



HAL
open science

Les “ entités nouvelles ” (molécules de synthèse, nanoparticules...): l'impossible définition d'une limite?

Jérôme Rose

► To cite this version:

Jérôme Rose. Les “ entités nouvelles ” (molécules de synthèse, nanoparticules...): l'impossible définition d'une limite?. La définition des “limites planétaires”: quelles implications pour le droit et la gouvernance internationale? Les rencontres internationales d'Aix-en-Prove 2022, UMR DICE; Sciences Po Aix; Institut méditerranéen pour la transition environnementale (ITEM), May 2022, Aix-En-Provence, France. pp.39-51. hal-04275981

HAL Id: hal-04275981

<https://hal.science/hal-04275981>

Submitted on 8 Nov 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

LES « ENTITÉS NOUVELLES »
(MOLECULES DE SYNTHÈSE, NANOPARTICULES...) :
L'IMPOSSIBLE DÉFINITION D'UNE LIMITE?

Jérôme ROSE

CEREGE UMR 7330

*CNRS, Aix-Marseille Université, IRD, INRAE, Coll. de France
Aix-en-Provence*

Comment limiter les effets des activités humaines sur nos écosystèmes ? Ce sujet n'est pas nouveau, mais l'accélération des changements climatiques, leurs impacts sur nos vies, nécessitent de renforcer la communication entre scientifiques, politiques et citoyens, pour une prise de conscience collective. Les concepts de limites et de frontières planétaires s'inscrivent, avec la notion d'empreinte carbone, dans la liste d'outils permettant de mieux appréhender l'ampleur des changements, le transfert de connaissances scientifiques vers le plus grand nombre et une prise de conscience la plus large possible.

Le concept des limites planétaires, qu'il s'agisse de leur définition et de leur dépassement, sujet de réflexion et de débat des rencontres internationales d'Aix-en-Provence 2022, ne s'aborde pas de la même manière en fonction des processus envisagés. En effet le fonctionnement du système terre se révèle particulièrement complexe et définir des seuils assurant un bon fonctionnement reste une tâche ardue. Que signifie bon fonctionnement ? Comment définir une valeur cible ? Mais si cette tâche se révèle parfois impossible, le concept de dépassement des frontières ou des limites participe à la prise de conscience collective et à la quantification des effets des activités humaines sur nos conditions d'existence sur la planète.

L'article de 2009¹ de Johan Rockström du Stockholm Resilience Center et de ses partenaires propose les bases de ce concept en identifiant neuf processus du système Terre. Le concept considère que si les seuils associés à ces neuf processus sont franchis, les changements environnementaux qu'ils engendreraient mettraient en danger l'existence de l'homme. Les neuf processus sont les suivants : le changement climatique, la perte de biodiversité (terrestre et marine), l'interférence avec les cycles de l'azote et du phosphore, l'appauvrissement de l'ozone

¹ J. ROCKSTRÖM et al., « A safe operating space for humanity », *Nature*, vol. 461, no 7263, p. 472-475, sept. 2009, doi: 10.1038/461472a

stratosphérique, l'acidification des océans, l'utilisation globale de l'eau douce, le changement d'utilisation des terres, la charge en aérosols atmosphériques et la pollution chimique. L'article de 2009 inclut la pollution chimique dans la liste des limites planétaires, mais ne parvient pas à déterminer de valeur seuil à ne pas franchir. Il s'agit de la force, mais aussi la faiblesse de ce concept. Comment définir une valeur seuil en la matière ?

I. LE CONCEPT DES LIMITES PLANÉTAIRES

A. La notion de variable de contrôle

Le concept des limites planétaires repose sur la capacité à définir des variables de contrôle pour les neuf processus retenus. Cette approche s'inspire des méthodes de modélisation de systèmes en vue de leur automatisation². Elle consiste à simplifier un système complexe, sans entrer dans le détail des mécanismes, et à définir une « fonction de transfert » qui permettra de déterminer la réponse et l'évolution du système, à la suite d'une perturbation en entrée de ce système, c'est-à-dire la variable de contrôle (figure 1).

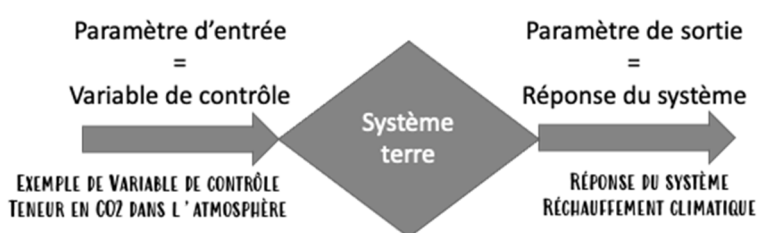


Figure 1 : concept de variable de contrôle d'un système complexe

Cette vision théorique très adaptée à des systèmes industriels, a été extrapolée par les auteurs de l'article de 2009 au système Terre. Une telle simplification induit forcément des difficultés et des biais concernant la quantification. En effet le système Terre présente de nombreuses hétérogénéités spatiales avec des sous-systèmes en interaction les uns avec les autres. Cette difficulté, mise en avant par Rockström et ses collaborateurs en 2009, peut en partie se résoudre en introduisant un double niveau de variables de contrôle, à savoir un niveau régional et un niveau planétaire.

² A. BOUTAUD et N. GONDRAN, « Limites planétaires : Comprendre (et éviter) les menaces environnementales de l'anthropocène. » 2019. Disponible sur <https://www.millenaire3.com/ressources/Limites-planetaires>

B. Limites et frontières planétaires

La notion des limites planétaires est étroitement liée à la définition de sa variable de contrôle et une valeur seuil de cette variable. Néanmoins il n'existe pas toujours une limite ou une valeur au-delà desquelles le fonctionnement planétaire présente un risque de rupture. Par exemple, les impacts des modifications du cycle de l'azote, l'un des neuf processus pris en compte, se révèlent particulièrement difficiles à intégrer dans une vision globale planétaire, tant ce processus varie à une échelle locale. L'exemple du changement climatique est différent. La concentration de CO₂ dans l'atmosphère qui représente la variable de contrôle de ce processus présente une limite. Mais l'incertitude ne permet pas d'identifier une valeur seuil hors de cette zone d'incertitude qui se situe entre 350 et 550 ppm (figure 2).

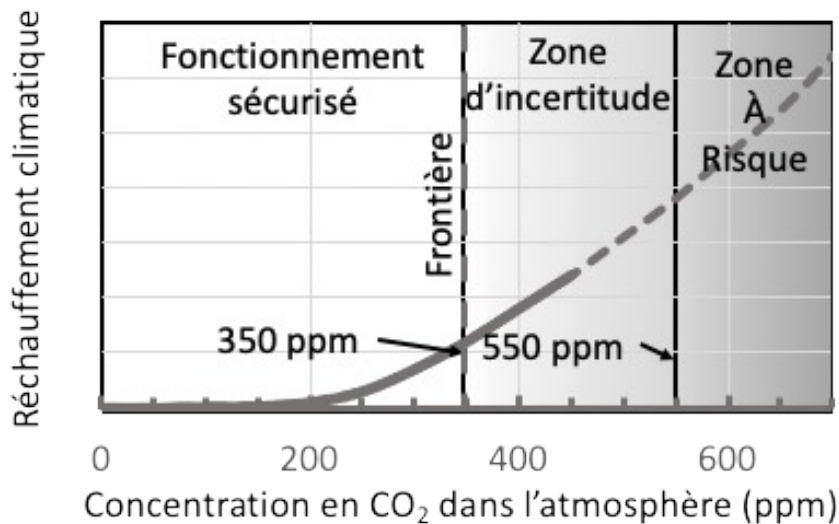


Figure 2 : le concept des frontières planétaires via l'exemple de la teneur en CO₂ de l'atmosphère.

Les auteurs de l'article de 2009 indiquent qu'il serait réducteur d'indiquer une valeur unique comme point de bascule. La notion de frontière a été proposée afin de clarifier la situation. En appliquant le principe de précaution à la zone d'incertitude de la variable de contrôle, Johan Rockström et ses partenaires proposent de définir la notion de frontière planétaire à la valeur basse de l'incertitude. Appliquée à la concentration de CO₂ dans l'atmosphère, cela permet de définir la valeur de 350 ppm, valeur basse de l'incertitude, comme une frontière entre une zone sûre (<350 ppm) vers une zone de forte incertitude (>350 ppm). La valeur de 550 ppm, valeur haute de l'incertitude, représente quant à elle la valeur de bascule dans la zone à risque.

II. IMPOSSIBILITÉ DE DÉFINIR UNE LIMITE POUR LE PROCESSUS « POLLUTION CHIMIQUE »

Dès 2009, Johan Rockström et ses partenaires indiquent clairement qu'il est parfois difficile et peut-être impossible, de définir des limites. Le cas du processus 'pollution chimique' illustre cette quasi-impossibilité.

A. Pollution chimique : la définition de Johan Rockström et de ses partenaires en 2009

Les auteurs focalisent la discussion de ce processus sur l'activité humaine de production de nouveaux composés chimiques. Ces composés produits en masse par l'industrie génèrent des pollutions, par expositions accidentelles ou chroniques des populations et des écosystèmes. Les auteurs ont intégré la pollution chimique aux huit autres processus, et donc à la notion des limites planétaires, car ils considèrent ce processus comme ubiquiste. Il existe des exemples de pollutions chimiques affectant la santé de l'homme et de l'environnement sur tous les continents sans oublier les océans. De plus ce processus affecte les autres processus globaux, par exemple la pollution chimique impacte négativement la biodiversité, elle peut être associée à une augmentation de la charge en aérosols atmosphériques.

B. Limites planétaires et toxicité

Dans le cas de la pollution chimique, la définition d'une limite passe forcément par la détermination du risque, c'est-à-dire la combinaison du niveau d'exposition et de la toxicité des composés chimiques. Le nombre de composés chimiques produits par l'homme est estimé à plus de 350 000. La Commission européenne estime que la production mondiale de produits chimiques devrait doubler d'ici à 2030. S'il existe des données toxicologiques et écotoxicologiques pour seulement quelques centaines ou milliers d'entre eux, il est aujourd'hui impossible de définir par une seule valeur (concentration, quantité mondiale ...), une limite de toxicité et ainsi une limite planétaire pour ce processus.

C. Evolution de la notion de pollution chimique vers celle d'entités nouvelles

Lors de la publication du deuxième article sur les limites planétaires par le groupe du Stockholm Resilience Center³, Will Steffen et ses partenaires font évoluer le processus de pollution chimique vers celui intitulé « entités nouvelles ». Initialement les auteurs incluaient la pollution chimique dans les processus globaux, ce qui a suscité un intéressant débat. La notion de pollution chimique peut-elle être considérée comme un phénomène planétaire ? En 2013. Par

³ W. STEFFEN et al., « Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet », *Science*, vol. 347, no 6223, p. UNSP 1259855, févr. 2015, doi: 10.1126/science.1259855.

exemple, Lin Persson et ses co-auteurs⁴ insistent sur le fait qu'il n'existe pas de frontière planétaire unique en matière de pollution chimique, mais plutôt qu'il existe de nombreux problèmes de frontières planétaires régis par la pollution chimique. Les auteurs suggèrent que pour prendre en compte la pollution chimique comme une limite planétaire, il est nécessaire de considérer trois critères. Le premier critère insiste sur la dangerosité du produit qui peut par exemple affecter gravement la biodiversité. Le composé, ou le mélange porte ainsi atteinte à un processus vital du système terre. Le deuxième considère que l'effet perturbateur n'est pas connu lors de la mise sur le marché et qu'il ne sera découvert que lorsqu'il devient un problème à l'échelle planétaire. Le troisième prend en compte les effets du polluant dans l'environnement. Si ceux-ci concernent l'ensemble du système terre alors leurs effets ne peuvent pas être facilement inversés.

Néanmoins et malgré ces nombreuses discussions et publications, il n'existe pas de variable de contrôle permettant une analyse globale de la pollution chimique. Ce qui ne s'oppose pas au fait qu'une menace potentielle provenant des espèces fabriquées par l'homme existe.

Ainsi Steffen et ses co-auteurs³ proposent d'introduire la notion d'entités nouvelles plutôt que de pollution chimique. Les entités nouvelles prises en compte dans cette vision globale du système terre doivent être persistantes, mobiles sur de grandes distances, et toxiques pour l'homme et l'environnement. Il peut s'agir de produits chimiques, de micro-nano plastiques, de nanoparticules, d'OGMs et bien d'autres. Cette notion élargit ainsi le champ couvert par celle de 'pollution chimique'.

III. NANOPARTICULES : DES ENTITÉS NOUVELLES

A. Nanoparticules et nanomatériaux

Parmi les entités nouvelles, les nanoparticules et nanomatériaux, bien que mentionnés dans l'article de Steffen et ses co-auteurs³, n'ont été que peu discutés dans la littérature à l'aune du concept des limites planétaires. Dans la suite, nous aborderons principalement les nanoparticules produites intentionnellement par l'homme.

Les nanotechnologies ont été présentées comme la première révolution technologique du XXI^e siècle⁵. Dès 2002, les économistes prévoyaient un développement industriel majeur des nanotechnologies, en s'appuyant sur une très grande variété d'applications, notamment l'imagerie médicale, les médicaments, la catalyse, l'électronique moléculaire, les cosmétiques et les matériaux de

⁴ L. M. PERSSON, M. Breitholtz, I. T. Cousins, C. A. de Wit, M. MacLeod, et M. S. McLachlan, « Confronting Unknown Planetary Boundary Threats from Chemical Pollution », *Environ. Sci. Technol.*, vol. 47, no 22, p. 12619-12622, nov. 2013, doi: 10.1021/es402501c.

⁵ J-Y BOTTERO J, ROSE J, WIESNER M. Nanotechnologies: Tools for Sustainability in a New Wave of Water Treatment Processes. *Integr Environ Assess Manag* 2006

construction, pour n'en citer que quelques-unes. Il existe de nombreuses définitions des nanotechnologies⁶. Elles peuvent être définies comme une branche de l'ingénierie qui traite de la création d'objets dont l'une de ses trois dimensions est inférieure à 100 nm. Derrière cette définition se cache une vision de la construction d'objets atome par atome, molécule par molécule, par auto-assemblage ou par des assembleurs moléculaires. Mais l'aspect le plus important des nanomatériaux concerne le fait qu'en diminuant la taille des objets, leurs propriétés chimique, optique, magnétique, électronique... sont modifiées et dans certains cas de nouvelles propriétés apparaissent. Les nanoparticules d'or représentent un cas emblématique illustrant parfaitement la notion de modification de propriétés⁶. Bien que l'or soit connu pour être inerte à l'échelle macroscopique, lorsque sa taille est réduite à quelques nanomètres, les nanoparticules d'or sont des catalyseurs d'oxydation extrêmement efficaces. Cela signifie qu'elles sont capables d'échanger des électrons avec le milieu extérieur devenant des objets très réactifs à l'échelle nanométrique. Un autre exemple dans le cas du traitement des eaux permet d'illustrer cet effet « nano ». Les nanoparticules peuvent être utilisées pour dépolluer les eaux de métaux et métalloïdes. Les oxydes de fer par exemple, sont connus depuis longtemps pour piéger l'arsenic⁷. La réglementation concernant la quantité d'arsenic dans les eaux de boisson indique une valeur seuil de 10 µg/l (Code de la Santé publique : articles de R. 1321-1 à R. 1321-66).

Les particules d'oxyde de fer « non-nano » (magnétite et maghémite⁸) peuvent piéger l'arsenic à leur surface, et permettent dans de très nombreux cas d'atteindre la limite de potabilité de 10 µg/l. Néanmoins, des modèles épidémiologiques⁹ prédisent que pour une ingestion quotidienne de deux litres d'eau à cette concentration le risque de développer un cancer serait de 1 pour 500, ce qui représente un risque très significatif. Diminuer cette concentration à 1 µg/l, par exemple, permettrait d'abaisser ce risque à 1 pour 5000. Mais atteindre une limite réglementaire plus basse, nécessite des technologies capables de piéger une plus grande quantité d'arsenic. Des études⁷ ont montré que les nanoparticules de taille inférieure à 10 nm peuvent fixer trois à quatre fois plus d'arsenic par unité de surface que des particules plus grandes utilisées classiquement, ce qui permettrait ainsi d'atteindre des concentrations 3 à 4 fois plus faibles que la valeur de 10 µg/l d'arsenic.

Ces exemples illustrent aussi la confusion qui existe entre la définition des nanomatériaux ayant une dimension inférieure à 100 nm et ceux pour lesquels des effets « nano » existent réellement. Les effets « nanos » apparaissent

⁶ M. AUFFAN M, J. Rose, Bottero JY, Lowry GV, Jolivet JP, Wiesner MR. Towards a definition of inorganic nanoparticles from an environmental, health and safety perspective. *Nat Nanotechnol* 2009; 4: 634-41. <https://doi.org/10.1038/nnano.2009.242>.

⁷ M. AUFFAN, J. ROSE, O. PROUX, D. BORSCHNECK, A. MASION, P. CHAURAND, et al. Enhanced adsorption of arsenic onto maghemites nanoparticles: As(III) as a probe of the surface structure and heterogeneity. *Langmuir* 2008; 24:3 215–22. <https://doi.org/10.1021/1a702998x>.

⁸ Nanoparticules d'oxydes de fer magnétiques (magnétite = Fe₃O₄, maghémite = Fe₂O₃).

⁹ National Research Council (US) Subcommittee on Arsenic in Drinking Water. *Arsenic in Drinking Water*. Washington (DC): National Academies Press (US); 1999.

généralement pour des tailles bien souvent inférieures à 20 nm⁶. La limite de 100 nm reste très artificielle et ne permet pas de prendre en compte les singularités des effets nanos.

Avec les nanotechnologies, nous sommes ainsi confrontés à des comportements nouveaux et encore inconnus. Les effets « nanos » à l'origine de leur fort intérêt ne pourraient-ils pas être à l'origine d'effets indésirables et toxiques ?

C'est pourquoi un certain nombre d'interrogations sont posées aux niveaux national, européen et international sur les risques sur la santé et l'environnement potentiellement associés à ces nouvelles technologies. En particulier, la dissémination potentielle dans l'environnement de nanomatériaux manufacturés produits en masse soulève des interrogations.

La taille des nanomatériaux, proche de celle d'un virus, a suscité une crainte majeure. Est-ce que tous les nano-objets peuvent franchir les barrières biologiques ? Si oui cela engendre-t-il un effet toxique ? La taille peut-elle représenter une variable de contrôle dans le contexte des limites planétaires ?

B. Nanoparticules : un paramètre contrôle-t-il la toxicité ? Peut-on définir une variable de contrôle pour ces entités nouvelles ?

Si la taille semble représenter le paramètre le plus important pour le contrôle des effets toxiques, de nombreuses études ont montré que ce lien unique taille vs. toxicité se révélait trop simpliste. De nombreux autres paramètres tels que la stabilité chimique, la forme, la structure cristalline, la surface spécifique, la chimie de surface, la solubilité, la stabilité colloïdale et bien d'autres peuvent être à l'origine d'effets biologiques indésirables.

Par exemple des études ont pu montrer que l'instabilité redox (oxydation ou réduction du cation métallique) de nanoparticules peut engendrer des effets toxiques. Le cas de nanoparticules à base de fer utilisées dans les domaines biomédicaux et environnementaux permet d'illustrer ce phénomène. Les nanoparticules de fer métal ainsi que les nanoparticules de magnétite (oxyde mixte de fer ferreux (Fe²⁺) et ferrique (Fe³⁺)) ont la capacité à être oxydées. Dans le cas du fer métal, il s'agit de l'apparition de rouille. Cette oxydation s'accompagne donc d'un transfert d'électrons depuis la nanoparticule vers le milieu extérieur. Cette réaction va entraîner la formation d'espèces radicalaires de l'oxygène qui sont à l'origine d'un stress oxydant pour les organismes vivants. Ce phénomène n'est donc pas lié à la nature nanométrique des particules. La diminution de la taille augmentant la surface de contact par masse de produit est toutefois à l'origine d'un stress oxydant plus marqué.

D'autres paramètres peuvent générer des effets toxiques. S. Lehmann et ses co-auteurs¹⁰ ont montré que le diamètre des nano-fils d'argent pouvait modifier leurs

¹⁰ S. G. LEHMANN, D. TOYBOU, A.-E.P DEL REAL, D. ARNDT, A. TAGMOUNT, et al. (2019) Crumpling of silver nanowires by endolysosomes strongly reduces toxicity. Proceedings of the National Academy of Sciences of The United States of America 116, 14893–14898.

effets toxiques sur des cellules de la peau. Ces résultats n'impliquant que modérément la longueur des nano-fils comme cela pouvait être supposé par analogie avec les fibres d'amiantes ont surpris la communauté scientifique. Les outils d'imagerie 3D ont révélé que plus la flexibilité augmentait (et donc le diamètre des nano-fils diminuait) plus les cellules pouvaient phagocyter les nano-fils sans générer de ruptures des membranes cellulaires, souvent à l'origine de stress oxydant. La flexibilité des nano-fils diminue ainsi les effets toxiques.

Ces exemples montrent qu'il n'existe pas un seul paramètre permettant de prédire la toxicité des nanoparticules, mais qu'il faut prendre en compte un grand nombre de propriétés.

Outre la multiplicité des paramètres pouvant engendrer des effets toxiques, la définition d'une variable de contrôle et de seuils s'accompagne mal de phénomènes discontinus. Les modèles toxicologiques se basent sur des courbes continues reliant la dose à l'effet ; l'augmentation de la dose engendre une augmentation des effets. Les courbes présentent souvent des formes sigmoïdes dont la pente et le plateau varient d'un composé toxique à un autre (figure 3). Il est alors possible de définir une valeur d'effet. Par exemple la lecture de cette courbe continue permet de définir la dose qui induit des effets pour 1% d'organismes testés. Des seuils peuvent ainsi être définis pour un élément toxique. Cette méthodologie permet par exemple de définir les seuils de doses maximales d'ingestion journalière de cet élément.

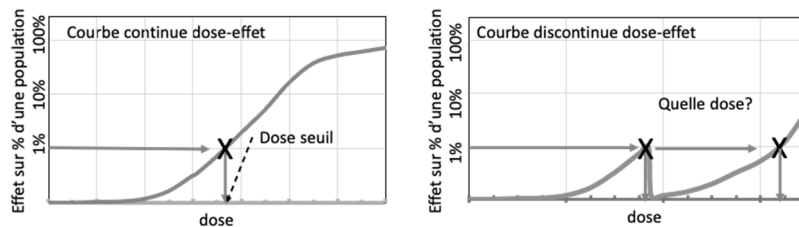


Figure 3 : représentations schématiques de courbes dose-effet continues et discontinues

Dans le cas des nanomatériaux et des nanoparticules, les relations dose-effet ne se traduisent pas toujours par des courbes continues. Il est par exemple possible que certains nanomatériaux induisent dans un premier temps un effet proportionnel à une dose croissante, puis, au-delà d'une certaine dose, une baisse brutale des effets peut apparaître. Il s'agit d'une courbe discontinue qui rend l'établissement de seuils de toxicités très difficiles. Ce comportement s'adapte mal à la définition d'une variable de contrôle.

De plus la vision du risque des nanoparticules ne doit pas se résumer aux nanoparticules initiales. Dans de très nombreux cas, les nanoparticules sont modifiées en surface afin de mieux les disperser dans la matrice du produit final

(peinture, plastique, crème ...) et/ou d'optimiser la propriété souhaitée. Par exemple les nanoparticules de TiO_2 ont la particularité d'absorber les ondes ultraviolettes (UV) du soleil, ce qui en fait d'excellents filtres UV pour les crèmes solaires. Mais le nano- TiO_2 , n'est pas utilisé de manière brute. Les produits commerciaux sont en fait de véritables composites. Si le cœur des nano-filtres UV est bien composé de TiO_2 , il peut exister une première couche à base de silice ou d'oxyde d'aluminium et une deuxième couche composée de molécules à base de silicium (silane) à la surface des nanocomposites. Or les connaissances concernant la dangerosité du TiO_2 purs, ne peuvent s'appliquer à ce composé complexe. De plus, les effets engendrés par une crème solaire, et un résidu de crème solaire relargué dans l'environnement et qui va subir des transformations, se sont révélés différents¹¹.

La caractérisation du risque des nanomatériaux doit donc prendre en compte l'ensemble du cycle de vie des technologies, depuis la fabrication, en passant par leur incorporation dans le matériau final (polymère, céramique, crème, peinture ...), l'utilisation du produit à base de nanomatériaux, jusqu'à leur fin de vie. Cette approche vise à définir à chaque étape à la fois la dangerosité du produit (toxicité) ainsi que le niveau d'exposition de l'homme et de l'environnement. Si les aspects toxicité des nanomatériaux ont été étudiés depuis près de 20 ans, la quantification et la compréhension des niveaux d'exposition de l'homme et de l'environnement restent mal comprises.

De plus, si des risques associés aux nanomatériaux existent, les effets à court terme semblent mieux documenter que les effets à long terme.

Quoiqu'il en soit, au travers de la littérature concernant le risque et la dangerosité des nanomatériaux, il apparaît clairement qu'il existe de nombreux paramètres pouvant déclencher des effets biologiques indésirables, et la taille des nanoparticules ne peut pas représenter le seul paramètre, la seule variable de contrôle de cette « entité nouvelle ».

C. Nanoparticules : quel niveau de production ?

Dans la discussion, nous n'abordons que les nanoparticules et les nanomatériaux fabriqués intentionnellement par l'homme afin de rester focalisés sur les nanotechnologies. Nous ne traiterons donc pas le cas des nano-plastiques, ou des suies produites par les procédés de combustion par exemple.

La production mondiale reste difficile à estimer pour plusieurs raisons. Tout d'abord les estimations ne prennent pas forcément en compte les mêmes objets. Par exemple le noir de carbone ou la silice amorphe, qui représentent les quantités les plus importantes ne sont pas des nanomatériaux issus des nanotechnologies. Ces deux objets sont parfois inclus dans les estimations, ce qui pourrait surestimer

¹¹ M. AUFFAN, P. CHAURAND, C. BOTTA, J. LABILLE, A. Masion, J-Y. BOTTERO, et al. Exposition et impact environnemental au cours du cycle de vie des nanomatériaux commercialisés. *Actual Chim* 2012:367-8.

l'ampleur des nanotechnologies. Néanmoins il semble que la production de nano-TiO₂, Nano-Ag, nanotube de carbone et quelques autres (sans la silice et le noir de carbone) atteigne 400 000 t/an. Cette production est loin d'être négligeable, mais doit aussi être mise en regard d'autres composés considérés toxiques comme les pesticides avec une consommation de 2,7 millions de tonnes en 2018, ou encore les plus de 300 millions de tonnes de plastique produites par an.

A l'échelle européenne, l'équipe du Pr Bernd Nowack¹² de l'EMPA en Suisse a développé un modèle afin de quantifier le relargage dans l'environnement de certains nanomatériaux comme Nano-TiO₂ et nano-Ag en prenant en compte le relargage sur l'ensemble du cycle de vie des matériaux. Leur modèle estime un relargage annuel dans les différents compartiments de l'environnement de 14 tonnes pour le nano-Ag et de 5700 tonnes pour le nano-TiO₂. La question de l'impact des nanomatériaux semble donc dépasser les simples lieux de production et leur dispersion pourrait toucher de grandes zones du système terre.

IV. LES LIMITES PLANÉTAIRES SONT-ELLES DÉPASSÉES POUR LES ENTITÉS NOUVELLES (ET LES NANOMATÉRIAUX EN PARTICULIER) ?

Les nanoparticules et nanomatériaux entrent bien dans le champ de la définition des entités nouvelles proposée par Steffen et ses partenaires³, suite aux propositions de L. Persson et ses collaborateurs⁴. En effet, dans l'article de L. Persson, il est indiqué que les composés présentant une persistance, une mobilité au travers des différents compartiments environnementaux et des effets biologiques significatifs pouvant affecter les processus vitaux du système terre, doivent entrer dans le cadre du concept des limites planétaires. Si le dernier point n'est pas totalement élucidé, les effets biologiques déjà identifiés indiquent clairement un risque potentiel associé aux nanotechnologies.

En 2022, Lin Persson et ses collaborateurs ont publié un article¹³ dans lequel ils estiment que les limites planétaires des entités nouvelles sont dépassées. La démonstration se base principalement sur la pollution aux plastiques, et la méthode repose sur un test de plusieurs paramètres comme variable de contrôle potentielle pour les entités nouvelles.

Comme indiqué précédemment, cet article de 2022¹² rappelle qu'il n'existe pas de variable de contrôle unique pour les entités nouvelles, ni d'effet biophysique permettant d'identifier des seuils, comme cela est possible pour le réchauffement et la teneur en gaz à effet de serre. De plus les effets peuvent être de nature différente. Ces remarques s'appliquent parfaitement aux nanomatériaux. L'article

¹² V. ADAM, A. CABALLERO-GUZMAN, B. NOWACK, Considering the forms of released engineered nanomaterials in probabilistic material flow analysis. *Environ Pollut* 2018;243:17–27. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.07.108>.

¹³ L. PERSSON, BMC. ALMROTH, CD. COLLINS, S. CORNELL, CA. de WIT, ML. DIAMOND, et al. « Outside the Safe Operating Space of the Planetary Boundary for Novel Entities. » *Environ Sci. Technol.*, 2022; 56:1510–21. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04158>.

rappelle malgré tout que la définition de variable(s) de contrôle est essentielle pour rendre opérationnelle une limite planétaire et évaluer la position du système terre par rapport aux seuils ou aux points de basculement. Les auteurs indiquent que les variables de contrôle pour les entités nouvelles doivent être basées sur une compréhension scientifique des mécanismes de causalité qui relie l'introduction d'entités nouvelles à la perturbation des effets du système terrestre. Malgré une littérature abondante, cette compréhension mécanistique est loin d'être complète !

Les auteurs proposent donc de tester plusieurs paramètres comme variable de contrôle pour les entités nouvelles.

Les auteurs proposent tout d'abord d'utiliser la production mondiale des entités nouvelles. Ce paramètre présente l'avantage de correspondre approximativement à la charge chimique globale du système terre. De plus les auteurs rappellent que les données de production sont connues des producteurs et sont souvent communiquées aux autorités de réglementation pour un grand nombre de produits chimiques. Mais les auteurs reconnaissent dans le même temps, que cette variable de contrôle semble peu pertinente, car les liens entre la production mondiale et les variables d'effet ne sont pas évidents et peuvent être difficiles à évaluer.

Les auteurs proposent ensuite d'utiliser la réglementation concernant les nouveaux produits comme variable de contrôle, tout en la réfutant partiellement, car les réglementations varient en fonction des pays, et qu'elles n'englobent qu'une partie des effets potentiels des produits chimiques dangereux.

Les auteurs proposent d'autres variables de contrôle comme la quantité relarguée dans l'environnement ou encore l'analyse des effets sur les écosystèmes terrestres.

La conclusion de cette analyse est que toutes les variables testées ont leurs forces et leurs faiblesses, mais aucune ne remplit à elle seule tous les critères. Les auteurs concluent que la nature de la limite planétaire pour les entités nouvelles exige plusieurs variables de contrôle différentes, et que « conjointement, cet ensemble de variables de contrôle constitue la base d'une stratégie réalisable pour alerter les risques planétaires et informer les actions ».

Malgré la difficulté de définir une variable de contrôle et de définir des valeurs seuils, dans la suite de l'article les auteurs considèrent que le niveau de production des entités nouvelles dépasse largement la capacité collective d'étudier leurs impacts avant la mise sur le marché. La réglementation européenne REACH représente un pas dans la bonne direction en intégrant les études d'impacts en amont de la mise sur le marché. Mais les auteurs rappellent que les réglementations à l'échelle internationale restent très hétérogènes et de nombreuses entités nouvelles sont mises sur le marché dans des pays pour lesquelles les réglementations sont peu contraignantes par rapport aux questions d'impacts sur l'homme et l'environnement. Considérer qu'il est impossible d'évaluer le risque d'un nombre toujours plus important d'entités nouvelles produites, représente l'argument principal des auteurs pour étayer leur conclusion : les limites planétaires sont dépassées pour les entités nouvelles.

V. EST-IL NÉCESSAIRE DE DÉFINIR DES LIMITES PLANÉTAIRES POUR LES ENTITÉS NOUVELLES ?

L'angle principal de l'article¹² de L. Persson et de ses collègues consiste à fixer la discussion sur les entités nouvelles dans le cadre du modèle des limites planétaires proposé en 2009. Si ce cadre, ce modèle, prenant en compte neuf processus, se révèle un puissant outil à la fois pédagogique et permettant une prise de conscience des impacts des activités humaines dans le contexte des changements globaux, il impose des contraintes méthodologiques. En particulier ce modèle repose sur les variables de contrôle. Les auteurs de l'article de 2022¹² en testant plusieurs paramètres comme variable de contrôle ne parviennent que partiellement à inclure les entités nouvelles dans le cadre du modèle des limites planétaires. Leur conclusion, qui repose sur des arguments plutôt qualitatifs « nous produisons les entités nouvelles à un rythme qui ne permet pas d'évaluer leur impact avant leur mise sur le marché » pourrait sembler en décalage avec les principes des limites planétaires. Nul doute que le débat n'est pas clos.

Quoiqu'il en soit, qu'il soit possible ou pas de définir des limites pour les entités nouvelles, il convient de renforcer l'ensemble du processus de production et de contrôle des entités nouvelles en mobilisant à la fois les industriels, les structures de réglementation ainsi que les organismes de recherche autour des modes de production plus sûrs et plus sobres. Cette problématique s'inscrit pleinement dans le cadre des objectifs de développement durable en particulier l'ODD 12 « consommation et production responsables ». Les principes de précaution et de prévention doivent-ils être mis en œuvre ? L'Europe via son *Green Deal*, s'oriente vers une économie durable, neutre sur le plan climatique d'ici 2050. Elle s'est également fixé l'objectif de protéger la santé humaine et l'environnement et ainsi évoluer vers une production qui souhaite bannir les produits chimiques toxiques. Cette volonté s'affiche dans la *Chemicals Strategy for Sustainability* mise en place en 2020. Les initiatives de développement des nanotechnologies *safe by design*, lancées il y a une dizaine d'années, qui consistent à prendre en compte les impacts environnementaux et les effets toxiques dès la phase de conception des entités nouvelles permettront certainement de limiter les risques sur le système terre. Ce concept, qui évolue vers le concept de *sustainable and safe by design*, tend à s'appliquer à l'ensemble des matériaux avancés. Ces stratégies de productions des entités nouvelles plus sûres pour l'homme et l'environnement suffisent-elles à éviter le dépassement d'une limite planétaire ? Doit-on aborder la question de la diminution de cette production ? S'il est difficile de répondre, nul doute que le concept des limites planétaires apporte un éclairage pertinent sur les risques associés aux entités nouvelles et à la pollution chimique.