

# La limite planétaire pour l'eau douce

Dossier de la rédaction de H2o  
November 2023

L'annonce faite le 13 septembre dernier du franchissement de la "limite planétaire" pour l'eau douce n'était pas un scoop puisque la même annonce avait déjà été faite en avril 2022 par la même équipe du Stockholm Resilience Center. Cette annonce ne portait pas non plus sur un événement récent puisque ce franchissement date de plus d'un siècle ! L'avis d'expert est nécessaire pour bien comprendre : voici celui de Gérard PAYEN. H2o novembre 2023.

## LA "LIMITÉ PLANÉTAIRE" POUR L'EAU DOUCE

Que signifie concrètement son "franchissement" ?  
Défrichage de l'annonce du Stockholm Resilience Center du 13 septembre 2023

Gérard PAYEN

membre de l'Académie des technologies

vice-président du Partenariat Français pour l'Eau

H2o - novembre 2023

À

RÉSUMÉ

La "limite planétaire de l'eau" dont le franchissement a été annoncé en septembre 2023 est un concept scientifique évolutif dont la signification peu intuitive est très éloignée de la perception donnée par l'expression limite planétaire en langage commun. Il y a donc un grand risque de mauvaise interprétation, risque accentué par l'accent spectaculaire mis sur des paramètres non encore interprétés de façon claire en détournant l'opinion publique des nombreux décléments factuels de la crise mondiale de l'eau.Â

Les "limites planétaires" sont un concept et un référentiel structuré imaginé en 2009 par Johan Rockström et son équipe du Stockholm Resilience Center. Ce référentiel contient des limites de sécurité qui ne doivent pas être franchies pour 9 types de changements apportés par l'Homme au fonctionnement du système Terre depuis le début de la période industrielle, changements dont l'ampleur est susceptible d'affecter de façon irreversible et dangereuse la durabilité de ce fonctionnement. Pour l'eau douce, le premier indicateur mondial choisi en 2009 était le volume des prélevements nets annuels. Un deuxième indicateur relatif à l'humidité des sols a été ajouté en 2022, puis abandonné. Deux nouveaux indicateurs ont été introduits mi-2022 en remplacement des précédents. Ils sont décrits dans l'encadré 3.

L'annonce mi-septembre 2023 du franchissement de la "limite planétaire" de l'eau douce n'était pas un scoop puisque la même annonce avait déjà été faite en avril 2022 par la même équipe. Cette annonce ne portait pas non plus sur un événement récent puisque ce franchissement date de plus d'un siècle ! En fait, deux "limites" ont été déclarées : l'une en 1905, relative à la variabilité des débits dans les cours d'eau (indicateur "eau bleue"), qui est aujourd'hui plus forte qu'avant la période industrielle dans un plus grand nombre de régions ; l'autre en 1929, relative à la variabilité des taux d'humidité dans la tranche supérieure des sols (indicateur "eau verte") qui est également aujourd'hui plus forte qu'avant la période industrielle dans un plus grand nombre de régions. Dans les deux cas, débits et taux d'humidité, des indicateurs mondiaux ont été construits à partir des données issues d'un modèle hydro-climatique sur la période 1671-2005. Chacun mesure l'extension géographique des zones dans lesquelles les valeurs mensuelles d'humidité ou de débits s'accordent de leurs bandes de fluctuations préindustrielles définies comme les bandes dans lesquelles se trouvaient 90 % de ces valeurs mensuelles avant 1860. Chacun des deux indicateurs est stable par construction autour de 10 % avant 1860, puis montre une croissance régulière après 1900. Certains détails sont étonnantes et nécessiteraient de mieux connaître le fonctionnement du modèle et la signification de ses paramètres débits et humidité.

Ces changements de variabilité sont significatifs mais leurs conséquences physiques sont difficiles à identifier. Traduisent-ils des dérèglements négatifs à l'échelle planétaire ou des dérèglements régional sans grande importance pour les équilibres planétaires ? Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour explorer et comprendre les conséquences éventuelles des augmentations depuis 1900 de ces deux indicateurs "eau bleue" et "eau verte".

Les auteurs du référentiel des "limites planétaires" cherchaient depuis de nombreuses années le moyen d'annoncer que l'eau avait franchi sa "limite planétaire". C'est en adoptant une approche conservatrice qu'ils ont pu déclarer que la "limite planétaire" des changements de l'eau douce avait été franchie dès 1905. En effet, en raison de l'ignorance des impacts réels des croissances des deux indicateurs précités, c'est en faisant appel au principe de précaution qu'ils ont considéré que la sécurité était de rester dans les limites des variabilités préindustrielles. Cependant la croissance d'un paramètre n'est pas forcément annonciatrice d'une catastrophe. Personne ne mesure aujourd'hui le danger réel correspondant à ces extensions géographiques.

La communauté de l'eau a besoin que des spécialistes de la modélisation hydro-climatique, d'une part explicitent le sens des deux paramètres utilisés, d'autre part confirment la concordance des résultats avec d'autres modèles. Par ailleurs, des recherches futures sont nécessaires pour identifier les impacts concrets de l'augmentation constatée de la variabilité des deux paramètres, impacts aujourd'hui théoriques, afin de pouvoir utiliser en pratique les résultats établis par le Stockholm Resilience Center.

Â

## LES FAITS

Le 13 septembre 2023, le Stockholm Resilience Center a annoncé le franchissement de 6 "limites planétaires" sur 9. Cette annonce incluait la transgression d'une sixième limite, celle relative à l'eau douce. Elle faisait suite à la parution ce même 13 septembre dans la revue *Science Advance* d'un article scientifique intitulé "Earth beyond six of nine planetary boundaries" signé par Katherine Richardson, Johan Rockström et 26 autres co-auteurs (référence 1).

Immédiatement, l'AFP a relayé et les médias du monde entier se sont faits les relais de cette annonce avec des titres souvent angoissants centrés sur l'eau. En France, ce sont aussi bien les médias grand public que des médias spécialisés qui ont relayé l'information : TF1, France Info, Huffington Post, Reporterre, Novethic, National Geographic, etc. À "Environnement : une sixième limite planétaire vient d'être franchie et elle concerne l'eau douce" (France Info), "Cycle de l'eau douce : une nouvelle limite planétaire vient d'être franchie" (Novethic), "La limite planétaire du cycle de l'eau à son tour dépassée" (Reporterre)... Bien entendu, une telle annonce n'a pas manqué de créer une forte émotion. Plusieurs spécialistes de l'eau l'ont relayée sur les réseaux sociaux comme si elle apportait un véritable nouveau trait important. Elle est maintenant reprise et largement pour appuyer des discours alarmistes sur l'eau.Â

Pourtant, si la Conférence des Nations unies sur l'eau (tenue en mars 2023) a déclaré la "crise mondiale de l'eau" et si les discours sur l'eau ont raison d'être alarmistes, ce n'est pas le travail scientifique à la base de l'annonce du 13 septembre 2023 qui en apporte des justifications supplémentaires, ainsi que j'essaie de l'expliquer ci-après.

Le "scoop" n'en était pas une puisque : d'une part, la même annonce sur l'eau avait déjà été faite en avril 2022 (référence 3), et reprise par le rapport "Soutenabilité" de France Stratégie en 2022 ; d'autre part, le franchissement de la "limite planétaire relative à l'eau douce" par le système Terre ne date lui-même pas de cet été ; selon les auteurs du travail scientifique, il remonte à plus d'un siècle !Â

À noter que la communication et la publication de franchissement de cette sixième limite planétaire s'appuie sur une publication relative à l'eau ayant été diffusée en "preprint" sur Archiv, mais qui n'a pas encore été validée par un comité de lecture.

## QUE COMPRENDRE ?

À la base de ce concept de "limites planétaires", il y a un véritable travail scientifique sur près de 15 ans visant à établir rigoureusement des limites de sécurité dans 9 domaines interdépendants mais distincts, du fonctionnement du système Terre. L'eau douce est l'un de ces 9 domaines identifiés dès 2009.Â

Dire qu'une limite a été franchie est toujours inquiétant.Â

Mais quelle limite pour l'eau a-t-elle été franchie et que signifie ce franchissement ?Â

J'ai essayé de trouver les réponses à ces deux questions en défrichant les nombreuses publications scientifiques des chercheurs travaillant avec le Stockholm Resilience Center sur les "limites planétaires" depuis 2009 (voir encadré 3). C'est riche et assez complexe. Il reste difficile de se représenter facilement ces deux limites pour l'eau et l'apprehension des conséquences concrètes de leur franchissement nécessiterait encore de futures recherches.

Le risque est grand d'interprétations hâtives erronées et, par suite, de mauvaises décisions.

Nous avons besoin de bien comprendre. Cet article décrit ce que j'ai compris à ce jour mais, n'étant pas spécialiste des modèles hydro-climatiques, je ne suis pas certain d'avoir tout interprété correctement et ce n'est donc qu'une note de défrichage. J'espère que d'autres pourront compléter ma compréhension encore incertaine du franchissement de cette "limite planétaire". À

En pratique, ce qui est appelé la "limite planétaire" de l'eau est formé de deux sous-limites l'une relative à "l'eau bleue", l'eau qui s'écoule dans les cours d'eau et les nappes souterraines et l'autre à "l'eau verte", celle qui tombe sur le sol et la vaporise avant de s'évaporer. Ces qualificatifs de limites colorées sont pratiques en communication mais leur signification risque d'être bien éloignée de ce qu'elles signifient pour les lecteurs. À

## LE CONCEPT DE "LIMITES PLANÉTAIRES"

Les "limites planétaires" sont un concept et un référentiel.

Le concept est lié au passage de l'Holocène à l'Anthropocène. Une "limite planétaire" est une limite de sécurité à ne pas franchir pour un type de changement apporté par l'Homme au fonctionnement du système Terre depuis le début de la période industrielle, changement dont l'ampleur est susceptible d'affecter de façon irreversible et dangereuse la durabilité de ce fonctionnement.

Le référentiel des "limites planétaires" est un ensemble structuré comprenant un petit nombre de grandeurs dont les changements sont surveillés avec une limite de sécurité pour chacune d'entre elles. Le petit nombre facilite la communication sur les résultats avec, en particulier, un diagramme-radar synthétique facile à apprécier. Ce référentiel est détaillé en encadré 1.

## LES "LIMITES PLANÉTAIRES" DE L'EAU DOUCE

L'eau douce est l'un des 9 secteurs du référentiel. Initialement en 2009, le processus surveillé était celui des déversements d'eau bleue par les activités humaines. Sa situation actuelle s'est révoluée dans sa zone de sécurité.

Un second processus, celui de "l'eau verte" a été examiné et un indicateur relatif à la variabilité de l'humidité des sols la planète a été établi. Ne donnant pas des résultats nets, il a été remplacé en 2022 par un nouvel indicateur, assez semblable mais établi sur la base d'un modèle hydro-climatique différent. Ce nouvel indicateur mesure l'extension géographique des zones dans lesquelles les valeurs mensuelles d'humidité des sols s'écartent de leurs bandes locales de fluctuations industrielles définies comme les bandes dans lesquelles se trouvaient 90 % de ces valeurs mensuelles avant 1860. Par construction, cet indicateur est quasi stable autour de 10 % pendant les deux siècles antérieurs à 1860 mais le modèle montre une croissance régulière depuis cette date. La signification profonde de cette croissance de variabilité de l'humidité des sols et ses impacts sur le fonctionnement du système Terre restent à clarifier. Les connaissances actuelles ne permettent pas d'identifier une zone dangereuse et la valeur du changement qui y ferait entrer, la bande de sécurité locale de cet indicateur a été arbitrairement fixée à la situation pré-industrielle, c'est-à-dire à la bande de fluctuations dans lesquelles se trouvaient 90 % des valeurs mensuelles locales avant 1860. La "limite de sécurité" planitaire a ainsi fixée par précaution à 11,1 % de la surface non gelée des continents dans lesquels les valeurs mensuelles sortaient de cette bande. Elle a été franchie en 1929 pour atteindre actuellement 15,8 % de la surface des continents.

En 2022, l'indicateur relatif aux phénomènes d'eau bleue a été abandonné et remplacé par un indicateur relatif à la variabilité des débits d'eau dans les réseaux hydrographiques. Cet indicateur mesure l'extension géographique des zones dans lesquelles les valeurs mensuelles de débits s'écartent de leurs bandes de fluctuation industrielle. Par construction, cet indicateur est quasi stable autour de 10 % pendant les deux siècles antérieurs à 1860. Le modèle hydro-climatique utilisé montre une croissance régulière depuis cette date. La signification profonde de cet indicateur et des impacts de son augmentation sur le fonctionnement du système Terre restent à clarifier. Les connaissances actuelles ne permettent pas d'identifier une zone dangereuse et la valeur de l'indicateur qui y ferait entrer, la bande de sécurité de cet indicateur a été fixée localement "par précaution" à la situation pré-industrielle, c'est-à-dire à la bande de fluctuations dans lesquelles se trouvaient 90 % de ces valeurs mensuelles locales avant 1860. La "limite de sécurité" planitaire a ainsi fixée arbitrairement à 10,2 %. Elle a été franchie en 1905 pour atteindre actuellement 18,2 % de la surface des continents.

Ainsi, ce qu'on appelle le "franchissement de la limite de sécurité" de l'eau douce est en réalité les franchissements concomitants de deux "limites" de précaution, l'une relative à la variabilité de l'humidité des sols, et l'autre relative à la variabilité des débits dans les cours d'eau. L'une et l'autre sont dépassées depuis environ un siècle.

La construction de ces deux indicateurs est détaillée dans l'encadré 3.

## DISCUSSION

Des interrogations sur les détails de la méthode

N'ayant aucune compétence en matière de modélisation planitaire hydro-climatique, je n'ai à ce stade aucun avis tant sur le degré de confiance que l'on peut avoir dans le modèle ISIMIP 2b utilisé par les auteurs, sur la signification physique des données journalières d'humidité et de débits qu'il attribue à des mailles de plusieurs dizaines de kilomètres de côté, ou encore sur le niveau de corrélation entre ces données et les mesures constatées sur le terrain. À

Je suis étonné par certains résultats comme : la proportion de résultats considérés comme aberrants (les 30 années 1861-1890 sur les 154 ans de la période d'analyse 1861-2005 !) ; les différences d'ampleur et de rythme de variations de l'indicateur d'humidité par rapport à l'étude de 2022 utilisant un indicateur très voisin mais des modèles hydro-

climatiques différents ; les fortes discontinuités des indicateurs en 1860. Par ailleurs, la norme en matière climatique étant plutôt aujourd'hui de ne tirer des enseignements qu'à partir d'analyses multi-modèles, l'utilisation ici d'un modèle hydro-climatique unique limite la confiance dans la possibilité d'utiliser les résultats. Toutefois, ces interrogations ne doivent pas masquer la qualité du travail scientifique. Il est important et parfaitement solide.

## Des difficultés d'interprétation des résultats

Les indicateurs planétaires utilisés relatifs à la variabilité de l'humidité des sols et aux débits dans les cours d'eau sont difficiles à se représenter physiquement. Avec le modèle utilisé, ils montrent clairement une quasi stabilité de 1690 à 1860, puis une croissance quasi continue depuis 1900. Comme en démontrent les auteurs, cette croissance peut être attribuée aux activités humaines en raison des changements croissants d'eau douce et des changements climatiques dus aux émissions de gaz à effet de serre depuis le début de la période industrielle.

Une grande difficulté est de savoir si la croissance de ces indicateurs conduit à des perturbations dangereuses du fonctionnement du système Terre. En effet, s'il y a clairement davantage de zones où la variabilité actuelle des débits ou de l'humidité des sols excède la variabilité de la période préindustrielle, quelles sont les conséquences physiques ?

S'agissant du premier indicateur "eau bleue" utilisé de 2009 à 2022, la limite de sécurité avait un sens physique clair. Il s'agissait chaque année de ne pas prélever davantage que les volumes renouvelés annuellement. La forte baisse de certaines nappes souterraines ou la transformation de certains grands fleuves en oueds asséchés temporairement du fait de pompages excessifs sont la manifestation apparente de ce risque. S'agissant des nouveaux indicateurs, les conséquences de leurs hausses sont peu évidentes, ce qui gêne l'établissement de limites de sécurité.

Localement, le fait que des cours d'eau aient des débits fortement modifiés du fait des changements et des rejets humains est manifeste. Les changements climatiques impactent aussi les régimes hydrographiques et apportent davantage de situations extrêmes, inondations ou sécheresses. Il en va de même pour l'humidité des sols. Les auteurs de la publication ont cherché à comparer les impacts directs des activités humaines de leurs impacts indirects via le réchauffement climatique. Toutefois, ils n'ont pu le faire car ils n'ont pas eu accès aux modélisations correspondantes.

À l'échelle du globe, quels sont les impacts des augmentations des surfaces dans lesquelles ces débits ou ces taux d'humidité sont perturbés ? Ces augmentations traduisent-elles des déséquilibres néfastes à l'échelle planétaire ou des déséquilibres régionaux à l'échelle locale, mais sans grande conséquence pour les équilibres planétaires ?

Je subodore que personne ne le sait aujourd'hui. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour explorer et comprendre les conséquences éventuelles des augmentations de ces deux indicateurs "eau bleue" et "eau verte" depuis 1900.

## Une approche conservatrice

Les auteurs du rapport des "limites planétaires" ont adopté une approche très conservatrice pour déclarer dès aujourd'hui que la "limite planétaire" des changements de l'eau douce avait été franchie dès 1909. En effet, c'est l'ignorance des impacts réels des augmentations des indicateurs planétaires qui, par précaution, les ont conduits à considérer que la sécurité futurait de rester dans les limites de variabilités industrielles. Cependant la croissance du paramètre n'est pas forcément annonciatrice d'une catastrophe.

## Un essai d'interprétation physique

Deux phénomènes connus pourraient expliquer, au moins partiellement, l'éloignement progressif au cours du XXe siècle des deux paramètres étudiés de leur bande de variabilité pendant la période industrielle :

L'évaporation directe due au réchauffement - Le réchauffement climatique augmente la température moyenne des sols, ce qui conduit à une évaporation immédiate plus forte des pluies, et donc à une réduction des quantités d'eau bleue verte disponibles. Ce phénomène affecte en particulier la France métropolitaine.

L'évaporation résultant des activités humaines - Il est clair que certains pratements conduisent à vaporiser l'eau prélevée et, par conséquence, tendent à réduire les flux "d'eau bleue" dans les réseaux hydrographiques. Principalement consacrés à l'irrigation, ces pratements augmentent depuis le début du XXe siècle. Aujourd'hui, 18 % des ressources en eau bleue renouvelées annuellement (indicateur ONU ODD 6.4.2), hors débits minimums pour les écosystèmes, sont prélevées par l'homme dont 13,2 % pour la seule agriculture. Or, les pratements pour irrigation se transforment à près de 90 % en évapotranspiration des plantes. Ces pratements agricoles ont quadruplé depuis 1900 où ils ne représentaient qu'environ 3 % des ressources renouvelées. Grosso modo, on peut en déduire que 9 à 10 % de "l'eau bleue" qui était disponible annuellement en 1900 est aujourd'hui détournée annuellement du réseau hydrographique et des stockages souterrains pour être évaporée, ce qui réduit d'autant la quantité d'eau bleue dans le milieu naturel. Au niveau d'un mois - échelle de temps utilisée dans les calculs de variabilité des auteurs - ce n'est pas seulement 10 % mais plusieurs dizaines de pourcents des taux de pratements entre 1900 et 2000 qui peuvent disparaître en période saisonnière, soit une variation probablement significative au regard de la bande de variabilité industrielle utilisée comme référence. L'augmentation des quantités d'eau évaporées du fait des activités humaines serait une interprétation cohérente avec le fait que l'essentiel des augmentations de variabilité de débits est du côté "débit plus faible qu'avant" non du côté "débit supérieur à avant".

Ces deux aspects ne seraient-ils pas suffisants pour expliquer les résultats de l'étude ? Si tel était le cas, il serait plus aisé d'imaginer le sens local de la limite de sécurité pour la variabilité des débits. à-,

À

## Références

1. Katherine Richardson et al., "Earth beyond six of nine planetary boundaries" - Science Advances Volume 9, Issue 37, September 2023
2. Gleeson et al, "The water planetary boundary: Interrogation and revision" - One Earth Volume 2, Issue 3, 20 March 2020, pp. 223-234
3. L. Wang-Erlundsson et al., "A planetary boundary for green water" - Nature Reviews Earth & Environment 3, 380-392 (2022)
4. Porkka et al., "Global water cycle shifts far beyond pre-industrial conditions - planetary boundary for freshwater change transgressed" - EarthArxiv 2022

À

## Encadré 1 - LE RÉFÉRENTIEL DES "LIMITES PLANÉTAIRES" ↗

Le référentiel des "limites planétaires" est structuré selon 5 familles d'éléments qui ont évolué au cours du temps. Il comprend également une représentation graphique des résultats en forme de rosace. Un premier référentiel, incomplet, a été publié en 2009. Une première révision d'ensemble a eu lieu en 2015, puis une deuxième en 2023. Ce n'est que depuis 2023 que le référentiel est complet.

Un cadre général - Lorsqu'en 2009, Johan Rockstrom et ses collègues (dont M. Falkenmark) créèrent le concept de "limites planétaires" s'apportant une zone de sécurité d'une zone de risques pour le système Terre, ils présentèrent 9 "régulateurs", c'est-à-dire 9 systèmes et processus biophysiques qui régulent l'état et la résilience du système Terre. Dès 2009, le référentiel proposa ainsi une structure en 9 domaines appelés aujourd'hui "processus" avec, pour chacun, la recherche de grandeurs évolutives à surveiller.

Bien qu'incomplète, la version 2009 incluait déjà le diagramme-radar (dit aussi "roue" ou "rosace") à 9 secteurs qui seraient servis dans toutes les versions. Ce chiffre de 9 semble davantage répondre à une volonté de simplifier la communication qu'à une nécessité scientifique. En effet, si les grandeurs à surveiller se sont multipliées au cours du temps, les nouvelles grandeurs sont classées en tant que sous-secteurs plutôt qu'en nouveaux secteurs. Ainsi en 2009, un seul secteur était divisé en 2 sous-secteurs. En 2023, c'est le cas pour 4 secteurs sur 9.

En mai 2023, une variante a été produite pour ajouter la notion de justice à celle de sécurité. L'équipe initiatrice des "limites planétaires" a publié un référentiel de "limites justes et sûres du système Terre" ("Safe and just Earth system boundaries") en reprenant la même structure mais en affinant le concept de limite avec deux seuils : un seuil de sécurité

et un seuil de justice atteint avant le prÃ©cÃ©dent. De faÃ§on surprenante, cette variante ne comporte que 8 secteurs et des grandeurs largement modifiÃ©es par rapport aux "limites planÃ©taires". Cette exploration de la notion de "limites justes" n'a cependant pas conduit Ã  modifier le rÃ©fÃ©rentiel des "limites planÃ©taires".

Dans les deux cas, ce sont les changements par rapport Ã  la pÃ©riode de l'HolocÃ"ne interglaciaire prÃ©industriel, commencÃ© il y a 11 700 ans, qui sont estimÃ©s et dont le caractÃ"re acceptable ou risquÃ© est explorÃ©.

Des domaines pilier du fonctionnement du systÃ"me Terre - En 2009, les 9 "processus" retenus comme majeurs pour l'Ã©volution du systÃ"me Terre Ã©taient :

- le changement climatique,Â
- l'acidification des ocÃ©ans,Â
- la rÃ©duction de la quantitÃ© d'ozone dans l'atmosphÃ"re,Â
- les flux "biogÃ©ochimiques" (en pratique, le phosphore et l'azote),Â
- l'usage de l'eau douce, les changements d'affectation des sols,Â
- la perte de biodiversitÃ©,Â
- le rejet d'aÃ©rosols dans l'atmosphÃ"re,Â
- la pollution chimique.

Certains de ces processus ont Ã©tÃ© prÃ©cisÃ©s ou amendÃ©s au cours du temps.

En 2023, les 9 "processus" rÃ©visÃ©s sont appellÃ©s :

- le changement climatique,Â
- l'acidification des ocÃ©ans,Â
- la quantitÃ© d'ozone dans l'atmosphÃ"re,Â
- les flux "biogÃ©ochimiques" (en pratique, le phosphore et l'azote),Â
- les changements de l'eau douce (et non plus son usage),Â
- les changements d'affectation des sols,Â
- l'interaction de la biosphÃ"re (et non plus seulement la perte de biodiversitÃ©),Â
- le rejet d'aÃ©rosols dans l'atmosphÃ"re,Â
- les nouveaux produits (c'est-Ã -dire les produits chimiques de synthÃ"se qui ne prÃ©existaient pas dans la nature).Â Â Â

Des grandeurs à surveiller dans ces domaines - En 2009, 10 processus ou sous-processus étaient identifiés. En 2023, leur nombre est passé à 13. Le changement climatique, les flux biogéochimiques, l'eau douce et l'intégrité de la biosphère sont ainsi chacun décomposés en deux sous-secteurs. Pour chaque grandeur, c'est un indicateur à l'échelle planétaire qui est recherché. Dans certains cas, des valeurs régionales sont également calculées. À l'instar de la température moyenne, les indicateurs calculés à l'échelle du globe sont souvent des agrégats ou des moyennes qui n'ont pas de signification physique. Mais, comme ils sont calculés de la même façon à plusieurs dates, leurs variations dans le temps peuvent traduire des évolutions physiques.

Pour chaque grandeur, ce sont les changements par rapport à la période de l'Holocène préindustriel qui sont analysés. Toutes ces changements ne sont pas quantifiables. Ainsi pour plusieurs grandeurs, par exemple pour les flux de produits chimiques artificiels, c'est un raisonnement et non une estimation chiffrée qui permet de considérer que des limites de sécurité ont été dépassées.

Des limites de sécurité pour les variations de ces grandeurs depuis le début de la période industrielle - Les limites qui sont fixées ne sont pas des points de bascule. Ce sont des limites de sécurité à ne pas franchir pour ne pas risquer d'entrer dans une zone dangereuse. Dans la version de 2009, celles-ci étaient fixées à la limite basse des incertitudes scientifiques. Dans la version de 2003, elles sont redéfinies comme étant à la limite basse de la zone de risque. Si la zone de risque est difficile à évaluer précisément, les auteurs utilisent le principe de précaution, ce qui peut être très conservateur mais nul ne peut le prouver.

Les estimations des situations actuelles de chaque grandeur par rapport à ces limites - Le référentiel des "limites planétaires" n'est pas seulement un ensemble de limites de sécurité. C'est aussi une évaluation de la situation actuelle par rapport à ces limites. Pour chaque grandeur, la situation actuelle de l'indicateur correspondant est estimée, puis comparée à la limite fixée.

Un diagramme-radar ou "rosace" comparant limites et situations actuelles - Le diagramme-radar, ou "rosace", est la forme visuelle adoptée depuis 2009 pour présenter l'ensemble du référentiel de fonctionnement synthétique. Cela fonctionne bien puisqu'on y repère facilement les domaines et sous-domaines, les limites et la situation actuelle pour chacune des 13 grandeurs surveillées. Le référentiel 2023 contient ainsi :

- un cadre structuré en 9 secteurs dont 4 sont décomposés en 2 sous-secteurs,
- 13 indicateurs mondiaux de changements,
- 12 limites quantifiées des variations dans le temps de 12 indicateurs depuis le début de la période industrielle, limites fixées pour s'assurer que le fonctionnement du système Terre reste dans une zone de sécurité,
- une comparaison entre les variations de ces indicateurs depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle et ces limites.

À

La rosace de 2023 des "limites" et "sous-limites planétaires"

Extrait de la Fig. 1 de l'article "Earth beyond six of nine planetary boundaries", Katherine Richardson et al.

Science Advances Volume 9, Issue 37, September 2023

Â

## Â EncadrÃ© 2 - LES SIMILITUDES DE STRUCTURE AVEC LE RÃ‰FÃ‰RENTIEL DES ODDÂ î»

Bien que leurs objets soient trÃ¨s diffÃ©rents, le rÃ©fÃ©rentiel des Objectifs de dÃ©veloppement durable (ODD), appellÃ© Agenda 2030, et celui des "limites planÃ©taires" ont des similitudes de structure. On peut les visualiser dans le tableau ci-dessous.

Dans les deux cas, les sujets sont rassemblÃ©s en petit nombre de domaines, 17 pour les ODD, 9 pour les "limites planÃ©taires".Â Leur existence vise surtout Ã faciliter la communication. En effet, pour les ODD, il s'agit de domaines regroupant chacun plusieurs objectifs sans Ãªtre des objectifs en eux-mÃªmes. Pour les "limites planÃ©taires", il s'agit de respecter le chiffre initial de 9 mÃªme si aujourd'hui ce ne sont pas 9 mais 13 processus physiques qui sont suivis.

Dans les deux cas, des indicateurs mondiaux font l'objet d'un suivi dans le temps et leurs valeurs actuelles sont comparÃ©es avec des valeurs fixÃ©es. La principale diffÃ©rence structurelle est la nature de ces valeurs fixÃ©es : pour les ODD, il s'agit de valeurs Ã atteindre, pour les "limites planÃ©taires", il s'agit de limites Ã ne pas dÃ©passer.Â

### RÃ©fÃ©rentielAgenda 2030Limites planÃ©taires

Domaines/secteurs  
17 ODD  
9 processus physiques

Sous-secteurs  
s/o  
13 grandeurs

Indicateurs  
232 indicateurs  
13 indicateurs

Comparaison avec le présent de  
169 cibles/objectifs  
13 limites de sécurité

Â

### Â EncadrÃ© 3 - LES "LIMITES PLANÃ‰TAIRES" DE L'EAU DOUCEÂ î

#### E-3.1. Une histoire en trois Â©tapes

L'eau douce a fait l'objet d'un premier indicateur en 2009 puis d'un deuxième en avril 2022. Finalement ces deux indicateurs ont été abandonnés et remplacés par deux nouveaux indicateurs en juillet 2022. Lorsqu'on dit aujourd'hui que "la limite planétaire pour l'eau douce" a été transgressée, il s'agit donc d'une "limite planétaire" différente de celle qui existait jusqu'en 2022.

Le rÃ©fÃ©rentiel de 2009 - En 2009, l'un des 9 régulateurs (on dit aujourd'hui "processus") était la "consommation d'eau douce". L'indicateur utilisé était le volume mondial des écoulements annuels nets d'eau bleue. Il était considéré à l'époque qu'il régule l'ensemble eau bleue-eau verte. Les limites et volumes suivants ont été estimés :

Wang et al.

ca 7%  
7,4%  
9,1%  
+23%  
ca 6%  
8,8%  
8,4%  
-5%

Porkka et al.

5%  
ca 4,7%  
ca 7,2%  
+53 %  
4,8%  
ca 5%  
ca 8%  
+60%

Wang vs Porkka

40%  
57%  
26%  
Â  
25%  
60%  
5%  
Â

Cependant, alors que plusieurs "limites planétaires" étaient franchies, avec 2 600 km3/an l'indicateur Eau restait dans la "zone de sécurité", ce qui était en désaccord avec la perception de risques élevés dans le domaine. Une recherche a alors été menée pour identifier un indicateur Eau additionnel qui serait pertinent et dont la zone de risque serait atteinte.

En 2013, l'équipe du Stockholm Resilience Center prend en compte les flux minimaux environnementaux des cours d'eau, ce qui abaisserait la limite de la zone de sécurité pour les déversements nets à 2 800 km3/an, moyenne de la très large fourchette 1 100 km3/an-4 500 km3/an. Cette nouvelle valeur est entachée elle-même d'une grande incertitude et ne peut pas conduire à affirmer que le système Terre est hors de la zone de sécurité.

En 2015, le cadre conceptuel des 9 régulateurs a été affiné en conservant toujours 9 domaines mais avec des sous-indicateurs. Le domaine Eau n'a cependant pas été modifié.

En 2020, l'équipe analyse en détail les insuffisances de l'indicateur des déversements nets et propose d'ajouter d'autres "sous-indicateurs" au domaine Eau. Dans un article publié par Gleeson et al. (référence 2), l'équipe explore 6 différents indicateurs possibles.

Le rapport modifié d'avril 2022 - En avril 2022, l'équipe conclut son exploration en comparant 3 indicateurs potentiels et en retient finalement un seul. Les auteurs d'une nouvelle publication (référence 3) proposent ainsi d'ajouter à l'indicateur des prévements d'eau bleue un indicateur relatif aux variations d'humidité des sols.▲

Le domaine liée à l'eau douce est alors changé de "consommation d'eau douce" en "changements relatifs à l'eau douce". Il est dorénavant structuré en 2 sous-domaines appelés "eau verte" et "eau bleue" :

- l'indicateur "Eau bleue" reste inchangé. C'est celui de 2009 sur les prévements annuels nets d'eau bleue et il reste dans le vert, c'est-à-dire en deçà de sa limite de sécurité ;
- l'indicateur "Eau verte" est un nouvel indicateur relatif à la variabilité de l'humidité des sols. L'augmentation significative de cette variabilité entre l'Holocene et la période industrielle fait considérer que cet indicateur est déjà entré dans sa zone de risque.▲ C'est ce qui a conduit le Stockholm Resilience Center à annoncer le 26 avril 2022 qu'une sixième "limite planétaire" était franchie.

Les nouvelles limites de juillet 2022 - Manifestement, la conception du nouvel indicateur "Eau verte" sur la variabilité de l'humidité des sols a donné des indices pour bâti un nouvel indicateur "Eau bleue" sur le même modèle.

C'est l'objet d'une nouvelle publication en juillet 2022 qui : pour "l'eau verte", modifie la construction de l'indicateur relatif à la variabilité de l'humidité des sols. Les variations du nouvel indicateur sur le XXe siècle sont bien plus importantes que pour le précédent. Cela confirme l'idée que "l'eau verte" est entrée dans sa zone de risque ; pour "l'eau bleue", remplace l'ancien indicateur lié aux prévements par un indicateur relatif à la variabilité des débits dans les réseaux hydrographiques. Cet indicateur peu variable avant la période industrielle est en croissance continue depuis la fin du XIXe siècle. Sa hausse sensible le fait considérer par précaution comme entré lui aussi dans sa zone de risque.

Ainsi, après l'abandon de l'indicateur de 2009 qui restait dans sa zone de sécurité, le domaine "Eau douce" se retrouve ainsi avec deux indicateurs entrés dans leur zone de risque. Cette situation est consacrée dans la révision d'ensemble des "limites planétaires" de 2023. Cette dernière publication place les deux indicateurs "Eau douce" dans des zones de "risque modérable" figurées en jaune sur le diagramme-radar.

### E-3.2 Eau verte : l'indicateur de variabilité d'humidité des sols

"L'eau verte" est l'eau apportée par les précipitations qui ne coule pas car elle est absorbée par les plantes ou les sols. L'équipe liée au Stockholm Resilience Center a retenu la variabilité de l'humidité de la partie superficielle du sol, celle qui est accessible aux plantes, comme grandeur à surveiller relative à l'eau verte.

Localement, cette humidité varie constamment avec des périodes plus sèches que la moyenne et des périodes plus humides. L'ampleur des fluctuations annuelles est considérée comme assez stable dans la période pré-industrielle. Les valeurs annuelles de cette période permettent de calculer les valeurs hautes et basses d'un corridor statistique 5 %-95 %. Dans la période antérieure à 1860 utilisée comme référence, les 5% de cas plus humides et les 5 % de cas plus secs se trouvent à l'extérieur de ce corridor local.

L'indicateur suivi au niveau planétaire est pour une période donnée (année ou mois selon les cas) le pourcentage de la surface continentale non gelée dans laquelle le taux local d'humidité du sol sort du corridor de référence local. Pendant la période de référence pré-1860, les composantes de cet indicateur local oscillent par construction autour de 5 % du continent sec et de 5 % du continent humide, soit autour de 10 % au total. Un corridor de référence de la variabilité pré-industrielle globale est déterminé en prenant pour chaque continent la valeur de l'indicateur planétaire (pourcentage de la surface) qui n'est dépassée que 5 % du temps, soit au total une valeur de l'indicateur à quelques points de pourcentage au-dessus de 10 %.

Il est à noter que cet "indicateur planétaire eau verte" combine deux phénomènes physiques sous-jacents très différents: l'excès inhabituel d'humidité et la sécheresse inhabituelle des sols. Les évolutions dans le temps de "l'indicateur planétaire" peuvent ainsi masquer des différences d'évolutions de ces deux phénomènes.

Partir d'un indicateur mondial agrégé annuellement un grand nombre de situations locales différentes est toujours délicat et complexe. Un premier essai a conduit à la publication d'avril 2022 qui donnait des résultats sensiblement différents suivant les modèles hydro-climatiques et les périodes de référence utilisées.

La méthode a été modifiée ultérieurement sur plusieurs points techniques. Un indicateur largement différent a été construit et la publication de juillet 2022 fournit des augmentations nettement plus claires de la variabilité des taux d'humidité au cours du XXe siècle.

### E-3.2.1 Le premier indicateur aujourd'hui abandonné

Sauf erreur d'interprétation, le premier indicateur mondial de variabilité de l'humidité a été bâti comme suit :

- Paramètre physique : le taux d'humidité de la partie supérieure du sol, celle qui est accessible aux plantes (root-zone soil) ;
- Maillage de la surface emergée non gelée en cellules de 250km ou d'un demi-degré d'arc suivant les modèles ;
- Deux modèles hydro-climatiques fournissant des valeurs d'humidité pour chaque cellule du maillage :
  - modèle MPI-ESM1.2-LR couplant plusieurs modèles avec le modèle dynamique végétation sols JSBACH3.2. Mailles de 250 km. Valeurs journalières ;
  - simulation avec le modèle dynamique de végétation LPJmL5.1 forcée avec des données climatiques CMIP6. Mailles de 0,5 degré d'arc. Valeurs mensuelles ;
- Deux périodes de référence :
  - de -6000 à -5500 ("Holocene moyen") ;
  - de 1850 à 1899 ("période pré-industrielle") ;
- Bornes locales mensuelles : 5e et 95e centiles des taux d'humidité attribués par le modèle lors du mois concerné

de la période de récession dans la cellule et les 8 cellules voisines ;

- Indicateur local pour l'année en cours : sortie ou non du corridor 5-95 au moins un mois de l'année, c'est-à-dire 1 si un taux d'humidité mensuel dépasse la borne locale supérieure (excessif d'humidité) ou est inférieur à la borne locale inférieure (sécheresse inhabituellement forte) et 0 dans le cas contraire ;

- Indicateur planaire : pourcentage de la surface des terres émergées non couvertes de glace dont l'indicateur local est en dépassement vers le haut ou vers le bas.

Résultats publiés en avril 2022 - L'étude fournit des résultats par rapport à 3 corridors 5-95 différents :

- Récession Holocene moyen -6000-5500 : Selon l'étude, 18 % de la surface continentale non gelée aurait actuellement des taux d'humidité qui sortent au moins un mois par an du corridor fixé sur la base de la période -6000 à -5500 alors que seulement 13 % de cette surface avait de tels écarts à l'holocene moyen. Cette augmentation est jugée suffisamment importante par les auteurs pour qu'ils affirment qu'une "limite planaire" a été franchie. Néanmoins, ce franchissement n'est pas daté et pour cause. En effet selon l'étude, la limite inférieure "sèche" aurait été franchie bien avant 1850 et la variabilité du sous-indicateur sec aurait même baissé depuis. En revanche, le sous-indicateur "humide" ne serait lui significativement sorti du corridor que vers 1940.

- Récession de 1850 à 1899 ("période pré-industrielle") : Cette période de récession est très courte puisque de 49 ans. De ce fait, elle fournit des corridors 5-95 plus courts. Pourtant, de façon étonnante, la variabilité de l'humidité calculée à partir du même modèle hydro-climatique MPI-ESM est notablement plus faible qu'avec le corridor plus large calculé à partir de la période de l'holocene moyen. Le modèle LPJmL fournit des valeurs de variabilité plus élevées en valeur absolue et de croissance plus rapide que celles du modèle MPI-ESM.

Fig. 3 de l'article "A planetary boundary for green water", à L. Wang-Erlandsson et al.

Nature Reviews Earth & Environment 3, 380-392 (2022)

### E-3.2.2 Le deuxième indicateur, celui qui est utilisé aujourd'hui

Sauf erreur d'interprétation, l'indicateur mondial actuel de variabilité de l'humidité est basé comme suit :

- Paramètre physique : le taux d'humidité de la partie supérieure du sol, celle qui est accessible aux plantes (root-zone soil) ;

- Maillage de la surface émergée non gelée en cellules d'un demi-degré d'arc (environ 50 km x 50 km à l'équateur terrestre) ;

- Un modèle hydro-climatique fournissant des valeurs mensuelles d'humidité pour chaque cellule du maillage : modèle ISIMIP 2b forcé avec les données climatiques CMIP5 avant 1860 puis des données climatiques historiques après 1860 ;

- Période de référence : de 1671 à 1860 (période "pré-industrielle") ;
- Période d'analyse : de 1671 à 2005 ;
- Bornes locales mensuelles : 5e et 95e percentiles des taux d'humidité attribués par le modèle lors du mois concerné de la période de référence dans la cellule. Le corridor obtenu semble plus restreint qu'en utilisant les cellules voisines, ce qui tend à augmenter les cas de dépassement par rapport au premier indicateur ;
- Indicateur local pour un mois de l'année en cours : sortie ou non du corridor 5-95, c'est-à-dire 1 si le taux d'humidité mensuel dépasse la borne locale mensuelle supérieure (excess inhabituel d'humidité) ou est inférieur à la borne locale mensuelle inférieure (sécheresse inhabituellement forte) et 0 dans le cas contraire ;
- Indicateur planétaire : moyenne des 12 pourcentages mensuels de la surface des terres émergées non couvertes de glace dont l'indicateur local est en dépassement vers le haut ou vers le bas.

## Résultats publiés en juillet 2022

Extrait de la Fig. 3 de l'article "Global water cycle shifts far beyond pre-industrial conditions - planetary boundary for freshwater change transgressed", Porkka et al. - EarthArxiv 2022

[Nota 1. Les données font l'objet de nombreuses corrections. Les résultats aussi puisque la période 1860-1890 est considérée comme aberrante.]

[Nota 2. Le modèle est utilisé une première fois sur la période 1661-1860 en fonctionnant avec les données climatiques CMIP5 avant 1860 puis une deuxième fois sur la période 1860-2014 avec des données climatiques historiques. Le moins qu'on puisse dire est qu'il y a en 1860 une discontinuité normale dont les raisons sont à élucider. Comme c'est le même modèle qui est utilisé avant et après 1860, cette discontinuité est totalement inattendue.]

La "limite de sécurité" fixée par précaution à la borne supérieure de la variabilité pré-industrielle, soit 11,1 %, a été atteinte en 1929 pour atteindre 15,8 % actuellement (moyenne 1996-2005).

La comparaison des résultats de la publication de 2022 par Lan Wang-Erlandsson et al., relative au premier indicateur, et ceux de la publication par Porkka et al., relative à ce deuxième indicateur, est très surprenante et laisse perplexe. En effet, bien que les données pré-industrielles et les méthodes soient très similaires, les résultats sont très différents :

- Les périodes de référence sont différentes, ce qui conduit à des corridors différents. Cependant, comme le corridor de Wang est plus large que celui de Porkka, Wang devrait trouver moins d'écarts. Or, c'est l'opposé : les déviations actuelles de Porkka et al. sont bien plus élevées que celles qu'avaient trouvées Wang et al. à
- Les dynamiques sont significativement différentes. Sur le XXe siècle, c'est-à-dire entre 1900 et 2000 :
  - les écarts du côté "humide" augmentent de 23 % pour Wang et al. et de 53 % pour Porkka et al.
  - les écarts du côté "sec" décroissent de 5 % pour Wang et al. et augmentent de 60 % pour Porkka et al.

Ces différences ont besoin d'être expliquées car les deux publications conduisent à des conclusions très différentes bien que les méthodes soient assez proches.

### E-3.3. La nouvelle limite planétaire pour "l'eau bleue"

En 2022, l'indicateur "Eau bleue" relatif aux prélèvements nets est remplacé par un indicateur relatif à la variabilité des débits dans les réseaux hydrographiques calculé à partir d'un modèle hydro-climatique.

Sauf erreur d'interprétation, cet indicateur mondial de variabilité des débits est calculé comme suit :

- Paramètre physique : les débits des cours d'eau ;
- Maillage de la surface émergée non gelée en cellules d'un demi-degré d'arc (environ 50 km x 50 km à l'équateur terrestre) ;
- Un modèle hydro-climatique fournissant des valeurs journalières de débits pour chaque cellule du maillage : modèle ISIMIP 2b de l'Institut climatique de Potsdam forcé avec les données climatiques CMIP5 avant 1860 puis des données climatiques historiques après 1860. Ce modèle intègre des données climatiques et des données humaines comme la construction de barrages, les prélèvements d'eau pour irrigation, les prélèvements domestiques et les prélèvements industriels.
- Période de référence : de 1671 à 1860 (dite période "préindustrielle") ;
- Période d'analyse : de 1671 à 2005 ;
- Bornes locales mensuelles : 5e et 95e percentiles des débits moyens attribués par le modèle au mois concerné de la période de référence dans la cellule ;
- Indicateur local pour un mois de l'année en cours : sortie ou non du corridor, c'est-à-dire 1 si le débit moyen mensuel dépasse la borne locale mensuelle supérieure (débit inhabituellement fort) ou est inférieur à la borne locale mensuelle inférieure (débit inhabituellement faible) et 0 dans le cas contraire ;
- Indicateur planétaire : moyenne des 12 pourcentages mensuels de la surface des terres émergées non couvertes de glace dont l'indicateur local est en dépassement vers le haut ou vers le bas.

Résultats publiés en juillet 2022 - La "limite de sécurité" fixée par précaution à la borne supérieure de la variabilité préindustrielle, soit à 10,2 %, a été franchie en 1905 pour atteindre 18,2 % actuellement (moyenne 1996-2005).

[Nota 1. Les données font l'objet de nombreuses corrections. Les résultats aussi puisque la période 1860-1890 est considérée comme aberrante.]

[Nota 2. Le modèle est utilisé une première fois sur la période 1661-1860 en le faisant avec les données climatiques CMIP5 avant 1860 puis une deuxième fois sur la période 1860-2014 avec des données climatiques historiques. Le moins qu'on puisse dire est qu'il y a en 1860 une discontinuité norme dont les raisons sont à élucider. Comme c'est le même modèle qui est utilisé avant et après 1860, cette discontinuité est totalement inattendue.]

Extrait de la Fig. 3 de l'article "Global water cycle shifts far beyond pre-industrial conditions - planetary boundary for freshwater change transgressed", Porkka et al. - EarthArxiv 2022

À À À

À

À L'auteur

Après avoir dirigé le groupe appelé aujourd'hui Suez, Gérard Payen a été conseiller pour l'Eau du secrétaire général des Nations unies, président d'AquaFed et vice-président de l'Association scientifique et technique pour l'eau et l'environnement (ASTEE). Aujourd'hui, il est vice-président du Partenariat Français pour l'Eau et membre de l'Académie des technologies. Il est par ailleurs l'auteur de l'application publique Water4allSDGs permettant d'évaluer les impacts d'une action Eau sur l'ensemble des cibles ODD.