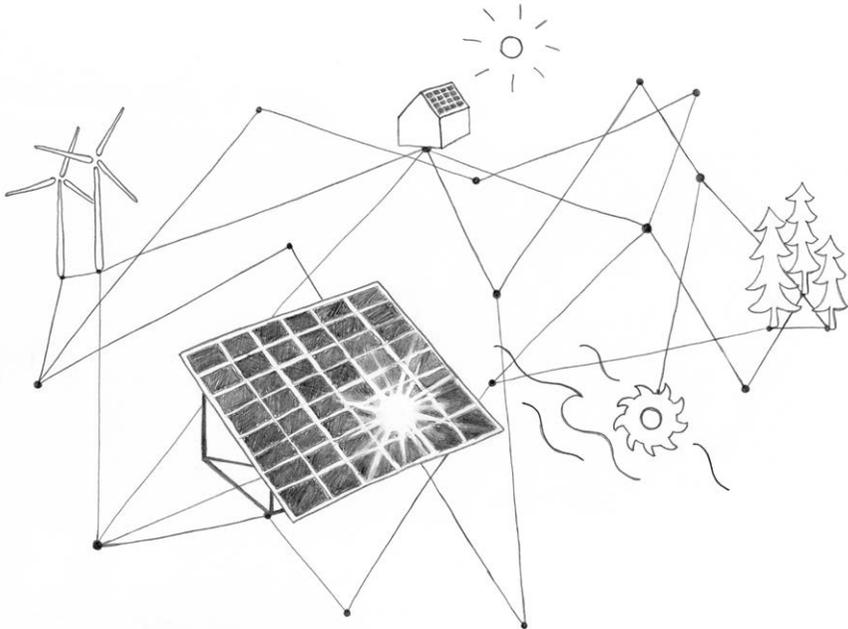


Note de transfert de connaissance du LACE n°2

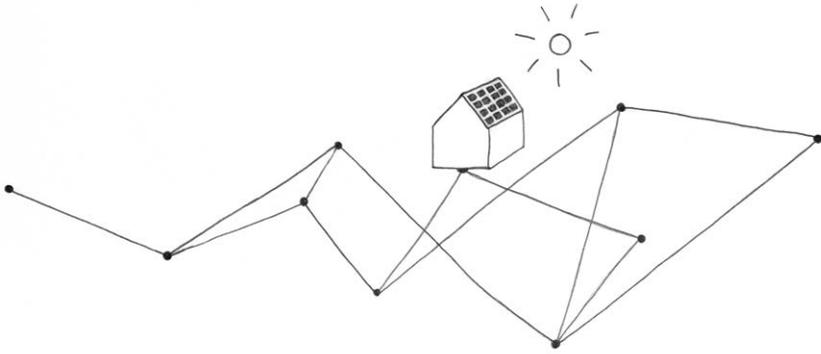
Alimenter une économie circulaire avec les énergies renouvelables ?

L'énergie solaire est la ressource renouvelable qui présente le plus grand potentiel mondial pour satisfaire la future demande énergétique en alimentant une population croissante et le développement d'une économie circulaire et durable.



Référence originale de l'article scientifique :

Desing, H., Widmer, R., Beloin-Saint-Pierre, D., Hischier, R. & Wäger, P. (2019). Powering a Sustainable and Circular Economy - An Engineering Approach to Estimating Renewable Energy Potentials within Earth System Boundaries. *Energies*. 2019 ; 12(24):4723. <https://doi.org/10.3390/en12244723>



Alimenter une économie circulaire et durable

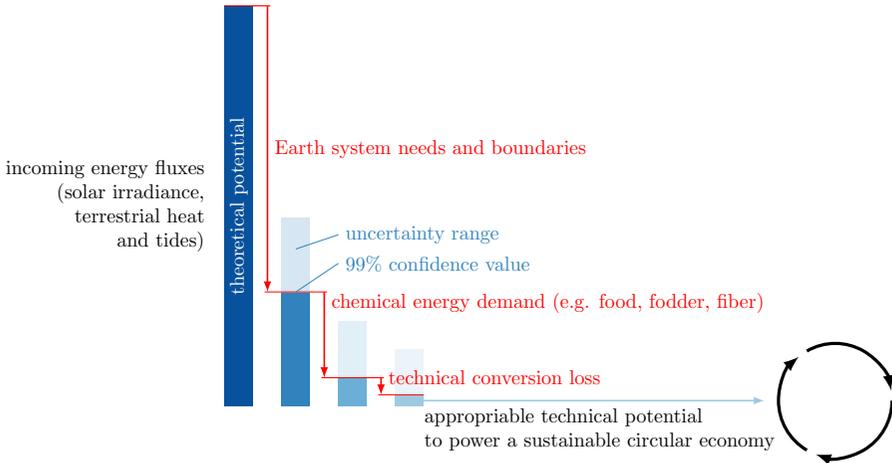
L'économie circulaire est souvent présentée comme une stratégie prometteuse pour découpler la croissance économique de l'utilisation des ressources naturelles et de la dégradation de l'environnement. Pourtant, le discours sur l'économie circulaire s'est concentré jusqu'à présent sur les matériaux et des solutions comme le recyclage, la réutilisation ou la réparation, sans se soucier de la disponibilité d'énergie nécessaire pour mettre en œuvre ces activités. En raison des énormes impacts sur l'environnement et la santé humaine découlant de l'utilisation des combustibles fossiles ainsi que de l'épuisement des stocks d'uranium et du risque d'accidents catastrophiques liés à l'énergie nucléaire, une économie basée sur ces combustibles ne peut être considérée comme durable. Dans un contexte de crise climatique qui s'aggrave et de perte de biodiversité, **une transition vers les énergies renouvelables est dès lors cruciale pour alimenter une économie circulaire de manière durable.**

Les flux d'énergies renouvelables qui atteignent la planète alimentent le système Terre, par exemple le cycle de l'eau. La demande humaine d'énergie, de production alimentaire ou de matériaux d'origine

biologique peut interférer et concurrencer ces besoins énergétiques du système Terre. Cette «concurrence» soulève la question suivante : **l'humanité peut-elle satisfaire sa demande énergétique technique avec les énergies renouvelables sans transgresser les limites du système Terre ?**

La question ci-dessus est au cœur des recherches menées par les chercheurs de l'Empa, l'Institut interdisciplinaire de recherche pour les sciences des matériaux et le développement de technologies. Cela dans le cadre du Programme national de recherche «Économie durable» (PNR 73) – projet «*Laboratory for Applied Circular Economy*» (LACE). Publiée récemment, cette recherche développe **un large cadre d'analyse théorique pour estimer les flux d'énergies renouvelables potentiellement disponibles à l'échelle mondiale pour alimenter une économie circulaire et durable.** Cela en prenant en compte et respectant les limites pertinentes du système Terre et la demande humaine en énergie, et en considérant les pertes de conversion liées aux technologies actuelles.

Quelle quantité d'énergie renouvelable peut être utilisée ?



Les flux d'énergies renouvelables entrants dans le système Terre et appropriés par les besoins naturels et humains (d'après les auteurs).

Le point de départ des auteurs est la quantité totale du flux d'énergies renouvelables qui entre dans le système Terre, flux appelé «*potentiel théorique*» (voir figure ci-dessus). Cette quantité comprend le flux de rayonnement solaire, la chaleur terrestre et les marées. La fraction de ce

potentiel théorique d'énergies renouvelables disponible pour alimenter la technosphère, et en particulier l'économie circulaire, est appelée «*potentiel technique appropriable*» (*appropriable technical potential*). Ce dernier est limité par trois facteurs :

1

Les besoins du système Terre : la plupart des flux entrants d'énergies renouvelables sont essentiels et à l'origine des processus naturels. Le cycle de l'eau ne pourrait par exemple pas fonctionner sans que le soleil fournisse l'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau et au déplacement des nuages par le vent. L'approche par les limites planétaires (voir encadré p. 4) est utilisée pour décrire les limites au-delà desquelles l'appropriation humaine des énergies renouvelables provoquerait des changements irréversibles au système Terre. Dans l'étude, deux limites sont particulièrement prises en compte : le changement d'utilisation des sols, dans la mesure où l'exploitation des énergies renouvelables dépend principalement de la surface terrestre disponible, et le prélèvement d'eau douce, important par exemple pour l'hydroélectricité.

2

Le besoin humain en énergie chimique : une grande partie des énergies renouvelables restantes est utilisée par les humains pour la production alimentaire et pour satisfaire d'autres utilisations de la biomasse comme les fibres destinées aux vêtements. Cette énergie n'est dès lors plus disponible pour une utilisation technique. Comme les activités humaines dépassent déjà plusieurs limites liées à l'utilisation des sols, une appropriation plus importante de l'énergie chimique n'est pas considérée comme durable. C'est le cas notamment de la production de biocarburants.

3

Le potentiel technique : en déduisant du potentiel théorique les énergies renouvelables nécessaires au système Terre ainsi que la demande en énergie chimique de la population humaine actuelle et future, on obtient les énergies renouvelables disponibles pour alimenter la technosphère. Prendre en compte les pertes pour convertir ces énergies en énergie électrique permet enfin d'estimer le potentiel technique appropriable.

Qu'est-ce que les limites planétaires ?

L'approche en termes de *limites planétaires* identifie un espace de fonctionnement sûr pour le développement humain à long terme, basé sur les limites biophysiques de la Terre. Cette approche spécifie les valeurs limites de neuf processus clés du système Terre. Dans cette étude, les limites suivantes sont prises en compte.

Le *changement d'utilisation* des sols est l'un des principaux moteurs de l'altération des processus du système Terre. Cette limite décrit la quantité de végétation indigène d'une zone ayant été enlevée, en fixant un niveau maximum durable pour l'enlèvement de la végétation. Elle est importante, car les perturbations humaines des écosystèmes naturels peuvent avoir des effets directs sur le système climatique et la biodiversité. La limite planétaire se concentre sur la suppression des forêts (en raison des fortes répercussions de la déforestation). Les biomes non forestiers (tels que les prairies, la toundra, etc.) sont toutefois également pris en compte dans cette étude afin d'élargir l'analyse.

L'*utilisation d'eau douce* décrit la limite d'utilisation durable du ruissellement des rivières par l'être humain. Elle précise le prélèvement mensuel maximal, basé sur une moyenne entre valeurs les plus basses et les plus hautes du débit annuel des rivières.

Quelle énergie renouvelable est essentielle à une économie circulaire durable ?

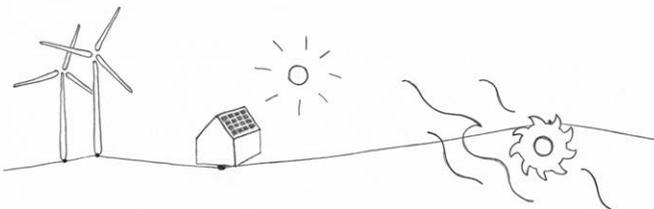
Parmi les flux d'énergies renouvelables entrants dans le système Terre, l'énergie solaire domine largement (99,97%) – ce qui en fait la source d'énergie fondamentale pour le fonctionnement de tous les processus naturels et anthropiques. Si l'on soustrait la demande d'énergie pour les processus terrestres et la demande humaine d'énergie chimique, il ne reste que 0,04% du potentiel théorique à convertir en énergie technique sans enfreindre les limites d'utilisation d'eau douce et des sols. Bien que cette fraction semble minime, elle est en réalité bien supérieure à la demande totale d'énergie technique actuelle. **Le potentiel technique appropriable est ainsi dominé par la conversion directe de l'énergie solaire (98%).** Toutes les autres énergies renouvelables (l'énergie éolienne, hydraulique ou la géothermie par exemple) offrent des potentiels techniques appropriables qui sont plusieurs ordres de grandeur plus faibles. Du point de vue global, toutes les autres énergies renouvelables sont ainsi secondaires – ce qui ne veut pas dire qu'elles ne sont pas localement importantes, notamment pour faire face l'intermittence de l'énergie solaire.

Le potentiel calculé d'énergie solaire appropriable peut largement couvrir la demande énergétique technique actuelle, laissant également place à une augmentation substantielle de la demande énergétique humaine. Cet élément est

important compte tenu de l'augmentation potentielle de la demande énergétique pour satisfaire les besoins d'une population croissante, pour équilibrer la distribution inégale des énergies renouvelables sur Terre, pour atténuer les impacts environnementaux des activités humaines passées et futures, ou encore pour alimenter le développement d'une économie circulaire.

Les calculs montrent également que si la demande énergétique mondiale atteignait la valeur indicative d'une société à 2000 watts, l'énergie solaire en provenance du seul environnement bâti pourrait être suffisante. Pour augmenter la demande énergétique par habitant dans le monde entier jusqu'à la moyenne actuelle en Suisse, il faudrait cependant récolter une quantité supplémentaire d'énergie solaire, cela sur jusqu'à 10% de toutes les surfaces désertiques.

L'énergie solaire offre non seulement le potentiel le plus important pour satisfaire la demande énergétique humaine, elle est aussi la plus sous-développée actuellement. Il est particulièrement intéressant de noter que son potentiel peut être développé sur la surface étanche des bâtiments existants, sans qu'il soit nécessaire de procéder à d'autres appropriations de sols et donc sans impact supplémentaire sur les limites planétaires. La situation est inverse pour l'hydroélectricité ou la biomasse, déjà fortement exploitées et proches ou au-delà de leurs limites écologiques sûres.



Conclusion

L'étude présente une approche permettant de déterminer les limites des énergies renouvelables appropriables qui pourraient être disponibles pour alimenter une économie circulaire et durable. Les auteurs concluent que la conversion directe de l'énergie solaire est essentielle et nécessaire pour garantir la satisfaction de la demande d'une population future croissante et pour permettre une économie circulaire alimentée par des énergies renouvelables. Les résultats démontrent que l'énergie solaire récoltée avec les technologies actuelles sur l'environnement bâti existant pourrait alimenter une société mondiale à 2000 watts. Toutes les autres ressources en énergies renouvelables pourraient alors compléter l'énergie solaire et contribuer à atténuer son intermittence. Les déserts peuvent être considérés comme une réserve pour le développement ultérieur de l'énergie solaire après que tous les autres potentiels aient été mis en œuvre. Cependant,

l'énergie doit quoi qu'il en soit être utilisée de manière judicieuse et efficace, compte tenu de la complexité de la transition post-combustibles fossiles et énergie nucléaire.

Pour fournir des solutions plus spécifiques, différentes échelles géographiques pourraient être envisagées, en adaptant le bouquet énergétique durable aux conditions locales. Idéalement, l'approche proposée pourrait être étendue pour évaluer des scénarios par pays et région. Alors que la résolution temporelle de l'étude est actuellement d'une année, les variations quotidiennes et saisonnières des flux d'énergies renouvelables pourraient également être prises en compte. Du côté de la demande, les produits pourraient être conçus pour s'adapter à ces fluctuations et les compenser. Les bâtiments sont un bon exemple, générant une forte demande d'énergie et en même temps un potentiel élevé d'approvisionnement en énergie.

Méthode

Pour comparer et quantifier les différentes sources d'énergie et les technologies d'énergies renouvelables, l'énergie électrique est utilisée comme base de comparaison. L'utilisation de l'électricité comme « devise » commune est justifiée, car la plupart des technologies d'énergies renouvelables peuvent convertir l'énergie du système Terre en électricité et parce que l'électrification de l'énergie est considérée comme essentielle à une société post-fossile.

Pour faciliter les calculs, l'approche utilise un modèle simplifié du système : aucune transition ni aucun changement de température n'est pris en compte, les stocks sont considérés comme constants (aucune modification de la biomasse terrestre ou forestière), et les variations spatiales ou temporelles sont également ignorées. En outre, ni les besoins en ressources ni les impacts dus au cycle de vie des technologies ne sont

pris en compte dans le modèle (production, installation, démantèlement, etc.).

En raison de la complexité liée à l'élaboration de modèles précis à l'échelle mondiale, une approche de précaution est appliquée. Cela signifie choisir une faible probabilité (*worst case*) de violation des limites du système Terre ou des limites techniques en fixant un niveau de confiance de 99% (il y a ainsi 1% de chance que le potentiel technique appropriable estimé ne soit pas viable écologiquement ou techniquement, tandis que 99% du potentiel plausible se situe au-dessus de la limite fixée pour chaque ressource). En raison de l'incertitude liée au développement des technologies futures, le principe de précaution est également appliqué pour les paramètres technologiques étant donné qu'ils sont basés sur les technologies de pointe.

Dans les calculs des sols appropriables, trois scénarios basés sur différents types d'utilisation des sols (terres cultivées, pâturages, environnement bâti), sont mobilisés :

- *Scénario 1 : proportionnel* – sols appropriables divisés selon leur part relative en l'an 2000,
- *Scénario 2 : réduction des pâturages* – la superficie des terres cultivées et de l'environnement bâti est maintenue au niveau de 2010, les pâturages sont redimensionnés en fonction de la limite planétaire.
- *Scénario 3 : maximisation des sols cultivés* – basé sur le scénario 2, les sols cultivés sont maximisés chaque fois que possible au détriment des pâturages afin d'augmenter l'offre alimentaire pour une population croissante.

Ces scénarios d'utilisation des sols définissent la surface disponible pour la conversion technique de l'énergie. Ils sont élaborés afin de tester l'influence des différentes utilisations des sols sur les résultats finaux. Comme les scénarios d'utilisation des sols choisis ont peu d'influence sur les résultats, à l'exception de l'énergie solaire dans le désert, le scénario 3 est utilisé dans l'article.

Pour le prélèvement d'eau douce, le prélèvement mensuel maximum du débit des rivières est utilisé, ce qui correspond approximativement à la limite entre la valeur la plus basse et la valeur la plus élevée.

Trois indicateurs différents sont utilisés pour évaluer les mix énergétiques par rapport à leur potentiel technique appropriable et à différents niveaux (d'un produit à l'économie globale). L'indicateur τ_i décrit la pression exercée sur une ressource énergétique, en comparant la puissance utilisée par chaque ressource à son potentiel technique appropriable.

Un autre indicateur utile est la *fraction d'énergie renouvelable* qui calcule la part de la demande totale d'énergie fournie par des ressources énergétiques renouvelables.

Enfin, l'*indicateur d'énergie renouvelable* est utilisé pour comparer le mix énergétique réel avec le potentiel technique théorique appropriable. Cet élément est important, car une utilisation optimale de toutes les ressources d'énergies renouvelables est obtenue lorsque le mix énergétique réel est le même que le mix énergétique potentiel.

A propos du PNR 73

Ce projet de recherche est réalisé dans le cadre du Programme national de recherche « Economie durable : protection des ressources, vision pour le futur et innovation » (PNR 73) du Fonds national suisse (FNS).

Le PNR 73 vise à établir des connaissances scientifiques pour une économie durable qui préserve les ressources naturelles, favorise le bien-être social et une compétitivité accrue de la place économie suisse. Le PNR 73 prend ainsi en compte l'environnement, l'économie et la société de même que l'ensemble des ressources naturelles et toutes les étapes de la chaîne de valeur.



Economie durable
Programme national de recherche

De plus amples informations sur www.nrp73.ch

À propos du LACE

Le LACE, pour Laboratory for Applied Circular Economy, est un projet de recherche inter- et transdisciplinaire qui réunit les chercheurs de trois institutions suisses d'éducation supérieure et de plusieurs disciplines : sciences environnementales et des matériaux, études commerciales et économie, ainsi que sciences juridiques et politiques. Le projet LACE collabore avec sept entreprises reconnues afin de montrer comment les principes de l'économie circulaire et les modèles d'affaires associés peuvent être introduits dans les chaînes de valeur des entreprises partenaires. L'objectif de ce projet est de définir à quelles conditions ces principes peuvent être écologiquement bénéfique et économiquement rentable pour les entreprises suisses. La fondation sanu durabilitas est le partenaire pour le transfert de connaissance du projet LACE.



De plus amples informations sur www.nfp73.ch/fr/projets/economie-circulaire/laboratoire-pour-une-economie-circulaire

A propos de sanu durabilitas

La fondation sanu durabilitas est un Think et Do tank indépendant basé à Bienne. Son objectif est de développer des solutions pratiques et prometteuses pour la transition vers la durabilité en Suisse dans les domaines de l'économie, la politique et l'administration publique, ainsi que d'améliorer les conditions-cadres pour la durabilité. En collaboration avec des partenaires issus de la science, de l'économie, de la politique, de l'administration et de la société civile, sanu durabilitas identifie les solutions prometteuses, les développe et les teste dans la pratique, élabore des recommandations et les communique aux décideurs et au public. Les thèmes actuels sur lesquels sanu durabilitas travaille sont l'économie circulaire, l'utilisation durable des sols, et la cohésion sociale dans une société en mutation.



De plus amples informations sur www.sanudurabilitas.ch