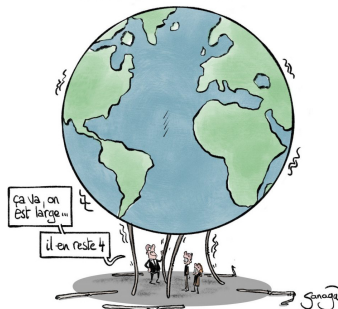


Les limites planétaires


<https://agence-lucie.com/limites-planetaires/>

UNE 5ÈME LIMITE PLANÉTAIRE
VIENT D'ÊTRE FRANCHIE


<https://www.blagues-et-dessins.com/une-5eme-limite-planetaire-vient-d-etre-franchie/>

Introduction à ce support

Bien qu'ils soient indiqués en page de garde, ce support ne parle pas au nom du CNRS, des universités ou des laboratoires mentionnés par les logos.

Ce support est à destination des enseignants qui désirent introduire les sujets d'environnement, climat, ressources, énergie et biodiversité à leurs élèves. Tout ce que contient cette présentation est libre d'accès : les textes, les images (pour les récupérer : "Clic droit + Copier l'image"), les réflexions ; voire la présentation totale.

Ce support de cours sur les limites planétaires à été rédigé Romain JARRIER (romain.jarrier@upmc.fr) et s'est largement appuyé du cours de Kévin JEAN (kevin.jean@lecnam.net) dans le cadre de l'enseignement TED001 « Enjeux des transitions écologiques : comprendre et agir »^[1]. Il est basé sur l'article « *Earth beyond six of nine planetary boundaries* » de RICHARDSON *et al*^[2] décrivant la dernière étude de l'équipe de J. ROCKSTRÖM du Stockholm Resilience Centre ; et du travail d'Aurélien BOUTAUD & Natacha GONDRAN^[3] « *Limites planétaires. Comprendre (et éviter) les menaces environnementales de l'anthropocène* ».

Certaines slides comportent des liens vers les sujets affiliés au contenu de la slide, si ces liens sont soulignés et en bleu, le support est finalisé ; si le renvoi est en noir non souligné, le support est encore à faire.

Ce projet est soutenu par le Groupement De Recherche Labos 1.5 (<https://labos1point5.org/le-gdr>) dont certains membres ont relu les supports. Dans le cas de cette présentation, les relecteurs sont :

- François DULAC (IPSL-LSCE, CEA Paris-Saclay)
- Isabelle COUCHOUD (USMB, EDYTEM UMR 5204)

Forme de ce support

Un lien de mise à jour de ce support est disponible en bas de la page de garde.

Ce fichier est la version "Lecture" : les slides et les images sont donc intégrales ce qui permet d'imprimer le fichier en version papier.

Si ce sujet vous intéresse, je vous conseille la [Version "présentation"](#) qui amène les diapositives plus doucement : les textes et les images arrivent pas à pas. Dans les supports, de nombreuses images se construisent au fur et à mesure avec le texte associé qui apparaît en fonction de l'état de l'image et permet donc une meilleur compréhension du raisonnement.

A savoir que les deux versions ("Lecture" et "Présentation") sont identiques dans leur contenu, seule la forme est différente.

Afin d'avoir accès aux fichiers sources $\text{\LaTeX}$, aux images et au fichier bibliographie, vous pouvez les télécharger au lien suivant : [Fichier sources](#)

Afin d'avoir les liens des autres supports, qui concernent d'autres sujets, cliquer sur le lien suivant : [Document de travail](#)

Dans ce document, toutes les citations et les éléments de l'en-tête (sections et cercles) sont des liens internes : cliquez dessus pour s'y rendre, et utiliser la combinaison de touche "**alt + flèche gauche**" pour revenir là où vous étiez.

Sommaire

1 Introduction

2 Les 9 limites planétaires

- Historique
- Les 9 limites planétaires
- Conséquences
- Interdépendance des limites planétaires

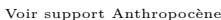
3 Soutenabilité

4 Conclusion

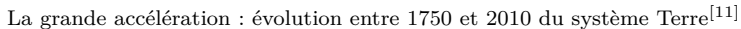
3/51

4/51

La grande accélération : évolution entre 1750 et 2010 de tendance socio-économiques^[11]



Voir support Anthropocène



Vers l'Anthropocène...

Toutes ces perturbations humaines nous font basculer vers un état non stable.

Selon certains géologues, nous sommes passés dans l'ère de l'anthropocène^[12, 13].

Soit l'ère géologique où les humains sont devenus la principale force de pression sur le système Terre^[8].

Cette ère géologique a été rejetée par l'Union internationale des sciences géologiques (IUGS), faute de marqueur géologique durable sur des millions d'années^[14].

Ce concept va au-delà de considérations purement géologique et est largement étudié dans le domaine des sciences sociales^[15, 16, 17]

Une ère d'incertitude où l'humanité ne s'est jamais aventuré.

Le début de cette ère géologique fait débat^[18, 19] :

- 5000 à -3000 : Invention de l'agriculture : repère du méthane ?
- 1610 : Colonisation des Amériques : impacts sur les populations et déforestation ?
- 1784 : Invention de la machine à vapeur (James Watt) ?
- 1945 : Augmentation notable de la concentration en CO₂ ?
- 1945 ou 1964 : Essais nucléaires : marqueur radioactif ?

Les principales causes :

- Notre utilisation massive d'énergies fossiles
- Notre système agricole industriel

9/51

Sommaire

1 Introduction

2 Les 9 limites planétaires

- Historique
- Les 9 limites planétaires
- Conséquences
- Interdépendance des limites planétaires

3 Soutenabilité

4 Conclusion

Sommaire

1 Introduction

2 Les 9 limites planétaires

- Historique
- Les 9 limites planétaires
- Conséquences
- Interdépendance des limites planétaires

3 Soutenabilité

4 Conclusion

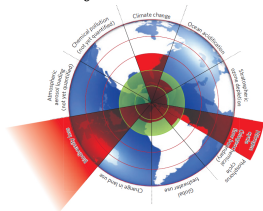
Origines

Les 9 limites planétaires ont été définies par un groupe pluridisciplinaire de biologistes, géologues, glaciologues, climatologues en 2009^[21] issue du centre *Stockholm Resilience Center*.

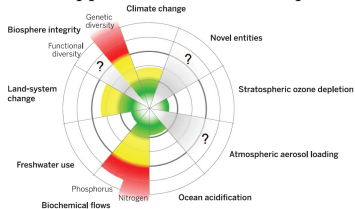
Cette équipe est celle de Johan ROCKSTRÖM, personne associée au concept des limites planétaires.

Plusieurs mise à jours et ré-évaluation des limites sont apportées au fil du temps :

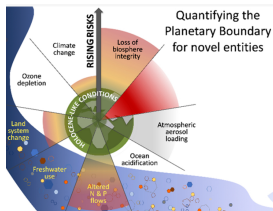
2009^[21]



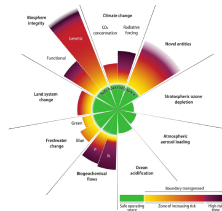
2015^[20]



2022^[22]

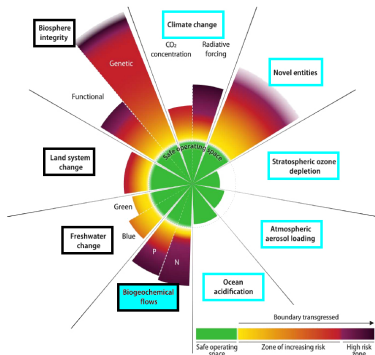


2023^[2]



Points de détails

La schématisation des limites planétaires est toujours similaire :



- Une zone sûre pour l'intégrité planétaire au centre, en vert
- Une zone d'incertitude, en jaune
- Une zone à fort risque, en rouge et/ou violet

Parmi les 9 limites planétaires^[23] :

- 4 concernent des problèmes de ressources
- 6 concernent des problèmes de pollution

Cycles azote et phosphore : ressource et pollution.

Termes :

Limite planétaire :  $\rightarrow$ 

Fin de la zone d'incertitude :  → 

Les limites planétaires en 2023^[2]

Évolution

Les 9 limites planétaires	2009 ^[21]	2015 ^[20]	2022 ^[22]	2023 ^[2]
Changement climatique	×	×	×	[CO ₂] × FRA ×
Acidification des océans	✓	✓	✓	✓
Appauvrissement couche d'ozone	✓	✓	✓	✓
Cycle biogéochimique Phosphore	✓	×	×	×
Azote	×	×	×	×
Cycle de l'eau douce	✓	✓	Eau bleue ✓ Eau verte ×	×
Changement d'affectation des sols	✓	×	×	×
Érosion de la biodiversité	×	Diversité génétique : × Diversité fonctionnelle : ??	×	×
Diffusion d'aérosols dans l'atmosphère	??	??	??	✓
Introduction de nouvelles entités (pollution chimique)	??	??	×	×
Total	3/9	4/9	5/9	6/9

× : Limite dépassée

✓ : Zone sûre

?? : Limite non définie

Problème de pollution

[CO₂] : Teneur CO₂

Problème de ressource

FRA : Forçage radiatif anthropique 15/51

Sommaire

1 Introduction

2 Les 9 limites planétaires

- Historique
- Les 9 limites planétaires
- Conséquences
- Interdépendance des limites planétaires

3 Soutenabilité

4 Conclusion

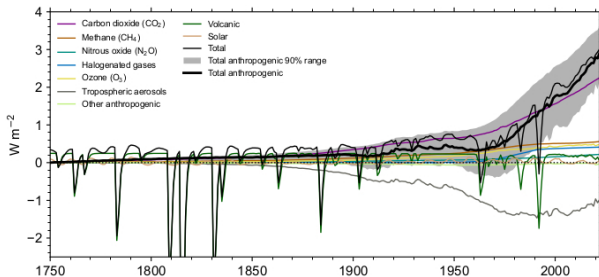
1b- Le changement climatique : forçage radiatif anthropique

Mise à jour en 2023^[2].

Le forçage radiatif [W.m^{-2}] caractérise la puissance de l'augmentation de la température planétaire.

Le forçage radiatif anthropique est la composante issu des activités humaines.

Avant l'ère pré-industrielle, ce forçage radiatif anthropique était de 0 W.m^{-2} .



Évolution du forçage radiatif et ses composantes^[30]

La limite planétaire :

1 W.m^{-2}

Fin de la zone d'incertitude :

$1,5 \text{ W.m}^{-2}$

Actuellement

$2,91 \text{ W.m}^{-2}$ ^[30]

2- Acidification des océans

L'acidité se mesure selon le potentiel Hydrogène (pH).

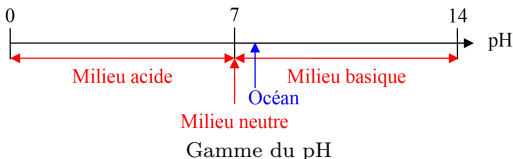
Voir support Eau

Cette gamme s'étale de 0 à 14 et est en échelle log.

L'océan est un milieu légèrement alcalin (basique), $\text{pH} = 8,2$.

Ce pH a varié dans l'histoire de la terre selon les cycles biogéochimiques (du carbone).

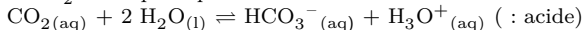
Depuis 25 000 ans, le pH est stable entre 8,1 et 8,3^[31, 32].



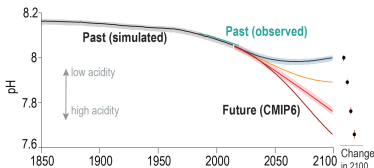
Cette alcalinité a permis à la vie de s'épanouir, surtout les organismes à base de calcaire :

- Squelettes calcaires
- Coraux
- Phytoplanctons
- Coquillages

L'augmentation du CO_2 atmosphérique acidifie l'océan :



Acidité qui empêche la formation de ces organismes. Puis toute la chaîne alimentaire amont.



Évolution du pH océanique^[28]

1850 : $\text{pH} 8,16 \rightarrow 2014 : \text{pH} 8,05 \Rightarrow$ différence : 22%.

La limite planétaire est définie à partir du taux de saturation de l'aragonite : un composé calcaire.

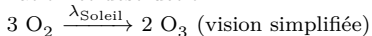
Avant l'ère pré-industrielle : $\Omega_0 \text{ arag} = 3,44 \quad (\equiv 100\%)$

Limite planétaire : $\Omega_{\text{arag}} = 2,75 \quad (\equiv 80\% \Omega_0 \text{ arag})$

En 2015 : $\Omega_{\text{arag}} = 2,8 \quad (\equiv 81,4\% \Omega_0 \text{ arag})$ ^[33]

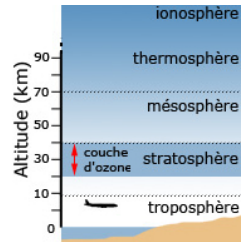
3- Appauvrissement de la couche d'ozone

La couche d'ozone se situe dans la stratosphère (entre 20 et 40 km). A ne pas confondre avec l'ozone troposphérique (que l'on respire) L'ozone (O_3) y est très diluée : quelques dizaines de ppm. Cette couche nous protège des Ultra-Violets et permet à la vie d'exister sous sa forme actuelle. L'ozone, très réactif, est en constante compétition entre formation et destruction :



La nouvelle donne est apparue avec les nouvelles entités chimiques, et particulièrement les fluorés/chlorés (chlorofluorocarbures : CFC).

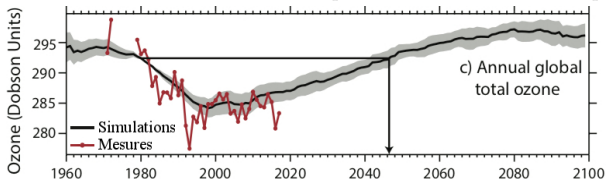
Les CFC (principalement fluide frigorigène) ont vu leur concentration multipliée par 5 entre 1960 et 1990^[34].



Atmosphère terrestre^[35]

Ces molécules détruisent très fortement l'ozone, d'un rapport de 1 à quelques milliers.

Des accords internationaux ont permis d'éviter la catastrophe.



Évolution de la concentration en O_3 ^[34]

Unité Dobson (UD) : 1 UD $\equiv$ 10 μm de O_3 pur tout autour de la Terre, dans les conditions normales de température et de pression

Avant l'ère pré-industrielle :

290 UD

Limite planétaire :

276 UD

Fin de la zone d'incertitude :

261 UD

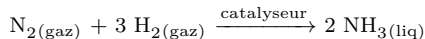
Actuellement : 284,6 UD

4a- Cycle biogéochimique : l'Azote, explication

L'azote est présente de manière très abondante sur notre planète : 80% de notre atmosphère, sous forme de N_2 gazeux. Ce gaz est inerte : il n'est pas réactif.

La nature sait rendre cet azote réactif en le fixant dans la terre (via les légumineuses).

Les activités humaines peuvent aussi rendre cela possible par le cycle de Haber-Bosch :



L'ammoniaque (NH_3) est le précurseur indispensable des engrais azotés :

Sulfate d'ammonium : $(NH_4)_2SO_4$

Nitrate d'ammonium : NH_4NO_3

Phosphate d'ammonium : $(NH_4)_3PO_4$

Urée : $CO(NH_2)_2$

95% de la production de H_2 mondiale provient du vaporeformage du gaz naturel :



Au-delà des engrais, nous émettons des molécules azotées lors de la combustion des fossiles (moteurs, chaudières, usines...) : NO_x (polluant atmosphérique) et N_2O (gaz à effet de serre).

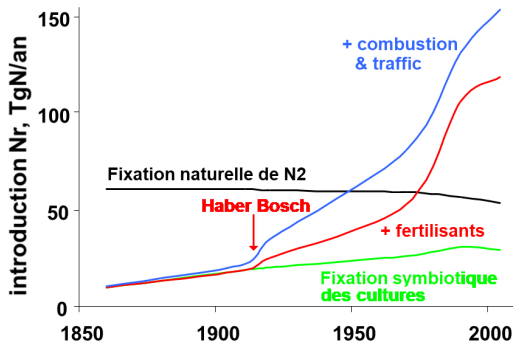
Concernant les engrais, l'azote réactif excédentaire, va ruisseler dans les eaux (rivières, nappes phréatiques, estuaires).

Cet apport excessif de nutriments permet l'explosion d'algues, qui par la suite des actions des bactéries anaérobies et aérobies, conduisent à une forte diminution de l'oxygénation de l'eau, extinction des autres animaux^[36, 3] → **Eutrophisation**

Cas des algues vertes en Bretagne, nappes phréatiques parisiennes polluées.

4a- Cycle biogéochimique : l'Azote, chiffres

La limite planétaire ne prend en compte que l'azote anthropique. En 2019^[3] :



Évolution de l'introduction d'azote réactif,
cumulé^[37, 38]

Combustion :

- Énergie fossile : 20 Mt/an
- Biomasse : 10 Mt/an

Fabrication d'azote réactif
(majoritairement des engrais) :
80 Mt/an

Fixation par les légumineuses :
40 Mt/an

Avant l'ère pré-industrielle : 0 Mt/an d'azote réactif rejetés

Limite planétaire : 62 Mt/an d'azote réactif rejetés^[20]

Fin de la zone d'incertitude : 82 Mt/an d'azote réactif rejetés

Actuellement : > 150 Mt/an d'azote réactif rejetés^[3, 39]

Voir support Cycle C/N/P

4b- Cycle biogéochimique : le Phosphore

L'autre cycle similaire est celui du phosphore.

Contrairement à l'azote, il ne se trouve pas à l'état naturel : nous l'exploitons dans les zones de sédimentation marine (revenu sur terre avec la tectonique des plaques) ou les mines de guano (fientes animales sédimentées).

C'est un nutriment qui est utilisé dans l'agriculture intensive pour la croissance des plantes.

Avec le ruissellement dû aux pluies, nous avons les mêmes problèmes que l'azote : eutrophisation, pollutions... ..ensuite dans les rivières et les mers.

Ces anoxies sont plus massives car ce phénomène se retrouve dans les océans.

↪ Explosion du nombre de planctons

↪ Perte d'oxygène sur des surfaces plus larges (anoxie océanique^[40, 41])

↪ Extinction plus importantes d'animaux par rapport à l'azote.

En Mt/an de phosphore rejetés :

Avant l'ère pré-industrielle : 0

Limite planétaire^[20] :

Océans : 11 Eau douce : 6,2

Fin de la zone d'incertitude :

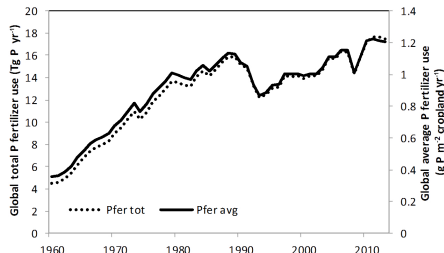
Océans : 100 Eau douce : 11,2

Actuellement^[42, 43] :

Océans : 22,6

Eau douce : 17,5

Voir support Cycle C/N/P

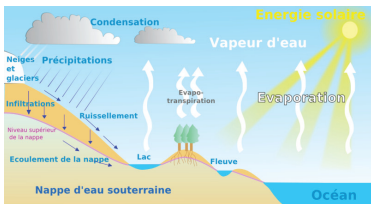


Utilisation du phosphore en tant qu'engrais^[42]

5- Cycle de l'eau douce, explication^[3]

Sur Terre, 70% de la surface est occupée par de l'eau. L'eau douce ne représente que 3% de l'eau présente sur Terre. La plus grande majorité de cette eau douce est présente sous forme de glacier (75%). Et pour une part importante dans les eaux souterraines (24%). Le reste (1%) est constitué :

- De l'eau de surface (fleuves, rivières, lacs)
- L'eau contenue dans l'atmosphère
- L'eau contenue dans la biosphère (organismes vivants)
- L'eau contenue dans le sol



Le cycle de l'eau^[3, 44]

Le cycle de l'eau est indispensable dans la régulation du système Terre, la vie animale et végétale ainsi que dans les cycles du carbone, azote et phosphore en servant de vecteur de circulation.

Les prélèvements humains existent depuis toujours, mais à pris une ampleur sans précédent depuis l'ère industrielle.

Les activités humaines sont aujourd'hui la principale cause de la modification du débit des rivières et des flux d'évaporation^[21].

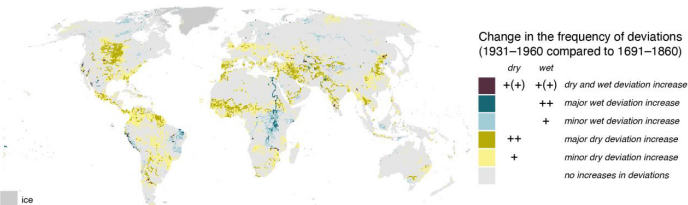
Les principales causes / conséquences :

- La déforestation : diminue l'évapo-transpiration et la rétention d'eau, assèche les zones humides, augmente le ruissellement, accélère l'érosion (idem artificialisation des sols).
- Les barrages et les canaux : modifient le débit des cours d'eau.
- Le captage d'eau (irrigation) : diminue le débit des cours d'eau et des nappes phréatiques.

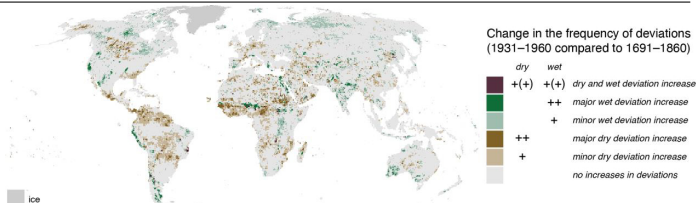
5- Cycle de l'eau douce, carte

La limite planétaire est composé de deux indicateurs :

- L'eau bleue : l'eau circulante (rivière, lac, nappes phréatiques), soit l'intégrité des écosystèmes aquatiques
- L'eau verte : l'humidité des sols, soit l'eau disponible pour la végétation



Modification de l'eau bleue^[45]



Modification de l'eau verte^[45]

5- Cycle de l'eau douce, chiffre

Ces deux critères rendent compte de deux usages de l'eau.

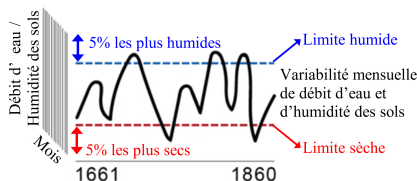
Certaines causes amènent à deux effets contraires sur ces critères. Ex : la déforestation :

- Diminue l'eau verte car il y a moins de captation du sol via la réduction des plantes
- Augmente l'eau bleue car il y a plus de ruissellement

La limite planétaire se compte en part de surface fortement impactée sur ces deux critères par rapport à l'holocène.

Nous regardons la variabilité des flux et de l'humidité pendant l'holocène

Puis nous notons la surface dépassant des limites
supérieure / **inférieure**



Variabilité en flux et humidité^[45], traduit

L'eau bleue :

Avant l'ère pré-industrielle (valeur moyenne) :
9,4%

Limite planétaire : 10,2%

Fin de la zone d'incertitude : 50%

Actuellement : 18,2%^[45]

L'eau verte :

Avant l'ère pré-industrielle (valeur moyenne) :
9,8%

Limite planétaire : 11,1%

Fin de la zone d'incertitude : 50%

Actuellement : 15,8%^[45]

6- Changement d'affectation des sols, explication

Il s'agit de mesures satellitaires complexes à analyser^[46] → forêt ou plantation d'arbre ?

La disparition de la couverture forestière impacte :

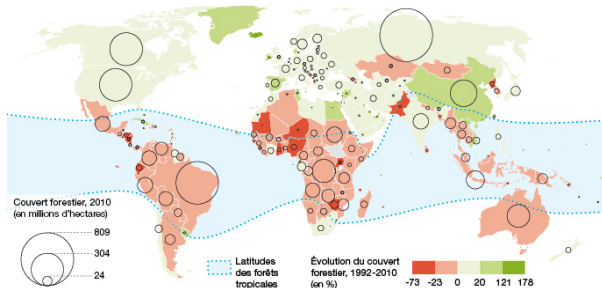
- Régularisation du cycle de l'eau
- Le climat (stockage du CO₂)
- Les cycles biogéochimiques (agriculture)
- La biodiversité

Les causes principales : extension des surfaces agricoles et artificialisation des sols.

Globalement, les forêts tempérées ont moins d'impact global que les forêts tropicales/boréales.

C'est pour cela que cette limite planétaire se décompose selon le type de forêt.

La limite des forêts tempérées est donc moins resserrée.



Évolution du couvert forestier, 1992-2010^[46]

6- Changement d'affectation des sols, chiffres

La référence est de 100% de couvert forestier avant 1700.

Les limites se comptent en proportion de couvert forestier restant.

Type de forêt	Global	Tempérée	Tropicale	Boréale
Avant 1700	100%	100%	100%	100%
Limite planétaire	75%	50%	85%	85%
Fin de la zone d'incertitude	54%	30%	60%	60%
Actuellement ^[46, 47]	62%	Amériques : 51,2% Asie : 37,9% Europe : 34,2%	Afrique : 54,3% Amériques : 83,9% Asie : 37,5%	Amériques : 56,6% Eurasie : 70,3%

7a- Érosion de la biodiversité : diversité génétique

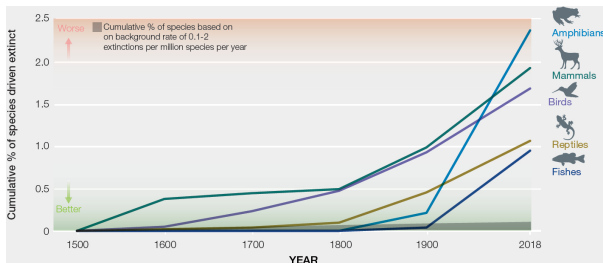
La diversité génétique représente la banque de données naturelle que possède la biodiversité pour continuer à exister.

Il va donc être fonction du taux d'extinction des espèces, soit en nombre d'extinction par an pour 1 million d'espèces (E/MEA).

Les espèces (animale et végétale) ont toujours disparus depuis leur existence, alors que d'autre apparaissent en même temps.

Il faut donc regarder le taux d'extinction avec le temps.

Nous ignorons la valeur de ce taux au-delà duquel une extinction massive surviendrait.



Taux d'extinction des vertébrés depuis 1500^[48]

Avant l'ère pré-industrielle :
1 E/MEA^[2]

Limite planétaire proposée :
< 10 E/MEA

Fin de la zone d'incertitude :
100 E/MEA

Actuellement :

> 100 E/MEA^[49, 50, 51]

7b- Érosion de la biodiversité : diversité fonctionnelle

Il s'agit de la capacité de la biosphère à pouvoir s'auto-alimenter.

Dans ce cas, nous observons la production de carbone produite par la biosphère (en Gt/an), et la part retirée par les activités humaines^[52, 53].

- Bois
- Cultures
- Animaux

Cette part retirée par l'homme ne participe plus à la régénération de la biodiversité, donc l'affaiblie.

Avant l'ère pré-industrielle, valeur du prélèvement : 1,9%^[2]

La limite planétaire est fixée à 10%

Fin de la zone d'incertitude : 20%.

Actuellement : 30%^[54]

8- Diffusion d'aérosols dans l'atmosphère, explication^[3]

Les aérosols sont des micro-particules en suspension dans l'atmosphère (du nm au μm).

Leur très faible masse leur permet de rester en suspension, mais sont rapidement lessivées par les pluies s'ils sont situées sous la couverture nuageuse. Ce qui n'est pas le cas des cendres volcaniques qui peuvent rester 1-2 ans en suspension.

Il peut s'agir de soufre, de carbone organique, de carbone suie, de poussière minérale...

Leur origine peut être naturelle : sel de mer, poussière du désert, éruption, pollens...^[55]

Ces aérosols naturels représentent 90% en masse des aérosols^[55].

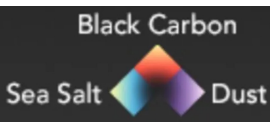
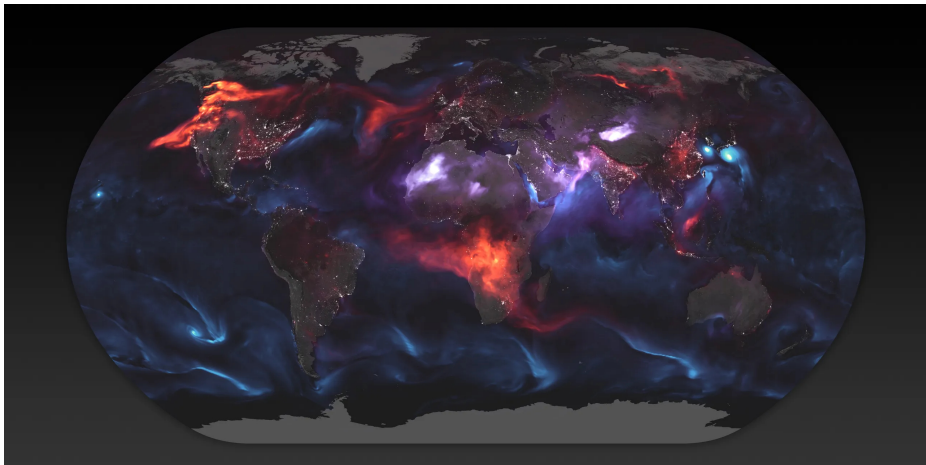
Ou anthropique : combustion de fossile, carbone noir issu de la combustion de biomasse^[55].

La déforestation, le surpâturage et l'irrigation excessive dégradent les sols et augmentent la quantité d'aérosols soulevée par le vent.

Leurs effets sont notables sur :

- La santé, estimation de 4,5 à 8,8 millions de morts par an dans le monde^[3].
- Le climat, modification de l'albédo avec des effets réchauffants (suie noire sur la glace) et refroidissants (réflexion de la lumière solaire incidente)^[56].
- Les phénomènes de mousson^[57, 58, 59].
- Des pertes en rendements agricoles^[60].

8- Diffusion d'aérosols dans l'atmosphère, carte^[61]



Aérosols, le 23 août 2018

Black Carbon :

- Fumée des incendies (→ Déforestation involontaire/volontaire)
- Combustion des fossiles

8- Diffusion d'aérosols dans l'atmosphère, chiffre

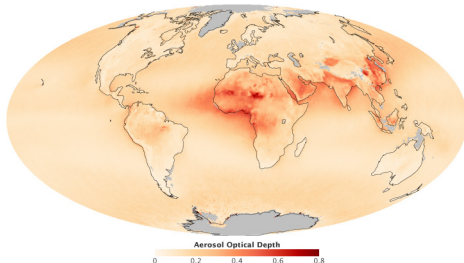
Les aérosols vont se comptabiliser en profondeur optique d'aérosols (AOD).

L'AOD est une mesure de l'absorption et de la diffusion de la lumière du soleil ou des infra-rouges terrestres par les aérosols^[20].

C'est une mesure issu de la perte de lumière du Soleil jusqu'à la surface terrestre

$$\text{Transmission} = I/I_0 = \exp(-\text{AOD})$$

→ Si AOD = 0 : aucun aérosol, ciel clair



Distribution moyenne des aérosols,
de mai 2000 à juin 2010^[3, 55]



→ Si AOD = 1 : très chargée en aérosols



Avant l'ère pré-industrielle : AOD = 0,03^[62]

Limite planétaire : AOD = 0,1

Fin de la zone d'incertitude : AOD = 0,25

Actuellement : AOD = 0,076^[62, 63, 64]

9- Introduction de nouvelles entités, explication^[3]

Il s'agit de la pollution chimique, et plus particulièrement d'entités chimiques non géologique. Donc des molécules artificielles que nous libérons dans l'environnement. Elles ont des effets néfastes sur la biodiversité et sur la santé humaine^[65].

Quelques exemples :

- Plastiques^[66] (6^{ème} continent)
- Micro-plastiques^[66]
- Médicaments
- Herbicides de synthèses (Glyphosate)
- Fluides frigorigènes (CFC, PFC...)
- Métaux lourds

Ils sont rejetés dans la nature depuis le procédé industriel (chimie, pharmacie, plasturgie...) ou agricole ; dans les produits manufacturés (alimentation, médicaments, solvants...) ; ou bien lors de leur cycle de fin de vie (incinération, décharges à ciel ouvert).

Ils se retrouvent sous toutes les formes (gaz, liquide, solide) et vont polluer les sols, les eaux, l'atmosphère...

Ils seront dégradés (ou pas) par les végétaux, les bactéries ou ingérés par les animaux.

En 2019 : 500 Mt de substances chimiques produites mondialement (500 × plus qu'en 1930). 50% de cette masse est issu de plastique dérivé du pétrole, 1/3 aux engrais minéraux.

La production de plastique a bondi de 79% entre 2000 et 2015^[1].

La nocivité d'une substance n'est pas liée à sa masse ou à son volume relargué.

~35 millions de produits chimiques sont proposés sur le marché en 2009^[67]. Il est donc impossible de mener une étude des effets de chaque substance sur l'environnement ou la santé.

Sommaire

1 Introduction

2 Les 9 limites planétaires

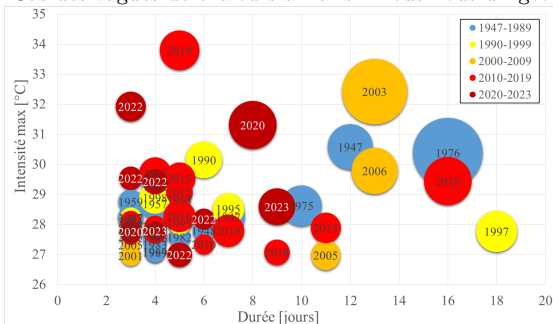
- Historique
- Les 9 limites planétaires
- **Conséquences**
- Interdépendance des limites planétaires

3 Soutenabilité

4 Conclusion

Changement climatique - Acidification - Cycle N/P

Cas des vagues de chaleurs à Paris : Nous nous dirigeons vers un état hors équilibre



Nombre de vague de chaleur :

1947-1989 : 14 → 0,3 par an

1990-1999 : 7 → 0,7 par an

2000-2009 : 6 → 0,6 par an

2010-2019 : 14 → 1,4 par an

2020-2023 : 9 → 2,25 par an

Vagues de chaleurs observées sur Paris^[69]

Acidification des océans : - perte des coraux (abrite 25% de la biodiversité marin^[70])
- modifications de la formation des planctons^[71]

Eutrophisation (cycle P) : Anoxie océanique

↪ Perturbation de la chaîne alimentaire, perte des zones de pêches, péril de la vie marine

Affectation des sols / Cycle de l'eau

La perturbation du cycle de l'eau et la déforestation amènent à de la désertification^[72] :



25% des surfaces continentales concernées

Le phénomène s'accélère :

- Fin 1960 : +1500 km²/an
- An 2000 : +3600 km²/an

L'un des points de bascule climatique est la transformation de l'Amazonie en savane suite à la déforestation^[73].



Sommaire

1 Introduction

2 Les 9 limites planétaires

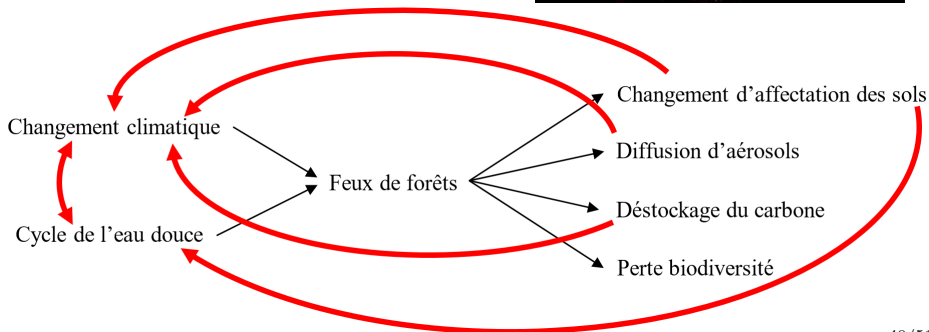
- Historique
- Les 9 limites planétaires
- Conséquences
- Interdépendance des limites planétaires

3 Soutenabilité

4 Conclusion

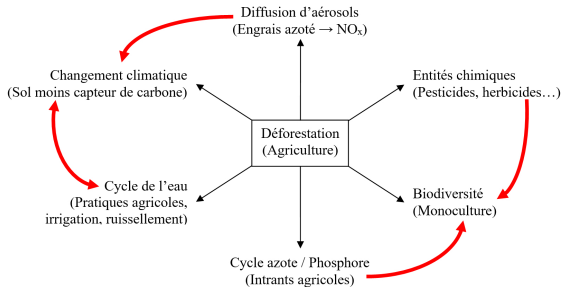
Exemple d'interdépendance (1/3)^[1]

Prenons le cas des méga-feux :



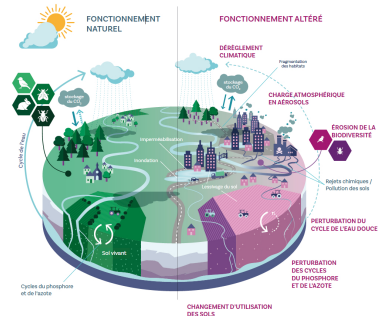
Exemple d'interdépendance (2/3)^[1]

Prenons le cas de l'agriculture via la déforestation :



Aérosol : Azote épandu se retrouvant dans l'atmosphère

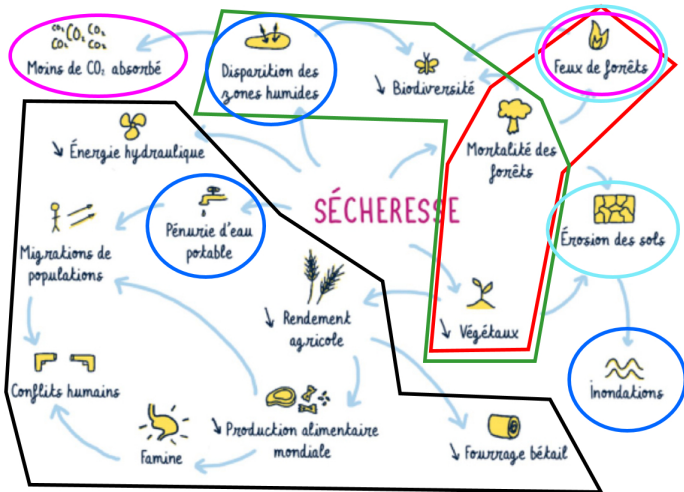
Intrants agricoles : Azote/Phosphore dans le sol et l'eau

Impacts du changement d'affectation
des sols^[10]

Si nous changeons les pratiques agricoles, beaucoup de ces perturbations seront fortement diminuées :

- Moins de labour → plus de puits de carbone, moins d'érosion et de ruissellement
- Plantes fixant l'azote (légumineuse) → moins d'engrais (cycle azote / phosphore, entité chimiques, aérosols)
- Moins de monoculture → biodiversité

Exemple d'interdépendance (3/3)



Conséquence de la sécheresse^[74]

Biodiversité

Changement climatique

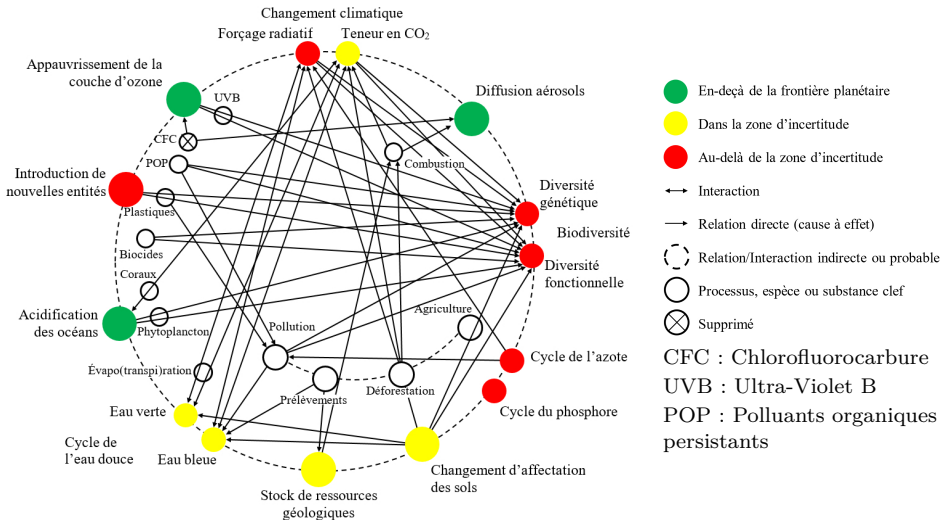
Cycle de l'eau

Changement d'affectation des sols

Aérosols

Société

Interdépendance totale



Interdépendance des limites planétaires^[75] (schéma modifié par rapport à [2])

La biodiversité subi très fortement les impacts des autres limites

Sommaire

1 Introduction

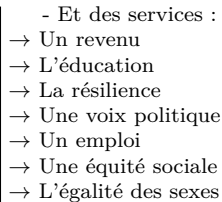
2 Les 9 limites planétaires

- Historique
- Les 9 limites planétaires
- Conséquences
- Interdépendance des limites planétaires

3 Soutenabilité

4 Conclusion

Sous cela, se trouvent les besoins sociaux primordiaux que nous devons fournir à l'humanité :



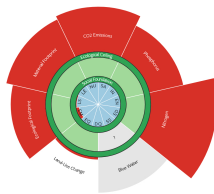
Ces besoins sociaux sont basés sur les objectifs de développement durable (ODD) de l'ONU^[78].

Économie du Donut^[77]

L'économie du donut : exemple par pays (2015)^[79]

En fonction du niveau de développement :

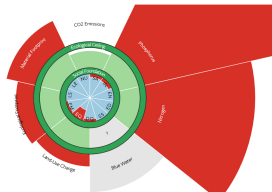
- Les limites planétaires sont dépassées pour les pays riches (France, USA)
- Les limites planétaires et sociales sont dépassées pour les pays intermédiaires (Brésil)
- Les limites sociales sont dépassées pour les pays pauvres (Éthiopie, RDC)



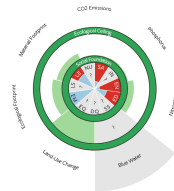
France



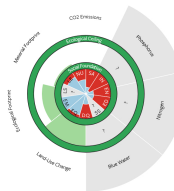
États-Unis



Brésil



République Démocratique du
Congo

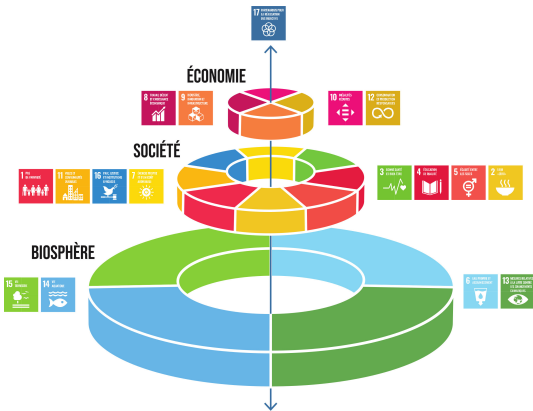


Éthiopie

La vision du Stockholm Resilience Center

Mieux que le donut, le Stockholm Resilience Center a fait une pièce montée !!

Cette vision permet de regrouper les 17 objectifs de développement durable de l'ONU^[78] selon les domaines d'applications.



Gâteau de mariage du Stockholm Resilience Center^[80]

Cerise sur le gâteau :

- ODD 17 : Partenariats pour la réalisation des objectifs

Économie :

- ODD 8 : Travail décent et croissance économique

- ODD 9 : Industrie, innovation et infrastructure

- ODD 10 : Inégalités réduites

- ODD 12 : Consommation et production responsable

Société :

- ODD 1 : Pas de pauvreté

- ODD 2 : Faim « zéro »

- ODD 3 : Bonne santé et bien être

- ODD 4 : Éducation de qualité

- ODD 5 : Égalité entre les sexes

- ODD 7 : Énergie propre et d'un coût abordable

- ODD 11 : Villes et communautés durables

- ODD 16 : Paix, justice et institutions efficaces

Biosphère :

- ODD 6 : Eau propre et assainissement

- ODD 13 : Mesures relatives à la lutte contre le changement climatique

- ODD 14 : Vie aquatique

- ODD 15 : Vie terrestre

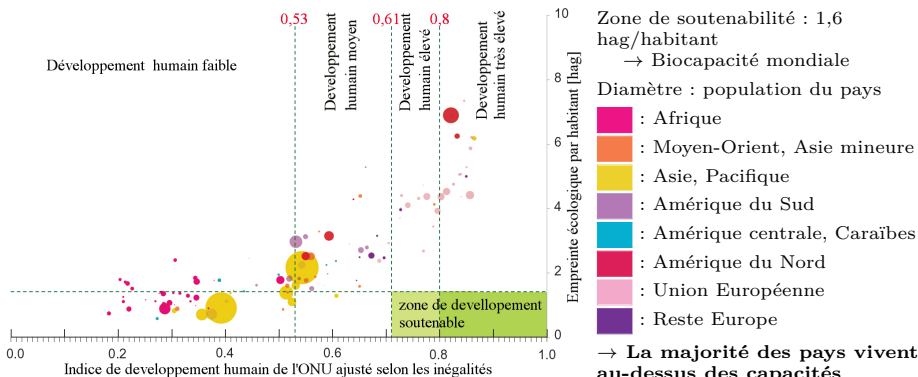
Croissance économique ? ? ? ? A voir . . .

IDH et empreinte écologique

L'Indice de Développement Humain (IDH, variant de 0 à 1) se calcule selon^[81] :

- Santé et longévité, basées sur l'espérance de vie à la naissance
- Éducation, basé sur le rapport de temps de scolarisation moyen/attendue
- Niveau de vie, basé sur le revenu national brut par habitant et le pouvoir d'achat

Nous pouvons le faire figurer en fonction de l'empreinte écologique



IDH en fonction de l'empreinte écologique^[82, 83]

hag : hectare globale : Surface bio-productive utile pour la société. Multiplication de la surface réelle par un facteur propre au type de surface : champs (2,51) ; forêts (1,26) ; pâturage (0,46) ; pêche (0,37) ; surfaces urbanisées (2,51)^[82]

Sommaire

1 Introduction

2 Les 9 limites planétaires

- Historique
- Les 9 limites planétaires
- Conséquences
- Interdépendance des limites planétaires

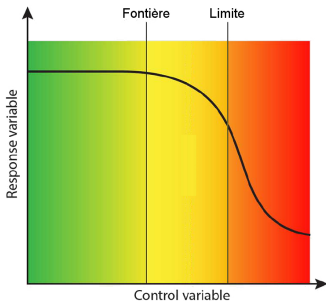
3 Soutenabilité

4 Conclusion

Même si cette notion est globalement admise et que de nombreux articles y font référence, les limites planétaires ne font pas totalement consensus dans le monde académique.

- Comment sont calculées les limites planétaires?
- La pertinence scientifique?

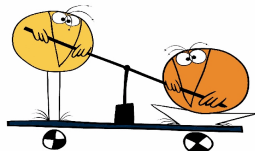
Il serait plus juste de parler de « Frontières planétaires » plutôt que « Limites » car le terme de frontière induit une notion d'incertitude par rapport au terme de limite. Mais aussi de franchissement possible dans les deux sens.



- Définir la « Frontière » comme l'entrée dans la zone d'incertitude, où, potentiellement, nous pourrions avoir un retour en arrière.

- Définir la « Limite » comme l'entrée dans la zone à haut risque, où, potentiellement, un retour en arrière serait impossible.

51/51



Je pompe donc je suis

En vous remerciant de votre attention



Bibliographie

- [1] K. JEAN.
CNAM - Enjeux des transitions écologiques : comprendre et agir.
In Séance 6 - Limites planétaires, 2023.
- [2] K. RICHARDSON, W. STEFFEN, W. LUCHT, J. BENDTSEN, S.E. CORNELL, J.F. DONGES, M. DRÜKE and I. FETZER, G. BALA, W. VON BLOH, G. FEULNER, S. FIEDLER, D. GERTEN, T. GLEESON, M. HOFMANN, W. HUISKAMP, M. KUMMU, C. MOHAN, D. NOGUÉS-BRAVO, S. PETRI, M. PORKKA, S. RAHMSTORF, S. SCHAPHOFF, K. THONICKE and A. TOBIAN, V. VIRKKI, L. WANG-ERLANDSSON, and L. WEBER and J. ROCKSTRÖM.
Earth beyond six of nine planetary boundaries.
Science advances, 9(37), 2023.
- [3] A. BOUTAUD and N. GONDRAN.
Limites planétaires - comprendre (et éviter) les menaces environnementales de l'anthropocène.

Technical report, Grand Lyon - La métropole, 2019.
- [4] Wikipédia (https://fr.wikipedia.org/wiki/Limites_plan%C3%A9taires).
Limites planétaires.
- [5] ONU.
6^{ème} rapport du GIEC, groupe 1, rapport complet.
The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021.
- [6] ONU.
4^{ème} rapport du GIEC, groupe 1, résumé à l'intention des décideurs.
The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007.

- [7] ONU.
6^{ème} rapport du GIEC, groupe 1, résumé à l'intention des décideurs.
The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021.
- [8] W. STEFFEN, P.J. CRUTZEN, and J.R. MCNEILL.
The Anthropocene : Are humans now overwhelming the great forces of nature ?
Ambio, 36(8) :614–621, 2007.
- [9] S.A. MARCOTT, J.D. SHAKUN, P.U. CLARK, and A.C. MIX.
A reconstruction of regional and global temperature for the past 11,300 years.
Science, 339 :1198–1201, 2013.
- [10] Centre de Ressources du développement Durable (CERDD).
Les limites planétaires.
Technical report, Centre de Ressources du développement Durable (CERDD), 2021.
- [11] W. STEFFEN, W. BROADGATE, L. DEUTSCH, O. GAFFNEY, and C. LUDWIG.
The trajectory of the Anthropocene : The great acceleration.
The Anthropocene Review, 2(1), 2015.
- [12] P.J. CRUTZEN.
Geology of mankind.
Nature, 415 :23, 2002.
- [13] P.J. CRUTZEN and E.F. STOERMER.
The "Anthropocene".
Global change Newsletter, The International Geosphere-Biosphere-Programme, 41 :17–18, 2000.

- [14] Nature (<https://www.nature.com/articles/d41586-024-00675-8>).
Geologists reject the Anthropocene as Earth's new epoch - after 15 years of debate, 6 Mars 2024.
- [15] Le Monde (https://www.lemonde.fr/sciences/article/2024/04/30/non-les-scientifiques-de-la-terre-ne-rejettent-pas-l-anthropocene_6230773_1650684.html).

Non, les scientifiques de la terre ne rejettent pas l'anthropocène, 2024.

- [16] Jean-Baptiste FRESSOZ and Christophe BONNEUIL.
L'Événement Anthropocène - La Terre, l'histoire et nous.
2014.
- [17] Jean-Baptiste FRESSOZ.
Sans transition - Une nouvelle histoire de l'énergie.
Écocène, 2024.
- [18] P.J. CRUTZEN and W. STEFFEN.
How long have we been in the Anthropocene era?
Climatic, 61 :251–257, 2003.
- [19] Nathanaël WALLENHORST.
La datation de l'entrée dans l'Anthropocène - Synthèse d'un débat à destination des enseignants.
Recherches et Éducation, 23, 2021.

- [20] W. STEFFEN, K. RICHARDSON, J. ROCKSTRÖM, S.E. CORNELL, I. FETZER, E.M. BENNETT, R. BIGGS, S.R. CARPENTER, W. DE VRIES, C.A. DE WIT, C. FOLKE, D. GERTEN, J. HEINKE, G.M. MACE, L.M. PERSSON, V. RAMANATHAN, B. REYERS, and S. SÖRLIN.
Planetary boundaries : Guiding human development on a changing planet.
Science, 347(6223), 2015.
- [21] J. ROCKSTRÖM, W. STEFFEN, K. NOONE, Å. PERSSON, F. S. CHAPIN III, E.F. LAMBIN, T.M. LENTON, M. SCHEFFER, C. FOLKE, H.J. SCHELLNHUBER, B. NYKVIST, C.A. DE WIT, T. HUGHES, S. VAN DER LEEUW, H. RODHE, S. SÖRLIN, P.K. SNYDER, R. COSTANZA, U. SVEDIN, M. FALKENMARK, L. KARLBERG, R.W. CORELL, V.J. FABRY, J. HANSEN, B. WALKER, D. LIVERMAN, K. RICHARDSON, P. CRUTZEN, and J.A. FOLEY.
A safe operating space for humanity.
Nature, 461 :472–475, 2009.
- [22] L. PERSSON, B.M. CARNEY ALMROTH, C.D. COLLINS, S. CORNELL, C.A. DE WIT, M.L. DIAMOND, P. FANTKE, M. HASSELLÖV, M. MACLEOD, M.W. RYBERG, P. SØGAARD JØRGENSEN, P. VILLARRUBIA-GÓMEZ, Z. WANG, and M. ZWICKY HAUSCHILD.
Outside the safe operating space of the planetary boundary for novel entities.
Environmental Science and Technology, 56 :1510–1521, 2022.
- [23] Zoé STEEP.
World3 et le rapport MEADOWS, les limites à la croissance - Questions raisonnées pour aujourd'hui.
2023.
- [24] E. MONNIN, E.J. STEIG, U. SIEGENTHALER, K. KAWAMURA, J. SCHWANDER, B. STAUFFER, T.F. STOCKER, D.L. MORSE, J.-M. BARNOLA, B. BELLIER, D. RAYNAUD, and H. FISCHERE.
Evidence for substantial accumulation rate variability in Antarctica during the Holocene, through synchronization of CO₂ in the Taylor Dome, Dome C and DML ice cores.
Earth and Planetary Science Letters, 224 :45–54, 2004.

- [25] O. MARCHAL and J. CHAPPELLAZ.
Sur les variations préindustrielles du CO_2 et du CH_4 atmosphériques.
Comptes Rendus Géoscience, 336 :691–699, 2004.
- [26] ONU.
5^{ème} rapport du GIEC, groupe 1, résumé technique.
The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013.
- [27] J.R. PETIT, J. JOUZEL, D. RAYNAUD, N.I. BARKOV, J.-M. BARNOLA, I. BASILE, M. BENDER,
J. CHAPPELLAZ, M. DAVIS, G. DELAYGUE, M. DELMOTTE, V.M. KOTLYAKOV, M. LEGRAND, V.Y.
LIPENKOV, C. LORIUS, L. PÉPIN, C. RITZ, E. SALTZMAN, and M. STIEVENARD.
Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core,
Antarctica.
Nature, 399 :429–436, 1999.
- [28] ONU.
6^{ème} rapport du GIEC, groupe 1, résumé technique.
The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021.
- [29] National Oceanic and Atmospheric Administration (<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>).
Monthly average Mauna Loa CO_2 .

- [30] P.M. FORSTER, C.J. SMITH, T. WALSH, W.F. LAMBERT, M.D. PALMER, K. VON SCHUCKMANN, B. TREWIN, M. ALLEN, R. ANDREW, A. BIRT, A. BORGER, T. BOYER, J.A. BROERSMA, L. CHENG, F. DENTENER, P. FRIEDLINGSTEIN, N. GILLET, J.M. GUTIÉRREZ, J. GÜTSCHOW, M. HAUSER, B. HALL, M. ISHII, S. JENKINS, R. LAMBOLL, X. LAN, J.-Y. LEE, C. MORICE, C. KADOW, J. KENNEDY, R. KILLICK, J. MINX, V. NAIK, G. PETERS, A. PIRANI, J. PONGRATZ, A. RIBES, J. ROGELJ, D. ROSEN, C.-F. SCHLEUSSNER, S. SENEVIRATNE, S. SZOPA, P. THORNE, R. ROHDE, M. ROJAS CORRADI, D. SCHUMACHER, R. VOSE, K. ZICKFELD, X. ZHANG, V. MASSON-DELMOTTE, and P. ZHAI.

Indicators of global climate change 2022 : Annual update of large-scale indicators of the state of the climate system and the human influence.

Earth System Science Data, 15(6), 2022.

- [31] F.G. FOSTER.

Seawater pH, $p\text{CO}_2$ and $[\text{CO}_3^{2-}]$ variations in the Caribbean sea over the last 130 kyr : A boron isotope and B/Ca study of planktic foraminifera.

Earth and Planetary Science Letters, 271 :254–266, 2008.

- [32] M.R. PALMER, G.J. BRUMMER, M.J. COOPER, H. ELDERFIELD, M.J. GREAVES, G.J. REICHART, S. SCHOUTEN, and J.M. YU.

Multi-proxy reconstruction of surface water $p\text{CO}_2$ in the northern Arabian sea since 29 ka.

Earth and Planetary Science Letters, 295(1-2) :49–57, 2010.

- [33] L. JIANG, R.A. FEELY, B.R. CARTER, D.J. GREELEY, D.K. GLEDHILL, and K.M. ARZAYUS.

Climatological distribution of aragonite saturation state in the global oceans.

Global Biogeochemical Cycles, 29 :1656–1673, 2015.

- [34] NASA European Commission World Meteorological Organization, ONU.

Scientific Assessment of Ozone Depletion : 2018.

ONU, 2018.

- [35] Institut Pierre Simon Laplace (<https://www.ipsl.fr/decouvrir/explorer/lozone/la-couche-dozone-et-son-role/>).
La couche d'ozone et son rôle.
- [36] IRSTEA Ifremer (https://www.inee.cnrs.fr/sites/institut_inee/files/download-file/Eutrophisation_synthese_FR.pdf) CNRS, INRA.
Eutrophisation : Manifestations, causes, conséquences et prédictibilité.
2017.
- [37] F. ESCULIER.
L'empreinte azote dans nos modes de vie.
2016.
- [38] J. ANGLADE.
Agriculture biologique et qualité de l'eau - intérêts de la complémentarité cultures élevages.
2019.
- [39] Food and Agriculture Organization of the United Nations (<https://www.fao.org/faostat/en/>).
Statistiques.
- [40] Andrew J. WATSON, Timothy M. LENTON, and Benjamin J.W. MILLS.
Ocean deoxygenation, the global phosphorus cycle and the possibility of human-caused large-scale ocean anoxia.
Philosophical Transactions of the Royal Society A, 375(20160318), 2017.
- [41] Union International pour la Conservation de la Nature.
Désoxygénation des océans : le problème de chacun - Causes, impacts, conséquences et solutions - Résumé à l'attention des décideurs.
Technical report, IUCN, 2019.

- [42] C. LU and H. TIAN .
Global nitrogen and phosphorus fertilizer use for agriculture production in the past half century : Shifted hot spots and nutrient imbalance.
Earth System Science Data, 9(1), 2017.
- [43] S.R. CARPENTER and E.M. BENNETT.
Reconsideration of the planetary boundary for phosphorus.
Environmental Research Letters, 6(1), 2011.
- [44] CNRS (<https://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau/decouv/cycle/cycleEau.html>).
Le cycle de l'eau.
- [45] M. PORKKA, V. VIRKKI, L. WANG-ERLANDSSON, D. GERTEN, T. GLEESON, C. MOHAN, I. FETZER, F. JARAMILLO, A. STAAL, S. TE WIERIK, A. TOBIAN, R. VAN DER ENT, P. DÖLL, M. FLÖRKE, S.N. GOSLING, N. HANASAKI, Y. SATOH, H.M. SCHMIED, N. WANDERS, J. ROCKSTRÖM, and M. KUMMU.
Global water cycle shifts far beyond pre-industrial conditions - planetary boundary for freshwater change transgressed.
Non encore revue par les pairs, 2023.
- [46] EU Copernicus Climate Change Service
(<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/satellite-land-cover?tab=overview>),
2014.
- [47] K. RICHARDSON, W. STEFFEN, W. LUCHT, J. BENDTSEN, S.E. CORNELL, J.F. DONGES, M. DRÜKE and I. FETZER, G. BALA, W. VON BLOH, G. FEULNER, S. FIEDLER, D. GERTEN, T. GLEESON, M. HOFMANN, W. HUISKAMP, M. KUMMU, C. MOHAN, D. NOGUÉS-BRAVO, S. PETRI, M. PORKKA, S. RAHMSTORF, S. SCHAPHOFF, K. THONICKE and A. TOBIAN, V. VIRKKI, L. WANG-ERLANDSSON, and L. WEBER and J. ROCKSTRÖM.
Earth beyond six of nine planetary boundaries - supplementary materials.
Nature, 9(37), 2023.

- [48] IPBES.
The global assessment report on biodiversity and ecosystem services.
Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES), 2019.
- [49] H. CEBALLOS, P.R. EHRLICH, A.D. BARNOSKY, A. GARCÍA, R.M. PRINGLE, and T.M. PALMER.
Accelerated modern human-induced species losses : Entering the sixth mass extinction.
Sciences Advances, 1(5), 2015.
- [50] M.D.A. ROUNSEVELL, M. HARFOOT, P.A. HARRISON, T. NEWBOLD, R.D. GREGORY, and G.M. MACE.
A biodiversity target based on species extinctions.
Science, 368(6496), 2020.
- [51] R.H. COWIE, P. BOUCHET, and B. FONTAINE.
The sixth mass extinction : fact, fiction or speculation ?
Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society, 97(2), 2022.
- [52] S.W. RUNNING.
A measurable planetary boundary for the biosphere.
Science, 337 :1458–1459, 2012.
- [53] A. KLEIDON.
Sustaining the terrestrial biosphere in the Anthropocene : A thermodynamic earth system perspective.
Ecology, Economy and Society - The INSEE Journal, 6(1) :53–80, 2023.
- [54] H. HABERL, K.H. ERB, and F. KRAUSMANN.
Human appropriation of net primary production : Patterns, trends, and planetary boundaries.
Annual Review of Environment and Resources, 2014.

- [55] A. VOILAND (<https://earthobservatory.nasa.gov/features/Aerosols>) Nasa. Aerosols : Tiny particles, big impact, 2010.
- [56] O. BOUCHER (<https://www.climat-en-questions.fr/reponse/aerosols-et-climat-par-olivier-boucher/>) IPSL.
- Comment les aérosols atmosphériques modifient-ils le climat ?, 2013.
- [57] J. HAYWOOD, A. JONES, N. BELLOUIN, and D. STEPHENSON. Asymmetric forcing from stratospheric aerosols impacts Sahelian rainfall. Nature Climate Change, 3(660-665), 2013.
- [58] K.S. KRISHNAMOHAN and G. BALA. Sensitivity of tropical monsoon precipitation to the latitude of stratospheric aerosol injections. Climate Dynamics, 59 :151–168, 2022.
- [59] S. ROOSE, G. BALA, K.S. KRISHNAMOHAN, L. CAO, and K. CALDEIRA. Quantification of tropical monsoon precipitation changes in terms of interhemispheric differences in stratospheric sulfate aerosol optical depth. Climate Dynamics, 61 :4243–4258, 2023.
- [60] David B. LOBELL, Stefania DI TOMMASO, and Jennifer A. BURNEY. Globally ubiquitous negative effects of nitrogen dioxide on crop growth. Sciences Advances, 8(22), 2022.
- [61] Earth observatory (<https://earthobservatory.nasa.gov/images/92654/just-another-day-on-aerosol-earth>) NASA.

Just another day on aerosol earth, 2018.

- [62] P. ZANIS, D. AKRITIDIS, A.K. GEORGOULIAS, R.J. ALLEN, S.E. BAUER, O. BOUCHER, J. COLE, B. JOHNSON, M. DEUSHI, M. MICHOU, J. MULCAHY, P. NABAT, D. OLIVIÉ, N. OSHIMA, A. SIMA, M. SCHULZ, T. TAKEMURA, and K. TSIGARIDIS.

Fast responses on pre-industrial climate from present-day aerosols in a CMIP6 multi-model study.

Atmospheric Chemistry and Physics, 20(14), 2020.

- [63] M. CHIN, T. DIEHL, Q. TAN, J.M. PROSPERO, R.A. KAHN, L.A. REMER, H. YU, A.M. SAYER, H. BIAN, I.V. GEOGDZHAYEV, B.N. HOLBEN, S.G. HOWELL, B.J. HUEBERT, N.C. HSU, D. KIM, T.L. KUCSERA, R.C. LEVY, M.I. MISHCHENKO, X. PAN, P.K. QUINN, G.L. SCHUSTER, D.G. STREETS, S.A. STRODE, O. TORRES, and X.-P. ZHAO.

Multi-decadal aerosol variations from 1980 to 2009 : A perspective from observations and a global model.

Atmospheric Chemistry and Physics, 14(7), 2014.

- [64] A. VOGEL, G. ALESSA, R. SCHEELE, L. WEBER, O. DUBOVIK, P. NORTH, and S. FIEDLER.

Uncertainty in aerosol optical depth from modern aerosol-climate models, reanalyses, and satellite products.

Journal of Geophysical Research : Atmospheres, 127(2), 2022.

- [65] Santé public France (<https://www.santepubliquefrance.fr/presse/2016/impacts-sanitaires-de-la-pollution-de-l-air-en-france-nouvelles-donnees-et-perspectives>).

Impacts sanitaires de la pollution de l'air en france : nouvelles données et perspectives.

- [66] WWF.

De la nature aux humains : jusqu'où iront les plastiques ?

WWF, 2019.

- [67] EWAG.
Anthropogenic micropollutants in water : impacts - risks - measures.
Technical report, Swiss Federal Institute of aquatic science and technology, 2009.
- [68] E. ELHACHAM, L. BEN-URI, J. GROZOVSKI, Y.M. BAR-ON, and R. MILO.
Global human-made mass exceeds all living biomass.
Nature, 588 :442-444, 2020.
- [69] Agence Parisienne du Climat (<https://www.apc-paris.com/changement-climatique/climat-a-paris/connaitre-levolution-du-climat-a-paris-et-ses-consequences/>).

Connaître l'évolution du climat à paris et ses conséquences.
- [70] ONU (<https://news.un.org/fr/story/2021/10/1105732>).
Une décennie de dérèglement climatique a vu disparaître 14% des récifs coralliens.
- [71] Véronique MARSOLLIER
(<https://www.cite-sciences.fr/archives/science-actualites/home/webhost.cite-sciences.fr/fr/science-actualites/actualite-as/wl/1248139321704/la-proliferation-de-planctons-microscopiques-pourrait-modifier-le-role-des-oceans/index.html>).

Acidification des océans : déséquilibre planctonique en perspective, 2013.
- [72] P.-Y. LONGARETTI.
Enjeux environnementaux : Changements globaux, limites planétaires et risques d'effondrement.
In Green University, 2022.

- [73] W. STEFFEN, J. ROCKSTRÖM, K. RICHARDSON, C. FOLKE T.M. LENTON, D. LIVERMAN, C.P. SUMMERHAYES, A.D. BARNOSKY, S.E. CORNELL, M. CRUCIFIX, J.F. DONGES, I. FETZER, S.J. LADE, M. SCHEFFER, R. WINKELMANN, and H.J. SCHELLNHUBER.
Trajectories of the earth system in the anthropocene.
Proceedings of the National Academy of Sciences, 115(33) :8252–8259, 2018.
- [74] A. BRES, C. MARC, and Bonpote.
Tout comprendre (ou presque) sur le climat.
CNRS édition, 2022.
- [75] A. BOUTAUD and N. GONDRAN.
Les limites planétaires.
La découverte, 2020.
- [76] K. RAWORTH.
A safe and just space for humanity, can we live within the doughnut ?
Oxfam, 2012.
- [77] K. RAWORTH.
Doughnut Economics : Seven Ways to Think Like a 21st Century Economist.
Chelsea Green Publishing, 2017.
- [78] ONU (<https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/objectifs-de-developpement-durable/>).
Objectifs de développement durable.
- [79] University of Leeds (<https://goodlife.leeds.ac.uk/national-trends/country-trends/#GBR>).
A good life for all within planetary boundaries, 2022.

- [80] Stockholm Resilience Center (<https://www.stockholmresilience.org/research/research-news/2016-06-14-the-sdgs-wedding-cake.html>).

The SDGs wedding cake.

- [81] ONU (<https://hdr.undp.org/about-hdro#humandev1>).
Human development report.

- [82] Catherine EVEN, Guillaume ROUX, and Jacques TREINER.
Empreinte écologique et démographique.
Technical report, Enjeux de la transition écologique, EDP Sciences, 2021.

- [83] WWF.
Living Planet - Report 2014 - Species and spaces, people and places.
Technical report, WWF, 2014.