

WEBINAIRE TTI.5

Séance 18

« Mesurer pour réduire nos impacts environnementaux : déploiements de l'économie circulaire et de l'ACV »

VENDREDI 29 MAI 2026
13h30 - 15h30



SYNTHÈSE DE LA SÉANCE

Introduction	2
Les conditions d'une transition vers la circularité forte	3
Franck AGGERI CGS Mines Paris - PSL	
Brevets circulaires dans l'industrie plastique : les arbitrages entre recyclage et réduction	13
Nathalie LAZARIC GREDEG (CNRS/Université Côte d'Azur)	
Évaluation environnementale des scénarios de transition du système électrique européen : co-bénéfices et trade-offs	17
Victor GUILLOT CMA Mines Paris - PSL	

INTRODUCTION

À l'heure du dérèglement climatique et d'interrogations sur la durabilité tant des systèmes de production que de consommation, il n'est pas rare d'entendre parler d'économie « circulaire », cette économie qui promet de boucler les flux de matière, d'énergie et de produits en faisant de nos propres déchets les matières premières de demain, selon un cycle sans fin.

Développé par la fondation Ellen McArthur et McKinsey en 2012, le concept a suscité un tel engouement qu'il a été repris par une très grande diversité d'acteurs depuis : entreprises, organisations de l'économie sociale et solidaire, pouvoirs publics à différentes échelles, monde de la recherche etc.

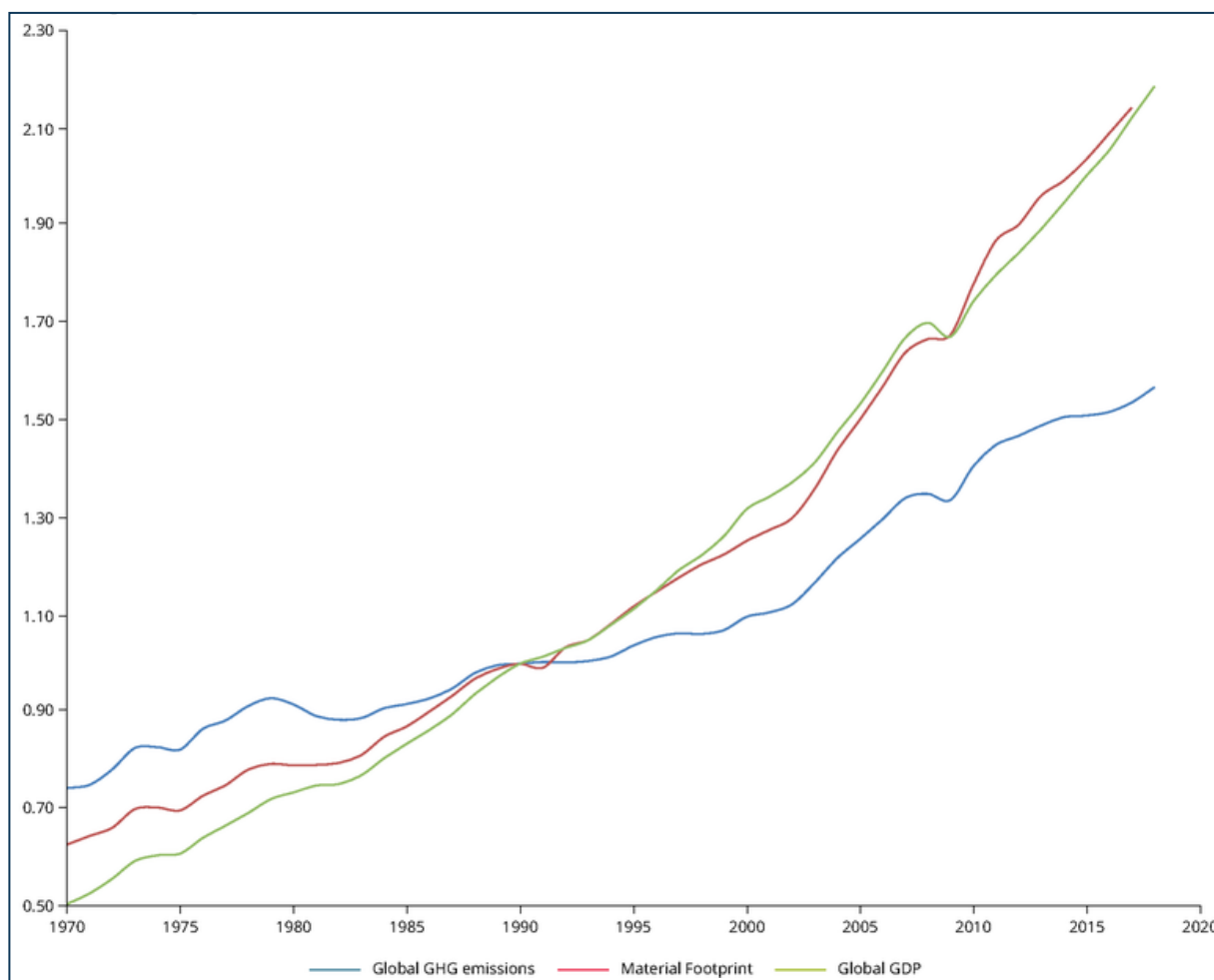
Ce webinaire s'est d'abord attaché à explorer les genèses et les rouages du grand récit qu'est le passage d'une économie dite « linéaire » à une économie dite « circulaire », et ce par la voix de Franck AGGERI professeur de management à Mines Paris PSL, chercheur au Centre de Gestion Scientifique et codirecteur de la chaire « mines urbaines ». A travers l'exemple des brevets de l'industrie plastique, Nathalie LAZARIC, chercheuse au GREDEG (Unité Mixte de Recherche sous la double tutelle du CNRS et d'Université Côte d'Azur), a permis de saisir la pertinence réelle de ce concept de « circularité » pour cette industrie, montrant l'écart béant entre discours et pratiques. Pour clore le webinaire, Victor GUILLOT, post-doctorant TTI.5 au Centre de Mathématiques Appliquées, sous la double tutelle Mines Paris-PSL et Technical University of Denmark, a présenté un autre éclairage sur le concept de durabilité en mobilisant les outils d'Analyse de Cycle de Vie couplées au cadre des limites planétaires afin d'étudier le système électrique européen du point de vue environnemental en tenant compte de possibles « reports de pollution » liés à ses évolutions anticipées dans les années à venir.

Les conditions d'une transition vers la circularité forte

Franck AGGERI | CGS Mines Paris - PSL

Le point de départ : le dérèglement climatique

Le graphique ci-dessous, accessible sur le site de l'Agence Environnementale Européenne, montre en bleu, rouge et vert les variations mondiales d'émissions de GES, de l'empreinte matérielle (quantité totale de matières premières extraites pour satisfaire la demande de consommation finale) et du PIB respectivement. Concernant les émissions de gaz à effet de serre, on note un découplage relatif entre émissions et PIB mondial depuis 1990 : la tendance du rapport entre variation des émissions et variation du PIB est à la baisse, ceci grâce au développement de l'efficacité énergétique, des sources d'énergies renouvelables ou du nucléaire par exemple. Toutefois, la tendance absolue est à la hausse, ce qui est le point principal environnementalement parlant bien sûr.



Relative change in main global economic and environmental indicators from 1970 to 2018.

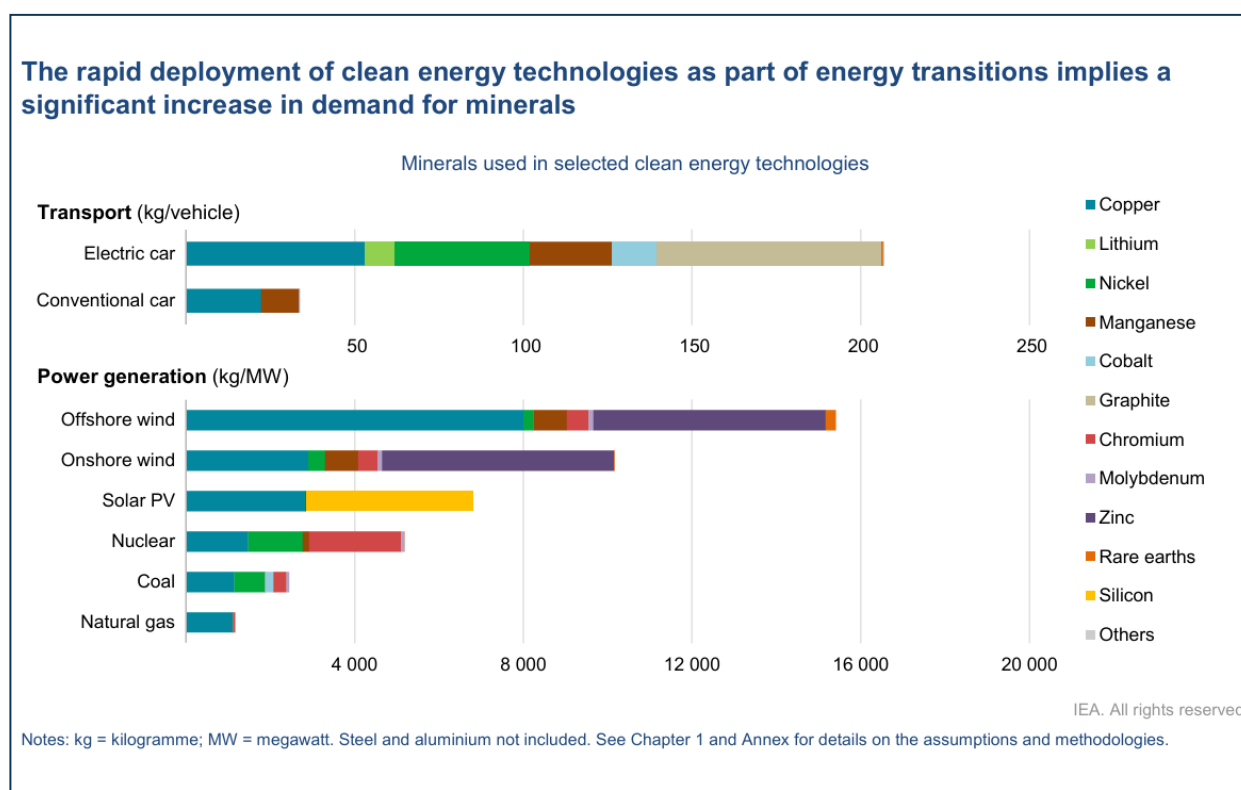
Source : European Environment Agency (2020) <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/maps-and-charts/relative-change-in-main-global>

Quelles réponses à ce constat ?

a) La réponse classique : la croissance verte

La vision de ce découplage relatif entre émissions et PIB superposée à l'urgence climatique conduit par exemple le prix Nobel d'Économie 2025 Philippe Aghion à prôner une « croissance verte », c'est-à-dire la poursuite de l'augmentation du PIB en misant sur un développement accru des technologies dites « vertes » comme l'éolien, le solaire, la voiture électrique, les pompes à chaleur etc. qui permettraient de parvenir à un découplage absolu entre émissions et PIB. Cette vision des choses est mise à l'honneur dans le plan d'investissement France 2030 par exemple.

Si l'on note la courbe en rouge de la variation de l'empreinte matérielle dans le graphe ci-dessus, on remarque toutefois un couplage très fort (absolu) entre PIB et empreinte matérielle. Nombre de travaux soulignent en effet cet aspect, et en premier lieu le rapport Meadows de 1972 intitulé *Les limites à la croissance*. Or, selon le rapport de 2019 du Programme des Nations Unies pour l'Environnement, l'extraction, la production et la transformation des ressources (y compris agricoles) constituait 50% des émissions de gaz à effets de serre mondiaux et 80% des atteintes à la biodiversité et aux ressources hydriques.



Exemple des nécessités matières pour quelques technologies « vertes » comparées à leurs analogues fossiles

Source : Agence Internationale de l'Énergie, *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*, 2020, page 6.

La « croissance verte », qui ne s'intéresse pas à l'empreinte matérielle, manque ainsi au passage tout un pan d'impacts environnementaux. De fait, les voitures électriques, éoliennes etc. consomment davantage de ressources en amont pour leur production, et nécessitent de plus un bon nombre de ressources critiques exploitées dans des pays tiers. Enfin, les analyses de cycle de vie (ACV), qui s'intéressent aux impacts environnementaux d'un produit rapportés à une unité fonctionnelle tout le long de la vie du produit (de l'extraction des matières premières à la fin de vie) confirment que s'effectue un « transfert de pollution » : si les technologies « vertes » émettent moins de GES, tout du moins entre leur mise sur le marché et leur mise à l'arrêt, elles sont souvent environnementalement moins intéressantes que leur analogue fossile lorsque l'on regarde d'autres indicateurs d'impacts environnementaux que l'empreinte carbone, et notamment l'empreinte matérielle.

b) L'économie circulaire

L'économie circulaire se présente comme une réponse alternative à la catastrophe environnementale, puisqu'elle s'intéresse justement aux flux de matière et pas seulement aux émissions de GES. Le récit dominant, c'est-à-dire celui diffusé par la fondation Ellen McArthur et McKinsey à l'origine du concept en 2012 puis repris par une multitude d'acteurs dont la Commission européenne et les médias, affirme dans les grandes lignes « qu'avant » le modèle était l'économie linéaire, caractérisée par les quatre étapes « Take, Make, Use, Dispose ». Chaque fois que sont fabriqués de nouveaux produits, c'est avec de nouvelles ressources ; l'obsolescence est programmée, la production des déchets explose et même après recyclage, environ 95% de la valeur matière est perdue en Europe d'après la Commission européenne, ce qui veut dire que le modèle est au sous-cyclage : les produits obtenus à partir de matières recyclées ont une valeur économique bien moindre que la valeur initiale des produits formés à partir de matière non recyclée.

S'oppose à ce modèle linéaire, rejeté dans l'obscurantisme du passé, la lumineuse « économie circulaire » fondée sur le principe de bouclage des flux de matière, d'énergie et de produits selon un cycle sans fin. On peut entendre parler d'économie circulaire 3R, 5R ou 10R pour décrire le cycle de la matière, le 5R étant par exemple « Refuser, Repenser, Réduire, Réutiliser, Recycler » : Refuser de produire, Repenser les systèmes de production et de consommation par l'écoconception et la sobriété, Réduire la quantité de matière mobilisée, Réutiliser au sens large de réemployer, réparer ou reconditionner, et Recycler en dernier recours.

Deux éléments clés caractérisent ce récit :

- L'usage des deux imaginaires que sont le cercle, symbole d'éternité, et

la circulation, métaphore de l'économie comme circulation sanguine

- Un certain nombre de promesses :
 - Économiques puisque McKinsey chiffre la création de valeur en 2012 à 630 milliards de dollars d'ici 2025
 - Environnementales avec la réduction de l'empreinte matière, des émissions de GES, de la consommation d'eau, de la production des déchets etc.
 - Sociales avec la création de millions d'emplois locaux par des boucles circulaires courtes, ce qui a d'ailleurs entraîné les acteurs locaux qui se sont pris à rêver à des boucles locales de réparation, de réemploi etc.



Source : Service de recherche du Parlement européen. Infographie associée à la page « Économie circulaire : définition, importance et bénéfices », disponible sur <https://www.europarl.europa.eu/topics/fr/article/20151201STO05603/economie-circulaire-definition-importance-et-benefices>

Si nous allons voir que ces promesses n'ont pas été tenues, le fait de considérer des stratégies de circularité à partir de processus initialement considérés séparément afin de les intégrer dans un schéma d'ensemble où ils sont complémentaires constitue indéniablement l'apport de la fondation Ellen MacArthur.

Le récit a en tout cas suscité un engouement spectaculaire, avec un grand nombre de politiques publiques dans le monde entier et la mobilisation

d'acteurs très variés, comme le montre par exemple :

- La loi Anti-Gaspillage Economie Circulaire (AGEC) française
- Le plan d'action pour l'économie circulaire européen
- La « Refactory » de l'entreprise Renault située à Flins en Ile-de-France, décrite selon le site de l'entreprise comme la « première usine européenne d'économie circulaire »
- L'explosion du nombre de publications scientifiques portant sur le concept à partir de 2015

Deux éléments de réponse sur les raisons de cette mobilisation inattendue peuvent être apportés :

- D'abord, l'économie circulaire est une forme d'utopie rationnelle particulièrement attractive : elle combine un récit mobilisateur combinant critique de l'ancien modèle et la présentation d'un modèle idéal, elle se fonde sur des images et des schémas frappants (voir schéma ci-dessus), et propose des outils concrets pour guider l'action collective. L'existence d'un référentiel AFNOR, ou de normes ISO lui donnent un air sérieux, un caractère « rationnel ».
- De plus, il fallait un contexte économique et géopolitique favorable à la réception de ce discours : celui-ci a eu lieu à la fin des années 2000, pendant une période d'envolée des prix des matières premières, d'instauration de quotas d'exportation chinois sur les terres rares (2005) et d'aggravation de la crise environnementale globale. Si ce concept semble résister au « backlash écologique » en cours, c'est sans doute parce que les tensions sur l'approvisionnement des ressources critiques ne se sont pas affaiblies depuis.

La circularité, une idée nouvelle ?

Ce récit sur la circularité, en opposant le modèle soi-disant « ancien » et le « nouveau » modèle, fait oublier que la circularité n'est ni nouvelle sur le plan des idées, ni nouvelles sur le plan des pratiques. En réalité c'est plutôt le modèle linéaire qui est nouveau.

- Sur le plan des idées, la doctrine du circulus (Leroux, 1834) ou le principe des mines urbaines (Talbot, 1920) sont deux exemples qui montrent que le concept est finalement recyclé. D'ailleurs, le schéma de la fondation Ellen MacArthur est lui-même pratiquement un copié-collé du modèle Cradle-to-Cradle développé par William McDonough et Michael Braungart dans

leur livre *Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things* paru en 2002.

- Sur le plan pratique, une économie traditionnelle de la récupération et du soin des objets a longtemps eu cours, c'était même le modèle économique dominant jusqu'à la fin des années 1870 en Europe de l'Ouest : chiffonniers, égoutiers, rétamateurs etc. en étaient les artisans. La circulation de matière organique entre villes et campagnes avait une importance capitale pour l'agriculture, alors que les engrais de synthèse n'existaient pas encore. Les coûts d'extraction, de fabrication et de transport étaient évidemment bien plus élevés que ceux de récupération.

Le déclin progressif de cette économie circulaire peut être attribué aux effets des révolutions industrielles, de l'importance prise par le courant hygiéniste à la fin du XIX^{ème} siècle et du développement du consumérisme.

Enjeux de l'économie circulaire actuelle et résultats obtenus

L'économie circulaire prétendument née en 2012 cherche à construire une économie de la qualité caractérisée par la traçabilité des matières (dont relève par exemple le projet de création d'un passeport produit digital de la Commission européenne), l'instauration de critères de qualité permettant de qualifier des ressources secondaires ou des produits usagés, mise sur des innovations produits / services et des nouveaux modèles d'affaire.

Cependant, 15 ans plus tard, les résultats sont encore modestes. D'après le rapport de 2024 *The Circularity Gap Report* du think tank Circle Economy, le taux de circularité n'a cessé de baisser depuis qu'il est mesuré pour atteindre 6,9% en 2025. Celui-ci mesure le taux de matière déclarée qui revient dans le circuit (essentiellement sous forme de recyclage), et masque des disparités géographiques (ce taux est plutôt vers 12% en France, en légère augmentation). Cela ne signifie pas nécessairement une baisse en valeur absolue puisqu'en valeur absolue la quantité de matière extraite ne fait qu'augmenter dans le temps. L'économie linéaire progresse simplement plus vite que l'économie circulaire déclarée (ne sont pas comptés les flux informels de matière, conséquents dans les économies émergentes). Les expérimentations locales, nombreuses, se heurtent cependant à une difficulté de montée en puissance ce qui rend le phénomène relativement marginal.

Pourquoi ce décalage entre promesses et réalisations ?

L'économie circulaire ne tient pas compte de plusieurs obstacles majeurs.

D'abord, elle évolue dans le mythe de la circularité infinie des produits et des matières. Elle fait ainsi fi de plusieurs réalités embarrassantes :

- La dégradation inévitable de la matière (principe d'entropie développé par Nicholas Georgescu-Roegen dans les années 1970 : imaginer une pièce de monnaie qui perd de la matière au fil du temps sous l'effet de l'usure)
- Les usages dispersifs de la matière. Un produit chimique épandu sur des sols agricoles ne peut revenir dans le circuit par exemple, puisqu'il a justement pour but de fertiliser les sols.

Mais l'obstacle de taille auquel fait face l'économie circulaire est la croissance de la production matérielle elle-même. En effet, si l'on prend par exemple le cas de l'aluminium, parfaitement recyclable et dont le recyclage est rentable, sa consommation augmente d'environ 3% par an depuis des décennies. Les produits dans lesquels on le retrouve en grande quantité (voitures et construction notamment) ont des durées de vie longue de plusieurs décennies, disons 30 ans pour l'exemple. Alors que la consommation aura augmenté d'un facteur $1,03^{30} = 2,4$ et si l'on suppose que l'on récupère absolument tout l'aluminium initial, cet aluminium recyclé ne couvrira 30 ans plus tard que $\frac{1}{2,4} \times 100 = 42\%$ de la consommation. Une telle croissance de la consommation couplée à des applications à durée de vie longue ne permet donc pas au recyclage de couvrir toute la consommation, même dans un cas de recyclage parfaitement idéal. Sans parler qu'il y a bien pire que l'aluminium : pour les ressources critiques comme celles formant les aimants permanents, on parle plutôt d'une croissance de la consommation de 10% par an...

Sachant cela, il faut reconnaître que le modèle dominant, s'il n'est pas purement et simplement linéaire, repose à la limite sur une circularité que l'on qualifiera de « faible », qui n'est finalement qu'une adaptation à la marge du modèle linéaire : elle repose sur la poursuite du modèle de croissance des volumes, empêchant tout rebouclage sérieux des flux de matière. L'efficacité matière, argument classique du système, qui consiste par exemple dans le cas d'une voiture à développer des moteurs plus économes en carburant, n'empêche aucunement les effets rebonds (rouler plus de kilomètres) comme cela a été montré maintes fois.

Il serait ainsi plus juste de parler d'économie spiralaire que d'économie circulaire, les flux de matière diminuant à chaque « boucle ».

La circularité « forte »

Après avoir saisi le caractère finalement bien « faible » de la circularité actuelle, que pourrait-on nommer circularité « forte » ? L'idée est de découpler la consommation de ressources de la production de richesses, ce qui suppose de sortir du « Design to Cost », cette volonté de concevoir les produits les moins chers possibles, et du paradigme de la croissance matérielle. La circularité forte

s'inscrit dans une démarche de soutenabilité forte, qui refuse la substitution des capitaux naturels par des capitaux humains ou technologiques

Comment passer de la circularité faible à la circularité forte ?

Quatre principaux points ressortent pour accomplir une telle transformation des systèmes de production et de consommation :

- Il s'agit d'abord de s'engager dans la voie de la sobriété, cette démarche volontaire et réflexive de modération et d'émancipation qui implique un renoncement à des produits ou services considérés comme superflus face à la catastrophe écologique en cours pour atteindre un niveau de production et de consommation considérés comme suffisant. Elle n'implique pas nécessairement une décroissance économique mais assurément une décroissance matérielle. Elle s'appuie sur des actions collectives et des politiques publiques volontaristes et cohérentes (par exemple la vision déployée dans le plan France 2030 et celle de la loi AGECL ne le sont pas) et va de pair avec le développement d'imaginaires désirables et un changement des indicateurs de performance (compléter les indicateurs d'efficacité -émissions par unité- par des indicateurs en valeurs absolus -des seuils- à différentes échelles). Il s'agit aussi de s'intéresser au type, aux caractéristiques et aux modalités d'utilisation des objets que l'on souhaite collectivement voir produits : faire une place à la robustesse et à la réparabilité, miser sur la durabilité programmée, s'appuyer sur le discernement technologique afin de privilégier le low tech plutôt que le high tech lorsque cela n'apporte pas suffisamment, favoriser l'intensification des usages par le partage ou l'économie de la fonctionnalité, etc.
- Il s'agit ensuite de favoriser les modèles d'affaires sobres, c'est-à-dire ceux caractérisés par des cycles de matières courts (pas de chaîne globale sur plusieurs continents mais des chaînes plus locales), une volonté de ralentir, de fermer les boucles et de régénérer. Les exemples ne manquent pas : permaculture, start-up comme Vesto qui mise sur le reconditionnement, Fnac-Darty qui propose des abonnements à la réparation (aujourd'hui deux millions d'abonnement) ce qui permet de générer du chiffre d'affaires avec un service plutôt qu'avec la vente de produits neufs etc. Certaines conditions sont nécessaires pour que de tels modèles fonctionnent, autant au niveau de l'offre (valeur résiduelle suffisante, sécurisation des gisements, organisation de la montée en compétence etc.) et des relations avec les clients et les parties prenantes, que des cadres cognitifs mobilisés (sortir du paradigme de la vente de produits neufs, changer les critères de performance etc.).

Cette approche des modèles d'affaire sobres comporte des limites : elle est très centrée sur l'entreprise et fondée sur une logique de différenciation stratégique, ce qui ne correspond pas vraiment aux caractéristiques systémiques et collectives de la circularité forte. Par exemple, la loi AGECE, par la création de fonds de réemploi et de réparation, a attiré un grand nombre d'acteurs privés, au détriment des acteurs de l'ESS qui se sont vus privés des gisements de bonne qualité dont ils bénéficiaient avant. Les ressources étant limitées, le partage équitable de la valeur est central pour assurer la pérennité d'un écosystème territorial sur le long terme.

- Les règles de gestion des ressources en commun sont à réinventer. En effet, l'outil de politique publique censé permettre cette gestion est la Responsabilité Élargie des Producteurs (REP). Or, dans cette logique, ce sont les producteurs qui gèrent le commun en question ce qui est problématique puisqu'ils ont directement un intérêt à son exploitation. Il faudrait pour le moins associer une plus grande diversité d'acteurs en modifiant les règles de gouvernance, notamment les règles d'accès au gisement, et de partage de la valeur.
- Penser différemment le passage à l'échelle, traditionnellement associé à un univers techno-solutionniste complètement inadapté à l'économie circulaire (POC / expérimentation / industrialisation). La circularité n'est pas la réplique à l'identique d'expérimentations locales, souvent très liées aux conditions locales justement. L'inspiration doit plutôt venir du fédéralisme, de l'essaimage ou des réseaux horizontaux par exemple. Dans le secteur automobile où la circularité est très développée, ce sont des acteurs disséminés sur tout le territoire et de petite taille qui assurent l'essentiel du rebouclage de la matière. De fait, les économies d'échelle ne marchent pas puisque les produits arrivent dans des états extrêmement variés. Ce qui circule aussi, ce n'est pas que la matière, mais aussi des idées, des récits, des expériences vécues, qui ont autant si ce n'est plus d'importance pour imaginer et mettre en œuvre des expérimentations nouvelles.

Questions et Réponses

Vous avez présenté une vision très occidentalisée de l'histoire du recyclage. En Asie, il y a une grande tradition autour du tri des objets en fin de vie, en Afrique il y a aussi une circularité extrêmement forte sur différents niveaux technologiques. N'y a-t-il pas deux choses très importantes à associer aux éléments qui se rapportent à la récupération que vous avez décrite :

- **Le savoir-faire, c'est peut-être justement ce qui va manquer en Europe de l'Ouest**

- **Une injonction de nécessité, qui semble difficile à déclencher sauf en cas de crise**

En voulant faire court, c'est effectivement une vision très occidentale dans la partie historique qui a été présentée. La circularité informelle (dont les flux ne sont pas mesurés) est très développée dans les pays les plus pauvres (coût de la main d'œuvre très faible, beaucoup de savoir-faire, pas les moyens d'acheter des ressources neuves). Beaucoup de produits d'occasion partent ainsi par exemple en Afrique. Le pays où la circularité est sans-doute la plus développée est Cuba de par la combinaison de la nécessité (embargo), et des savoir-faire en termes de réparation (des véhicules des années 50 roulent encore). Cependant, cette circularité est simplement impossible lorsque ce sont certains déchets de pays riches qui s'empilent dans un pays pauvre, même aux savoir-faire de récupération très développés. Cette question des compétences a été complètement ignorée par les pouvoirs publics, alors qu'il y a des filières entières à reconstituer. Ce sont des métiers passionnants, relativement bien payés de par la pénurie de main d'œuvre. Certains secteurs restent attractifs (l'automobile fait encore rêver) mais d'autres non. Quant à l'injonction de nécessité, elle est effectivement particulièrement prégnante en cas de crise. Aujourd'hui c'est d'ailleurs le levier principal : les entreprises sont angoissées par les problèmes de souveraineté, de résilience de leur modèle d'affaire. Ceci peut les pousser à aller vers des boucles plus locales.

Quid de l'empreinte environnementale des services IT nécessaires à la circularité ?

Un postdoc de TTi.5 travaille justement sur le Passeport Produit Digital européen. Il a conduit et presque finalisé une analyse de cycle de vie attributionnelle et conséquentielle sur les produits électriques et électroniques. Pour ce passeport, des systèmes de stockage relativement simple sont à l'étude, puisqu'il existe un grand nombre de produits sans enjeu de propriété intellectuelle majeur. Les impacts associés seraient très limités. Cependant, au-delà du cas d'application, il faudra regarder en détail secteur par secteur.

Brevets circulaires dans l'industrie plastique : les arbitrages entre recyclage et réduction

Nathalie LAZARIC | GREDEG
(CNRS/Université Côte d'Azur)

Contexte

S'intéresser à l'industrie plastique, c'est s'intéresser à un secteur très dépendant des produits pétroliers et a priori très peu circulaire de par la constitution même des produits. En quelques chiffres :

- Entre 2000 et 2019 les déchets plastiques ont fait plus que doubler pour atteindre 353 millions de tonnes en 2019
- Au niveau mondial
 - 9% du plastique est recyclé (en France ce chiffre monte à 23%)
 - 19% est incinéré
 - 50% est mis en décharge
 - 22% échappe aux systèmes de gestion de déchets traditionnels

Les objectifs de l'étude

L'étude présentée par Nathalie Lazaric s'est intéressée à l'innovation dans l'industrie plastique, pour évaluer si elle visait réellement plus de circularité. Il s'agissait aussi de comprendre dans quelle direction œuvraient les financements publics : permettaient-ils la diminution de la production de plastique (la réduction étant un des premiers piliers de l'économie circulaire) ou renforçaient-ils finalement une spécialisation des acteurs de la filière dans une stratégie de leur choix (par exemple le recyclage, largement promu par la filière) ?

Pour mener à bien cette étude, c'est la base de données des brevets européens (déposés à l'European Patent Office) qui a été mobilisée, sur une période de temps inédite puisque l'étude couvre les brevets de l'industrie entre 1978 et 2022 soit pas moins de 360 000 brevets. Grâce aux classes des bases de brevet, il s'agissait de séparer les innovations écologiques (appartenant à la classe CPC-Y02 : « technologies or applications for mitigation or adaptation against climate change ») des autres, puis de distinguer dans ces innovations technologiques celles qui relevaient de l'économie circulaire par une analyse lexicographique du titre et de l'introduction de ces brevets. Une fois cette base de brevets relevant de l'économie circulaire obtenue, il était possible

de classer les brevets dans les quatre catégories de l'économie circulaire retenues (modèle 4R) :

- R1 : la Réduction, où il s'agit des brevets cherchant à réduire la quantité de plastique utilisée : sacs plastiques plus fins, matériaux biosourcés etc.
- R2 : la Réutilisation, où il s'agit des brevets cherchant à réemployer de la matière en fin de vie pour une autre application (voiture d'occasion par exemple)
- R3 : le Recyclage, où il s'agit de brevets misant sur le tri ou des procédés mécaniques ou chimiques afin de trouver de nouvelles applications aux déchets plastique
- R4 : la Récupération / valorisation énergétique où il s'agit de trouver les moyens de récupérer de la chaleur à partir de déchets plastique

L'objectif de l'étude était d'apporter des nouvelles mesures pour identifier la direction du progrès technique de la filière plastique en ayant une approche de long terme permettant notamment d'évaluer l'importance de la circularité pour celle-ci et mieux comprendre les trajectoires circulaires des acteurs.

Les résultats

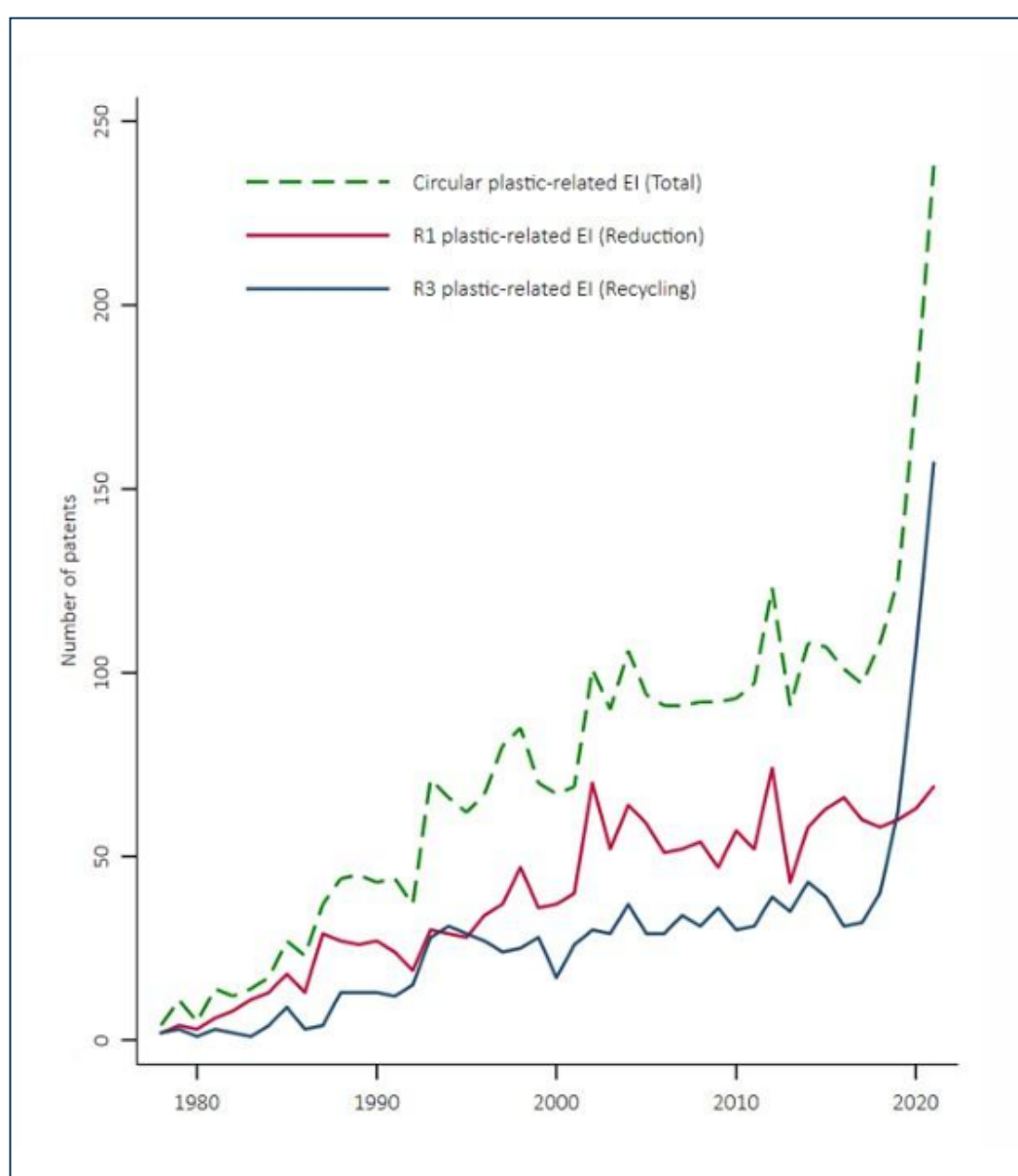
On recense plus de 360 000 brevets déposés entre 1978 et 2022 par la filière plastique, pour seulement 30 700 brevets classés comme écologiques (soit 8,5%) et quelques 3 700 brevets identifiés comme circulaires (soit 1%). On ne peut que constater l'écart béant entre discours et pratiques de la filière plastique en Europe : seuls 1% des brevets déposés se rapportent à l'économie circulaire entre 1978 et 2022. En les classant dans les quatre catégories décrites ci-dessus, 47% portent sur la réduction (R1), et 35% sur le recyclage (R3). Ces chiffres n'indiquent pas que le recyclage prend de plus en plus d'ampleur au fil du temps, alors que la dynamique est inverse pour la réduction (voir graphique ci-après).

Au fur et à mesure du temps, les brevets de réduction diminuent de manière relative par rapport à la poussée des brevets dans le recyclage, phénomène qui devient flagrant à partir de 2019. L'augmentation en valeur absolue des brevets circulaires à partir de cette année peut de plus être nuancée par le fait qu'augmente par une tendance similaire le nombre total de brevets déposés.

Les aspects de réemploie et de valorisation énergétique étant plus marginaux, l'étude s'est alors concentrée sur les catégories R1 et R3 afin d'évaluer de potentielles « contraintes de sentier » par un modèle économétrique : lorsqu'une entreprise développe des brevets R1, est-elle susceptible de développer des brevets R3, et inversement ?

Les résultats montrent effectivement cet « effet de sentier » : déposer un brevet dans une des deux catégories diminue les chances de déposer un brevet dans l'autre. De plus, un renforcement des connaissances a pu être constatée en ce qui concerne les brevets de type R3 : ils s'autorenforcent et s'accumulent. Ce phénomène ne se retrouve pas pour la catégorie R1, qui est moins cumulative.

A partir de 2019, est constaté un renforcement des bases de connaissances de la filière plastique dans le domaine du recyclage (R3). Ceci peut s'expliquer par l'intervention des politiques publiques au niveau de l'allocation des fonds pour renforcer une base de connaissance plutôt qu'une autre. Le levier du recyclage est ainsi privilégié au détriment de la réduction, et la spécialisation des acteurs s'accroît.



Rate and direction of circular patents in the plastic industry: The trade-off between reducing and recycling innovation. Source : M. Sciacitano, N. Arfaoui, N. Lazaric, O. Brette, M. Pezzoni.

Conclusion

En conclusion, malgré un certain discours sur l'économie circulaire, les producteurs de plastiques n'y accordent en réalité qu'une importance minime. L'allocation des fonds par les pouvoirs publics à partir de 2019 a de plus favorisé le développement du recyclage (R3) au détriment de la réduction (R1). L'étude montre aussi l'hétérogénéité des dynamiques d'innovation avec une spécialisation des producteurs qui s'autorenforce au fil du temps de par l'absence d'externalités positives des inventions entre les deux trajectoires R1 et R3 (« spillover »). Il paraît très difficile pour les pouvoirs publics de contrebalancer cette tendance sans l'adoption de stratégies beaucoup plus offensives vers la réduction au détriment du recyclage, largement favorisé actuellement.

Questions et Réponses

La question du recyclage vs réduction ne s'apparente-t-elle pas à la nature de l'économie (de croissance) ? Quelque part, réduire signifie changer de modèle d'où une très forte résistance et une grande inertie qui se traduit bien par cet exemple autour des plastiques.

Oui, ce que l'on observe c'est que l'inventivité va essentiellement vers le développement de nouveaux plastiques sans tenir compte de l'économie circulaire. On remarque par exemple une multiplication des polymères qui se recyclent mal, avec des compositions toujours nouvelles. L'étude confirme que le seul lieu où l'on trouve de l'économie circulaire réside dans certains discours des producteurs de la filière.

Pouvez-vous donner un exemple de brevet plastique sur la réduction (R1) et le recyclage (R3) ?

Oui. Un exemple de réduction (R1) : le développement de plastiques allégés pour être plus fins et réduire leur poids. On trouve aussi des brevets pour des mélanges plastiques biosourcés / plastiques pétrosourcés afin de réduire la voilure en termes de dioxyde de carbone.

Pour le recyclage (R3), on trouve des brevets permettant d'enlever des produits toxiques aux plastiques (produits qui permettent de rendre les plastiques non inflammables par exemple) pour permettre un recyclage adéquat.

Avez-vous filtré les brevets non entretenus dès la seconde année ?

Non, les brevets non maintenus n'ont pas été retirés. La remarque est pertinente, mais d'un point de vue technique, cela aurait été trop compliqué, il aurait fallu croiser avec d'autres données. L'objectif de l'étude était d'apporter des données nouvelles sur l'industrie plastique et documenter la réalité de l'économie circulaire au-delà des discours.

Évaluation environnementale des scénarios de transition du système électrique européen : co-bénéfices et trade-offs

Victor GUILLOT | CMA Mines Paris - PSL

Contexte

L'exposé de Victor Guillot, post-doctorant en mathématiques appliquées, est un exemple de couplage entre Analyse de Cycle de Vie (ACV) et systèmes énergétiques. L'ACV permet d'aborder la soutenabilité environnementale d'un produit à travers une unité fonctionnelle à partir d'une dizaine de catégories d'impacts environnementaux, dont l'empreinte carbone. C'est un outil d'aide à la décision centré sur une fonction précise d'un produit bien spécifique. Les résultats obtenus sont relatifs à l'unité fonctionnelle considérée.

Par ailleurs, pour obtenir des valeurs absolues, le cadre des limites planétaires proposé par le Stockholm Resilience Centre propose neuf « limites planétaires », caractérisées par une quinzaine d'indicateurs, à ne pas dépasser sous peine de dommages irréversibles aux conditions d'habitabilité de la planète. Il est possible d'attribuer à tel ou tel système une fraction de chaque limite planétaire.

Ces deux manières d'aborder la soutenabilité environnementale d'un système ont en commun le fait qu'elles caractérisent la soutenabilité au travers d'une multitude de catégories d'impacts (neuf pour les limites planétaires avec des subdivisions, une dizaine pour l'ACV selon la méthode empruntée). Deux difficultés se présentent face à cette conception multiple de la soutenabilité environnementale :

- D'abord, pour deux systèmes similaires, une fois l'ACV réalisée pour les deux, il est souvent difficile de les comparer environnementalement. En effet, un impact moindre dans une des catégories n'assurent aucunement un impact moindre dans une autre. Il y a donc un arbitrage à faire entre des catégories aussi différentes que « Changement Climatique » et « Empreinte Matérielle » ou « Appauvrissement de la Couche d'Ozone » par exemple.
- La deuxième difficulté associée à la grande dimension se présente lorsque l'on souhaite réduire les impacts environnementaux lors d'un choix entre plusieurs systèmes qui remplissent la même fonction : un raisonnement basé sur une seule catégorie (par exemple l'empreinte

carbone) va négliger les impacts sur toutes les autres catégories, donnant lieu à un potentiel report de pollution (aussi nommé report de charge, ou « burden shifting »), c'est-à-dire qu'en favorisant une catégorie particulière, on peut tout-à-fait passer à côté d'impacts largement supérieurs dans des catégories distinctes induites par le système privilégié.

L'intérêt de l'exposé est de présenter une méthode pour faire face à la deuxième difficulté, en prenant pour cas d'application le système électrique européen.

ACV et système électrique européen

L'ACV est une méthode quantitative pour évaluer les impacts environnementaux associés à un produit tout au long du cycle de vie du produit (de l'extraction des matières premières à la fin de vie). Elle doit être faite conformément aux normes ISO 14040 et ISO 14044. La méthode retenue pour notre propos comporte 16 indicateurs environnementaux. Il s'agit de mesurer les 16 indicateurs à l'échelle du système électrique européen puis de comparer les valeurs obtenues à la fraction allouée au système électrique européen dans le cadre des limites planétaires (l'ACV ne permettant pas d'évaluer l'impact en valeur absolue du produit, mais toujours relativement à l'unité fonctionnelle choisie).

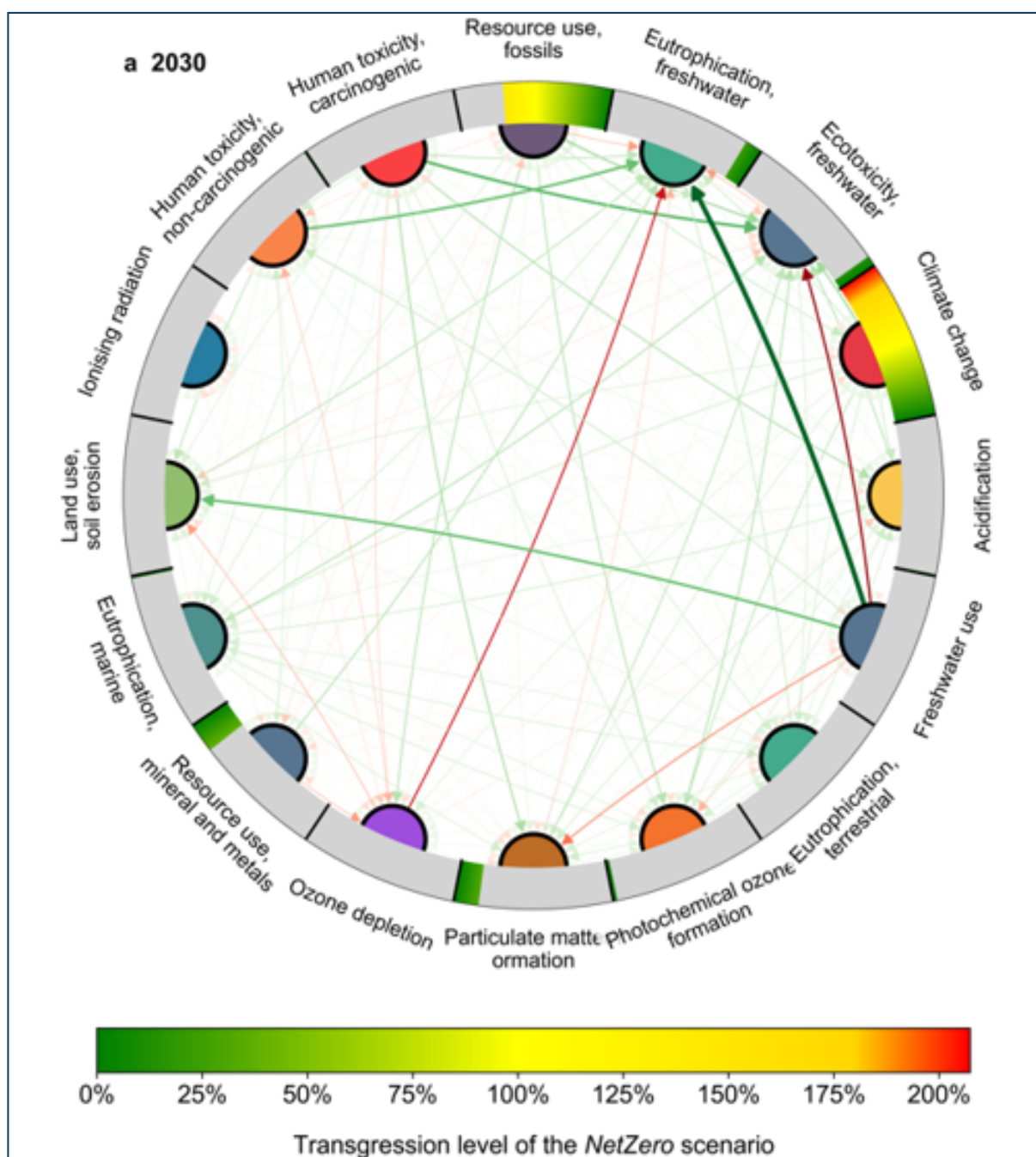
En générant des facteurs d'impacts associés au système électrique (autant l'infrastructure elle-même que l'électricité produite et transportée) tenant compte de son évolution technique prévue par des scénarios de référence européens, l'ACV permet de produire des variantes de l'impact environnemental du système électrique, auxquelles l'on peut ajouter des contraintes environnementales afin d'évaluer l'influence des contraintes sur les autres catégories environnementales et identifier éventuellement des reports de pollution. On peut alors comparer les valeurs obtenues aux valeurs allouées par les limites planétaires pour saisir les catégories environnementales les plus pertinentes.

Résultats

Les résultats peuvent se présenter sous la forme de l'anneau ci-après.

On peut noter les 16 catégories d'impacts environnementaux tout autour de l'anneau. Sur l'anneau lui-même, on note la valeur relative des indicateurs d'impacts associés au système électrique européen prévus en 2030 dans le cadre du scénario Net Zéro. Relative à quoi ? Aux valeurs allouées au système électrique européen dérivées des limites planétaires. On note ainsi

une transgression de plus de 200% de l'indicateur associé à la catégorie du changement climatique par exemple (que l'on peut attribuer en partie à la production d'électricité à forte teneur carbone de l'UE).



Évaluation environnementale des scénarios de transition du système électrique européen : co-bénéfices et trade-offs. Source : V. Guillot et E. Assoumou

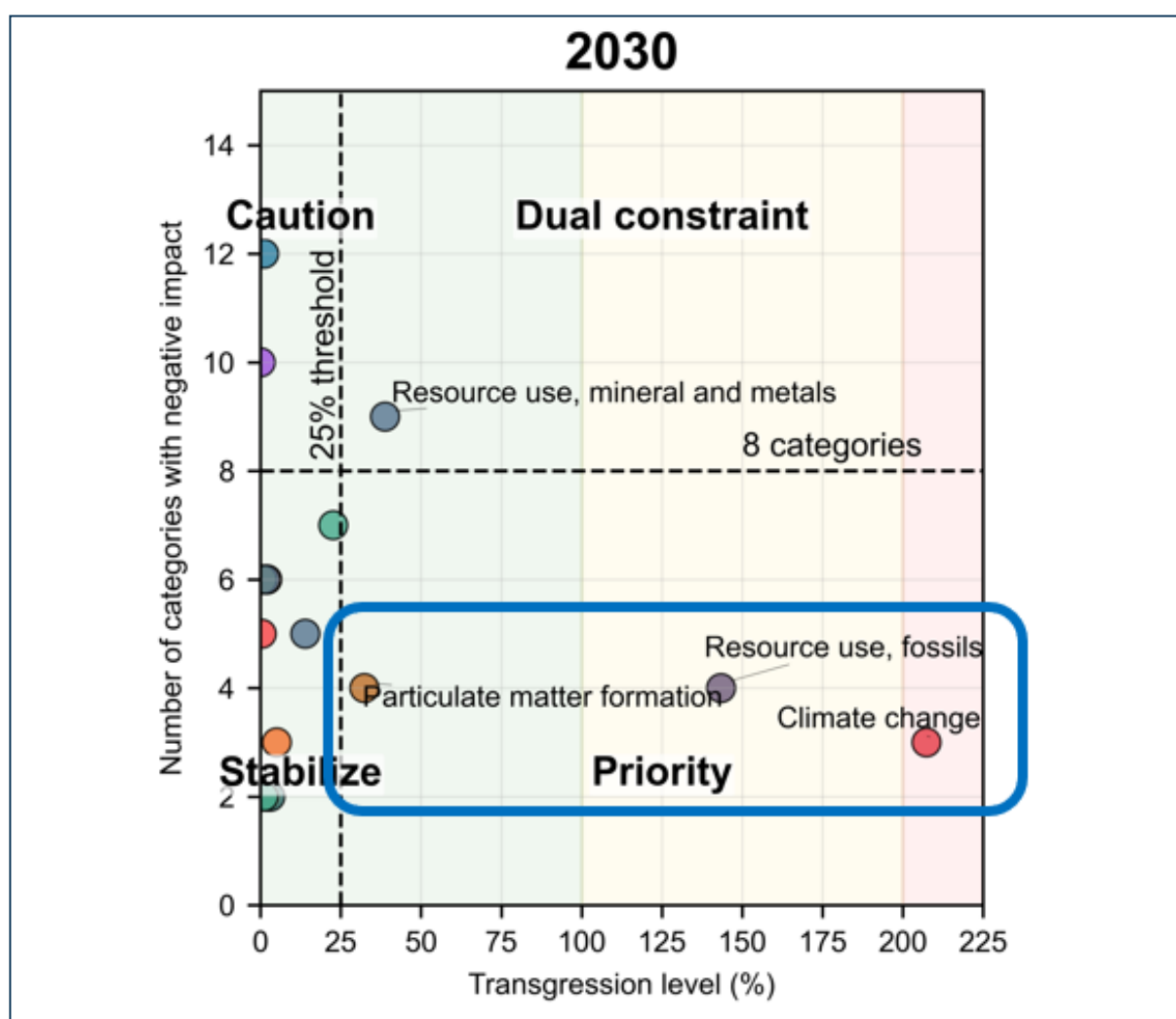
L'intérêt de l'anneau est aussi de s'intéresser aux dépendances entre différentes catégories d'impacts, et c'est là qu'entrent en jeu les notions de cobénéfice et de trade-off.

En tenant compte des caractéristiques du système électrique européen (incluant les centrales de production d'électricité), lorsque l'on réduit par exemple la consommation d'eau, on va réduire du même coup l'eutrophisation de l'eau douce, produisant par là un cobénéfice (flèche verte). Cela signifie

que la technologie moins intensive en eau douce qui va se substituer à la technologie relativement plus intensive, va aussi avoir un impact moindre en termes d'eutrophisation de l'eau douce. A l'inverse, il va y avoir relativement plus de formation de particules fines, d'où un trade-off (flèche rouge). Il est possible d'effectuer ce travail pour toutes les catégories, ce qui permet d'obtenir l'anneau complet ci-dessus, où il est possible de considérer simultanément catégorie d'impacts, seuils provenant des limites planétaires, cobénéfices et trade-offs.

Une nouvelle méthode pour l'aide à la décision ?

Il est possible de reformuler l'anneau ci-dessus par un graphe sur lequel il est possible de représenter chacune des 16 catégories d'impact, avec en abscisse le niveau de transgression de la limite planétaire associée, et en ordonnée le nombre de trade-off associés.



Évaluation environnementale des scénarios de transition du système électrique européen : co-bénéfices et trade-offs. Source : V. Guillot et E. Assoumou

Quatre quadrants se distinguent :

- Celui en bas à gauche du graphique, avec un risque limité de report de

pollution et un niveau de transgression limité.

- Celui en bas à droite du graphique, avec un risque limité de report de pollution et un niveau de transgression élevé.
- Celui en haut à gauche du graphique, avec un risque important de report de pollution et un niveau de transgression limité.
- Celui en haut à droite du graphique, avec un risque important de report de pollution couplé à un niveau de transgression élevé.

Ce graphique montre qu'une grande partie des catégories d'impacts avec des niveaux de transgression élevés ont un risque de report de pollution limité. Ainsi, des politiques environnementales dédiées à la diminution de l'impact environnemental lié à ces catégories (ci-dessus le changement climatique, l'utilisation de ressources fossiles et la formation de particules fines) auraient moins de risques de report de pollution que des politiques qui se concentreraient sur la diminution d'impacts liés à des catégories se situant dans le coin supérieur droit du graphique (ci-dessus l'utilisation de minéraux et de métaux par exemple). Dans le cas du système électrique européen, les politiques cherchant à faire diminuer l'usage des combustibles fossiles engendreraient donc un report de pollution limité.

Ce type de graphique peut être utile lors de l'élaboration de politiques publiques en lien avec le système électrique européen et son impact environnemental.

Conclusion

Identifier les risques de report de pollution nécessite de gérer un problème de grande dimension (beaucoup de variables impliquées). En couplant ces reports de pollution aussi bien à l'évolution prévue du système électrique européen qu'à l'Analyse de Cycle de Vie et au cadre des limites planétaires, il est possible de comparer les différentes catégories afin d'identifier celles avec un niveau de transgression élevé et un risque de report de pollution limité, et ce dans le but d'orienter les politiques publiques.

Questions et Réponses

Je suis étonné qu'il n'y ait pas un report de pollution plus important correspondant à la diminution de l'usage des combustibles fossiles. Pouvez-vous revenir dessus ?

Le graphique montre qu'il va y avoir numériquement plus d'effets positifs sous forme de cobénéfices que de trade-offs pour une diminution de l'usage des combustibles fossiles. Cependant, il est difficile d'interpréter ces graphiques directement puisque les co-bénéfices et trade-off n'y sont pas visualisables.

Les graphiques en anneaux permettent eux de les visualiser, même s'ils sont assez denses.

Le concept de limite planétaire ne résulte-t-il pas d'une inspiration monotherme du second principe visant à relaxer l'emballlement climatique alors que le climat est une machine ditherme évoluant vers d'autres régimes stationnaires ?

L'approche empruntée dans le cadre de cet exposé est de se placer dans le cadre des limites planétaires. Cela permet, pour un ensemble d'indicateurs environnementaux, de connaître les seuils qui permettent de garantir l'état d'habitabilité de la Terre. Pour le système électrique européen, une approche par budget a été retenue.

La question précédente remet vraisemblablement en cause l'utilisation des limites planétaires comme indicateurs, en affirmant que c'est un biais.

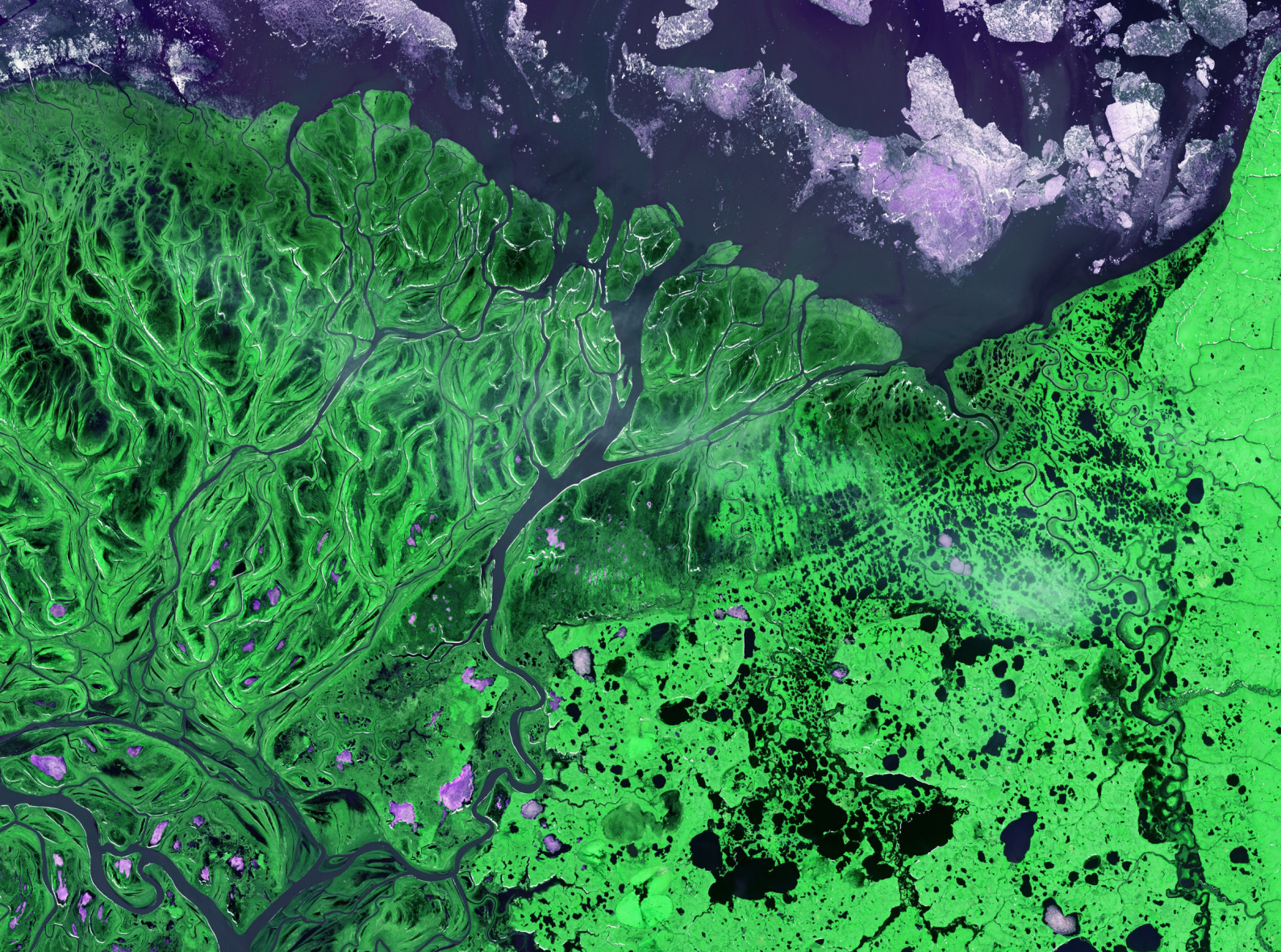
On se place ici dans le cadre de l'analyse environnementale en terme absolus, où il s'agit de définir des seuils pour l'ensemble des catégories environnementales. Renoncer à ces notions de seuils, c'est implicitement accepter un accès infini à la consommation d'eau par exemple. Pour l'étude, des seuils étaient nécessaires, et les valeurs que l'on peut trouver dans la littérature ont par conséquent été retenues.

Quid de ces associations de méthodologies, approuvées par certains auditeurs, dans le cadre de l'économie circulaire ? On sait qu'il existe le cadre des 4R ou 5R pour l'économie circulaire, et l'ACV absolue ici (tenant compte des seuils absolus des limites planétaires) prend en compte d'autres types d'indicateurs de ressources. Comment peut-on associer l'ensemble ? Est-ce que cela va vers plus de complexité en termes de données ?

- **Victor Guillot** : Les aspects difficultés de data sont en train de changer grâce à l'IA qui facilite le travail. Les difficultés sont plutôt sur les efforts qu'il faut faire sur les enjeux de changement climatique : les niveaux de transgression de la catégorie « changement climatique » sont tellement importants relativement aux autres catégories qu'une approche pragmatique serait de dire qu'il faut avancer sur le climat et gérer les autres aspects comme il est possible.
- **Nathalie Lazaric** : L'hétérogénéité des méthodologies pour les ACV complexifie la compréhension que l'on peut avoir de l'impact environnemental d'un produit. Il faut donc les compléter avec d'autres types de mesure et essayer d'affiner l'analyse. Ainsi, les impacts sur la santé

ne sont pas (ou mal) pris en considération par les ACV (impact incertain sur la santé des plastiques biosourcés par exemple). Bien mesurer l'impact environnemental des brevets est complexe et nécessite l'invention de nouvelles méthodologies, avec de nouvelles catégories.

- **Franck Aggeri** : Un des points aveugles de l'économie circulaire est que les politiques publiques ne font pas tellement le lien entre des objectifs de circularité (exprimés en termes de flux) et les impacts environnementaux. Ceci est problématique puisque comprendre la contribution de la circularité aux enjeux de durabilité est bien sûr indispensable. Cela commence à être fait localement dans certaines entreprises, mais c'est peu fait au niveau des politiques publiques de façon systémique. Or, les risques ne manquent pas : effets rebonds, transferts de pollution etc. L'ACV est un outil imparfait mais qui est malgré tout intéressant : il ne prend pas en compte la santé, il prend très mal en compte les questions de biodiversité ou de qualité des sols. Cela a des conséquences : l'agriculture biologique, évaluée au kilogramme, voit ses produits avoir une bonne partie de ses impacts environnementaux supérieurs à l'agriculture conventionnelle, celle-ci étant plus productive. Cela dit, le point clé de l'ACV ce sont les hypothèses de départ : quel est le périmètre, l'unité fonctionnelle, comment on prend en compte les interdépendances. Par exemple, dans l'industrie des cosmétiques, les produits biosourcés ont le vent en poupe pour des raisons de santé. Or, les acteurs de la filière savent bien que biosourcé n'est pas forcément meilleur sur le plan environnemental : tout dépend du type de matières agricoles et de la façon dont sont conduites les cultures. Ainsi, il ne faut pas simplement regarder les impacts à l'échelle de la culture, mais prendre en compte les cobénéfices que peuvent avoir les différents choix, au risque de ne pas obtenir des résultats cohérents et intéressants. Les choix du périmètre et de l'unité fonctionnelle sont donc absolument cruciaux et c'est là où il y a sans doute des recommandations à faire. L'intelligence est donc à mettre en amont, au niveau des hypothèses et du cadrage, ce qui nécessite une vision systémique.



CONTACT

🌐 the-transition-institute.minesparis.psl.eu

✉ tti.5@minesparis.psl.eu