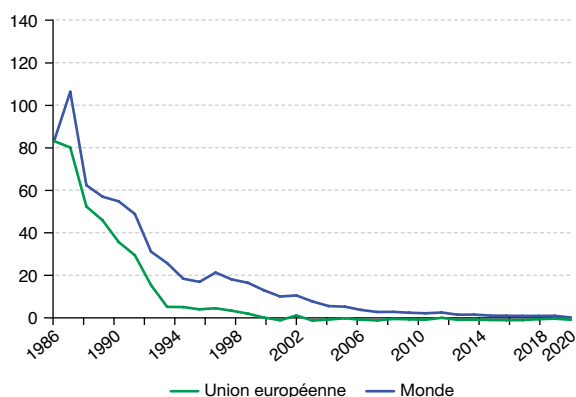
LES MESURES PRISES POUR RECONSTITUER LA COUCHE D'OZONE

En réaction à la destruction de la couche d'ozone, la communauté internationale a adopté le Protocole de Montréal en 1987, dont l'objectif est de réduire drastiquement la production et la consommation de substances appauvrissant la couche d'ozone (CFC et halons dans un premier temps). C'est le premier traité international signé par l'ensemble des États reconnus par l'ONU. À la suite de sa mise en œuvre, la production et la consommation des CFC ont été très fortement réduites. Depuis 1987, ce protocole a été amendé à cinq reprises afin, notamment, de prendre en compte d'autres substances appauvrissant la couche d'ozone.

Au niveau européen, le Protocole a été complété en 2009 par le règlement³¹ relatif aux substances qui appauvrissent la couche d'ozone (graphique 16). Ainsi, alors que le Protocole de Montréal régule la production et le commerce de ces substances, le règlement de 2009 interdit la plupart de leurs utilisations. Il définit également un système de quotas et de licences de production, importation, exportation et utilisation de ces substances et produits qui en contiennent ou en dépendent, ainsi qu'un rapportage obligatoire des entreprises concernées.

Graphique 16 : évolution de la consommation de substances réglementées appauvrissant la couche d'ozone

Consommation en potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone, indice base 100 en 1986



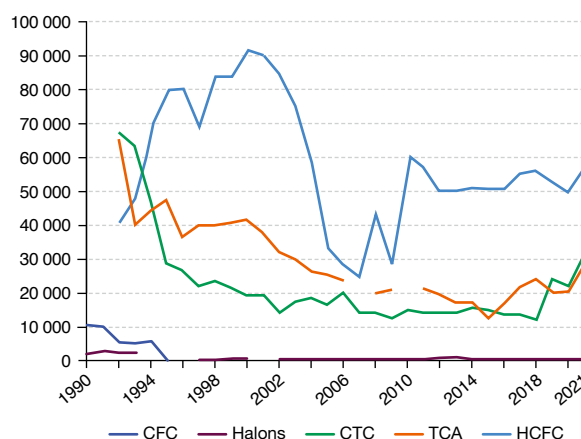
Notes : la consommation correspond à la production à laquelle sont ajoutées les importations, moins les exportations et moins la destruction ; gaz pris en compte : CFC, halons, CTC (tétrachlorure de carbone), TCA (trichloroéthane), HCFC, HBFC (hydrobromofluorocarbures), BCM (bromochlorométhane), MB (bromure de méthyle).

Sources : Agence européenne pour l'environnement ; Programme des Nations unies pour l'environnement, 2022

La France a cessé sa production de halons en 1994 et celle de CFC en 1995. Toutefois, conformément au règlement relatif aux SAO, des dérogations sont prévues pour certaines utilisations : comme intermédiaires de synthèse, comme agents de fabrication, ou pour des utilisations essentielles en laboratoire et à des fins d'analyse. La hausse de la production de TCA et de CTC à partir de 2018 s'explique par une demande croissante (graphique 17).

Graphique 17 : évolution de la production de substances* appauvrissant la couche d'ozone (SAO) en France

En tonnes



*CFC, halons, CTC, TCA, HCFC.

Note : les CFC regroupent les CFC113, CFC114, CFC115. Les HCFC regroupent les HCFC 22, HCFC 141B et HCFC 142 B. Les CTC correspondent au tétrachlorure de carbone et les TCA au trichloroéthane (méthylchloroforme).

Source : ministère chargé de l'Environnement, 2022. Données rapportées au titre du Protocole de Montréal sur les substances appauvrissant la couche d'ozone

Les CFC ont été remplacés par les HCFC, puis par les hydrofluorocarbures (HFC) qui ne contiennent pas d'atome de chlore, responsable de la dégradation de l'ozone stratosphérique. Malheureusement, les HFC sont de puissants gaz à effet de serre. Ainsi à titre d'exemple, un dégazage dans l'atmosphère de 1 kg de HFC-134 aura le même impact sur le climat que 1 300 kg de CO₂ ou qu'un parcours de 10 000 km en berline.

³¹ Règlement (CE) n° 1005/2009 du Parlement européen et du Conseil du 16 septembre 2009 relatif aux substances qui appauvrissent la couche d'ozone.

Le Protocole de Montréal a donc été complété par l'Amendement de Kigali en 2016, qui prévoit l'abandon progressif de la production et de la consommation de certains HFC. Le règlement européen n° 2037/2000 prévoit l'arrêt de la production d'HCFC au 1^{er} janvier 2026. Le règlement n° 517/2014 relatif aux gaz à effet de serre fluorés impose une réduction de 79 % des fluides de type HFC entre 2015 et 2030.

En France, la réglementation prévoit un ensemble de règles de certification et de surveillance des équipements tributaires de gaz à effet de serre fluorés (frigidaires, installations de climatisation, etc.). Le ministère chargé de l'Environnement a également mis en place des dispositifs d'aides pour accompagner les entreprises souhaitant utiliser des alternatives aux HFC, dont les prix devraient augmenter du fait de la baisse des quotas européens.

Concernant les HFC, les émissions françaises de HFC ont diminué de 40 % en dix ans, passant d'une estimation de 17 629 kilotonnes de CO₂ équivalent par an (kt CO₂ e/an) en 2011 à 10 695 kt CO₂ e/an en 2021³².

Les productions de CFC, de HCFC et de halons sont rapportées par tous les pays auprès du Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE)³³. Alors que cette production est devenue quasi nulle, les scientifiques observent depuis 2012 une augmentation inattendue des émissions de trichlorofluorométhane (CFC-11) du côté de l'Asie, probablement due à une production illégale. La vigilance reste donc de mise.

LES PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION DE LA COUCHE D'OZONE

La surveillance régulière de l'évolution de la couche d'ozone s'appuie sur les mesures réalisées par satellites, à bord de ballons et d'avions et par des stations d'observation au sol. D'après la dernière évaluation scientifique de l'appauvrissement de la couche d'ozone (2022) menée conjointement par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le PNUE, le trou de la couche d'ozone serait en voie de résorption. Dans certaines parties de la stratosphère, elle s'est rétablie à un rythme allant de 1,5 à 2,2 % par décennie à des latitudes moyennes dans les hémisphères Nord et Sud, et de 1,1 à

1,6 % par décennie sous les tropiques, depuis l'an 2000.

La restauration de la couche d'ozone demeure un processus très lent, car les substances chimiques ont une longue durée de vie dans l'atmosphère. Sur la base des politiques actuelles, les modèles prédisent un retour aux niveaux de 1980 approximativement d'ici 2066 au-dessus de l'Antarctique, 2045 au-dessus de l'Arctique et 2040 dans le reste du monde.

Le Protocole de Montréal est ainsi considéré comme un succès majeur en matière de protection de l'environnement mondial. D'autre part, selon le Groupe de l'évaluation scientifique³⁴ du protocole de Montréal, l'amendement de Kigali devrait permettre d'éviter un réchauffement climatique de 0,3 à 0,5 °C d'ici à 2100.

L'enjeu aujourd'hui est de trouver des produits de substitution ayant le moins d'impacts possible et de limiter nos besoins de climatisation par des solutions fondées sur la nature ou moins énergivores, ceci pour à la fois garantir l'intégrité de la couche d'ozone et préserver le système climatique planétaire. Ce premier traité universel, qu'est le Protocole de Montréal, pourrait alors servir d'exemple et ouvrir la voie à de futures négociations sur le climat.

POUR ALLER PLUS LOIN

- Giec, Groupe de l'évaluation technique et économique (GETE), 2005. Rapport spécial. *Préservation de la couche d'ozone et du système climatique planétaire : questions relatives aux hydrofluorocarbures et aux hydrocarbures perfluorés.*
- MTECT, 2021. *Substances appauvrissant la couche d'ozone et gaz à effet de serre fluorés.*
- OMM, ONU Environnement, 2022. Rapport d'évaluation quadriennal sur les substances appauvrissant la couche d'ozone : *Scientific assessment of ozone depletion 2022.*
- PNUE, 2020. InforMEA (Informations sur les accords multilatéraux sur l'environnement) – Dérivations pour utilisations critiques de bromure de méthyle pour 2021 et 2022.
- Steffen, W. et al., 2015. *Planetary Boundaries: Guiding Human Development on a Changing Planet.* *Science* 347 (6223): 1259855–55.

³² Citepa, avril 2022 - Format Secten.

³³ Données disponibles sous ozone.unep.org/countries.

³⁴ Auteur d'une évaluation scientifique quadriennale sur l'appauvrissement de la couche d'ozone conformément à l'article 6 du Protocole de Montréal.

Augmentation des aérosols dans l'atmosphère

UNE LIMITE PLANÉTAIRE NON QUANTIFIÉE, MAIS AUX ENJEUX CLIMATIQUES ET SANITAIRES MAJEURS

Les aérosols désignent des particules solides ou liquides en suspension dans l'air, dont la taille peut varier de quelques nanomètres à quelques dizaines de micromètres (µm). Si la majorité d'entre eux est d'origine naturelle, une quantité croissante est rejetée dans l'atmosphère par les activités humaines depuis l'ère préindustrielle. Cette augmentation des aérosols dans l'atmosphère constitue un enjeu majeur pour le climat et la santé humaine.

Une partie des aérosols atmosphériques est d'origine primaire : les particules sont rejetées directement dans l'air par des sources naturelles (érosion des sols, embruns marins, pollens, cendres volcaniques, etc.) ou par des activités anthropiques (combustion de combustibles fossiles ou de biomasse (*voir glossaire*), activités mécaniques avec création de particules généralement plus grossières issues des labours, moissons, chantiers, etc.). Une autre partie des aérosols est d'origine secondaire : ils ne sont pas émis directement dans l'atmosphère mais se forment par réactions chimiques entre des gaz ou particules déjà présents dans l'air.

Les aérosols sont notamment caractérisés par la taille et la composition chimique des particules qui les constituent. Différentes familles de composés chimiques peuvent être

identifiées dans les particules : une fraction organique d'origine primaire, incluant le carbone suie, issue de combustions incomplètes d'énergies fossiles ou de biomasse ; une fraction organique d'origine secondaire provenant de l'oxydation de composés organiques volatils rejetés par les activités humaines et la végétation ; des espèces inorganiques primaires (sels de mer et poussières minérales) ; des espèces inorganiques secondaires (principalement le nitrate, le sulfate non émis par les embruns marins et l'ammonium).

Dans le cadre des travaux sur les limites planétaires, la variable de contrôle retenue est « l'épaisseur optique d'aérosols » (AOD), c'est-à-dire le degré d'opacité de l'atmosphère due à la concentration d'aérosols. Compte tenu de la variabilité spatio-temporelle des particules, des sources et des impacts, l'identification d'un seuil global n'a pas été possible à ce stade. Partant du cas de la mousson d'Asie du Sud-Est, phénomène particulièrement sensible à la présence d'aérosols dans l'atmosphère, les chercheurs ont proposé une limite locale spécifique à la zone Asie du Sud-Est (Steffen *et al.*, 2015). Le seuil proposé pour l'AOD est de 0,25 (le niveau naturel de l'AOD pour cette région se situe entre 0,15 et 0,4). En 2015, l'épaisseur optique moyenne d'aérosols mesurée en Asie du Sud-Est est estimée à 0,3, ce qui la situe dans la zone d'incertitude définie par les chercheurs (entre 0,25 et 0,5 AOD) - (*tableau 10*).

Tableau 10 : variable de contrôle et limite planétaire pour l'augmentation des aérosols dans l'atmosphère

Variable de contrôle	Seuil et zone d'incertitude	Valeur mondiale
Profondeur ou épaisseur optique d'aérosols (AOD)	Aucun seuil planétaire défini, en l'absence de connaissances suffisantes Zone Asie du Sud-Est : seuil proposé de 0,25 AOD (zone allant de 0,25 à 0,5)	Absence de valeur moyenne, la variabilité étant trop forte dans l'année et sur l'ensemble de la planète. Moyenne annuelle de l'AOD en Asie du Sud-Est : 0,3

Source : d'après Steffen *et al.*, 2015

DES ENJEUX SUR LE CLIMAT ET SUR LA SANTÉ DE L'HOMME ET DES ÉCOSYSTÈMES

Les aérosols ont une influence directe et indirecte sur le climat, en perturbant le bilan radiatif de la Terre. Certaines particules constituées principalement de sulfates ou de nitrates réfléchissent une partie du rayonnement solaire et ont un effet refroidissant. D'autres, comme le carbone suie,

absorbent les rayons du soleil et réchauffent l'atmosphère. De manière indirecte, les aérosols influent également sur le climat en contribuant à la formation des nuages. Malgré l'amélioration des modèles et des mesures de surveillance, il est encore difficile d'estimer l'effet global des aérosols sur le climat. Ils seraient à l'origine de changements dans le régime des précipitations locales, notamment des pluies au Sahel dans les années 1950-1980 et des moussons en Asie³⁵.

³⁵ Selon les dernières conclusions du Giec (rapport 2021) : « La fourchette probable de l'augmentation totale de la température à la surface du globe due à l'activité humaine entre 1850-1900 et 2010-2019 est de 0,8 °C à 1,3 °C, la meilleure estimation étant de 1,07 °C. Il est probable que les GES bien mélangés ont contribué à un réchauffement de 1,0 °C à 2,0 °C, d'autres facteurs humains (principalement les aérosols) ont contribué à un refroidissement de 0,0 °C à 0,8 °C, les facteurs naturels ont changé la température de la surface de la planète de -0,1 °C à +0,5 °C et la variabilité interne l'a modifiée de -0,2 °C à +0,2 °C » (A.1.3).
« Les diminutions des précipitations terrestres de mousson à l'échelle mondiale entre les années 1950 et 1980 sont en partie attribuées aux émissions d'aérosols d'origine humaine dans l'hémisphère Nord, mais les augmentations observées depuis lors résultent de l'augmentation des concentrations de GES et de la variabilité interne décennale à pluri-décennale (confiance moyenne). En Asie du Sud, en Asie de l'Est et en Afrique de l'Ouest, l'augmentation des précipitations de mousson due au réchauffement dû aux émissions de GES a été contrebalancée par une diminution des précipitations de mousson due au refroidissement dû aux émissions d'aérosols d'origine humaine au cours du XX^e siècle (confiance élevée). Les augmentations des précipitations de mousson en Afrique de l'Ouest depuis les années 1980 sont en partie dues à l'influence croissante des GES et à la réduction de l'effet refroidissant des émissions d'aérosols d'origine humaine en Europe et en Amérique du Nord (confiance moyenne) ». (A.3.3)

Les effets sanitaires des aérosols varient selon la taille des particules qui les constituent et selon leur composition chimique. Les particules dites grossières (diamètre compris entre 2,5 et 10 μm) impactent la santé respiratoire et sont retenues dans la région naso-pharyngée. Les particules fines, de diamètre inférieur ou égal à 2,5 μm ($\text{PM}_{2,5}$) et en particulier celles inférieures à 1 μm , peuvent pénétrer très profondément dans l'appareil respiratoire et même passer dans la circulation sanguine. Ces particules fines peuvent causer des maladies cardiovasculaires notamment.

Les particules grossières correspondent majoritairement à des particules primaires d'origine naturelle, ainsi qu'à certains types de particules secondaires. Les particules fines sont essentiellement constituées de particules primaires d'origine anthropique et de certaines particules secondaires.

En 2019, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) estime à 4,2 millions le nombre de décès prématurés provoqués par la pollution de l'air extérieur dans les villes et les zones rurales. D'après la dernière estimation publiée en 2021 par Santé publique France, près de 40 000 décès de causes non accidentelles seraient attribuables chaque année à une exposition des personnes âgées de 30 ans et plus aux $\text{PM}_{2,5}$ en France.

Les aérosols ont également des impacts sur le bâti avec l'encrassement des façades, ainsi que sur la productivité des végétaux en entravant la photosynthèse.

LES POLITIQUES ET ACTIONS EN FAVEUR DE LA QUALITÉ DE L'AIR

Même si les effets des aérosols sur le climat sont ambivalents, leur réduction a un effet globalement positif sur le climat, puisque leurs émissions sont liées à des activités anthropiques également émettrices de gaz à effet de serre. D'autre part, leur réduction a un impact positif sur la santé humaine et la santé des écosystèmes.

Au niveau international, l'OMS a publié dès 1987 des lignes directrices relatives à la qualité de l'air. Celles-ci, revues en 2005 et en 2021, définissent des niveaux de concentrations recommandés pour les particules en suspension, comme l'ozone, le dioxyde d'azote et le dioxyde de soufre. Ces valeurs constituent la base scientifique pour protéger la santé des populations des effets de la pollution atmosphérique et contribuer à éliminer ou réduire au maximum les polluants atmosphériques reconnus ou soupçonnés être dangereux pour la santé ou le bien-être de l'homme. Elles sont documentées par les données médicales, épidémiologiques et toxicologiques.

Dans le cadre de la Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance, le Protocole de Göteborg, relatif à la réduction de l'acidification, de

l'eutrophisation et de l'ozone troposphérique, fixe dans sa version amendée en 2012 des objectifs de réduction des émissions pour 2020 de cinq polluants, dont les $\text{PM}_{2,5}$. Ce protocole incite les Parties à la Convention à mettre en œuvre en priorité des mesures de réduction des émissions de particules qui diminueraient également les émissions de carbone suie de manière significative.

Au niveau européen, deux directives établissent la législation sur la qualité de l'air :

- la directive 2008/50/CE pour la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe, qui concerne le dioxyde de soufre (SO_2), les oxydes d'azote (NO_x), le dioxyde d'azote (NO_2), les particules de diamètre inférieur ou égal à 10 μm et de diamètre inférieur ou égal à 2,5 μm (PM_{10} et $\text{PM}_{2,5}$), le monoxyde de carbone (CO), le benzène, le plomb et l'ozone ;
- la directive 2004/107/CE concernant l'arsenic, le cadmium, le mercure, le nickel et les hydrocarbures aromatiques polycycliques dans l'air ambiant.

Ces deux directives assurent un cadre commun pour l'évaluation et la gestion de la qualité de l'air, ainsi que pour l'information du public. Elles fixent également des concentrations maximales dans l'air pour certaines substances polluantes dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire leurs effets nocifs sur la santé humaine et les écosystèmes. Dans le cadre de la mise en œuvre du Pacte vert, la Commission européenne a lancé des travaux de révision de ces directives, avec la publication d'une proposition de directive en octobre 2022. La Commission propose ainsi de fusionner les directives de 2004 et 2008, et de définir des normes de qualité de l'air plus ambitieuses.

Les émissions de polluants dans l'air sont également réglementées au niveau européen, notamment par la directive 2016/2284. Cette dernière impose aux États membres des objectifs de limitation des rejets dans l'air de certains polluants : des plafonds d'émission sont ainsi fixés à chaque pays pour cinq polluants (SO_2 , NO_x , composés organiques non méthaniques, $\text{PM}_{2,5}$ et ammoniac), à respecter pour 2020 et 2030. Des réglementations sectorielles (émissions industrielles, qualité des carburants, émissions des transports, etc.) sont également élaborées dans ce cadre.

En France, la baisse des émissions, amorcée il y a plusieurs années à la suite de la mise en place de stratégies et plans d'action tels que le plan national de réduction des émissions de polluants atmosphériques (PREPA), a permis une amélioration globale de la qualité de l'air. Les concentrations moyennes annuelles de polluants diminuent et les dépassements des seuils réglementaires de qualité de l'air pour la protection de la santé affectent des zones moins étendues et moins nombreuses.

Le PREPA, adopté en décembre 2022, précise la stratégie de l'État pour réduire les émissions de polluants atmosphériques au niveau national et pour répondre aux exigences européennes. Il combine des mesures réglementaires, fiscales et incitatives, ainsi que des outils de planification à destination des collectivités et de sensibilisation des acteurs. Il décline des actions par grand secteur d'activité (industrie, résidentiel tertiaire, transports et agriculture).

Dans le secteur des transports, le PREPA organise notamment la mise en place de zones à faibles émissions dans les agglomérations de plus de 150 000 habitants, obligation inscrite dans la loi Climat et Résilience de 2021. Ces zones à faibles émissions, instaurées par la loi d'orientation des mobilités de 2019, ont pour objectif de réduire la circulation des véhicules les plus polluants, notamment en matière de NO₂. Des zones à faibles émissions ont déjà été mises en place dans une douzaine de pays européens, avec des résultats encourageants : à la suite de l'instauration d'une zone à faibles émissions, des baisses de concentrations de tous les polluants ont été enregistrées, et vont jusqu'à - 29 % pour le NO₂, - 59 % pour le carbone suie, ou - 23 % pour les PM₁₀ (Ademe, 2020).

Les collectivités peuvent également favoriser le développement d'activités non polluantes, notamment à travers l'élaboration de plans de protection de l'atmosphère, qui s'imposent aux agglomérations de plus de 250 000 habitants. Ces plans, qui doivent s'articuler avec les

plans mobilités et les plans climat-air-énergie territoriaux (PCAET), peuvent par exemple permettre aux collectivités de favoriser les déplacements actifs comme le vélo ou la marche, ainsi que les transports en commun.

Les collectivités peuvent également contribuer financièrement au développement d'activités moins polluantes. Ainsi, dans le cadre du « Fonds Air Bois », certaines collectivités, en collaboration avec l'Ademe, fournissent une aide financière aux particuliers souhaitant remplacer un appareil de chauffage au bois non performant par un appareil très performant en matière de rendement et de limitation des particules fines.

POUR ALLER PLUS LOIN

- Ademe, 2020. *Zones à faibles émissions (low emission zones) à travers l'Europe*.
- CGDD, 2022. *Bilan de la qualité de l'air extérieur en France en 2021*. Datalab, octobre 2022, 52 p.
- Giec, 2021. *Changement climatique 2021, Les bases scientifiques physiques*. Résumé à l'intention des décideurs.
- OMS, 2022. *Pollution de l'air ambiant (extérieur)*.
- Steffen, W. et al., 2015. *Planetary Boundaries: Guiding Human Development on a Changing Planet*. *Science* 347 (6223): 1259855–55.

Introduction d'entités nouvelles dans la biosphère

UNE LIMITE PLANÉTAIRE NON PRÉCISÉMENT QUANTIFIÉE MAIS CONSIDÉRÉE DÉPASSÉE

Depuis 2015³⁶, cette neuvième limite planétaire comprend l'ensemble des entités, au sens géologique, produites, mises en circulation et rejetées dans l'environnement par les activités humaines. Ces entités (substances de synthèse, nouvelles formes de substances existantes, formes de vie modifiées) sont susceptibles d'avoir des effets indésirables sur les écosystèmes, les organismes vivants et la santé. Parmi ces entités se trouvent les substances chimiques telles que les résidus de médicaments, les additifs, les pesticides, les perturbateurs endocriniens, les chlorofluorocarbones (CFC), mais également les nanomatériaux, les polymères plastiques ou les organismes génétiquement modifiés, susceptibles de perturber les équilibres physiques et/ou biologiques.

À large échelle, certaines substances sont persistantes et se déplacent sur de grandes zones géographiques, risquant de menacer l'intégrité de la biosphère. Au-delà de leur impact global sur la santé des animaux, des humains et des écosystèmes (concept « une seule santé » selon le *One Health High-Level Expert Panel* ou OHHLEP, 2021), elles agissent comme une variable lente qui affecte d'autres limites planétaires. Par exemple, les émissions de CFC peuvent avoir des effets néfastes sur la couche d'ozone stratosphérique, ou interagir avec la limite sur les aérosols, car de nombreux polluants persistants sont transportés sur de longues distances par des particules d'aérosols. Sur le plan sanitaire, une exposition chronique à un polluant peut entraîner la perturbation de différentes fonctions biologiques, notamment une augmentation des troubles du développement neurologique, en particulier chez les populations les plus sensibles (vie foetale et petite enfance). Ces polluants peuvent également altérer les végétaux et affecter la biodiversité en perturbant la physiologie de certaines espèces, leur capacité de reproduction ou d'alimentation.

Depuis 2009, dans le cadre des travaux sur les limites planétaires, les chercheurs tentent de définir comment caractériser et quantifier cette limite, compte tenu de sa

complexité et de l'absence de données dans certains territoires. Dans une étude parue en 2021 (Persson *et al.*, 2021), les auteurs soulignent que la nature de cette limite nécessite de considérer plusieurs variables de contrôle (relatives à la production, au rejet et aux impacts non désirables de ces entités nouvelles) qui, ensemble, pourront permettre de constituer une base solide afin de mieux appréhender les risques planétaires. Ils suggèrent aussi d'accorder une attention particulière à la pollution plastique qui leur apparaît comme un problème très préoccupant. Si les quantifications de cette limite sont aujourd'hui restreintes, les auteurs estiment néanmoins que la production et le rejet d'entités nouvelles, ainsi que la diversité des substances concernées, augmentent à un rythme tel qu'il dépasse la capacité des sociétés à effectuer des évaluations et des contrôles de sécurité, avant la mise en circulation des produits potentiellement dangereux pour la planète. Aujourd'hui, 350 000 produits chimiques sont ainsi commercialisés sur le marché mondial (plastiques, pesticides, médicaments, composés chimiques industriels, etc.), cette production ayant été multipliée par 50 depuis 1950. Ils en concluent que l'espace de fonctionnement sûr pour les entités nouvelles est désormais dépassé (*tableau 11*).

Face à ce constat, les auteurs suggèrent de poursuivre les travaux de recherche en matière d'entités nouvelles, et de développer des variables de contrôle plus opérationnelles (quantification plus robuste, recueil de données globales, locales et temporelles plus fines). Ils ajoutent que ces actions doivent aller de pair avec la mise en œuvre immédiate de mesures visant à réduire les dommages actuels liés au dépassement de la limite : réduire la production de ces entités nouvelles avec établissement d'un plafond de production et d'émission de produits chimiques, évoluer vers une économie circulaire massive (réutilisation de matériaux et produits), prendre en compte l'enjeu du recyclage dans la conception des produits, améliorer la prévention de la pollution à la source, ainsi que la gestion des produits chimiques. Enfin, si une approche plus préventive fondée sur les risques est nécessaire pour les entités nouvelles, elle l'est également pour l'ensemble des processus du système Terre.

³⁶ Avant 2015, cette limite, intitulée « pollution chimique », couvrait un périmètre plus restreint.

partie 2 : les neuf limites planétaires - introduction d'entités nouvelles dans la biosphère

Tableau 11 : variables de contrôle et limite planétaire pour l'introduction d'entités nouvelles dans la biosphère

Variables de contrôle	Exemples	Situation actuelle
Tendances relatives à la production d'entités nouvelles	Volume de production de produits chimiques	Production mondiale multipliée par au moins 50 entre 1950 et 2015. Elle devrait tripler d'ici 2050 par rapport à 2010.
	Volume de production de plastiques	Augmentation de la production mondiale de 79 % entre 2000 et 2015. La production globale cumulée devrait tripler d'ici 2050.
Tendances relatives au rejet d'entités nouvelles dans l'environnement	Quantité d'émissions de produits chimiques dangereux	Données primaires sur les émissions disponibles pour très peu d'entités nouvelles dans très peu de pays. Tendances à la hausse des émissions, malgré l'amélioration des contrôles d'émissions pour un nombre limité de substances (avec notamment des effets de substitutions).
	Quantités de plastiques rejetés dans l'environnement	Augmentation de 3,8 % des quantités de plastiques rejetés dans l'environnement entre 2014 et 2015. Environ 22 Mt de plastiques rejetées par an dans l'environnement en 2019, dont 6 Mt rejetées vers les milieux aquatiques (OCDE, 2022).
Impacts non désirables des entités nouvelles sur les processus du système Terre	Toxicité de la pollution chimique	Pollution de l'eau douce par le métolachlore (pesticide) et le bisphénol A en Europe.
	Perturbation de l'intégrité de la biosphère par la pollution plastique	De nombreuses preuves des effets physiques et toxicologiques de la pollution plastique, notamment sur la répartition et la sensibilité des espèces.

Source : d'après Persson et al., 2021

LES POLITIQUES ET ACTIONS POUR LUTTER CONTRE LES POLLUTIONS

Bien que les conséquences des entités nouvelles soient parfois peu connues, les pouvoirs publics ont développé des dispositions et réglementations permettant d'en réguler la dissémination. Ces dispositions ont notamment été adoptées en vertu du principe de précaution, qui dispose que les autorités veillent à parer à la réalisation de dommages potentiellement graves et irréversibles pour l'environnement, bien qu'incertains en l'état des connaissances scientifiques, en adoptant notamment des mesures provisoires et proportionnées. En France, ce principe de précaution est inscrit à l'article 5 de la Charte constitutionnelle de l'environnement.

Plastiques

Parmi les entités nouvelles, la lutte contre la pollution plastique constitue aujourd'hui un enjeu politique fort. Au niveau international, des négociations sur un traité international pour mettre fin à la pollution plastique ont débuté en 2022 sous l'égide des Nations unies. Ces négociations pourraient aboutir à la mise en place de mesures volontaires ou contraignantes sur l'ensemble de la chaîne de valeur des plastiques.

Au niveau européen, le Pacte vert a pour objectif de réduire de 50 % les déchets plastiques en mer, et de 30 % les microplastiques libérés dans l'environnement, notamment à travers la mise en œuvre de la directive européenne de 2019 sur les plastiques à usage unique. Une contribution fondée sur la quantité de déchets d'emballages plastiques non recyclés par chaque État membre, couramment appelée « taxe plastique », a également été mise en place au niveau

européen, afin d'inciter les États à réduire cette quantité. Comme le souligne la stratégie européenne pour des textiles durables et circulaires, publiée en 2022 par la Commission européenne, l'atteinte de ces objectifs passe également par l'écoconception de produits comme les textiles, dont le délitement des fibres participe à la pollution aux microplastiques.

En France, la loi anti-gaspillage pour une économie circulaire, publiée en 2020, prévoit la fin de la mise sur le marché des emballages de plastique à usage unique d'ici 2040. Concrètement, les lots de vaisselle jetable et les cotons-tiges en plastique sont interdits à la vente depuis le 1^{er} janvier 2020, les pailles ou les couverts jetables depuis le 1^{er} janvier 2021, et les sachets de thé ou de tisane en plastique non biodégradable depuis le 1^{er} janvier 2022. La loi prévoit également que des objectifs de réduction, réutilisation ou réemploi, et de recyclage soient fixés tous les cinq ans. Trois objectifs ont ainsi été fixés pour 2025 : (1) réduire de 20 % les emballages en plastique à usage unique ; (2) tendre vers 100 % de réduction des emballages en plastique à usage unique « inutiles » ; (3) tendre vers 100 % de recyclage des emballages en plastique à usage unique. Les filières de responsabilité élargie du producteur (REP) contribuent également à l'atteinte de ces objectifs, en rendant les producteurs responsables de la gestion des déchets et de leur prévention. En particulier, les filières « emballages électriques », « produits textiles » ou « équipements électriques et électroniques », dont les déchets sont riches en plastiques, jouent un rôle important dans la lutte contre la pollution plastique.

Substances chimiques et nanomatériaux

Au niveau européen, la mise sur le marché de substances chimiques est régulée par le règlement REACH, acronyme anglais pour « enregistrement, évaluation, autorisation et restriction des substances chimiques », adopté en 2006. Le règlement REACH concerne les substances utilisées dans les procédés industriels et dans les mélanges (produits de nettoyage, peintures, etc.). Ces substances, lorsqu'elles sont fabriquées ou importées à plus de 1 tonne par an, doivent être enregistrées, et être ainsi soumises à une évaluation des risques pour la santé et l'environnement. Si une substance est jugée des plus « préoccupantes » de ce point de vue, son utilisation doit être soumise à une autorisation et un contrôle strict. Si le risque est jugé inacceptable, une substance peut être soumise à restriction, c'est-à-dire que sa production, sa mise sur le marché ou son utilisation sont limitées ou interdites. Le règlement REACH est associé à un règlement relatif à la classification, l'étiquetage et l'emballage des substances chimiques et des mélanges (dit règlement CLP) et d'autres réglementations sectorielles (cosmétiques, textiles, alimentations, etc.).

Le règlement REACH couvre notamment les nanomatériaux, et a clarifié en 2018 les informations à fournir pour les formes nanoparticulaires des substances. Compte tenu de leur taille, ces substances inhalées ou ingérées seraient capables de franchir les barrières biologiques et de migrer dans l'organisme. Néanmoins, comme le soulignent Schwirn *et al.* (2020), des incertitudes persistent sur les moyens d'évaluer de façon robuste les risques environnementaux et toxicologiques des nanomatériaux.

Organismes génétiquement modifiés (OGM)

L'importation, la mise sur le marché et la culture d'OGM sont encadrées au niveau européen. Aujourd'hui, une certaine d'OGM, ainsi que leurs produits dérivés, sont autorisés pour être importés dans l'UE et utilisés dans l'alimentation humaine et animale, contre plus de 200 aux États-Unis. Ainsi, selon l'*International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications* (ISAAA), 70 % des importations destinées à l'alimentation animale dans l'UE en 2019 sont issues de plantes génétiquement modifiées. La réglementation européenne a rendu obligatoire l'étiquetage des OGM et produits dérivés, dès lors que la matière première est génétiquement modifiée. De son côté, la France a introduit en 2008 l'étiquetage « sans OGM » pour les ingrédients d'origine végétale, animale et apicole. Les OGM autorisés à l'importation et à la mise sur le marché dans l'UE sont également autorisés en France pour les mêmes usages.

L'autorisation d'utiliser des OGM dans l'alimentation humaine ou animale n'implique cependant pas que leur culture est autorisée. Ainsi, le maïs MON810 est le seul OGM autorisé pour la culture au niveau européen. En France, la culture des OGM à des fins commerciales est interdite depuis 2008. En

comparaison, aux États-Unis, plus de 120 variétés d'OGM peuvent être cultivées.

Néanmoins, la réglementation relative aux OGM ne s'applique pas aux variétés rendues tolérantes aux herbicides (VRTH) par sélection variétale classique – basée sur le croisement de variétés existantes – ou par mutagenèse aléatoire *in vitro* ou *in vivo* – basée sur l'induction de mutations génétiques non ciblées grâce à des produits mutagènes. D'après les données de l'Anses (2020), en 2017, les VRTH représentaient en France 27 % des surfaces de tournesol et 2 % des surfaces de colza.

Déchets nucléaires

L'énergie nucléaire occupant une place importante dans le mix énergétique français, la France produit d'importantes quantités de déchets radioactifs, dont le stockage à long terme constitue une problématique majeure. Les rayonnements émis par ces déchets représentent le principal risque pour la santé de l'homme, de la faune et des écosystèmes. Ils contiennent également des éléments chimiques pouvant être toxiques. La gestion de ces déchets est encadrée au niveau national par un plan national de gestion des matières et déchets radioactifs, prévu par le cadre réglementaire européen, et révisé tous les trois ans. Ce plan fait le point sur les quantités de déchets existantes et attendues, sur les moyens de stockage associés, et définit les objectifs à atteindre. Pour les déchets radioactifs qui ne peuvent être stockés en surface ou à faible profondeur pour des raisons de sûreté nucléaire ou de radioprotection, le Code de l'environnement retient la solution du stockage géologique profond. C'est l'enjeu du projet Cigéo (Centre industriel de stockage géologique), dont la demande d'autorisation de création a été déposée en janvier 2023.

POUR ALLER PLUS LOIN

- Geyer Roland, 2020. *Plastic Waste and Recycling - Environmental Impact, Societal Issues, Prevention, and Solutions. Chapter 2 - Production, use, and fate of synthetic polymers*, pp. 13-32.
- OCDE, 2022. *Global Plastics Outlook - Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options*.
- Persson *et al.*, 2021. *Outside the Safe Operating Space of the Planetary Boundary for Novel Entities*. *Environmental Science & Technology* 2022 56 (3), 1510-1521.
- Rockström *et al.*, 2009. *A safe operating space for humanity*. *Nature* 461, 472-475 (2009).
- Schwirn *et al.*, 2020. *Environmental Risk Assessment of Nanomaterials in the Light of New Obligations Under the REACH Regulation: Which Challenges Remain and How to Approach Them?*
- Steffen, W. *et al.*, 2015. *Planetary Boundaries: Guiding Human Development on a Changing Planet*. *Science* 347 (6223): 1259855-55.

partie 3

Quelles utilisations du cadre des limites planétaires à l'échelle locale ?

— Cette troisième partie s'intéresse à l'usage qui peut être fait du cadre des limites planétaires à d'autres échelles. Même si ce cadre n'a pas été originellement conçu pour être décliné à des niveaux plus fins, il peut néanmoins se révéler comme un cadre de référence utile pour appréhender l'impact sur l'environnement au sens large, de territoires ou d'activités spécifiques, dans une perspective de développement durable. Deux exemples d'application sont présentés ici : l'un porte sur le portefeuille de produits agroalimentaires d'une entreprise de la grande distribution ; l'autre sur un territoire, celui du schéma de cohérence territoriale (SCoT) du Sud-Loire.



partie 3 : quelles utilisations du cadre des limites planétaires à l'échelle locale ?

LIMITES PLANÉTAIRES ET « DESCENTE D'ÉCHELLE »

La proposition originale des limites planétaires porte sur « le système Terre » et considère la planète dans son entièreté. Selon ses auteurs, « le cadre des limites planétaires n'est pas conçu pour être réduit à l'échelle ou désagrégé à des niveaux plus petits, tels que les nations ou les communautés locales » (Steffen *et al.*, 2015). C'est cependant à l'échelle nationale ou locale que l'action politique se produit le plus souvent.

Plusieurs travaux visent ainsi à traduire la « pensée limites planétaires » en un jeu d'indicateurs faisant écho aux limites planétaires, mais pertinents au niveau local, et parfois mis en lien avec les objectifs de développement durable. La question de la « descente d'échelle » du cadre des limites planétaires, tant au niveau des territoires que d'activités spécifiques, fait l'objet de plusieurs centaines de publications scientifiques depuis 2015.

Un premier groupe de publications, particulièrement fourni, propose des méthodes « d'évaluation absolue de la soutenabilité environnementale » (*Absolute Environmental Sustainability Assessment - AESA*) qui visent à combiner analyse de cycle de vie et limites planétaires pour évaluer la soutenabilité d'une activité donnée (service, produit, ou entreprise, par exemple).

Un second groupe de publications vise à appliquer le cadre des limites planétaires au niveau territorial.

Cette partie décrit dans un premier temps les méthodes d'évaluation absolue de la soutenabilité environnementale, avec une illustration sur le portefeuille alimentaire d'une entreprise de la grande distribution. Dans un second temps, l'application du cadre des limites planétaires à un territoire est présentée à travers l'exemple du territoire du sud du département de la Loire.

L'analyse du cycle de vie (ACV)

L'analyse de cycle de vie est une méthode d'évaluation environnementale qui estime les impacts environnementaux potentiels d'un système (un produit ou un service), assurant une (ou plusieurs) fonction(s), tout au long de son cycle de vie (« du berceau à la tombe »). Cela permet de représenter les pressions générées par les différentes phases du système étudié (fabrication, utilisation, fin de vie) et d'identifier les éventuels transferts d'impacts entre phases ou entre impacts environnementaux.

Cette approche est aujourd'hui couramment utilisée, par des entreprises et des organismes institutionnels, pour mieux connaître les impacts environnementaux générés par un produit ou une filière, ou envisager les conséquences de plusieurs stratégies possibles.

LES MÉTHODES D'ÉVALUATION DE LA DURABILITÉ ENVIRONNEMENTALE ABSOLUE

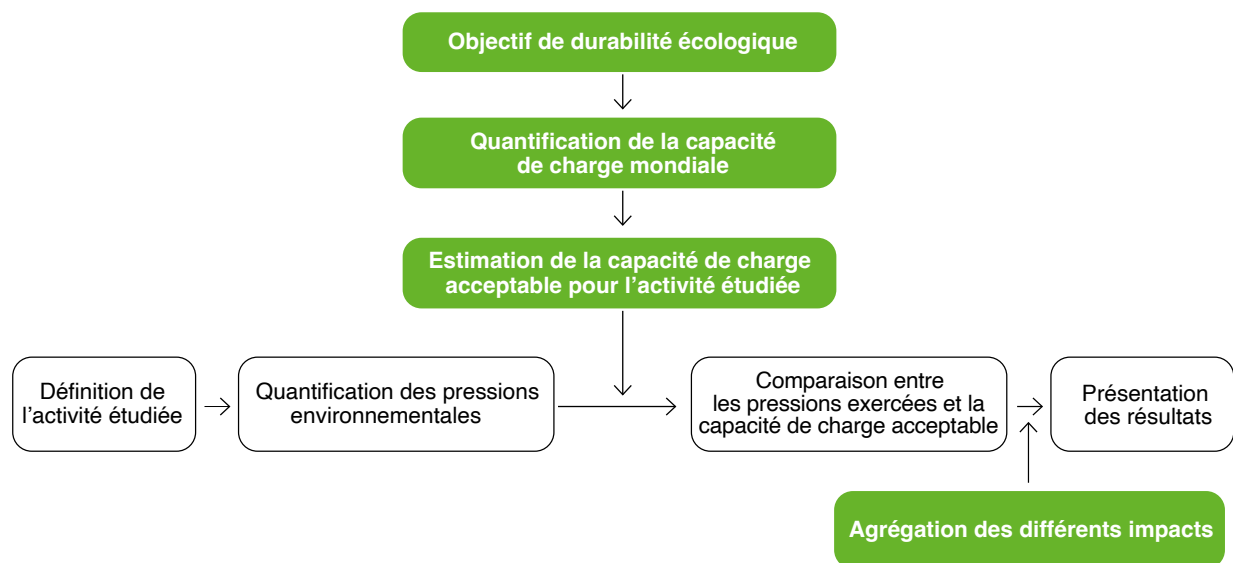
Les méthodes d'évaluation environnementale absolue (AESAs) ont pour objectif d'évaluer si une activité de production ou de consommation donnée est écologiquement soutenable en comparant ses pressions environnementales, estimées par l'analyse de cycle de vie, à une « capacité de charge acceptable » qui peut être assignée à l'activité étudiée,

généralement sur la base du cadre des limites planétaires (Bjørn *et al.*, 2020). Plusieurs méthodes sont actuellement développées à cette fin (*schéma 2*).

La capacité de charge acceptable peut être définie comme l'impact maximum qu'un écosystème peut supporter sans subir une atteinte inacceptable de son intégrité fonctionnelle ou, pour l'utilisation de ressources non renouvelables, comme le rythme auquel des substituts renouvelables peuvent être développés (Bjørn *et al.*, 2020).

partie 3 : quelles utilisations du cadre des limites planétaires à l'échelle locale ?

Schéma 2 : cadre de la méthode d'évaluation absolue de la durabilité environnementale



Source : Bjørn et al., 2019

Les méthodes diffèrent par leurs choix d'indicateurs. Certaines se basent sur les indicateurs d'impacts environnementaux recommandés par la Commission européenne (European Commission, 2010) et déterminent des valeurs de référence qui peuvent être définies comme la « charge environnementale acceptable » qui permettrait de respecter les limites planétaires si toutes les activités humaines appliquaient cette même charge maximale. Cette approche a été proposée par Bjørn et Hauschild (2015) et a été appliquée depuis à de nombreux domaines liés aux activités de production et de consommation, dont la consommation des ménages de l'UE (Sala et al., 2020).

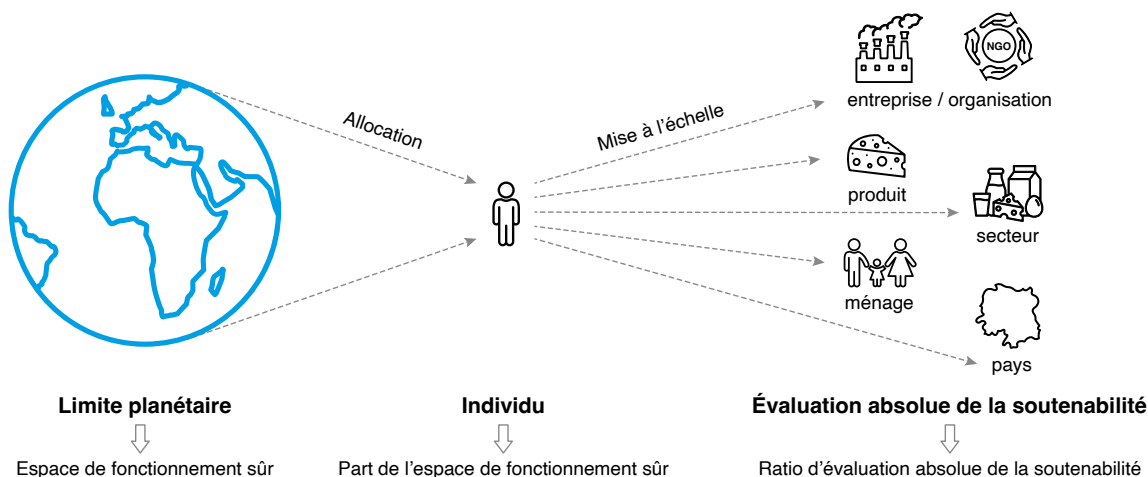
Il apparaît ainsi que la consommation européenne n'est pas soutenable pour plusieurs indicateurs tels que le changement climatique et le changement d'occupation des sols (Sala et al., 2020). Il ne s'agit pas seulement de dire que les consommations finales des Européens génèrent des pressions sur les écosystèmes planétaires, mais de quantifier le niveau de ces pressions par rapport à la capacité maximale des écosystèmes à supporter ces pressions.

Une autre approche consiste à comparer les impacts environnementaux générés par un système donné à la « part de l'espace de fonctionnement sûr » (Share of Space Operating Space – SoSOS) qui peut lui être assignée (Ryberg et al., 2018). Il faut ainsi définir de nouveaux « facteurs de caractérisation » des impacts afin de pouvoir directement comparer les impacts estimés à la part de l'espace de fonctionnement sûr qui peut être attribuée au système étudié. Cette méthode exprime ainsi directement les résultats des analyses de cycle de vie dans les métriques des variables de contrôle des limites planétaires définies par Steffen et al. (2015).

Quelle que soit l'approche AESA, elle nécessite de choisir des principes de partage pour répartir les impacts planétaires entre les différentes activités humaines. Le choix du principe de partage repose sur divers choix éthiques qui doivent être clairement documentés et communiqués. Pour présenter des résultats plus robustes, les études AESA peuvent tester et présenter les résultats en utilisant plusieurs choix de principes de partage (schéma 3).

partie 3 : quelles utilisations du cadre des limites planétaires à l'échelle locale ?

Schéma 3 : processus proposé de descente d'échelle



Source : d'après Hjalsted et al., 2021

Le principe de partage

Le principe de partage est un ratio qui alloue une quantité globale de « budget écologique acceptable » à une échelle inférieure, qui peut être un individu, une entreprise, un territoire, etc. Le choix de ce principe peut être apprécié d'un point de vue technique et éthique.

Techniquement, il s'agit de déterminer des variables socio-économiques qui soient à la fois disponibles aux échelles globales et locales, et qui soient jugées corrélées à la variable environnementale étudiée. Par exemple, le ratio qui rapporte la population locale d'un territoire à la population mondiale est souvent retenu pour une allocation des limites planétaires à un système territorial car il répond aux deux critères techniques : les données de population sont disponibles aux deux échelles, locale et globale, et plus la population d'un territoire est élevée, plus ses pressions augmentent (sans que l'augmentation ne soit nécessairement proportionnelle).

Autre exemple, pour un système industriel, on estimera que la part du secteur économique auquel appartient ce système dans la valeur ajoutée générée par l'ensemble des secteurs est un bon proxy pour qualifier le poids de ce système dans l'offre économique (du côté de la demande, on pourra utiliser la ventilation des dépenses finales de consommation par secteur économique). Il est également possible d'utiliser plusieurs ratios successivement.

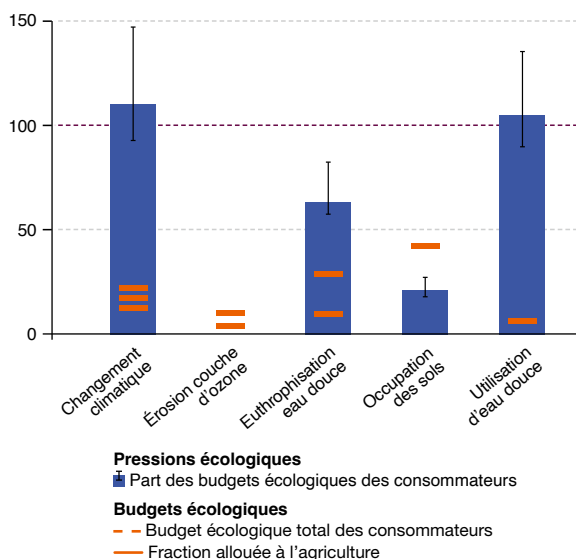
Outre le choix de la variable à retenir pour l'allocation, se pose la question du principe de justice qui sous-tend l'utilisation d'un tel ratio (Ryberg *et al.*, 2020). La majorité des publications ont recours à un principe d'égalitarisme : la dotation des sous-systèmes est proportionnelle à leur poids dans la variable d'allocation retenue (pour les pays, leur population par exemple). D'autres principes sont parfois utilisés, comme l'équité, qui consiste à favoriser davantage les plus démunis dans l'allocation de la capacité de charge globale (par exemple, pour pénaliser les pays responsables des émissions historiques de gaz à effet de serre, des quotas moins que proportionnels à leur taille leur sont attribués).

UN EXEMPLE D'APPLICATION AU PORTEFEUILLE DE PRODUITS AGROALIMENTAIRES D'UNE ENTREPRISE DE LA GRANDE DISTRIBUTION

Le cadre des limites planétaires a été mobilisé par exemple pour estimer les pressions exercées par la production des produits agricoles, allant de l'extraction des matières premières mobilisées à la sortie de ferme (c'est-à-dire sans prendre en compte la préparation industrielle des produits vendus). Les produits agricoles analysés ici sont les produits alimentaires sortant des entrepôts d'une entreprise de grande distribution, sur une période d'un an (Wolff *et al.*, 2017) - (graphique 18).

Graphique 18 : identification des pressions exercées à des niveaux insoutenables par la production agricole des produits alimentaires vendus par le distributeur

En % du budget écologique des consommateurs



Source : d'après Wolff *et al.*, 2017

Le graphique 18 représente les impacts environnementaux liés à la production, à la sortie de la ferme, des matières premières qui composent l'ensemble des produits alimentaires vendus en un an par une entreprise de la grande distribution. Les barres bleues représentent les impacts estimés pour un « panier alimentaire annuel moyen », ramené au « budget écologique maximal » qui peut être attribué à chaque personne pour respecter collectivement la frontière planétaire. Le trait noir vertical représente la marge d'incertitude associée à

l'estimation de ces impacts. Le pointillé rouge représente le budget écologique total pouvant être considéré comme « acceptable » en 2018, pour respecter les limites planétaires si tous les habitants de la planète rejetaient les mêmes quantités d'émissions.

Une barre bleue supérieure à 100 % (comme pour le changement climatique, par exemple) signifie que la fabrication des ressources agricoles mobilisées pour fabriquer les produits alimentaires vendus dépassent le « budget » d'émissions (ou la capacité de charge maximale) par personne qui permettrait de respecter les limites planétaires.

Ce « budget écologique » devant servir non seulement à se nourrir mais aussi à se loger, se déplacer..., il est intéressant d'essayer d'approcher le « budget écologique » des consommateurs qui peut être attribué à l'alimentation. Pour cela, figure également la part de l'agriculture dans les émissions passées, pour chaque catégorie d'impacts, représentée par les traits horizontaux en orange (les différents traits correspondent aux valeurs minimales et maximales de différentes sources de données possibles). Il apparaît ainsi que pour le changement climatique, l'eutrophisation et l'utilisation de l'eau douce, les pressions générées par la production agricole du « panier alimentaire annuel moyen » dépassent largement le « budget écologique » des consommateurs qui peut être attribué à l'alimentation.

L'APPLICATION DU CADRE DES LIMITES PLANÉTAIRES À UN TERRITOIRE : L'EXEMPLE DU SCOT SUD-LOIRE

Le territoire est un autre objet d'application intéressant, en tant qu'arène où se prennent des décisions pouvant impacter notre capacité à respecter ou non, les limites planétaires (choix d'aménagement du territoire, rénovation thermique des logements, incitations économiques et industrielles, par exemple).

Epures, l'agence d'urbanisme de la région stéphanoise, s'est ainsi intéressée à la territorialisation du cadre des limites planétaires à l'échelle du schéma de cohérence territoriale (SCoT) du Sud-Loire. Ce territoire se compose de quatre établissements publics de coopération intercommunale (EPCI) : Saint-Étienne Métropole, la Communauté de communes des Monts du Pilat, la Communauté d'agglomération Loire-Forez-Agglomération et la Communauté de communes de Forez-Est, représentant ainsi 198 communes et 600 000 habitants, pour une surface de 300 000 hectares.

Un territoire peut être considéré comme une « étendue sur laquelle vit un groupe humain » (Paquot, 2011). Cette double identité a son importance pour l'évaluation environnementale. « L'étendue » est un espace relativement bien défini administrativement, mais qui peut être amené à évoluer lors de modifications administratives (ajout ou retrait de communes dans le périmètre du SCoT, par exemple).

partie 3 : quelles utilisations du cadre des limites planétaires à l'échelle locale ?

Cet espace présente une certaine vulnérabilité face aux changements planétaires qui ne sont pas répartis uniformément dans le monde. La territorialisation du cadre des limites planétaires peut donc porter sur l'identification de cette vulnérabilité. Le groupe humain qui vit sur le territoire considéré exerce quant à lui des activités qui génèrent des impacts contribuant à l'atteinte des limites planétaires. La territorialisation de ces limites à l'échelle d'un territoire peut ainsi consister à estimer la contribution du territoire à l'atteinte des limites planétaires pour identifier les enjeux environnementaux et alerter les décideurs locaux afin d'y répondre au mieux dans les politiques qu'ils ont en charge.

C'est principalement ce deuxième axe qui a été envisagé dans le cadre de l'étude exploratoire, menée conjointement par Epures, le SCoT Sud-Loire et Mines Saint-Étienne (Epures, 2021).

Ce travail a nécessité :

- d'une part, de décliner les seuils exprimés à l'échelle planétaire à une échelle locale : soit en exploitant directement les indicateurs utilisés par le cadre original des limites planétaires (Steffen *et al.*, 2015), soit en s'appuyant sur les indicateurs développés par d'autres travaux de territorialisation à des échelles locales (souvent nationales) ;
- d'autre part, de recueillir les données locales permettant de quantifier les pressions et les capacités de charge : selon la limite considérée (associée à un phénomène écologique), la capacité de charge peut correspondre (1) à une part de la capacité de charge globale ou (2) à un seuil de vulnérabilité propre au fonctionnement local des écosystèmes. Le système local d'observation environnementale n'étant pour l'instant pas orienté sur la mesure des capacités de charge locales, c'est la modalité (1) qui a été retenue.

La contribution des impacts des activités humaines menées sur le territoire a été estimée au regard de huit limites planétaires (la limite « entités nouvelles » n'ayant pas encore été quantifiée au niveau planétaire au moment de l'étude). Une représentation a été proposée en vue de montrer si la contribution du territoire permet de rester dans « l'espace de fonctionnement sécurisé » ou si, au contraire, le territoire contribue à un dépassement de la frontière.

La démarche peut être illustrée par le traitement de la limite relative à la perturbation du cycle de l'azote.

Un problème environnemental est une chaîne causale qui peut s'observer à chacun de ses maillons : les activités humaines (*drivers*) génèrent des pressions (*pressures*) qui entraînent un état de dégradation environnementale (*state*) se traduisant par des vulnérabilités locales (*impacts*) et appelant *in fine* des actions qui portent sur les activités concernées (responses)³⁷. Pour ce qui est de l'azote, l'état de dégradation peut être exprimé par la manifestation d'épisodes d'eutrophisation, et la pression principale en est l'apport excessif d'engrais aux sols agricoles (en partie fixés par les cultures, mais l'excès est emporté dans les réservoirs d'eau douce par ruissellement).

Des épisodes d'eutrophisation des milieux aquatiques sont fréquemment observés sur le territoire du Sud-Loire, mais ils ne font pas l'objet d'un suivi officiel, ni de mesures systématiques là où le problème émerge. Le relevé des niveaux de concentration en nitrates et phosphates des cours d'eau est en effet seulement évalué sur des critères de potabilité et non des critères de qualité écologique. Si les problèmes d'eutrophisation chronique sur le territoire traduisent bien le dépassement local des capacités de charge hydrologiques, les connaissances manquent sur ce que les hydrosystèmes locaux sont capables de supporter. La charge maximale que les hydrosystèmes sont capables d'admettre dépend en effet de l'hydromorphologie (vitesse et débit d'écoulement) et de l'hydrogéologie du cours d'eau (nature du lit et des interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines), propres à chaque site.

L'absence de données précises justifie de ne pas considérer, pour la détermination de cette limite, l'état environnemental local, et de privilégier les pressions exercées sur le territoire par l'apport de fertilisants.

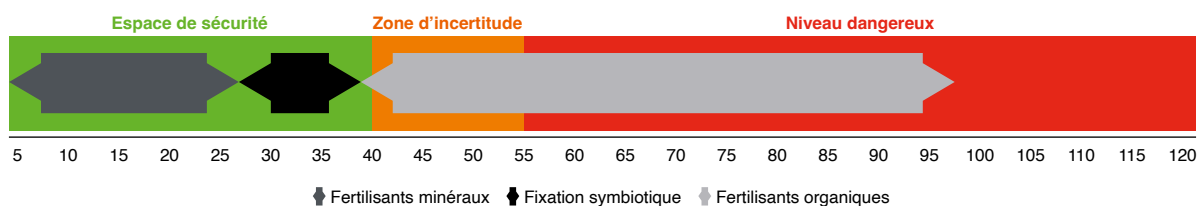
Le graphique 19 illustre la représentation proposée pour les émissions d'azote dans les eaux douces, associées à l'usage en agriculture de fertilisants minéraux (engrais et amendements de synthèse) et organiques (fumier, lisier) ainsi que de cultures permettant une fixation symbiotique (légumineuses, par exemple). Ces émissions ont été estimées avec le modèle CASSIS-N proposé par le département Géosciences de l'Université de Tours (Poisvert *et al.*, 2016).

³⁷ Cette chaîne causale est connue sous l'acronyme anglo-saxon de DPSIR.

partie 3 : quelles utilisations du cadre des limites planétaires à l'échelle locale ?

Graphique 19 : représentation de l'intensité de perturbation du cycle de l'azote dans le SCot Sud-Loire

En kg d'azote/ha/an



Note de lecture : les apports annuels (pour l'année 2018) en azote fixé symbiotiquement (par les cultures de légumineuses notamment) s'élèvent à 13 kg par hectare, et les apports par intrants chimiques (azote dit minéral) contribuent à hauteur de 26 kg par hectare, ces chiffres étant estimés à partir des types de cultures présents en Sud-Loire. Le cadre des limites planétaires de 2015 n'inclut pas les apports organiques, car ils sont jugés négligeables par rapport aux apports symbiotiques et minéraux à l'échelle du globe. Leur prise en compte sur le territoire du Sud-Loire est cependant déterminante pour comprendre les surcharges azotées dans l'environnement local, en particulier le système hydrographique qui souffre d'eutrophisation par endroit. En prenant en compte cet apport organique dominant sur le territoire, et qui s'explique par un système cultural principalement tourné vers l'élevage, le territoire dépasse la zone d'incertitude associée à la limite locale sur le cycle de l'azote.

Source : modèle CASSIS-N avec données du RPG 2018

L'apport en azote sur le territoire est détaillé pour chaque source d'intrant : la fertilisation minérale correspond aux apports réalisés à partir de produits chimiques commerciaux, la fertilisation symbiotique est apportée par les cultures capables de synthétiser l'azote (e.g. les légumineuses), et la fertilisation organique provient de la réutilisation des lisiers et composts.

Les auteurs du cadre des limites planétaires recommandent de se concentrer sur les apports minéraux et symbiotiques, majoritaires à l'échelle globale et plus facilement estimables en général (pour estimer les apports de fertilisants organiques, il est nécessaire de connaître la taille et la nature des cheptels). La spécificité du système agricole sud-ligérien, dans lequel l'élevage est très présent, se traduit toutefois par un apport principal en fertilisants organiques (issus des excréments animaliers). Ainsi, même en supprimant l'utilisation de fertilisants minéraux et la culture de plantes à fixation symbiotique, l'apport en fertilisants organiques est tel que le territoire du Sud-Loire pourrait continuer à contribuer au niveau dangereux de la limite planétaire sur l'azote et le phosphore.

D'autres pressions conduisant à l'eutrophisation pourraient être prises en compte, comme la hausse des températures, liée au changement climatique, ou les autres sources de pollution à l'azote et au phosphore (eaux usées de l'industrie et des logements, bien qu'abattues en stations d'épuration). De plus, le réseau hydrographique du territoire ne s'arrête pas à ses limites administratives, de telle sorte que les pressions du territoire administratif ne sont pas les seules à contribuer à l'état de dégradation aquatique, les apports de fertilisants par le bassin-versant de la Loire amont (Ardèche

et Haute-Loire) jouant également un rôle important, de même que le territoire du Sud-Loire contribue aux pressions de la Loire aval (Saône-et-Loire, Allier).

Le seuil maximal admissible par les sols agricoles du territoire a ainsi été défini en attribuant au territoire une part du seuil global proportionnelle à l'importance de la superficie agricole du territoire dans la superficie agricole globale (il s'agit donc d'une allocation de la capacité de charge globale selon un principe de partage, et non d'une limite écologiquement et localement construite). Les pressions ont pour leur part été évaluées par des modèles agronomiques estimant l'apport d'azote en fonction des types de cultures sur le territoire.

En définitive, l'exercice présente une dimension pédagogique en permettant de disposer de point de comparaison (à partir des pressions exercées par un territoire donné) ; il permet également de mettre en exergue certaines insuffisances des systèmes locaux d'observation environnementale en proposant un cadre d'observation plus transversal, complémentaire aux indicateurs traditionnellement suivis à l'échelle locale. Il montre également l'intérêt de réorienter le système d'observation du suivi de la qualité des eaux vers une mesure conjointe des pressions (concentrations en nitrates et phosphates) et des capacités de charge pour disposer d'indicateurs de soutenabilité absolue territorialisés.

Le *tableau 12* présente le bilan proposé pour les différentes limites sur le territoire. Plus que les résultats de l'évaluation (ceux-ci méritant d'être approfondis et confirmés), c'est le cadre ainsi proposé et la mise en évidence de la fiabilité des données pouvant être mobilisées pour faire l'exercice qui constituent les principaux intérêts de cette première étude exploratoire.

partie 3 : quelles utilisations du cadre des limites planétaires à l'échelle locale ?

Tableau 12 : bilan des différentes limites planétaires à l'échelle mondiale et du SCoT Sud-Loire et de la qualité du système d'observation local

Limites planétaires	Échelle planétaire	Échelle Sud-Loire	Fiabilité des données mobilisées
Le changement climatique	Zone d'incertitude	Niveau dangereux	Bonne
L'érosion de la biodiversité	Niveau dangereux	Zone d'incertitude	Moyenne
La perturbation du cycle de l'eau douce	Espace de sécurité	Zone d'incertitude	Faible
La perturbation du cycle du phosphore	Niveau dangereux	Non évalué	Faible
La perturbation du cycle de l'azote	Niveau dangereux	Zone d'incertitude	Moyenne
L'atteinte de la couche d'ozone	Espace de sécurité	Espace de sécurité	Bonne
La diminution du couvert végétal	Zone d'incertitude	Non évalué	Moyenne
L'augmentation des particules en suspension dans l'air	Non évalué	Espace de sécurité à niveau dangereux	Bonne

Source : Epures, Mines Saint-Etienne, 2021. Quelle participation du Sud Loire à l'atteinte des limites planétaires ?

Remarquons enfin que certaines limites planétaires peuvent sembler proches de ce qui est déjà pris en compte dans les politiques environnementales portées au niveau local. Toutefois, si l'objet étudié (eau, biodiversité, changement climatique, par exemple) est souvent similaire, l'approche est généralement différente.

La limite « changement climatique » est sans doute la limite la plus proche des objectifs déjà portés par le plan climat-air-énergie territorial (PCAET). En effet, ce plan vise à décliner la stratégie nationale bas-carbone (SNBC), laquelle s'appuie sur un objectif de neutralité carbone conforme aux Accords de Paris, avec lequel le cadre des limites planétaires est lui aussi conforme.

En revanche, les objectifs des autres politiques environnementales locales sont plus éloignés de la démarche « limites planétaires ». Par exemple, au titre de la biodiversité, les contrats de corridors écologiques définis sur le territoire

Sud-Loire consistent à restaurer ou maintenir des continuités spatiales entre « espaces naturels ». L'objectif s'appuie donc sur les réservoirs et continuités existants et non pas sur les capacités de charge écosystémiques (approche limites planétaires). Or, maintenir un certain niveau de continuité ne garantit pas que le territoire ne dépasse pas sa contribution maximale à la perte de richesse et d'abondance des espèces à l'échelle globale.

En définitive, l'application à l'échelle locale du cadre des limites planétaires peut présenter des perspectives intéressantes, tant en matière de recherche que d'aide à la décision. Même si elle suppose de nombreuses hypothèses pour décliner un cadre d'analyse initialement conçu au niveau mondial, elle peut favoriser une prise de conscience plus précise et transversale de l'impact des décisions prises au niveau local sur les impacts globaux et « le système Terre ».

partie 3 : quelles utilisations du cadre des limites planétaires à l'échelle locale ?

POUR ALLER PLUS LOIN

- Bjørn, A., Chandrakumar, C., Boulay, A.-M., Doka, G., Fang, K., Gondran, N., Hauschild, M.Z., Kerkhof, A., King, H., Margni, M., McLaren, S., Mueller, C., Owsianiak, M., Peters, G., Roos, S., Sala, S., Sandin, G., Sim, S., Vargas-Gonzalez, M., Ryberg, M., 2020. *Review of life-cycle based methods for absolute environmental sustainability assessment and their applications*. Environ. Res. Lett. 15, 083001.
- Bjørn, A., Hauschild, M.Z., 2015. *Introducing carrying capacity-based normalisation in LCA: framework and development of references at midpoint level*. Int. J. Life Cycle Assess. 20, 1005–1018.
- Bjørn, A., Richardson, K., Hauschild, M.Z., 2019. *A Framework for Development and Communication of Absolute Environmental Sustainability Assessment Methods*. J. Ind. Ecol. 23, 838–854.
- Epures, 2021. *Quelle participation Sud Loire à l'atteinte des limites planétaires ?*
- European Commission, 2010. *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook*. Joint Research Center.
- Hjalsted, A.W., Laurent, A., Andersen, M.M., Olsen, K.H., Ryberg, M., Hauschild, M., 2021. *Sharing the safe operating space: Exploring ethical allocation principles to operationalize the planetary boundaries and assess absolute sustainability at individual and industrial sector levels*. J. Ind. Ecol. 25, 6–19.
- Paquot, T., 2011. *Qu'est-ce qu'un « territoire » ?* Vie sociale n° 2, pp. 23 à 32.
- Poisvert, C., Curie, F., Gassama, N., 2016. *Évaluation des pressions azotées*.
- Ryberg, M.W., Owsianiak, M., Richardson, K., Hauschild, M.Z., 2018. *Development of a life-cycle impact assessment methodology linked to the Planetary Boundaries framework*. Ecol. Indic. 88, 250–262.
- Sala, S., Crenna, E., Secchi, M., Sanyé-Mengual, E., 2020. *Environmental sustainability of European production and consumption assessed against planetary boundaries*. J. Environ. Manage. 269, 110686.
- Wolff, A., Gondran, N., Brodhag, C., 2017. *Detecting unsustainable pressures exerted on biodiversity by a company. Application to the food portfolio of a retailer*. J. Clean. Prod. 166, 784–797.

Cette partie a été rédigée par :

• **Natacha GONDRAN**

Mines Saint-Étienne, Université de Lyon, CNRS, Université Jean Monnet, Université Lumière Lyon 2, Université Lyon 3 Jean Moulin, ENS Lyon, ENTPE, ENSA Lyon, UMR 5600 EVS, Institut Henri Fayol, F-42023 Saint-Étienne France

• **Quentin DASSIBAT**

En contrat doctoral de l'École urbaine de Lyon, Université de Lyon. Ce travail a bénéficié de l'aide de l'État gérée par l'Agence nationale de la recherche au titre du programme d'Investissements d'avenir portant la référence ANR-17-CONV-0004

• **Maud MARSAUCHE**

Epures, agence d'urbanisme de la région stéphanoise

Annexes

- Révision 2023 du cadre des neuf limites planétaires
- Glossaire
- Sigles et abréviations
- Symboles chimiques et unités de mesure



Révision 2023 du cadre des neuf limites planétaires

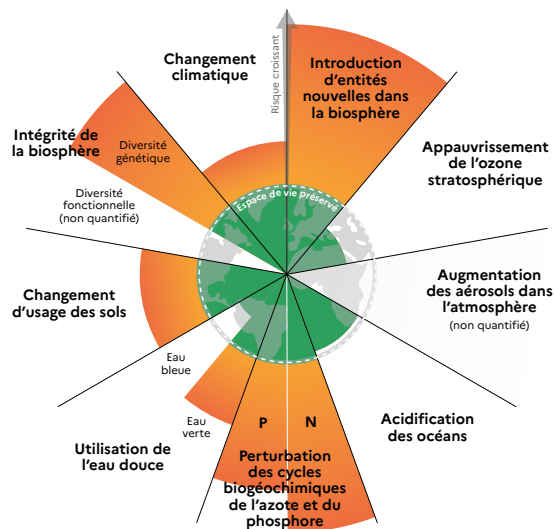
En septembre 2023, le *Stockholm Resilience Centre* a publié une actualisation du cadre conceptuel des neuf limites planétaires proposé en 2009 (Rockström *et al.*) et révisé en 2015 (Steffen *et al.*). Pour la première fois, les neuf limites planétaires sont quantifiées (Richardson *et al.*³⁸, 2023). De nouvelles variables de contrôle sont affectées à quatre limites (intégrité de la biosphère/diversité fonctionnelle, cycle de l'eau douce/eau bleue, aérosols dans l'atmosphère, entités nouvelles), venant révéler ou confirmer leur franchissement (*schéma 2*). Le niveau de dépassement augmente pour toutes les limites précédemment considérées dépassées (*schéma 1*).

Les scientifiques établissent que six des neuf limites planétaires sont désormais dépassées : le changement climatique, l'intégrité de la biosphère, la perturbation des

cycles biogéochimiques de l'azote et du phosphore, le changement d'usage des sols, l'utilisation de l'eau douce, et l'introduction d'entités nouvelles. Cela signifie que la planète se trouve dorénavant bien au-delà de l'espace de fonctionnement sûr pour l'humanité.

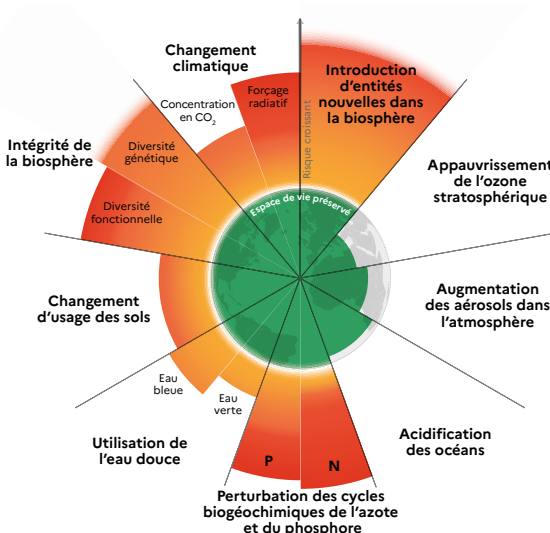
Le tableau suivant présente les neuf limites planétaires avec les variables de contrôle qui leur sont affectées, leur valeur de référence préindustrielle, les seuils à ne pas dépasser et leurs valeurs actuelles issues de la dernière publication du *Stockholm Resilience Centre* de septembre 2023. Celles-ci sont juxtaposées aux anciennes variables et valeurs connues précédemment et utilisées dans la présente publication (version de début 2023).

Schéma 1 : les neuf limites planétaires du cadre de 2015 actualisé en 2022



Sources : Steffen *et al.*, 2015 ; Personn *et al.*, 2021 ; Wang-Erlandsson *et al.*, 2022

Schéma 2 : les neuf limites planétaires du cadre de 2023



Source : Richardson *et al.*, 2023

³⁸ Richardson K. *et al.*, 2023. Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Sciences Advances*. Vol. 9, Issue 37.

annexes

Processus du système Terre	Variable de contrôle	Valeur de référence, ère préindustrielle (Holocène)	Zone de risque croissant - Frontière planétaire seuil bas- seuil haut		Valeur actuelle de la variable de contrôle	
			Version début 2023, utilisée pour cette publication	Version du 13 septembre 2023	Connue début 2023 et utilisée pour cette publication	Publiée le 13 septembre 2023
Changement climatique	Concentration de CO ₂ dans l'atmosphère en partie par million (ppm)	280 ppm CO ₂	350 à 450 ppm CO ₂	idem	425 ppm CO ₂	417 ppm CO ₂
	Augmentation du forçage radiatif en watt par mètre carré (W/m ²) par rapport à l'ère préindustrielle	0 W/m ²	+ 1,0 à + 1,5 W/m ²	idem	+ 2,72 W/m ²	+ 2,91 W/m ²
Intégrité de la biosphère	Diversité spécifique : taux d'extinction sur 1 million d'espèces par an (E/MEA)	1 E/MEA	10 à 100 E/MEA	idem	> 100 E/MEA	idem
	Diversité fonctionnelle : indice d'intégrité de la biodiversité (IIB) par rapport à l'ère préindustrielle, en %	100 %	90 à 30 % pour les biomes, grandes zones régionales, principaux écosystèmes marins ou grands groupes fonctionnels	Variable abandonnée	77 %	Variable abandonnée
	Diversité fonctionnelle : énergie disponible pour les écosystèmes à travers la part de la production primaire nette annuelle de la biosphère (PPN exprimée en giga tonnes de carbone par an - Gtde C/an) accaparée par l'homme (HANPP exprimé en % de la PPN préindustrielle)	1,9 % de la production primaire nette de la biosphère (estimée à 55,9 Gtde C/an) est prélevée par l'homme	Non spécifiée car nouvelle variable proposée avec la révision du cadre en septembre 2023	10 à 20 % HANPP (de 10 % à 20 % de la production primaire nette de la biosphère est prélevée par l'homme)		30 % HANPP (16,8 Gtde C/an prélevées en 2020 / 55,9 Gtde C/an produites en moyenne avant l'ère préindustrielle)
Ozone stratosphérique	Concentration d'ozone dans l'atmosphère mesurée en unités Dobson (DU)	290 DU	275 DU (276 DU correspond à 5 % de réduction de la valeur préindustrielle évaluée par latitude)	276 à 261 DU	285 DU	284,6 DU
Acidification des océans	État de saturation de l'eau de mer de surface en aragonite (% de la valeur préindustrielle) - (Ω _{arag})	3,44 Ω _{arag}	80 % à 70 % de l'état de saturation de l'eau de mer de surface en aragonite lors de l'ère préindustrielle (soit 2,75 à 2,4 Ω _{arag})	2,75 Ω _{arag}	2,9 Ω _{arag} (soit 84 %)	2,8 Ω _{arag}



annexes

>>>

Processus du système Terre	Variable de contrôle	Valeur de référence, ère préindustrielle (Holocène)	Zone de risque croissant - Frontière planétaire seuil bas- seuil haut		Valeur actuelle de la variable de contrôle	
			Version début 2023, utilisée pour cette publication	Version du 13 septembre 2023	Connue début 2023 et utilisée pour cette publication	Publiée le 13 septembre 2023
Cycles azote et phosphore	Échelle mondiale : quantité de phosphate émis par les systèmes d'eau douce vers les océans, en millions de tonne (Mt) par an	0 Mt/an	11 à 100 Mt/an	idem	22 Mt/an	22,6 Mt/an
	Échelle régionale : quantité de phosphate dans les engrais épandus sur les sols agricoles, en Mt par an		6,2 à 11,2 Mt/an	idem	14,2 Mt/an	17,5 Mt/an
	Quantité d'azote réactif rejeté par les activités humaines en Mt par an, à l'échelle mondiale	0 Mt/an	62 à 82 Mt/an	idem	150 Mt/an	190 Mt/an
Changement d'usage des sols	Échelle mondiale : rapport entre la superficie forestière actuelle et la superficie forestière « originelle » (avant 1700) Biome : rapport entre la superficie forestière actuelle du biome et la superficie forestière « originelle » du biome (avant 1700)	100 %	Global : 75 à 54 % (moyenne pondérée des trois limites de biomes individuels) Biomes : Tropical 85 à 60 % ; Tempéré 50 à 30 % ; Boréal 85 à 60 %	idem	Global : 62 % Tempéré : 50 % Tropical et boréal : 68 %	Global : 60 % Tropical : Amériques (83,9 %) ; Afrique (54,3 %) ; Asie (37,5 %). Tempéré : Amériques (51,2 %) ; Europe (34,2 %) ; Asie (37,9 %). Boréal : Amériques (56,6 %) ; Eurasie (70,3 %).
Utilisation de l'eau douce	Eau bleue - Global : volume total d'eau douce consommé, prélevé dans les eaux de surface et souterraines renouvelables Eau bleue - Local : un seuil maximal de prélèvement de l'eau douce est proposé à l'échelle des bassins-versants et en fonction du régime hydrologique saisonnier		Global : 4 000 à 6 000 km ³ /an Local : 25 % en période de basses eaux (25-55 %) 40 % en période intermédiaire (40-70 %) 55 % en période de hautes eaux (55-85 %)	Variable abandonnée	2 600 km ³ d'eau douce consommée par an	Variable abandonnée La dernière estimation de la consommation d'eau douce mondiale serait plutôt de 1 700 km ³ .
	Eau bleue : perturbations d'origine humaine des écoulements Limite supérieure (95 ^e percentile) de la surface terrestre mondiale avec des écarts supérieurs à la période préindustrielle	9,4 % (moyenne de la période préindustrielle)	Non spécifiée car nouvelle variable proposée avec la révision du cadre en septembre 2023	10,2 % à 50 % (valeur du seuil haut provisoire)		18,2 %
	Eau verte : % de la surface terrestre libre de glace dans laquelle l'humidité du sol de la zone racinaire s'écarte de la variabilité naturelle observée au cours des 11 000 dernières années	9,8 % (moyenne de la période préindustrielle)	10 % (pas de seuil haut précisé)	11,1 % à 50 % (valeur du seuil haut provisoire)	18 % (valeur provisoire)	15,8 %

>>>



annexes



>>>

Processus du système Terre	Variable de contrôle	Valeur de référence, ère préindustrielle (Holocène)	Zone de risque croissant - Frontière planétaire seuil bas- seuil haut		Valeur actuelle de la variable de contrôle	
			Version début 2023, utilisée pour cette publication	Version du 13 septembre 2023	Connue début 2023 et utilisée pour cette publication	Publiée le 13 septembre 2023
Aérosols	Profondeur ou épaisseur optique d'aérosols (AOD)		Aucun seuil planétaire défini, en l'absence de connaissances suffisantes Cas pilote : zone Asie du Sud-Est : 0,25 à 0,5 AOD	Variable abandonnée	Cas pilote : Asie du Sud-Est 0,3 AOD	Variable abandonnée
	Différence interhémisphérique dans l'épaisseur optique d'aérosols (AOD)	0,03	Non spécifiée car nouvelle variable proposée avec la révision du cadre en septembre 2023	0,1 à 0,25		0,076
Entités nouvelles	Pourcentage de produits chimiques synthétiques rejetés dans l'environnement sans tests de sécurité adéquats	0	Non spécifiée	0 à ? (seuil haut non défini)		Dépassé



Glossaire

Anthropique : relatif aux activités humaines (industrie, agriculture, etc.).

Aragonite : minéral composé de carbonate de calcium naturel de formule CaCO_3 . L'aragonite se distingue de la calcite par son système cristallin.

Azote réactif : une des formes de l'azote (diazote, nitrate, nitrite, ammoniac, azote organique).

Bassin-versant : aire d'alimentation d'un cours d'eau ou d'un lac, délimitée par des lignes de partage des eaux. Les résultats sont présentés ici à l'échelle des sous-bassins hydrographiques définis pour répondre à la directive européenne (2000/60/CE) établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau, dite « directive-cadre sur l'eau » (DCE).

Bilan radiatif de la Terre : bilan des rayonnements solaires entrant et sortant de l'atmosphère.

Biocapacité : capacité des écosystèmes à fournir des matières biologiques utiles et à assimiler des déchets générés par les hommes en utilisant les modes de gestion et les technologies d'extraction existantes (définition du *Global Footprint Network*).

Biomasse : matière organique, non fossile, d'origine biologique, pouvant être utilisée comme matière première biogène dans l'approvisionnement alimentaire ou dans d'autres produits, ou encore, servir de combustible pour produire de la chaleur ou de l'électricité.

Biome : unité écologique de très vaste étendue, recouvrant une fraction d'un ou de plusieurs continents, et caractérisée par un même climat et un ensemble d'espèces végétales et animales qui lui sont spécifiques, comme la toundra, la forêt tropicale humide ou encore la savane.

Budget carbone : estimation des émissions mondiales nettes de CO_2 d'origine anthropique cumulées depuis la période préindustrielle, jusqu'à atteindre un niveau d'émissions nettes nul qui conduirait à limiter le réchauffement climatique à un niveau donné (2 °C par exemple), tout en tenant compte de l'impact des émissions anthropiques d'autres GES. Par extension, estimation de la quantité de CO_2 qu'il est encore possible d'émettre avec le même objectif de limitation du réchauffement climatique, compte tenu du cumul des émissions anthropiques de CO_2 depuis le début de la période industrielle.

Carbonate : en chimie, c'est un sel de l'acide carbonique, caractérisé par la présence de l'ion carbonate, CO_3^{2-} . Associé au calcium, le carbonate de calcium est le constituant essentiel des coquilles et des squelettes des animaux marins, y compris les coraux durs, avec le carbonate de magnésium.

Cycadales : végétal appartenant à la famille des gymnospermes (plantes vasculaires qui produisent des graines non protégées par un fruit) qui se caractérise principalement par sa morphologie ressemblant à celle des palmiers ou des fougères arborescentes.

Cycle biogéochimique de l'azote : cycle qui décrit la succession des modifications subies par les différentes formes de l'azote neutre en formes réactives (diazote, nitrate, nitrite, ammoniac, azote organique) et vice-versa.

Cycle biogéochimique du phosphore : contrairement aux autres cycles biogéochimiques majeurs (azote, carbone), le cycle du phosphore ne possède pas de composante gazeuse et n'affecte pratiquement pas l'atmosphère. C'est donc un élément limitant pour de nombreux écosystèmes terrestres, faute de réservoir atmosphérique.

Écosystème : unité écologique fonctionnelle regroupant un ensemble de populations animales et végétales en interaction constante au sein d'un ou plusieurs habitats naturels ou semi-naturels.

Empreinte carbone : indicateur estimant la quantité de gaz à effet de serre émise par une population pour satisfaire sa consommation au sens large (biens, services, utilisation d'infrastructures), en tenant compte des émissions liées aux importations et aux exportations. L'empreinte carbone de la France permet d'apprécier les pressions globales sur le climat de la demande intérieure française quelle que soit l'origine géographique des émissions. Elle résulte d'un calcul propre au ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires. Elle porte sur la France métropolitaine plus les territoires d'outre-mer appartenant à l'Union européenne et tient compte de trois gaz à effet de serre : le CO_2 , le CH_4 et le N_2O .

Empreinte écologique : surface biologiquement productive de terre et d'eau dont un individu, une population ou une activité a besoin pour produire les ressources qu'elle consomme et absorber les déchets qu'elle génère (définition du *Global Footprint Network*).

Espèce endémique : espèce dont l'ensemble des populations ne se trouve que dans ce territoire. La notion d'endémisme est donc indissociable d'une zone géographique donnée. Par exemple, l'iguane des Petites Antilles (*Iguana delicatissima*) vit exclusivement dans les Petites Antilles, rencontré nulle part ailleurs sur Terre.

Espèce inféodée : espèce liée très fortement à un organisme ou à un milieu et qui peut difficilement vivre sans celui-ci.

Eutrophisation : enrichissement excessif des cours d'eau et des plans d'eau en éléments nutritifs comme le phosphore et l'azote, lesquels agissent comme engrais pour les plantes aquatiques. L'eutrophisation se manifeste par la prolifération de végétaux aquatiques et par une diminution notable de la teneur en oxygène de l'eau. Il s'en suit, entre autres, une diversité animale et végétale amoindrie et des usages perturbés.

Gaz à effet de serre (GES) : gaz d'origine naturelle (vapeur d'eau) ou anthropique (liée aux activités humaines) absorbant et réémettant une partie des rayons solaires (rayons infrarouges), phénomène à l'origine de l'effet de serre.

Habitat : ensemble homogène non dissociable constitué, d'une part, d'un biotope (climat local, nature et propriétés physico-chimiques du sol, nature géologique du sous-sol) et, d'autre part, d'une biocénose (communauté d'organismes vivants). Les habitats constituent les milieux de vie des espèces.

Indice Liste rouge (Red List Index–Indice liste rouge) : indice mesurant le risque d'extinction des espèces en relevant les diminutions plus ou moins rapides d'effectifs. Il est construit à l'aide du nombre d'espèces au sein de chaque catégorie de menace de l'UICN et du nombre d'espèces ayant changé de catégorie.

Ion carbonate : ion polyatomique (ou moléculaire) de formule chimique CO_3^{2-} . En minéralogie, un carbonate est un minéral dont la composition chimique est aragonite et calcite CaCO_3 , etc.

IPBES (Intergovernmental science-policy Platform for Biodiversity and Ecosystem Services) : organisation intergouvernementale indépendante ayant pour mission de constituer une interface entre la communauté scientifique et les gouvernants et dont le secrétariat est assuré par les Nations unies (UNEP). Elle contribue à éclairer la prise de décisions politiques par la diffusion d'une connaissance pluridisciplinaire sur la biodiversité et les écosystèmes.

Liste rouge : liste d'espèces classées selon le degré de menaces pesant sur elles, régulièrement révisée, établie à partir d'une méthodologie définie par l'UICN. En France, la réalisation de la Liste rouge nationale est coordonnée par l'UMS PatriNat (OFB-CNRS-MNHN) et le comité français de l'UICN.

Mésafaune : faune de taille intermédiaire entre la microfaune et la macrofaune.

MSA (Mean Species Abundance) : indicateur voisin de l'indice d'intégrité de la biodiversité (IIB) utilisé par le *Stockholm Research Centre* pour fixer une limite planétaire. La MSA traduit l'abondance moyenne des espèces terrestres originelles (mammifères, oiseaux, amphibiens, reptiles, invertébrés et plantes vasculaires) d'un territoire, rapportée à leur abondance dans les écosystèmes originels non perturbés.

Neutralité carbone : la neutralité carbone est définie par la loi énergie-climat comme « un équilibre, sur le territoire national, entre les émissions anthropiques par les sources et les absorptions par les puits de gaz à effet de serre ». En France, atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 implique une division par 6 des émissions de gaz à effet de serre sur son territoire par rapport à 1990 (source : MTECT).

Ozone : polluant se formant sous l'effet du rayonnement solaire et de réactions chimiques complexes entre différents polluants, en particulier les oxydes d'azote et les composés organiques volatils.

pH (potentiel hydrogène) : plus le pH d'un liquide est bas, plus le liquide est acide, et plus le pH est élevé, plus le liquide est alcalin ou basique, le pH neutre étant de 7. Le pH moyen des océans se situe autour de 8,25 : c'est ce niveau qui permet un développement optimal de la vie marine. Depuis plusieurs décennies, le pH des océans a tendance à diminuer : il se situerait aujourd'hui autour de 8,14, soit une baisse de 0,1 point de pH.

Pollution : au sens du rapport Meadows, la pollution représente de façon très large tous les phénomènes locaux ou planétaires, qui, au-delà d'un certain seuil, ont des effets négatifs sur la santé humaine et la productivité agricole, de plus en plus grands lorsque la pollution augmente.

Prélèvement net : souvent désigné par le terme « consommation », correspond aux volumes d'eau prélevés qui ne sont pas directement restitués aux milieux aquatiques. Pour plus de détails, voir les [hypothèses retenues](#).

Puits de carbone : réservoir qui capte et stocke le carbone atmosphérique. Le principal puits est le puits océanique, il absorbe entre 2 et 3 milliards de tonnes de carbone, soit 7 à 10 milliards de tonnes de CO_2 représentant un quart environ des émissions résultant des activités humaines. Les autres puits sont les forêts et les tourbières.

Récif corallien : structure naturelle sous-marine construite par les coraux, animaux marins invertébrés qui fabriquent leur squelette calcaire dur à partir de carbonates et de calcium présents dans l'eau de mer. Les récifs coralliens forment des écosystèmes marins parmi les plus riches en biodiversité.



annexes

Scénarios RCP (*Representative Concentration Pathway*) : ensemble des quatre scénarios utilisés par le Giec pour estimer les variations du climat futur sur la base d'hypothèses sur les émissions de gaz à effet de serre.

Schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires (SRADDET) : document stratégique, prospectif et intégrateur, opposable à certains niveaux de collectivité. Les schémas de cohérence territoriale (SCoT) ou, à défaut, les plans locaux d'urbanisme (PLU), les cartes communales ou documents en tenant lieu, ainsi que les plans de déplacements urbain (PDU), les plans climat-air-énergie territoriaux (PCAET) et les chartes des parcs naturels régionaux (PNR), doivent prendre en compte les objectifs du SRADDET et être compatibles avec les règles de son fascicule 1.

Science participative ou science citoyenne : programme de collecte d'informations impliquant une participation citoyenne dans le cadre d'une démarche scientifique. Plusieurs programmes de ce type existent pour le comptage des animaux comme ceux de [Vigie-Nature](#).

Service écosystémique : avantage matériel ou immatériel que l'homme retire des écosystèmes : services d'approvisionnement (ressources alimentaires, médicamenteuses, énergétiques, etc.), de régulation

(régulation des risques naturels, épuration naturelle de l'eau, stockage du carbone, etc.) et services socio-culturels (bien-être, activités récréatives et culturelles, etc.).

Sous-bassin hydrographique : sous-unité hydrographique définie par la directive européenne (2000/60/CE) établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau, dite directive-cadre sur l'eau. Le territoire de la France métropolitaine est découpé en 33 sous-bassins. Chacun des départements d'outre-mer comporte un seul sous-bassin.

Surface agricole utile (SAU) : concept statistique destiné à évaluer le territoire consacré à la production agricole. La SAU est composée de terres arables (grandes cultures, cultures maraîchères, prairies artificielles, etc.), surfaces toujours en herbe (prairies permanentes, alpages), cultures pérennes (vignes, vergers, etc.). Elle n'inclut pas les bois et forêts. Elle comprend en revanche les surfaces en jachère (comprises dans les terres arables).

Surplus d'azote/de phosphore : quantité d'azote/de phosphore apportée en excès par rapport aux besoins des cultures, qui est donc inutilisée par les plantes et reste dans les sols après la récolte avant de parvenir dans l'eau par infiltration ou via l'érosion des sols.

Sigles et abréviations

Ademe	Agence de la transition écologique
AESA	<i>Absolute Environmental Sustainability Assessment</i> (évaluation de la durabilité environnementale absolue)
AOD	épaisseur optique d'aérosols
CFC	chlorofluorocarbure
CGDD	Commissariat général au développement durable
CTC	tétrachlorure de carbone
DCE	directive-cadre sur l'eau
EEE	espèce exotique envahissante
FAO	Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture
GES	gaz à effet de serre
GFN	<i>Global Footprint Network</i>
Giec	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
HCFC	hydrochlorofluorocarbure
HFC	hydrofluorocarbure
ICPE	installation classée pour la protection de l'environnement
IGN	Institut national de l'information géographique et forestière
IPBES	<i>Intergovernmental science-policy Platform for Biodiversity and Ecosystem Services</i>
MASA	ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire
Medpol	programme d'évaluation et de maîtrise de la pollution marine dans la région méditerranéenne
MSA	<i>Mean Species Abundance</i> (abondance moyenne des espèces)
MTECT	ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires
OCDE	Organisation de coopération et de développement économique
ODD	objectif de développement durable
OFB	Office français de la biodiversité
OGM	organisme génétiquement modifié
OiEAU	Office international de l'eau
OMM	Organisation météorologique mondiale
OMS	Organisation mondiale de la santé
ONB	Observatoire national de la biodiversité
ONU	Organisation des Nations unies
Ospar	Convention pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est
PAC	politique agricole commune
PAN	programme d'action national
PAR	programme d'action régional
PCAET	plan climat-air-énergie territorial
PIB	produit intérieur brut
PLU/PLUi	plan local d'urbanisme / plan local d'urbanisme intercommunal
PM_{2,5}	particules dont le diamètre est inférieur à 2,5 micromètres
PM₁₀	particules dont le diamètre est inférieur à 10 micromètres
PNACC	plan national d'adaptation au changement climatique
PNUE	programme des Nations unies pour l'environnement (ou UNEP - <i>United Nations Environment Programme</i>)
PREPA	plan national de réduction des émissions de polluants atmosphériques
RCP	<i>Representative concentration pathway</i>
RLI	<i>Red List Index</i> (indice Liste rouge)

annexes

SAO	Substance appauvrissant la couche d'ozone
SAR	schéma d'aménagement régional
SAU	surface agricole utile
SCoT	schéma de cohérence territoriale
SDAGE	schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux
SDES	service des données et études statistiques
SNBC	stratégie nationale bas-carbone
SNDI	stratégie nationale de lutte contre la déforestation importée
SRADDET	schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires
SRC	<i>Stockholm Resilience Centre</i>
SRCAE	schéma régional climat-air-énergie
SSP	<i>Shared Socio-economic Pathways</i> (scénarios socio-économiques du Giec)
SSP	service de la statistique et de la prospective (MASA)
TCA	trichloroéthane
UE	Union européenne
UICN	Union internationale pour la conservation de la nature
Unifa	Union des industries de la fertilisation
UTCATF	Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie
WWF	<i>World Wide Fund for nature</i>

Symboles chimiques

CaCO₃	aragonite
CH₄	méthane
CO₂	dioxyde de carbone
N₂O	protoxyde d'azote
NO₂	dioxyde d'azote
NO_x	oxyde d'azote
O₃	ozone
pH	potentiel hydrogène
SO₂	dioxyde de soufre

Unités de mesure

DU	<i>Dobson unit</i> (unité Dobson)
Gt	gigatonne (milliard de tonnes)
ha	hectare
kg	kilogramme
km²	kilomètre carré
km³	kilomètre cube
m³	mètre cube
Mha	million d'hectares
Mt	million de tonnes
ppm	partie par million (soit 1 millionième)
t	tonne
°C	degré celcius

Table des matières





table des matières

Avant-propos	4
Synthèse	5
INTRODUCTION	13
PARTIE 1 - LES LIMITES : PERSPECTIVE HISTORIQUE ET CADRE GÉNÉRAL	15
Les limites à la croissance	16
L’empreinte écologique	17
Les limites planétaires	17
PARTIE 2 : LES NEUF LIMITES PLANÉTAIRES	23
Changement climatique	24
Une frontière planétaire dépassée	24
La contribution de la France au dépassement de la frontière planétaire	25
Les politiques et actions en faveur du climat	26
Érosion de la biodiversité	29
Une crise mondiale de la biodiversité, conduisant au dépassement de la limite planétaire	29
La contribution de la France au dépassement de la limite planétaire	30
Les politiques et actions en faveur de la biodiversité	33
Perturbation des cycles biogéochimiques de l’azote et du phosphore	35
Des cycles vitaux perturbés, conduisant au dépassement de la limite planétaire pour l’azote	35
La contribution de la France au dépassement de la limite planétaire	36
Les politiques et actions pour lutter contre la pollution par l’azote et le phosphore	38
Changement d’usage des sols	40
Une déforestation mondiale qui conduit la planète dans une zone d’incertitude	40
La contribution de la France au dépassement de la limite planétaire	41
Les politiques et actions pour limiter la déforestation et protéger les sols	42
Utilisation mondiale de l’eau douce et cycle de l’eau	44
Une frontière planétaire non franchie mais des situations locales non soutenables	44
La contribution de la France au dépassement de la frontière planétaire	45
Les politiques et actions en faveur de la préservation de la ressource en eau	47
Acidification des océans	49
Une frontière planétaire aujourd’hui non dépassée, mais pour combien de temps ?	49
Les politiques et actions en faveur de la préservation des océans	50
Appauvrissement de l’ozone stratosphérique	52
Une limite planétaire non franchie, grâce à l’engagement de la communauté internationale	52
Les mesures prises pour reconstituer la couche d’ozone	53
Les perspectives d’évolution de la couche d’ozone	54
Augmentation des aérosols dans l’atmosphère	55
Une limite planétaire non quantifiée, mais aux enjeux climatiques et sanitaires majeurs	55
Des enjeux sur le climat et sur la santé de l’homme et des écosystèmes	55
Les politiques et actions en faveur de la qualité de l’air	56
Introduction d’entités nouvelles dans la biosphère	58
Une limite planétaire non précisément quantifiée mais considérée dépassée	58
Les politiques et actions pour lutter contre les pollutions	59



table des matières

PARTIE 3 : QUELLES UTILISATIONS DU CADRE DES LIMITES PLANÉTAIRES À L'ÉCHELLE LOCALE ?	61
Limites planétaires et « descente d'échelle »	62
Les méthodes d'évaluation de la durabilité environnementale absolue	62
Un exemple d'application au portefeuille de produits agroalimentaires d'une entreprise de la grande distribution	65
L'application du cadre des limites planétaires à un territoire : l'exemple du SCoT Sud-Loire	65
ANNEXES	71
Révision 2023 du cadre des neuf limites planétaires	72
Glossaire	76
Sigles et abréviations	79
Symboles chimiques et unités de mesure	80

Conditions générales d'utilisation

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (3, rue Hautefeuille - 75006 Paris), est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (loi du 1^{er} juillet 1992 - art. L.122-4 et L.122-5 et Code pénal art. 425).

Dépôt légal : octobre 2023
ISSN : 2555-493X (en ligne)

Directeur de la publication : Thomas Lesueur
Rédacteur en chef : Hugues Cahen
Coordination éditoriale : Céline Blivet
Infographie : Bertrand Gaillet
Cartographie : Antea
Maquettage et réalisation : Agence Efil, Tours



Cette publication propose un éclairage sur le cadre conceptuel des neuf limites planétaires tel qu'il a été défini en 2015 (Steffen et al.). Dans cette optique, elle s'attache à répondre aux questions suivantes : qu'est-ce que les limites planétaires ? comment ce concept est-il né ? quelles problématiques environnementales recouvre-t-il ? parmi ces neuf limites, lesquelles sont d'ores et déjà franchies ou risquent de l'être à défaut d'actions au niveau mondial ? quelles politiques sont mises en œuvre en France pour éviter le franchissement de ces limites ? que peuvent apporter les limites planétaires aux États, aux territoires et aux entreprises, face aux enjeux écologiques mondiaux ? comment peut-on les utiliser en France ?

Au-delà des enjeux du climat et de la biodiversité, d'autres phénomènes non moins cruciaux, complexes et interconnectés, sont pris en compte par le cadre des limites planétaires : la perturbation des cycles biogéochimiques de l'azote et du phosphore, le changement d'usage des sols, l'utilisation de l'eau douce, l'acidification des océans, l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique, l'augmentation des aérosols dans l'atmosphère, et l'introduction d'entités nouvelles dans la biosphère. Autant d'enjeux que la communauté scientifique cherche à appréhender au mieux pour maintenir un « espace de fonctionnement sûr pour l'humanité ».

La France face aux neuf limites planétaires

Service des données et études statistiques

Sous-direction de l'information environnementale

Tour Séquoia - 92055 La Défense cedex

Courriel : diffusion.cgdd@developpement-durable.gouv.fr