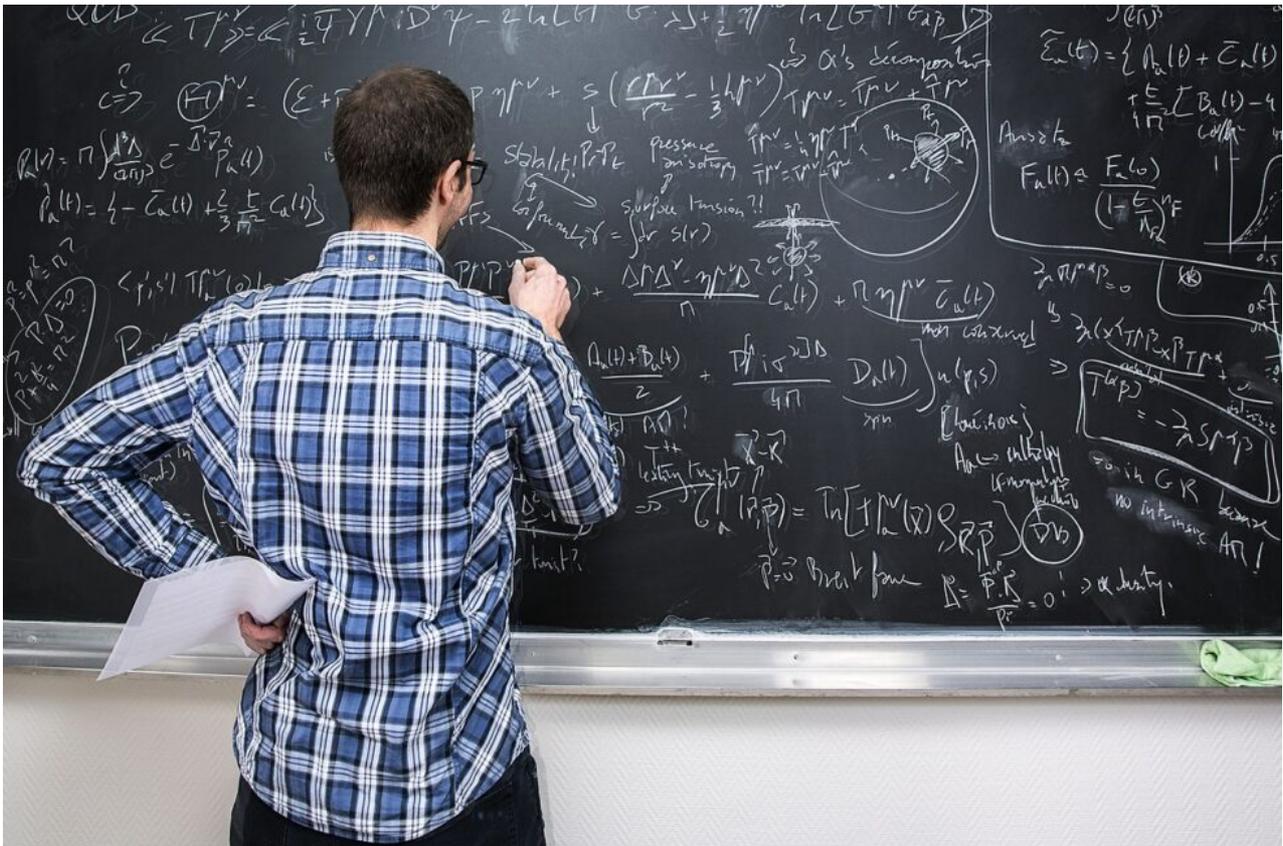


La loi des conséquences inattendues

transitionsenergies.com/loi-consequences-inattendues/

27 juin 2025





Sciences & techno

par La rédaction

En matière énergétique, les politiques comme les technocrates et les militants travaillent trop peu ou trop mal. Ils ne comprennent pas ou ne mesurent pas les dommages collatéraux et les conséquences des politiques qu'ils mettent en œuvre ou qu'ils prônent. Les exemples ne manquent pas et sont édifiants. Car il existe des limites physiques intangibles à la technologie des batteries, au stockage de l'énergie et aux renouvelables. Par Léon Thau. Article paru dans le numéro 25 du magazine Transitions & Energies.

En matière énergétique, on ne peut comme dans beaucoup d'autres domaines nier longtemps les réalités physiques. Les batteries lithium-ion en apportent une belle démonstration. Il ne s'agit pas de dire que cette technologie n'est pas à la fois une avancée considérable dans le stockage de l'électricité et indispensable aujourd'hui dans les équipements électroniques et les véhicules électriques. Mais il y a des limites physiques au potentiel des batteries qui ne peuvent pas être balayées d'un revers de main et pèsent sur les performances des véhicules électriques et plus encore sur l'utilisation des batteries pour stocker de l'électricité à l'échelle des besoins des réseaux. Voilà pourquoi il faut prendre avec des pincettes les modèles, nombreux, qui montrent que la transition énergétique et l'électrification des usages sont une question d'années et de volonté politique grâce au développement des renouvelables intermittents et des batteries.

Batteries : on ne peut pas changer le plomb en or

Un baril de pétrole contient environ 50 fois plus d'énergie que la batterie de la technologie commercialisée la plus avancée du même poids. Un écart qui ne se réduira jamais de manière significative. L'énergie qu'une batterie produit dépend du flux d'électrons entre différents matériaux, chacun d'entre eux pouvant fournir un certain nombre d'électrons pour un poids donné. On peut améliorer le temps de charge de la batterie, sa durabilité ou le nombre de fois où elle peut être chargée avant de tomber en panne. Mais on ne peut pas changer la composition fondamentale des éléments, pas plus qu'on ne peut changer le plomb en or...

Conséquence de leur densité énergétique limitée par les réalités chimiques, les batteries sont lourdes et le resteront. Cela ne pose pas de problème pour de nombreuses applications, les téléphones, les ordinateurs portables et les petits appareils ménagers. La faible densité énergétique n'est pas un inconvénient majeur quand les appareils sont petits et souvent rechargeables, et que le poids n'est pas un facteur limitant de leurs performances. En revanche, pour les machines qui ont besoin d'énergie pour se déplacer (voitures, camions, avions), le poids supplémentaire devient un sérieux problème. On peut parler de cercle vicieux. Un véhicule plus lourd a besoin de plus d'énergie pour se déplacer, ce qui signifie qu'il a besoin de plus grosses batteries. Il faut donc ajouter encore plus de poids, ce qui signifie qu'il faut encore plus d'énergie pour le déplacer...

C'est pour cela que l'avion électrique à batteries est une absurdité qu'un élève de troisième ayant des connaissances basiques en physique peut comprendre immédiatement. Le poids est la contrainte la plus lourde, c'est le cas de le dire, qui pèse sur les performances d'un objet volant devant s'arracher à la pesanteur. Chaque kilogramme de batterie emporté dans un avion réduit la capacité de charge utile et l'autonomie. Il existe une relation directe entre le poids d'un avion et son autonomie et/ou sa charge utile. En outre, contrairement au carburant, les batteries ne s'allègent pas en cours de vol. En dehors de voler vingt minutes avec deux passagers, il est difficile d'imaginer un avion électrique à batterie en faire beaucoup plus dans un avenir proche.

Pour ce qui est des véhicules électriques terrestres, l'équation est différente et peut et même doit prendre en compte la dimension d'efficacité énergétique. Le constat de départ est identique. Les batteries rendent les voitures plus lourdes et celles-ci ont besoin de batteries encore plus grandes et plus lourdes pour se déplacer.

Actuellement, les meilleurs moteurs à combustion interne ne peuvent pas convertir en énergie utilisable plus de 40 % de l'énergie contenue dans le carburant. Cela signifie que même si l'essence a 50 fois la densité énergétique d'une batterie, vous ne pourrez utiliser que 20 fois cette énergie. Les batteries sont bien plus efficaces. Elles permettent de convertir environ 90 % de l'énergie qu'elles contiennent en énergie utilisable et tout cela sans émissions de gaz d'échappement.

Mais il faut charger les batteries et si cela se fait avec de l'électricité produite par des combustibles fossiles, nous revenons au problème précédent. Ce n'est pas le cas en France, mais dans la plupart des autres pays au monde... Les carburants fossiles (charbon, gaz naturel, fioul) sont brûlés dans de gros moteurs stationnaires pour produire

de l'électricité. Bien qu'ils soient plus efficaces que les moteurs de voiture, le poids n'entre pas en ligne de compte ; ces moteurs stationnaires ont un rendement de l'ordre de 40 à 60 % environ. Et lorsque l'électricité arrive jusqu'à la prise de courant, recharge la voiture et est ensuite reconvertie en mouvement, le rendement final est très proche de celui d'un moteur à combustion interne ; tout cela sans prendre en compte les processus d'extraction et de raffinage extrêmement énergivores utilisés pour la production des matériaux des batteries et leur durée de vie limitée.

La meilleure solution est sans doute celle des véhicules hybrides. Lorsqu'ils sont bien conçus, ils maximisent les avantages des moteurs à combustion et des systèmes électriques et minimisent leurs inconvénients. La plupart des véhicules fonctionnent loin de leur efficacité optimale, par exemple lorsqu'ils tournent au ralenti dans les embouteillages ou qu'ils accélèrent après s'être arrêtés. Un système hybride permet à chaque source d'énergie de fonctionner lorsqu'elle est la plus efficace. Il peut aussi utiliser le freinage par récupération pour capter la même proportion d'énergie que celle d'un véhicule entièrement électrique. Et comme les véhicules hybrides n'ont pas besoin de transporter des batteries d'une capacité de plusieurs centaines de kilomètres, ils sont moins pénalisés par les questions de poids. Les batteries plus petites doivent seulement fournir suffisamment d'énergie pour permettre au moteur à combustion de continuer à fonctionner dans sa plage la plus efficace. En outre, comme la batterie n'est pas soumise à des cycles de décharge profonde, elle a une espérance de vie plus grande. Enfin, comme elle est relativement petite, son remplacement éventuel se fait à un coût plus acceptable. Il n'y a qu'un seul problème, de taille. Les hybrides sont rejetés par les politiques environnementales construites aujourd'hui exclusivement sur les émissions à l'échappement.

Panneaux solaires : une ombre sur la surface du globe

Les mêmes réalités physiques qui limitent les performances des batteries affectent la production d'électricité renouvelable. Ni les éoliennes, ni les panneaux solaires, ni les centrales hydroélectriques ne créent de l'énergie. Ils l'extraient des systèmes environnementaux existants. Et il existe des limites fondamentales à la quantité d'énergie que nous pouvons extraire avant de commencer à affecter ces systèmes eux-mêmes.

Par exemple, pour répondre à la consommation mondiale actuelle d'électricité à l'aide de panneaux photovoltaïques, il faudrait couvrir une surface d'environ 600 000 km², supérieure à celle de la France métropolitaine. Et cela avec des panneaux sombres absorbant la chaleur qui modifieraient fondamentalement la façon dont une vaste zone interagit avec le rayonnement solaire. Les surfaces naturelles telles que le sol, la végétation et les déserts réfléchissent environ 25 à 40 % de la lumière solaire vers l'espace. Les panneaux solaires sont conçus pour absorber autant de lumière que possible, de sorte qu'ils en réfléchissent beaucoup moins. Toute l'énergie qui n'est pas réfléchi est soit convertie en électricité (jusqu'à un maximum d'environ 30 %), soit transformée en chaleur (le reste).

Si nous concentrons une grande quantité de panneaux solaires dans une zone géographique, nous allons créer sur Terre une zone d'ombre artificielle de la taille d'un grand pays, ce qui modifiera considérablement la façon dont cette partie de la surface de la Terre interagit avec l'énergie solaire – pensez à la chaleur d'un siège de voiture noir lors d'une journée ensoleillée. L'augmentation des températures locales aura un impact sur la configuration des vents, les précipitations, et créera des îlots de chaleur qui s'étendront bien au-delà des fermes solaires elles-mêmes. À l'image du problème de l'énergie des batteries, il s'agit d'une autre cascade de dommages collatéraux qui ne peuvent pas être éliminés par la technique. En réalité, bien sûr, les panneaux sont et seront répartis dans le monde entier. Mais l'effet thermodynamique sera proche, même s'il sera moins concentré.

Il ne s'agit pas, comme avec les batteries, de considérer que le photovoltaïque n'a pas sa place. C'est une technologie extrêmement utile, en particulier pour la production locale distribuée d'électricité. Mais remplacer les combustibles fossiles par le solaire reviendrait à modifier délibérément les caractéristiques de la surface de la Terre à une échelle suffisamment grande pour avoir de graves conséquences climatiques... au nom de la prévention du risque climatique.

Hydroélectricité : un impact sur la rotation de la Terre

Les impacts environnementaux de l'énergie hydroélectrique sont connus et considérables. Pour protéger les populations des inondations accrues que le changement climatique pourrait entraîner et produire de l'électricité, nous inondons délibérément des vallées, déplaçons de façon permanente des populations et submergeons des écosystèmes entiers. Pour construire le barrage des Trois Gorges en Chine, le plus grand du monde qui enjambe le fleuve Yangtze, haut de 185 mètres et long de plus de 2 300 mètres, il a fallu déplacer 1,3 million de personnes et inondé 632 km² de terres. Cela a nécessité dix-sept ans à 40 000 personnes, 28 millions de m³ de béton et suffisamment d'acier pour fabriquer 63 tours Eiffel.

Ces réservoirs massifs qui peuvent contenir 40 milliards de m³ d'eau modifient les conditions météorologiques locales et même la rotation de la Terre. Lorsque le barrage est rempli, le moment d'inertie augmente, créant une (très très petite) résistance à la rotation de la Terre. Un scientifique de la NASA a calculé que lorsqu'il est plein, le barrage augmente la durée du jour de 0,06 microseconde, 60 milliardièmes de seconde. Il a également calculé que le barrage pouvait déplacer les pôles de la Terre d'environ deux centimètres. Et la Chine envisage aujourd'hui de construire au Tibet un barrage sur le fleuve Yarlung Tsangpo qui aurait une capacité de production de 60 GW, presque le triple de celle du barrage des Trois Gorges (22,5 GW).

Stocker l'électricité renouvelable... on peut toujours rêver

Même si nous parvenons à surmonter les problèmes d'échelle et d'impact environnemental, nous serons toujours confrontés à une réalité physique immuable : le soleil ne brille pas toujours – même dans les climats les plus ensoleillés –, il se couche la

nuit, et le vent ne souffle pas toujours. Plus nous dépendons des énergies renouvelables, plus nous aurons besoin de systèmes de stockage d'énergie massifs pour combler leur lacune, l'intermittence.

Rappelons au passage qu'en fait, l'électricité ne se stocke pas. Elle se transforme de façon mécanique, en pompant de l'eau dans les réservoirs hauts des barrages, ou chimique, via les batteries ou en fabriquant de l'hydrogène.

Créer des STEP (stations de transfert d'énergie par pompage) consiste à pomper l'eau en amont lorsqu'il y a un excédent d'énergie et à la relâcher en la faisant passer des turbines lorsque cela est nécessaire. Cela permet de stocker de l'électricité à grande échelle. Mais il faut accepter alors d'inonder plus de vallées pour créer les réservoirs nécessaires.

La question des batteries a été vue et n'est pas à l'échelle des besoins d'un système électrique, reste l'hydrogène bas-carbone. Mais l'efficacité énergétique du procédé est lamentable.

Après tout, l'hydrogène contient environ trois fois plus d'énergie par kilogramme que l'essence. Mais l'hydrogène prend également quatre fois plus de place que l'essence pour stocker la même quantité d'énergie, même lorsqu'il est liquéfié à une température extrême de $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$. Le processus de capture de l'hydrogène par électrolyse de l'eau n'est efficace qu'à 75 % environ. Il faut ensuite comprimer l'hydrogène sous une pression extrêmement élevée ou le refroidir à des températures cryogéniques, des processus qui consomment environ 30 % d'énergie en plus.

Lorsque vous souhaitez ensuite utiliser cet hydrogène dans une pile à combustible pour produire à nouveau de l'électricité, vous perdez encore 40 % de ce qui reste. En fin de compte, vous récupérez moins de 40 % de l'énergie électrique avec laquelle vous avez commencé. Chaque étape de la conversion perd de l'énergie, c'est un fait inéluctable de la thermodynamique. Pour compenser le fait que vous gaspillez 60 % de l'électricité que vous avez produite à partir de vos énergies renouvelables, vous devez augmenter considérablement votre capacité de production d'énergie renouvelable. Si on reprend l'exemple des 600 000 km² de panneaux solaires, il faut passer à 3 millions de km², plus que la surface de l'Inde.

Les lois de la thermodynamique et l'intermittence nous contraignent donc soit à surdimensionner énormément les capacités renouvelables, soit à accepter de rester dépendants d'autres sources d'énergie. En l'état actuel de nos connaissances, il n'y a pas de troisième option, sauf à accepter d'avoir de l'électricité au gré des conditions météorologiques.

Le syndrome chinois

On ne peut passer sous silence la structure de coût particulière des renouvelables. Dans le cas de l'électricité produite à partir de combustibles fossiles, le principal facteur de coût est le combustible lui-même. Dans le cas du nucléaire, sa part est moins importante,

mais existe. Les sources d'énergies renouvelables sont différentes. Il n'y a pas de coût du combustible et le coût de l'électricité produite dépend donc du prix de l'équipement. La fabrication de panneaux solaires, d'éoliennes et de batteries nécessite des processus à forte intensité énergétique et capitalistique et des écosystèmes industriels.

Pour que nos industries nationales soient économiquement compétitives, il faut que les coûts de l'énergie soient comparables à ceux de nos concurrents. Et si nous utilisons des énergies renouvelables, cela signifie que les prix des équipements doivent être aussi bas que possible. Ainsi, en poursuivant des objectifs ambitieux en matière de renouvelables, nous devenons de plus en plus dépendants de pays où les équipements peuvent être fabriqués à moindre coût que dans les pays occidentaux.

Un pays a parfaitement compris cette dynamique, la Chine. L'usine du monde a utilisé sa base manufacturière alimentée par du charbon bon marché et des subventions massives pour devenir le principal producteur de technologies vertes. Elle semble avoir compris que, paradoxalement, plus les pays occidentaux poursuivent agressivement des objectifs en matière d'énergies renouvelables, plus ils deviennent dépendants de la production chinoise alimentée en grande partie par des combustibles fossiles.

Nous nous sommes mis délibérément dans un cercle vicieux. Nous achetons dans les pays où l'équipement est le moins cher, ce qui aide ces pays à développer leur expertise en matière de fabrication et de technologies, leurs écosystèmes industriels et leurs économies d'échelle. Il devient de plus en plus déraisonnable pour nous d'essayer de construire nos propres équipements, car nous n'avons pas les ressources nécessaires pour le faire à un prix proche de celui auquel nous pouvons les acheter. Et comme nos coûts énergétiques sont désormais liés aux prix des équipements, que les coûts énergétiques sont un facteur majeur de la compétitivité industrielle et qu'ils sont politiquement sensibles dans une démocratie, toute tentative d'adoption d'équipements plus coûteux se traduirait par des coûts énergétiques plus élevés et saperait encore davantage notre compétitivité industrielle et notre stabilité économique.

Ainsi, tandis que l'Occident poursuit des objectifs ambitieux en matière d'énergies renouvelables et ferme des industries « sales » comme la production de pétrole et d'acier, nous ne réduisons pas nécessairement les émissions mondiales de gaz à effet de serre, mais nous devenons de plus en plus dépendants de pays comme la Chine, où les contrôles environnementaux sont moindres. Les chiffres sont spectaculaires. L'industrie chinoise produit plus de 80 % des panneaux solaires, environ 65 % des composants d'éoliennes et plus de 75 % des batteries au lithium.

Capitalisme de connivence

Imaginez que vous gériez un grand fonds d'investissement. Il existe une multitude d'entreprises de technologies vertes. Elles ne sont pas encore rentables – peut-être fabriquent-elles des voitures électriques qui coûtent trop cher ou des éoliennes qui ne peuvent pas concurrencer le gaz ou le nucléaire. Mais contrairement aux entreprises traditionnelles, la réussite de ces entreprises dépend presque entièrement des politiques

gouvernementales. Vous pouvez investir massivement dans ces entreprises pendant que leurs actions sont bon marché, puis utiliser votre influence pour faire pression en faveur de politiques qui rendent leurs produits presque obligatoires.

Quiconque remet en question ces politiques peut être considéré comme un négationniste climat. Le mouvement écologiste apporte un soutien populaire. Les entreprises dans lesquelles vous avez investi engagent des armées de lobbyistes pour protéger et étendre leurs avantages. L'investissement stimule la politique, la politique stimule les profits, les profits stimulent l'investissement. Vous, l'investisseur, ne faites rien d'illégal. Vous ne faites qu'investir de manière responsable et défendre des politiques durables.

Ces entreprises vantent leurs initiatives de transition responsable et d'énergie durable, avec des promesses élaborées concernant des projets d'hydrogène et de capture du carbone. Elles n'ont pas le choix : sans les bonnes références socialement responsables ESG et les initiatives vertes mises en avant sur leurs sites web et leurs campagnes d'image, elles auront moins de contrats et moins de financements.

En conclusion, il existe des limites physiques intangibles à la technologie des batteries, au stockage de l'énergie et aux renouvelables. Une voie raisonnable consisterait à maintenir en service notre infrastructure énergétique existante tout en adoptant progressivement les énergies renouvelables là où elles ont un sens pratique et économique, et non sur la base d'objectifs arbitraires. La transition énergétique se fera naturellement lorsque les alternatives deviendront réellement compétitives, mais la forcer prématurément par le biais de politiques créera la plupart du temps plus de problèmes économiques, techniques, sociaux et politiques qu'elle n'en résoudra.

La nature n'a que faire de nos objectifs politiques, de nos stratégies d'investissement ou de nos vœux pieux. Nous ignorons ses lois à nos risques et périls.

Registre : [abonne](#), [batteries lithium-ion](#), [densité énergétique](#), [efficacité énergétique](#), [électricité renouvelable](#), [hydroélectricité](#), [panneaux photovoltaïques](#), [technologies](#), [transition énergétique](#)