

## **Les neuf limites planétaires – synthèse**

Aujourd'hui, la stabilité et la résilience du système terrestre sont menacées par les actions des êtres humains et des changements compromettant la survie de certaines espèces animales et végétales, ainsi que l'espèce humaine, sont en cours. Afin de quantifier ces changements et comprendre comment les limiter, en 2009, Rockström et al. ont identifié les principaux processus du fonctionnement du système terre et les seuils à ne pas franchir pour ne pas basculer vers de graves changements environnementaux pour certains irréversibles. Ils ont ainsi défini neuf limites planétaires.

En rouge, les limites dépassées en 2023 ; en vert, les limites situées en dessous du seuil critique en 2023.

| Limite                    | Quoi ?   | Causes ?  | Conséquences ?   |
|---------------------------|--|---|--|
| Intégrité de la biosphère | - Déclin du nombre (diversité fonctionnelle) et de la variété des espèces vivantes (diversité génétique).<br>- Les êtres humains dépendent de l'intégrité des écosystèmes pour leur survie (p. ex. production agricole et animaux pollinisateurs). | 1) Dégradation et destruction des habitats par les activités humaines (p. ex. déforestation, urbanisation, aquaculture, pêche, etc.) ; cause principale de la perte de la biodiversité dans la majorité des écosystèmes terrestres et d'eau douce.<br>2) Surexploitation des ressources (p. ex. surpêche) ; cause principale de la perte de la biodiversité dans les milieux marins.<br>3) Pollution des eaux, de l'air et des sols (p. ex. pesticides, microplastiques).<br>4) Changements climatiques.<br>5) Espèces invasives (p. ex. moules zébrées dans le Léman). | - Mise en danger du fonctionnement des écosystèmes et de leur résilience (c'est-à-dire leur capacité à faire face aux perturbations).<br>- 6 <sup>e</sup> extinction de masse.<br>- Conséquences des causes ci-contre :<br>1) Destruction et fragmentation des habitats.<br>2) Prélèvements supérieurs à la capacité de régénération de la faune et la flore.<br>3) Dégradation des habitats.<br>- Ingestion par les espèces vivantes : impacts sur toute la chaîne alimentaire.<br>4) Perte locale d'espèces, changements structurels au sein d'un écosystème et extinctions d'espèces.<br>- Déplacement des aires de répartition des espèces (changements trop rapides pour que l'adaptation soit possible).<br>5) Prolifération d'espèces invasives causant des dommages écologiques, sanitaires et/ou économiques. |
|                           | Variable de contrôle   | a) Diversité génétique : taux d'extinction par million d'espèces par an<br>b) Diversité fonctionnelle : appropriation par les humains de la productivité primaire nette (ppn), c'est-à-dire le taux de production de biomasse (photosynthèse) dans un écosystème*.  |  |
|                           | Limite planétaire  | a) Diversité génétique : maximum 10<br>b) Diversité fonctionnelle : l'appropriation par les humains ne doit pas être plus de 10% de la valeur de totale de la période préindustrielle.  |  |
|                           | Valeur actuelle et tendance  | a) Diversité génétique : Environ 100 à 1000, en augmentation<br>b) Diversité fonctionnelle : env. 30 %  |  |

| Limite   | Quoi ?  | Causes ?   | Conséquences ?   |   |
|--|---|--|--|---|
| Pollution de l'air = charge atmosphérique en aérosol | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Effet des aérosols* atmosphériques d'origine anthropique sur le système Terre.</li> <li>- Environ un dixième des aérosols est d'origine humaine avec des concentrations qui varient fortement d'un endroit à l'autre.</li> <li>- Augmentation des particules fines (fumées, poussières, gaz polluants, etc.) dans l'atmosphère depuis la révolution industrielle.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Émissions de poussières fines liées à la combustion de carburants fossiles et de biomasse (p. ex. bois, déchets végétaux) et à la dégradation et l'érosion des sols (p. ex. désertification).</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Impacts directs sur les températures : effet refroidissant ou réchauffant selon la composition chimique des aérosols qui influence leur pouvoir réfléchissant au rayonnement solaire (p. ex. smog).</li> <li>- Interactions avec la vapeur d'eau présente dans l'air : les microparticules affectent la formation des nuages et par conséquent la pluviométrie (p. ex. en changeant le calendrier et la localisation des moussons, formation de pluies acides).</li> <li>- Impacts négatifs sur la santé (p. ex. maladies respiratoires).</li> <li>- Modification de l'albédo avec le dépôt de suie et de particules foncées sur la surface terrestre, la neige et la glace : augmentation de la quantité de lumière solaire absorbée avec pour conséquence une augmentation des températures locales / de la fonte des neiges et de la glace.</li> <li>- Aérosols de sulfates et de nitrates peuvent affecter la capacité des plantes à effectuer la photosynthèse : impact sur les écosystèmes.</li> </ul>  |   |
|  | Variable de contrôle  |  |  | Différence de « profondeur optique » entre les hémisphères nord et sud (réduction de la quantité de lumière du soleil qui atteint la surface terrestre par absorption et diffusion)   |
|  | Limite planétaire   |  |  | 0,1   |
|  | Valeur actuelle et tendance   |  |  | 0.076   |
| Changement climatique                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Amplification de l'effet de serre naturel de la Terre en raison des émissions anthropiques de gaz à effet de serre (GES) tels que le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>), le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) ou les gaz fluorés.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Émissions anthropiques de CO<sub>2</sub> dues : <ul style="list-style-type: none"> <li>- à l'utilisation des combustibles fossiles (pétrole, gaz, charbon),</li> <li>- à la déforestation,</li> <li>- à la fabrication du ciment.</li> </ul> </li> <li>Émissions anthropiques de CH<sub>4</sub> dues : <ul style="list-style-type: none"> <li>- aux activités agricoles (élevage de bétail, riziculture, fumier animal),</li> <li>- à la production et au transport de combustibles fossiles</li> <li>- à la décomposition des déchets organiques dans les décharges.</li> </ul> </li> <li>Émissions anthropiques de N<sub>2</sub>O dues : <ul style="list-style-type: none"> <li>- aux activités agricoles (utilisation des engrais, gestion des fumiers)</li> </ul> </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Hausse de la température moyenne globale avec des différences régionales et locales.</li> <li>- Augmentation des phénomènes climatiques extrêmes, en fréquence et en intensité (sécheresses, inondations, cyclones, etc.).</li> <li>- Désertification.</li> <li>- Risque accru de déclenchement des points de basculement qui engendrent des situations de non-retour (p. ex. effondrement des calottes glaciaires, dépérissement généralisé de la forêt amazonienne, etc.).</li> <li>- Augmentation des incendies.</li> <li>- Montée du niveau des mers et des océans.</li> <li>- Détérioration des écosystèmes.</li> <li>- Perte de la biodiversité.</li> <li>- Modification de la circulation atmosphérique et océanique.</li> <li>- Impacts sur les populations humaines : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Modification de la disponibilité locale en eau douce.</li> <li>- Production agricole et capacité à produire de la nourriture.</li> <li>- Habitabilité de certaines villes et régions.</li> <li>- Migrations climatiques.</li> </ul> </li> </ul> |   |
|  | Variable de contrôle  |  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, parties par million (ppm)</li> <li>b) Augmentation du forçage radiatif* en watt par mètre carré (W/m<sup>2</sup>) par rapport à l'ère préindustrielle</li> </ul> |
|  | Limite planétaire   |  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>a) 350 ppm au maximum</li> <li>b) + 1,0 W/m<sup>2</sup> par rapport à l'ère préindustrielle</li> </ul>   |
|  | Valeur actuelle et tendance   |  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>a) 417 ppm en augmentation</li> <li>b) + &gt;2,75 W/m<sup>2</sup></li> </ul>   |

| Limite                         | Quoi ?  |   | Causes ?  | Conséquences ?   |
|--------------------------------|---|---|---|--|
|                                |   |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- à la combustion d'énergie fossile</li> <li>- à la combustion de végétaux</li> <li>- aux activités industrielles</li> </ul> Émissions anthropiques de gaz fluorés dues : <ul style="list-style-type: none"> <li>- aux systèmes de réfrigération et de climatisation</li> <li>- aux activités industrielles</li> </ul>                                 |  |
| Pollution chimique             | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pollution de l'environnement générée par les activités humaines (agricoles, industrielles ou urbaines).</li> <li>- La pollution chimique s'intéresse à : <ul style="list-style-type: none"> <li>- l'introduction de nouvelles entités chimiques (= composés chimiques synthétiques) dans la biosphère (p. ex. pesticides synthétiques),</li> <li>- aux matières radioactives mobilisées par l'être humain,</li> <li>- aux organismes génétiquement modifiés, etc.</li> </ul> </li> </ul> |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Libération de composés toxiques dans la biosphère dont la persistance dans l'environnement, la mobilité géographique et l'impact potentiel sur les sous-systèmes du système Terre sont souvent mal (voire pas) connus.</li> <li>- La pollution chimique est composée d'environ 1/3 de pollutions plastiques et 2/3 d'engrais de synthèse.</li> </ul> | Effets sur la santé humaine et les écosystèmes : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Accumulation dans les tissus des êtres vivants.</li> <li>- Réduction de la fertilité.</li> <li>- Dommages génétiques.</li> <li>- Bioaccumulation (= accumulation de la nouvelle entité dans les tissus du corps d'un organisme).</li> <li>- Bioamplification (= augmentation de la concentration de la nouvelle entité dans le corps des organismes tout au long de la chaîne alimentaire).</li> </ul>   |
|                                | Variable de contrôle  | Pourcentage de produits chimiques synthétiques rejetés dans l'environnement sans avoir fait l'objet de tests de sécurité adéquats       |   |  |
|                                | Limite planétaire   | Le principe de précaution s'applique et la valeur du seuil est fixée à 0.   |   |  |
|                                | Valeur actuelle et tendance   | Actuellement de nombreux produits chimiques sont rejetés dans l'environnement sans avoir fait l'objet de tests de sécurité adéquats > 0 |   |  |
| Charge d'azote et de phosphore | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Perturbation des cycles biogéochimiques par l'utilisation d'azote et de phosphore dans l'agriculture comme nutriments essentiels pour augmenter la production de cultures alimentaires (engrais).</li> </ul>   |   | Perturbation du cycle de l'azote : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilisation d'engrais azotés dans l'agriculture qui ne sont que partiellement absorbés par les plantes : écoulement de l'excédent vers les cours d'eau, les lacs, les nappes phréatiques et les eaux côtières.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pollution aux nitrates : eau impropre à la consommation.</li> <li>- Saturation de la végétation : en favorisant la croissance de certaines plantes au détriment d'autres, cela provoque une diminution de la diversité des espèces végétales.</li> <li>- Détérioration des écosystèmes aquatiques : les engrais qui se retrouvent dans l'eau provoquent la croissance excessive d'algues pouvant entraîner la mort des poissons (eutrophisation) : zones mortes dans les mers et côtes</li> </ul> |
|                                | Variable de contrôle  | Au niveau global : Écoulement du  |   |  |

| Limite                   | Quoi ?   |  | Causes ?  | Conséquences ?   |  |
|--------------------------|--|--|---|--|--|
|                          |  | phosphore des systèmes hydrologiques d'eau douce vers les océans (en Mt / an)  | réactif appliqué à la terre comme engrais en million de tonnes (Mt) par an  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Combustion de carburants fossiles et de biomasse (y compris déchets végétaux) : libération d'oxydes d'azote qui, en retombant sur les sols, contribuent à l'augmentation de la teneur en azote.</li> <li>- Cultures de plantes fixatrices d'azote (légumineuses), eaux usées urbaines et élevage de bétail.</li> <li>- Perturbation du cycle du phosphore : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Extraction rocheuse de phosphates utilisés pour produire des engrais et des détergents qui finissent dans les sols et les eaux.</li> <li>- Élevage.</li> </ul> </li> </ul>   |  |
|                          | Limite planétaire  | Phosphore : max. 11 Mt / an  | Azote : max. 62 Mt / an   |  |  |
|                          | Valeur actuelle et tendance  | Env. 22,6 Mt / an en augmentation  | Env. 190 Mt / an en augmentation  |  |  |
| Acidification des océans | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Les océans sont des puits à carbone. Ils absorbent une partie du CO<sub>2</sub> atmosphérique.</li> <li>- Lorsque le CO<sub>2</sub> se dissout dans les océans et les mers, il forme de l'acide carbonique provoquant une baisse du PH de l'eau et ainsi une acidification des océans et des mers.</li> </ul> |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- L'augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère provoque une augmentation de la quantité de CO<sub>2</sub> absorbée par les mers et les océans, une diminution du pH de l'eau et une acidification des océans et des mers.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Conséquences néfastes sur les organismes marins : affaiblissements de leurs coquilles et de leurs squelettes, ce qui les rend plus fragiles et vulnérables (p. ex. mort des coraux, diminution des coquillages, problèmes de croissance des crustacés).</li> <li>- Perturbation de la chaîne alimentaire marine et mise en danger de l'ensemble de l'écosystème : affaiblissement des organismes à la base de la chaîne (planctons et coquillages).</li> <li>- Modification de la composition des écosystèmes marins en favorisant le développement de certaines espèces par rapport à d'autres et en perturbant le comportement de certains animaux.</li> <li>- Les effets de l'acidification des océans se combinent avec ceux de l'augmentation de la température de l'eau et de la réduction de l'oxygène dissout dans l'eau (causée par l'augmentation de la température de l'eau). Ce « trio mortel » a des conséquences dévastatrices notamment sur les récifs coralliens hébergeant des écosystèmes riches en biodiversité et protégeant les côtes de l'érosion.</li> </ul> |  |
|                          | Variable de contrôle   | Taux de saturation moyenne globale de l'aragonite (carbonate de calcium) dans les eaux de surface (Ω), équivalent au pourcentage du niveau préindustriel |   |  |  |
|                          | Limite planétaire  | 2.86 Ω équivalent à 80 % du niveau préindustriel   |   |  |  |
|                          | Valeur actuelle et tendance  | 2.84 Ω en diminution   |   |  |  |
| Prélèvements d'eau douce | - Perturbation du cycle de l'eau douce, comprenant l'eau bleue* et l'eau verte*.   |  | 1) Déforestation.   | Conséquences des causes ci-contre :<br>1)  |  |

| Limite                  | Quoi ?  |   |   | Causes ?   | Conséquences ?   |
|-------------------------|---|---|---|--|--|
|                         | Variable de contrôle  | Eau bleue : part du territoire connaissant une perturbation des eaux de surface et des eaux souterraines (en %) | Eau verte : part du territoire connaissant une perturbation de la quantité d'eau disponible pour la végétation (en %) | 2) Urbanisation et construction de surfaces imperméables.<br>3) Détournement et prélèvements d'eau par l'agriculture, les industries, les activités hydrauliques, etc.<br>4) Changement climatique.<br>5) Augmentation de la quantité d'aérosols.  | - Assèchement des sols (impact négatif sur l'eau verte)<br>- Aridification et désertification<br>- Réduction des précipitations locales (impact négatif sur l'eau bleue et verte).<br>2)<br>- Altération de la façon dont l'eau s'écoule et s'infiltré dans le sol.<br>- Pollution de l'eau (contamination de l'eau potable, destruction des habitats aquatiques, effets néfastes sur la santé humaine).<br>3)<br>- Modification de la disponibilité en eau pour la consommation humaine > conflits entre les différents types d'usages et entre les régions > conflits armés.<br>- Manque d'eau pour le développement de la végétation.<br>- Assèchement des fleuves.<br>4)<br>- Modification du régime pluviométrique (aridification ou réduction / augmentation des précipitations locales, Changements dans la saisonnalité des pluies, sécheresses locales, etc.).<br>- Changements dans les processus d'accumulation et de fonte des neiges et des glaces.<br>5)<br>- Modification des régimes de précipitations par son impact sur la formation des nuages. |
|                         | Limite planétaire   | 10,2 % de la surface terrestre libre de glace   | 11,1 % des sols planétaires   |  |  |
|                         | Valeur actuelle et tendance   | Env. 18 %   | Env. 16 %   |  |  |
| Reconversion des terres | - Conversion des terres (forêts, savanes, prairies, arbustaies, etc.) à des fins humaines (surfaces agricoles, urbaines, etc.). |   |   | Causes directes :<br>- Intensification de l'agriculture (première cause au niveau mondial).<br>- Activités forestières.<br>- Urbanisation.<br>- Construction d'infrastructures.<br>- Production d'énergie.<br>- Activités minières.<br>Causes indirectes :<br>- Changements climatiques -> aridification, événements extrêmes (cyclones, inondations, etc.). | - Modification de la quantité d'eau évaporée par la couverture végétale -> modification du cycle de l'eau.<br>- Dégradation de la structure et de la qualité des sols (disparition des racines, de la matière organique et des organismes qui contribuaient à la stabilité des sols).<br>- Augmentation de l'érosion des sols par l'eau et le vent.<br>- Imperméabilisation des sols.<br>- Augmentation des dangers naturels.<br>- Création d'îlots de chaleur urbaine.<br>- Destruction des puits de carbone naturels.<br>- Perte de la biodiversité et modification des écosystèmes.<br>- Renforcement du réchauffement climatique.<br>- Perturbation des cycles de l'azote et du phosphore.   |
|                         | Variable de contrôle  | Surface boisée par rapport à la surface couverte avant intervention humaine (en %)                              |   |  |  |
|                         | Limite planétaire   | Au moins 75 % (au moins 85 % pour les forêts tropicales et boréales, au moins 50 % pour les forêts tempérées)   |   |  |  |
|                         | Valeur actuelle et tendance   | < 60 % en diminution  |   |  |  |

| Limite                               | Quoi ?  | Causes ?   | Conséquences ?   |
|--------------------------------------|---|--|--|
| Appauvrissement de la couche d'ozone | <ul style="list-style-type: none"> <li>- L'ozone (O<sub>3</sub>) est une molécule composée de trois atomes d'oxygène qui filtre une partie du rayonnement ultraviolet (UV) du soleil et protège les êtres vivants d'une surexposition à ces rayons.</li> <li>- La plupart des molécules d'ozone se trouvent dans la stratosphère (située entre 10 et 50 km au-dessus de la surface terrestre)</li> <li>- L'ozone constitue un bouclier naturel, sans lequel la vie sur terre serait impossible.</li> <li>- Naturellement les mécanismes de formation et de destruction de l'ozone se compensent.</li> <li>- Diminution importante de la couche d'ozone au début des années 1980 -&gt; trou dans la couche d'ozone.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Émissions massives de chlorofluorocarbures (CFCs) dans les années 1980 et 1990.</li> <li>- Utilisation des CFCs interdite par la mise en place du protocole de Montréal en 1987.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Une surexposition aux rayons UV peut causer certains types de cancers de la peau et certaines pathologies des yeux.</li> <li>- Perturbation, voire interruption, de la capacité des organismes végétaux à réaliser la photosynthèse.</li> <li>- Depuis les années 2000, l'épaisseur moyenne de la couche d'ozone est en cours de récupération.</li> <li>- Le protocole de Montréal a permis de ne pas dépasser la limite planétaire. Cependant, les produits qui ont remplacé les CFCs sont des puissants GES...</li> </ul> |
|                                      | Variable de contrôle  | Concentration d'ozone dans la stratosphère en unités Dobson (DU)   |  |
|                                      | Limite planétaire   | Au moins 275 DU  |  |
|                                      | Valeur actuelle et tendance   | 277,4 DU en augmentation   |  |

#### SOURCES :

- Amer Estefania (2024). *Les dimensions du Donut de Kate Raworth*. Centre de compétence en durabilité (CCD), Université de Lausanne (UNIL). <https://www.ecolevaudoisedurable.ch/ressources/les-dimensions-du-donut-de-kate-raworth> (consultation août 2024).
- Aimee Laurel, Carolina Escobar-Tello, Kate Raworth, and Ruurd Priester, with contributions by the DEAL Team (2024). *Dimensions of the Doughnut*. Doughnut Economic Action Lab. <https://doughnuteconomics.org/tools/dimensions-of-the-doughnut> (consultation février 2025).
- Caesar L., Sakschewski B. et al. (2024). *Planetary Health Check Report 2024*. Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam, Germany. (disponible sur: <https://www.planetaryhealthcheck.org/> consultation février 2024).

#### LEXIQUE :

- \*Écosystème = unité écologique caractérisée par une communauté d'organismes et leur environnement physique, ainsi que leurs interactions (Amer, 2024).
- \*Aérosol = mélange d'un gaz et de particules fines solides ou liquides qui sont en suspension.
- \*Forçage radiatif = la concentration accrue de GES dans l'atmosphère empêche une partie du rayonnement infrarouge de repartir vers l'espace induisant ainsi un déséquilibre dans le bilan radiatif de la terre.
- \*Eau bleue : eau contenue dans les cours d'eau, lacs, nappes phréatiques, etc.
- \*Eau verte : résulte de l'infiltration de l'eau des précipitations dans les couches supérieures du sol : eau directement disponible pour les plantes et essentielle pour le bon fonctionnement des écosystèmes.

Réalisation : Cellule durabilité (Département de l'enseignement et de la formation professionnelle, État de Vaud) – février 2025

Relecture : Thomas Jaccard (Centre de compétence en durabilité, UNIL)