Que signifie concrètement le franchissement de la « limite planétaire » pour l'eau douce?

Défrichage de l'annonce du Stockholm Resilience Center du 13 septembre 2023

Résumé

Les « limites planétaires » sont un concept et un référentiel structuré imaginé en 2009 par Johan Rockström et son équipe du *Stockholm Resilience Center*. Il contient des limites de sécurité à ne pas franchir pour 8 types de changements apporté 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 irréversible et dangereuse la durabilité de ce fonctionnement. Ce référentiel est décrit de façon détaillée en annexe 1. Pour l'eau douce, le premier indicateur mondial choisi en 2009 était le volume des prélèvements 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'annexe 2.

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 déclaré avoir été franchies :

- 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 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'écartent de leurs bandes de fluctuation pré-industrielle. Chacun ces deux indicateurs est stable par construction avant 1860 puis montre une croissance régulière après 1900. Certains détails sont étonnants et nécessiteraient de mieux connaitre 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 déséquilibres néfastes à l'échelle planétaire ou des déséquilibres réels à l'échelle locale sans grande conséquence 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 2 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 pré-industrielles. Mais, la croissance d'un paramètre n'est cependant pas forcément annonciatrice d'une catastrophe. Personne ne mesure aujourd'hui le danger réel correspondant à ces extensions géographiques.

Suites

La communauté de l'eau a besoin que des spécialistes de modélisation hydro-climatique :

- explicitent le sens des 2 paramètres utilisés,
- confirment que d'autres modèles donnent des résultats analogues.

Par ailleurs, des recherches futures sont nécessaires pour identifier les impacts concrets de l'augmentation constatée de variabilité des deux paramètres aujourd'hui bien théoriques et ainsi pouvoir utiliser pratiquement les résultats mis en avant par le *Stockholm Resilience Center*.

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 le 13 septembre dans la revue *Science Advance* d'un article scientifique intitulé « *Earth beyond six of nine planetary boundaries*[1] » signé par Katherine Richardson, Johan Rockstrom et 26 autres co-auteurs.

Immédiatement, l'AFP a réagi 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'info : TF1, France-Info, Huffington Post, Reporterre, Novethic, National Geographic, etc.

> France-Info : *« Environnement : une sixième limite planétaire vient d'être franchie et elle concerne l'eau douce »*
>
> Novethic : « *Cycle de l'eau douce : une nouvelle limite planétaire vient d'être franchie »*
>
> Reporterre : *« La limite planétaire du cycle de l'eau à son tour dépassée »*

Bien entendu, une telle annonce en forme de scoop a créé une forte émotion. Plusieurs spécialistes de l'eau l'ont relayée sur les réseaux sociaux comme si elle apportait un élément nouveau très important.

Elle est maintenant reprise ça et là pour appuyer des discours alarmistes sur l'eau.

Pourtant,

- si la Conférence ONU de mars dernier a parlé de 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 un puisque :
    - la même annonce sur l'eau avait déjà été médiatisée le 26 avril 2022 !
      Elle avait même été reprise par le rapport « Soutenabilités » de France-Stratégie et avait créé tant d'interprétations hâtives que j'avais diffusé une note ressemblant à la présente.
      (Mais notre monde ultrarapide nous fait tellement zapper qu'un an et demi plus tard la majorité des français avaient oublié tout cela[2])
    - Le franchissement de la « limite planétaire relative à l'eau douce » par le Système Terre ne date pas de cet été. Selon les auteurs du travail scientifique, il remonte à plus d'un siècle !
      (mais pour le savoir, il faut lire les publications scientifiques et ne pas se contenter de relayer par clic les titres grand public ou les messages courts des réseaux sociaux, forcément incomplets).

A noter que la communication et la publication de franchissement d'une sixième limite planétaire s'appuie sur une publication relative à l'eau[3] qui a été diffusée en « preprint » sur Archiv mais qui n'a pas encore été validée par un comité de lecture.

---

[1] *Earth beyond six of nine planetary boundaries*, Science Advances, Volume 9, Issue 37, Sep 2023, Katherine Richardson et al. https://www.science.org/doi/epdf/10.1126/sciadv.adh2458

[2] Certains journalistes ont cependant bien compris qu'il y avait une différence. Alors qu'en 2022, la limite planétaire pour l'eau avait été considérée comme dépassée pour l'eau verte mais pas pour l'eau bleue, en 2023, ce sont ces deux sous-limites qui sont considérées comme dépassées. Les titres des articles n'ont cependant pas repris cette subtilité ni les dates de franchissement.

[3] *Global water cycle shifts far beyond pre-industrial conditions – planetary boundary for freshwater change transgressed* , Porkka et al., 2022, EarthArxiv https://eartharxiv.org/repository/view/3438/

Que comprendre ?

A la base, il y a un énorme 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.

Dire qu'une limite a été franchie est toujours inquiétant, surtout lorsqu'il s'agit de limites construites pour éviter d'entrer en zone dangereuse.

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

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 annexe 3). C'est riche et assez complexe. Il est difficile de se représenter facilement ces deux limites pour l'eau et les conséquences concrètes de leur franchissement, un sujet qui nécessite de futures recherches.

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

Nous avons besoin de bien comprendre. C'est la raison pour laquelle j'ai rédigé cette note. Elle 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 qu'une note de défrichage. J'espère que d'autres pourront compléter ma compréhension encore incertaine du franchissement de cette « limite planétaire ». En réalité, celle-ci est formée de deux sous-limites dont les qualificatifs d'eau bleue et d'eau verte sont pratiques en communication mais dont la signification peut être bien éloignée de ce qu'évoquent ces notions auprès des lecteurs.

Le concept des « 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 irréversible 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'elles. Le petit nombre facilite la communication sur les résultats avec, en particulier, un diagramme-radar synthétique facile à appréhender. Ce référentiel est détaillé en annexe 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 prélèvements d'eau bleue par les activités humaines. Sa situation actuelle s'est révélée dans sa zone de sécurité.

Un autre processus, celui de « l'eau verte » a été examiné et un indicateur relatif à la variabilité de l'humidité des sols a été bâti. Ne donnant pas des résultats très nets, il a été remplacé en 2022 par un deuxième indicateur assez semblable mais établi sur la base d'un modèle hydro-climatique différent. Cet indicateur mesure l'extension géographique des zones dans lesquelles les valeurs mensuelles d'humidité du sol s'écartent de leurs bandes locales de fluctuation pré-industrielle. Par construction, cet indicateur est quasi-stable pendant les deux siècles antérieurs à 1860 mais le modèle a montré 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 permettant pas d'identifier une zone dangereuse et la valeur du changement qui y ferait entrer, la bande de sécurité de cet indicateur a été fixée à la borne supérieure 95% de la variabilité de la période pré-industrielle. La « limite de sécurité » fixée ainsi par précaution à 11.1%, a été franchie en 1929 pour atteindre actuellement 15.8% de la surface des continents.

En 2022, l'indicateur relatif aux prélèvements 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 pré-industrielle. Par construction, cet indicateurs est quasi-stable 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 sa croissance sur le fonctionnement du Système Terre restent à clarifier. Les connaissances actuelles ne permettant 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 à la borne supérieure 95% de la variabilité de la période pré-industrielle. La « limite de sécurité » fixée ainsi par précaution à 10.2% 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 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 en annexe 2.

Discussion

Interrogations sur les détails de la méthode

N'ayant aucune compétence en matière de modélisation planétaire hydroclimatique, je n'ai à ce stade aucun avis :
- sur le degré de confiance que l'on peut avoir dans le modèle unique ISIMIP 2b utilisé
- sur la signification physique des données journalières d'humidité et de débits qu'il attribue à des mailles de plusieurs dizaines de km de côté.
- ni sur le niveau de corrélation entre ces données et les mesures constatées sur le terrain

J'ai compilé en annexe 4 certaines interrogations de nature scientifique.

Je suis étonné par certains résultats comme :
- la proportion de résultats considérés comme aberrants (30 années sur 154 !)
- les différences d'ampleur et de rythme de variation de l'indicateur d'humidité par rapport à l'étude 2022 utilisant un indicateur très voisin et deux autres types de modèles
- les fortes discontinuités des indicateurs en 1860

Par ailleurs, la norme aujourd'hui en matière climatique est plutôt de ne tirer des enseignements que sur des analyses multi-modèles. N'utiliser qu'un modèle limite la confiance accordée aux résultats.

Ces interrogations ne doivent pas masquer la réalité d'un gros travail scientifique qui parait solide. Ses résultats donnent matière à réflexion.

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 le font les auteurs, cette croissance peut sans doute être attribuée aux activités humaines en raison des prélèvements 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 une sortie de la bande de variabilité de la période pré-industrielle, quelles en sont les conséquences physiques ?

Pour le 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 transformation de certains grands fleuves en oueds asséchés temporairement en certaines saisons du fait des pompages ou la baisse de certaines nappes souterraines sont des manifestations visibles de ce risque. Pour les nouveaux indicateurs, les conséquences de leur hausse 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 prélèvements et rejets humains est manifeste. Les changements climatiques impactent aussi les régimes hydrographiques et apportent davantage de situations extrêmes, inondations ou sécheresses (celles-ci sont-elles captées par les modèles ?). Idem pour l'humidité des sols. Les auteurs de la publication ont cherché à séparer les impacts directs des activités humaines de leurs impacts indirects via le réchauffement climatique mais les modélisations correspondantes ne sont pas disponibles.

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

Aujourd'hui, je subodore que personne ne le sait.

Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour explorer et comprendre les conséquences éventuelles des augmentations depuis 1900 des deux indicateurs « eau bleue » et « eau verte ».

Une approche conservatrice

Les auteurs de référentiel 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 croissances des indicateurs qui, par précaution, les ont amenés à considérer que la sécurité était de rester dans les limites de variabilités pré-industrielles. La croissance d'un paramètre n'est cependant 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 XXème siècle des 2 paramètres étudiés de leur bande de variabilité pré-1860.

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'eaux bleue et verte disponibles. Ce phénomène affecte en particulier la France métropolitaine.

L'évaporation résultant des activités humaines Il est clair que certains prélèvements conduisent à évaporer l'eau prélevée et, par conséquence, tendent à réduire les flux du réseau hydrographique. Principalement consacrés à l'irrigation, ces prélèvements augmentent depuis le début du XXème 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 prélèvements pour irrigation se transforment à près de 90% en évapotranspiration des plantes. Ces prélèvements agricoles ont quadruplé depuis 1900 où ils ne représentaient que de l'ordre de 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 % de taux de prélèvement entre 1900 et 2000 qui disparaissent, soit une variation probablement significative au regard de la bande de variabilité pré-industrielle utilisée. Cela serait cohérent avec le fait que l'essentiel des augmentations de variabilité de débits est du côté « sec » et non du côté « humide ».

Ces deux aspects ne seraient-ils pas suffisant 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.

Annexe 1 - Le référentiel des « limites planétaires »

Le référentiel des « limites planétaires » est structuré selon 5 familles d'éléments qui se sont affinés progressivement au cours du temps et une représentation graphique des résultats. 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.

Les 5 familles d'éléments sont les suivantes

a) Un cadre général

Lorsqu'en 2009, Johan Rockstrom et ses collègues (dont M. Falkenmark) créèrent le concept de « limites planétaires » séparant une zone de sécurité d'une zone de risques pour le système Terre, il 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 proposé a ainsi comporté 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 sera préservé 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 sont classées comme des sous-secteurs plutôt que de 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 intégrer la notion de justice en plus de celle de sécurité. L'équipe à la tête des limites planétaires a publié un référentiel de "limites justes et sures du Système Terre" ("*Safe and just Earth system boundaries")* en reprenant la même structure mais en raffinant le concept de limite avec deux seuils, un seuil de sécurité et un seuil de justice atteint avant. De façon surprenante, cette variante ne comporte que 8 secteurs et des grandeurs légèrement modifiées par rapport aux « limites planétaires ».

Cette exploration de la notion de limites justes n'a pas conduit à modifier le référentiel des « limites planétaires ».

Dans chaque cas, ce sont les changements par rapport à la période de l'Holocène interglaciaire pré-industriel commencé il y a 11 700 ans qui sont estimés et dont le caractère acceptable ou risqué est exploré.

b) Des domaines piliers du fonctionnement du Système Terre

En 2009, les 9 "processus" qui ont été retenus comme majeurs pour l'évolution du système Terre sont :

- le changement climatique,
- l'acidification des océans,
- la réduction de la quantité d'ozone dans l'atmosphère,
- les flux "biogéochimiques" (en pratique, le phosphore et l'azote),
- l'usage de l'eau douce,
- les changements d'affectation des sols,
- la perte de biodiversité,
- le rejet d'aérosols dans l'atmosphère
- la pollution chimique

Certains de ces processus ont été précisés ou amendés au cours du temps. En 2023, les 9 « processus » sont appelés :

- le changement climatique,
- l'acidification des océans,
- la quantité d'ozone dans l'atmosphère,
- les flux "biogéochimiques" (en pratique, le phosphore et l'azote),
- les changements de l'eau douce (et non plus son usage),
- les changements d'affectation des sols,
- l'intégrité de la biosphère (et non plus seulement la perte de biodiversité),
- le rejet d'aérosols dans l'atmosphère

- les nouveaux produits (c'est-à-dire les produits chimique de synthèse qui ne préexistaient pas dans la nature)

c) 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. A 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 pré-industriel 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.

d) 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.

e) 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.

f) 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 façon 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 XIXème et ces limites.

Similitudes de structure avec le référentiel des ODD

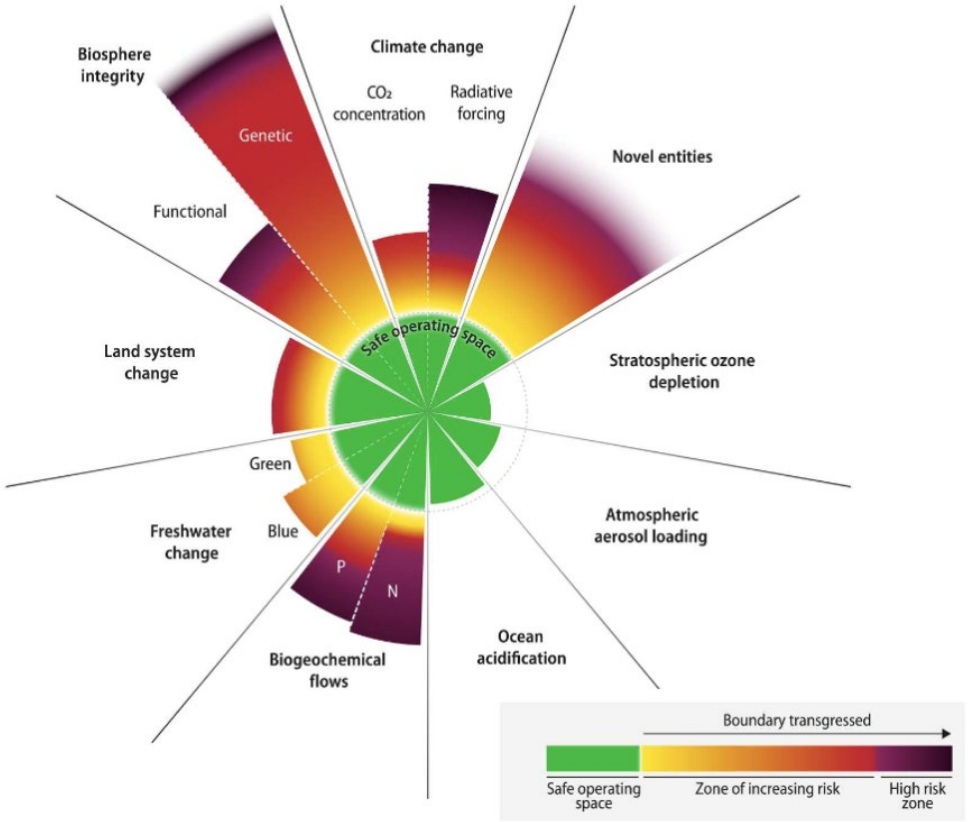
Bien que leurs objets soient très différents, le référentiel des ODD appelé Agenda 2030 et celui des « limites planétaires » ont des similitudes de structure. On peut les visualiser dans le tableau ci-dessous.

Dans les deux cas, les sujets sont rassemblés en petit nombre de domaines, 17 pour les ODD, 9 pour les « limites planétaires ». Leur existence vise surtout à faciliter la communication. En effet, pour les ODD, il s'agit de domaines regroupant chacun plusieurs objectifs sans être des objectifs en eux-mêmes. Pour les « limites planétaires », il s'agit de respecter le chiffre initial de 9 même 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 comparées avec des valeurs fixées.

La principale différence structurelle est la nature de ces valeurs fixées : pour les ODD, il s'agit de valeurs à atteindre, pour les « limites planétaires », il s'agit de limites à ne pas dépasser.

Référentiel	Agenda 2030	Limites planétaires
Domaines / secteurs	17 ODD	9 processus physiques
Sous-secteurs	s/o	13 grandeurs
Indicateurs	232 indicateurs	13 indicateurs
Comparaison du présent avec	169 cibles (objectifs)	13 limites de sécurité



La rosace 2023 des limites et sous-limites planétaires
(copie de la figure 1 de la source septembre 2023 de l'annexe 3)

Annexe 2 - Les « limites planétaires » de l'eau douce

A2.1. Une histoire en trois étapes

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 a existé jusqu'en 2022.

Le référentiel 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 prélèvements 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[4] :

Volume annuel	nature	Concept
~12 500 –15 000 km3/an		Limite supérieure du volume d'eau bleue accessible
5000–6000 km3/an	de prélèvements bruts	Seuil de pénurie physique (physical water scarcity)
4000–6000 km3/an	de prélèvements nets	Zone de risque incertain
~4,000 km3/an	**de prélèvements nets**	**Limite de la zone de sécurité**
~4,000 km3/an	de prélèvements bruts	Estimation actuelle
~2,600 km3/an	de prélèvements nets	Estimation actuelle

Cependant, alors que plusieurs « limites planétaires » étaient franchies, avec 2 600 km^3/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 Rockstrom prend en compte les flux minimaux environnementaux des cours d'eau, ce qui abaisserait la limite de la zone de sécurité pour les prélèvements nets à 2 800 km^3/an, moyenne de la très large fourchette 1 100 km^3/an - 4 500 km^3/an[5]. Cette nouvelle valeur est entachée elle-même d'une grande incertitude et ne peut conduire pas à affirmer que le système Terre est hors de la zone de sécurité.

En 2015, le cadre conceptuel des 9 régulateurs a été raffiné 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 prélèvements nets et propose d'ajouter d'autres 'sous-indicateurs' au domaine Eau. Dans leur article publié par Gleeson et al[6], ils explorent 6 différents indicateurs possibles.

Le référentiel modifié d'avril 2022,

[4] https://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/

[5] https://www.sei.org/publications/towards-a-revised-planetary-boundary-for-consumptive-freshwater-use-role-of-environmental-flow-requirements/ Gerten, D., H. Hoff, J. Rockström, J. Jägermeyr, M. Kummu, A.V. Pastor (2013). Towards a revised planetary boundary for consumptive freshwater use: role of environmental flow requirements. Current Opinion in Environmental Sustainability 5(6), 551–558.

[6] https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590332220300907
Gleeson and al., '*The Water Planetary Boundary: Interrogation and Revision'*, One Earth, Volume 2, Issue 3, 20 March 2020, Pages 223-234,

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 proposent ainsi d'ajouter à l'indicateur des prélèvements d'eau bleue un indicateur relatif aux variations d'humidité des sols.

Le domaine lié 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 prélèvements 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'Holocène 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 idées pour bâtir 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 XXème siècle sont bien plus importantes que pour le précédent. Cela confirme que « l'eau verte » est entrée dans sa zone de risque.
- Pour « l'eau bleue », remplace l'ancien indicateur liés aux prélèvements 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 XIXème 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 modéré » figurées en jaune sur le diagramme-radar.

A2.2 Eau verte : l'indicateur de variabilité d'humidité des sols

L'eau verte, c'est l'eau apportée par les précipitations qui ne coule pas car elle est absorbée par les plantes ou les sols. Le *Stockholm Resilience Center* a retenu comme grandeur correspondante à surveiller la variabilité de l'humidité de la partie supérieure du sol, celle qui est accessible aux plantes.

Localement, cette humidité varie constamment avec des périodes plus sèches que la moyenne et des périodes plus humides. Les fluctuations annuelles sont assez stables 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%.

L'indicateur suivi 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 de ce corridor de référence. A noter que s'il n'y a qu'un « indicateur planétaire » pour « l'eau verte », il y a deux phénomènes physiques sous-jacents, l'excès inhabituel d'humidité et la sécheresse inhabituelle des sols.

Si la « quasi-stabilité » de l'Holocène s'était poursuivie pendant la période industrielle, l'indicateur mondial refléterait les probabilités de 5% de sorties hautes et basses du corridor et serait donc proche de 10%.

Bâtir un indicateur mondial agrégeant 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 et périodes de référence utilisés.

La méthode a été modifiée sur plusieurs points techniques. Un indicateur différent a alors été construit et la publication de juillet 2022 fournit des augmentations de variabilité des taux d'humidité nettement plus claires.

A2.2.1 Le premier indicateur aujourd'hui abandonné

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

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

b) Maillage de la surface émergée non gelée en cellules de 250km ou d'un demi-degré d'arc suivant les modèles.

c) 2 modèles hydroclimatiques fournissant des valeurs d'humidité pour chaque cellule du maillage :
   - modèle MPI-ESM1.2-LR couplant plusieurs modèles avec le modèle dynamique vegetation sols JSBACH3.2. Mailles de 250km. Valeurs journalières.
   - simulation avec le modèle dynamique de végétation LPJmL5.l forcé avec des données climatiques CMIP6. Mailles de 0,5 degré d'arc. Valeurs mensuelles.

d) 2 périodes de référence :
   - de -6000 à -5500 (« Holocène moyen »)
   - de 1850 à 1899 (« période pré-industrielle »)

e) *Bornes locales mensuelles* : 5ème et 95ème percentile des taux d'humidité attribués par le modèle lors du mois concerné de la période de référence dans la cellule et les 8 cellules voisines.

f) *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 (excès inhabituel d'humidité) ou est inférieur à la borne locale inférieure (sécheresse inhabituellement forte) et 0 dans le cas contraire.

g) *Indicateur planétaire* : 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 :

Référence Holocène moyen -6000-5500

L'étude montre qu'actuellement 18% de la surface continentale non gelée a 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'Holocène moyen.

Cette augmentation est jugée suffisamment importante par les auteurs pour qu'ils affirment qu'une « limite planétaire » a été franchie.[7]

Ce franchissement n'est pas daté et pour cause. En effet, la limite inférieure sèche a été franchie bien avant 1850 et la variabilité du sous-indicateur sec a même baissé depuis. En revanche, le sous-indicateur « humide » ne serait lui significativement sorti du corridor que vers 1940.

Référence de 1850 à 1899 (« période pré-industrielle »)

Cette période de référence est très courte, 49 ans. De ce fait, elle fournit des corridors 5-95 plus étroits. Pourtant, de façon étonnante, la variabilité de l'humidité calculée à partir du même modèle hydroclimatique MPI-ESM est notablement plus faible qu'avec le corridor plus large calculé à partir de la période de l'Holocène 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.

[7] "Since ~ 18% of land area currently exits local bounds, the green water Planetary Boundary is considered to be considerably transgressed."

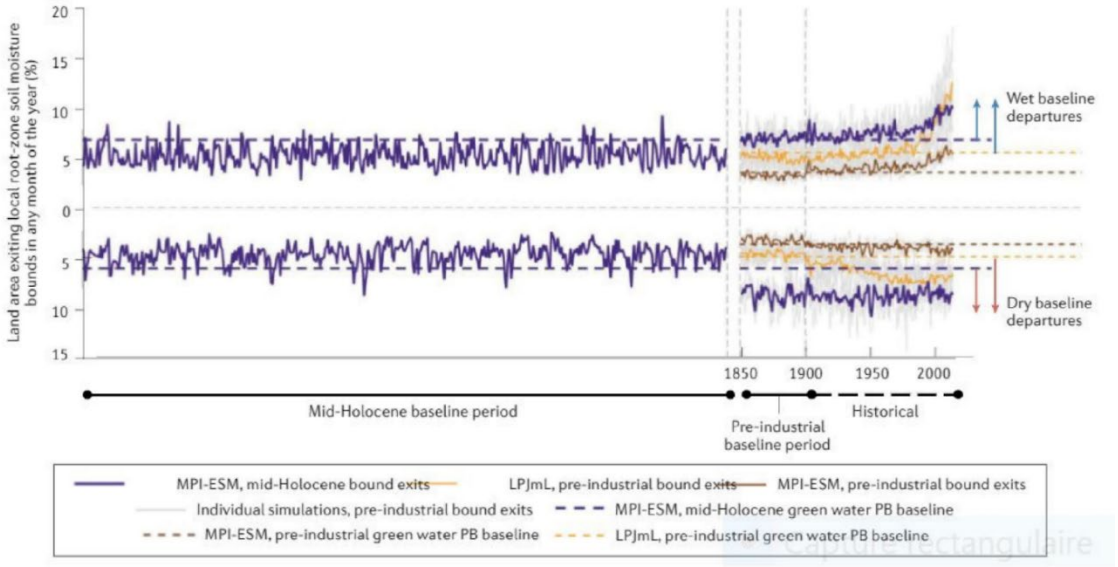


Fig. 3 | **Departure from the envelope of baseline variability.** Percentage of land area with monthly root-zone soil moisture deviations beyond local lower (dry departure) and upper (wet departure) bounds. Dry and wet bounds are defined as the 5th and 95th percentiles of root-zone soil moisture over the mid-Holocene (500 years from ~6,000 years ago) and pre-industrial (1850–1899) baseline periods, respectively (Supplementary Methods), using data from the Earth system model MPI-ESM1.2-LR (REFS[125,126]) (purple and brown lines) and the global vegetation and water balance model LPJmL (REF.[200]) (yellow lines; Supplementary Data). Pre-industrial baseline departures were considered for the historical period (1900–2014) and mid-Holocene baseline departures for the entire historical period (1850–2014), as transient root-zone soil moisture data are unavailable over the entire Holocene. Simulations of the proposed green water planetary boundary (PB) control variable have, thus, already departed from the variability envelope (5th and 95th percentiles) of both the pre-industrial and the mid-Holocene baseline.

Copie de la figure 3 de la source avril 2022 de l'annexe 3

A2.2.1 Le deuxième indicateur utilisé aujourd'hui

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

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

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

c) 1 modèle hydroclimatique 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

d) Période de référence :
   - de 1671 à 1860 (période « pré-industrielle »)

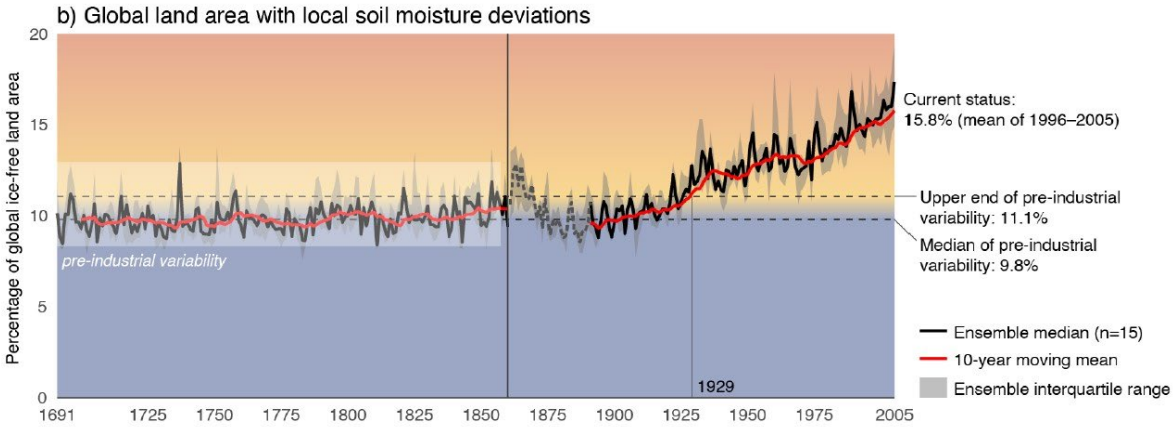
e) Période d'analyse :
   - de 1671 à 2005

f) *Bornes locales* mensuelles: 5ème et 95ème percentile 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.

g) *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 (excès inhabituel d'humidité) ou est inférieur à la borne locale mensuelle inférieure (sécheresse inhabituellement forte) et 0 dans le cas contraire.

h) *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



Copie de la figure 3 de la source juillet 2022 de l'annexe 3

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 forçant 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 énorme 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 franchie 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 sont bien plus élevées que celles qu'avaient trouvé Wand et al.
- Les dynamiques sont significativement différentes. Sur le XXème siècle, c'est-à-dire entre 1900 et 2000 :
  - Les écarts "humides" augmentent de 23% pour Wang et al. et de 53 % pour Porkka et al
  - Les écarts "secs" décroissent de 5% pour Wang et al. et augmentent de 60% for Porkka et al.

Publication	Limite supérieure	1900	2000	2000/ 1900	Limite inférieure	1900	2000	2000/ 1900
Wang et al.	ca 7,0%	7,4%	9,1%	**+23%**	ca 6,0%	8,8%	8,4%	**-5%**
Porkka et al.	5%	ca 4,7%	ca 7,2%	**+53%**	4.8%	ca 5,0%	ca 8,0%	**+60%**
Wang vs Porkka	40%	57%	26%		25%	60%	5%	

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

A2.3. 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 hydroclimatique.

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

a. *Paramètre physique* : les débits des cours d'eau
b. Maillage de la surface émergée non gelée en cellules d'un demi-degré d'arc (environ 50km x 50km à l'équateur).
c. 1 modèle hydroclimatique 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 intégre 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.

   Nota 1: à ce stade, j'ignore la signification du paramètre débit attribué à des cellules de milliers de km^2 et sa correspondance avec les réalités physiques du chevelu des cours d'eau dans ces cellules.
d. Période de référence :

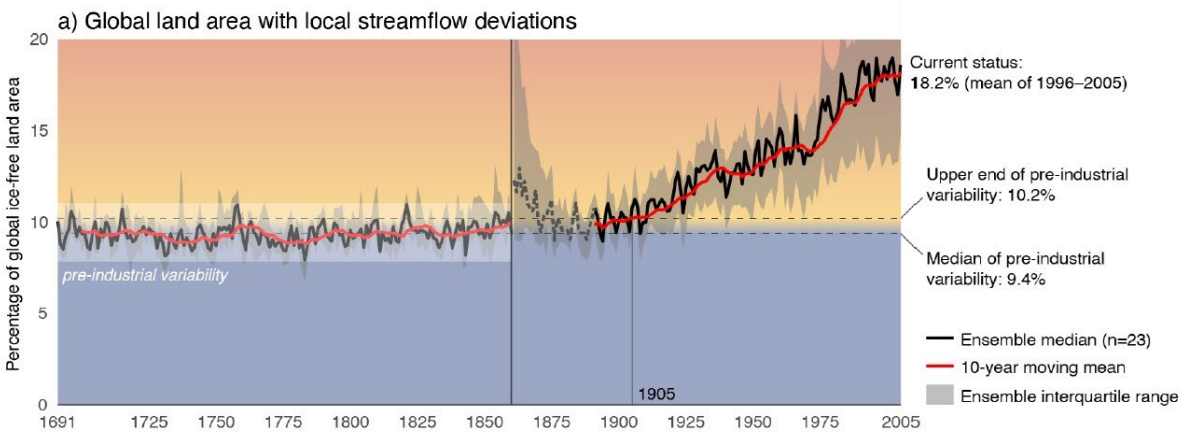
   de 1671 à 1860 (période « pré-industrielle »)
e. Période d'analyse : de 1671 à 2005
f. *Bornes locales* mensuelles: 5ème et 95ème percentile des débits moyens attribués par le modèle au mois concerné de la période de référence dans la cellule.
g. *Indicateur local pour un mois de l'année en cours* : 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.
h. *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.

<u>Résultats publiés en juillet 2022 :</u>

La « limite de sécurité » fixée par précaution à la borne supérieure de la variabilité pré-industrielle, 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 forçant 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 énorme dont les raisons sont à élucider. Comme c'est le même modèle qui est utilisé avant et après 1860, cette discontinuité est totalement inattendue.



Copie de la figure 3 de la source juillet 2022 de l'annexe 3

Annexe 3 – Publications scientifiques des auteurs du référentiel des 'limites planétaires »

2009 - Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity

2009 - A safe operating space for humanity.

2015 - Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet

2020 - The water planetary boundary: interrogation and revision

2020 - Illuminating water cycle modifications and Earth system resilience in the Anthropocène.

2022 janvier - Outside the Safe Operating Space of the Planetary Boundary for Novel Entities

2022 avril – A planetary boundary for greenwater

2022 juillet - Global water cycle shifts far beyond pre-industrial conditions – planetary boundary for freshwater change transgressed

2023 mai - Safe and just Earth system boundaries

2023 sept - Earth beyond six of nine planetary boundaries

Annexe 4 - Interrogations de nature scientifique

Q1. Comment fait-on pour confronter avec la réalité les paramètres d'humidité des sols et de débit des cours d'eau utilisés dans les modèles hydro-climatiques pour décrire la situation moyenne dans des cellules de 0,5° x 0,5°? En d'autres termes, comment établit-on des données historiques d'humidité des sols ou de débit des cours d'eau dans des mailles géographiques de centaines de km de côté ?

Q2. Les auteurs affirment que le modèle hydro-climatique qu'ils utilisent a été validé avec un bon taux de conformité aux observations[8]. Les résultats produits semblent montrer au contraire un fort écart entre les « données historiques » et les valeurs produites par le modèle. Pourquoi y a-t-il un hiatus aussi fort en 1860, hiatus ayant conduit les auteurs à faire des corrections de points sur la période 1860-1920 et à oblitérer la période 1860-1900 de leurs courbes de résultats ?

Q3. Le modèle utilisé est le modèle ISIMIP 2b de l'Institut Climatique de Potsdam forcé avec les données climatiques CMIP5 avant 1860 puis des données climatiques historiques après 1860 L'indicateur d'humidité des sols précédent était calculé par MPI-ESM1.2-LR du Max Planck Institute for Meteorology de Hambourg avec une simulation de végétation LPJml.5.1 forcée avec des données CMIP6. Il est troublant de voir que des résultats fondés sur des valeurs CMIP5 aient remplacé des résultats fondés sur des valeurs CMIP6.
Y a-t-il des différences notables de données entre les valeurs CMIP5 et CMIP6 ?

Q4. Pourquoi la croissance du deuxième indicateur « eau verte » d'humidité des sols est-elle significativement différente de celle du premier indicateur ? Est-ce que la suppression de la moyenne entre cellules voisines et la prise en compte du nombre de mois de sortie des bandes de fluctuations pré-industrielle pourraient être suffisantes pour expliquer ces différences de résultats ou proviennent-elles des différences de modèles ou de données hydro-climatiques utilisés ?

Q5. Y a-t-il des modèles hydro-climatiques autres que celui de Potsdam qui donnent des courbes significativement différentes de variations d'humidité des sols ou de débits des cours d'eau ?

[8] "The models in ISIMIP 2b have been validated against observations, showing adequate performance especially when estimates from individual models are combined in an ensemble modelling approach", Source Juillet 2022 ligne 370