

Séance du 1^{er} juillet 2025

Conférence-débat de Philippe Gillet avec Yves Caristan

RESSOURCES NATURELLES : L'ÉQUILIBRE BRISÉ. QUAND LES PROCESSUS INDUSTRIELS ET NATURELS S'ENTRECHOQUENT : UNE PERSPECTIVE GÉOLOGIQUE

L'exploitation humaine des ressources minérales bénéficie et s'inspire de processus géologiques naturels, qui se sont déroulés tout au long de l'histoire de la Terre. Les grands gisements de fer, de terres rares, de cuivre ou de lithium - ressources désormais politiquement et économiquement stratégiques - sont le résultat de processus d'enrichissement et de concentration indépendants de l'activité humaine.

Ces processus industriels naturels s'entrechoquent aujourd'hui avec nos processus industriels contemporains. Les deux phénomènes ne se pensent en effet pas sur les mêmes ordres de grandeur : là où le fonctionnement de la Terre a mis plusieurs millions d'années pour constituer des gisements, leur exploitation par l'homme se déploie sur des centaines, voire des dizaines d'années. Ce décalage produit des déséquilibres dans les cycles naturels, à la manière d'une baignoire percée dont les flux entrants et sortants ne parviennent plus à se compenser.

Retracer l'histoire de cette industrie « naturelle » de la Terre depuis sa création permet de replacer l'exploitation humaine de quatre ressources stratégiques (le fer, le cuivre, les terres rares et le lithium) dans le « temps profond » de l'usine planétaire. Comment réconcilier l'industrie humaine et l'industrie naturelle des ressources minérales ? Quels sont les grands cycles géologiques dont bénéficie (autant qu'il les bouleverse) un objet aussi banal que le smartphone ?
Que peut la géologie pour renouer ces équilibres brisés ?

Sommaire

Exposé de Philippe Gillet	2
Débats	6

Philippe Gillet

Ancien élève de l'École Normale Supérieure, docteur en sciences de la terre, Philippe Gillet a enseigné à l'université de Rennes, à l'École normale supérieure de Lyon, ainsi qu'à l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL). En parallèle de sa carrière universitaire, Philippe Gillet a occupé plusieurs postes de direction. Il a dirigé l'Institut des sciences de l'univers du CNRS, puis a été directeur de l'École normale supérieure de Lyon. Il a également exercé les fonctions de directeur de cabinet de la ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, et a été vice-président aux affaires académiques de l'EPFL à Lausanne. Depuis 2016, il préside le Conseil scientifique de l'INRAE ainsi que le Conseil scientifique et de l'innovation de la région Île-de-France.

Yves Caristan

Diplômé de l'École normale supérieure, titulaire d'un doctorat en géophysique et d'un doctorat en physique, Yves Caristan a débuté sa carrière au CEA, avant de rejoindre le BRGM comme Directeur général. De retour au CEA, il dirige successivement la Direction des sciences de la matière, le Centre de recherche CEA/Saclay, la Direction des affaires internationales à l'Université Paris-Saclay. Il est Conseiller ERC pour les candidats ERC de l'Université Paris-Saclay (depuis 2015). Il est membre de l'Académie des technologies et a été Secrétaire général d'Euro-CASE (2017 à 2021).



Exposé de Philippe Gillet

Les activités humaines mettent en jeu des processus « industriels » inverses à ceux de la planète. La planète a mis des centaines de milliers d'années à fixer le dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère primitive, en particulier pour le précipiter sous forme de carbonate. L'industrie du ciment suit exactement le processus inverse, en libérant le CO₂ qui était dans les roches pour la fabrication du ciment. De même, dans la terre primitive, le fer est réduit et se fait oxyder lors d'un événement assez extraordinaire qu'est la Grande Oxydation, l'activité humaine fait le contraire, en prenant des minerais de fer qui sont oxydés, pour les réduire et en faire du métal.

Le smartphone est un témoin de ces processus « industriels » naturels et humains en tension, et représente **une sorte de planète en miniature**. On y trouve du lithium pour la batterie, des terres rares, de l'or, du cuivre, du fer, du silicium, etc. C'est une mini-planète, si l'on prête attention à sa composition chimique.

Pour observer l'équilibre brisé qui existe entre ces processus « industriels » humains et naturels, **le géologue adopte une double perspective**. Il est d'abord un historien de la planète, qui essaye de reconstruire les origines de l'évolution de la planète. Il est aussi chargé d'anticiper et de prévoir, notamment les conséquences de l'exploitation des ressources naturelles et du changement climatique.

Plan de l'exposé

On pourra ainsi s'intéresser à **quatre épisodes successifs de l'histoire de la planète**, qui se sont déroulés sur plus de 4,5 milliards d'années :

Le premier épisode, c'est **la construction de la planète et la composition du stock initial de ressources naturelles que nous utilisons (1.)**.

Le deuxième épisode (entre 3,5 et 2,5 milliards d'années) c'est **l'oxydation massive de l'atmosphère**, qui permet l'apparition de grands gisements de minerais de fer (2.).

Le troisième épisode, c'est le fonctionnement de la Terre telle qu'on la connaît aujourd'hui, avec la tectonique des plaques. C'est dans cette phase que l'on peut retracer **l'histoire des principales ressources nécessaires à la fabrication du smartphone** : le cuivre, le lithium et les terres rares (3.).

Le quatrième épisode, c'est **l'anthropocène**, période où l'activité humaine a un impact rétroactif sur le fonctionnement naturel de la planète. Face aux crises qui en découlent, on verra que la géologie et la géo-ingénierie peuvent proposer des solutions (4.).

Au fil de ces quatre épisodes, on suivra quatre éléments naturels qui sont aujourd'hui au cœur de l'économie mondiale et des équilibres géopolitiques, à savoir **le fer, le cuivre, le lithium et les terres rares**. Et l'on devra compter sur un invité spécial, l'humanité, facteur multiplicatif des phénomènes retracés ici.

Manipuler des ordres de grandeurs hétérogènes...

Penser l'interaction entre les dynamiques « industrielles » naturelles et humaines implique de **manipuler des ordres de grandeur sur une très grande amplitude**.

C'est vrai en matière de **concentration des ressources dans différents objets**. On le voit si l'on considère par exemple la quantité de fer (Fe) ou de terres rares (REE) présente dans un organisme humain, un smartphone, une turbine d'éolienne et la terre.

kg	YOU	1 SMARTPHONE	1 WIND TURBINE	EARTH*
Fe	10^{-3}	10^{-2}	10^6	$10^{24}/10^{14}$
REE	10^{-8}	10^{-4}	10^3	$10^{17}/10^{10}$

* Potential/Mineable Resources

C'est aussi vrai si l'on prend en compte le temps, qui est un autre ordre de grandeur à manipuler pour penser l'interaction entre l'activité « industrielle » humaine et naturelle. Si l'on compare la durée de vie d'un téléphone (environ un an) à celle d'un individu (environ 100 ans), à celle de l'humanité (10^6) et celle de la Terre ($4,6 \times 10^9$), on voit de façon très évidente les échelles de temps imbriquées à partir desquelles il faut penser l'exploitation humaine des ressources naturelles. **Le temps que nous percevons n'est pas le temps profond, et la méconnaissance du temps profond est l'une des conséquences de notre manière d'exploiter les ressources planétaires.**

C'est encore vrai lorsqu'on regarde **l'énergie que reçoit et que dissipe la Terre**. L'énergie dissipée est principalement de l'énergie interne, liée au refroidissement de la chaleur radioactive de la planète : ce qui représente environ 10^{18} J/an. L'énergie reçue vient du soleil, et représente 10^{24} J/an, soit près d'un million de fois plus que la perte de chaleur interne. Ce qui est intéressant, c'est de voir que l'activité humaine génère une quantité d'énergie comparable à ces ordres de grandeur naturels : autour de 10^{21-22} J/an - soit plus que l'énergie dissipée par l'intérieur de la planète. En réalité, l'humanité n'est pas loin de produire une quantité d'énergie comparable à celle qu'on reçoit du soleil.

Cette activité énergétique de la planète doit en outre se penser à deux niveaux différents, qui impliquent là encore des ordres de grandeur divers. La Terre est en permanence en train de se refroidir, ce qui implique une dissipation constante d'énergie. Dans la partie interne et solide de la Terre, constituée des roches et du noyau, ces processus sont extrêmement lents : les mouvements responsables de la dissipation de chaleur sont de l'ordre du centimètre par an, à des températures très élevées, autour de 1000°C . À l'inverse, dans la partie externe de la Terre, principalement gazeuse et liquide, les mouvements sont beaucoup plus rapides : de l'ordre du centimètre par seconde, et à des températures bien plus faibles, autour de 10°C . Bien que ces deux mondes – interne et externe – fonctionnent selon les mêmes principes (convection, dissipation d'énergie), ils opèrent à des vitesses et des températures très différentes. Ce contraste est fondamental, surtout lorsqu'on se rappelle que **la majorité des ressources naturelles que nous exploitons provient de l'intérieur de la Terre**.

Parmi les ordres de grandeur qui régissent les cycles des ressources naturelles, l'activité humaine constitue donc un acteur central, et la croissance démographique devient un facteur multiplicatif déterminant. En effet, nous serons bientôt 10 milliards d'habitants, et ce chiffre a un effet multiplicateur sur tous les grands équilibres de la planète.

... Pour évaluer les déséquilibres qui en découlent

Ces déséquilibres peuvent être représentés par une métaphore classique : **la baignoire qui fuit à mesure qu'on la remplit**. Il faut que le flux entrant et le flux sortant s'équilibrent ; si le flux entrant est supérieur au flux sortant, la baignoire déborde, mais si c'est le contraire, la baignoire se vide. Ces deux flux déterminent ce qu'on appelle le temps de résidence, c'est-à-dire le temps moyen pendant lequel une particule de matière reste dans le réservoir.

Cette métaphore permet de **penser simplement les grands cycles qui affectent les ressources naturelles**. Par exemple, l'eau a un temps de résidence moyen de 10 jours dans l'atmosphère, de 10 ans dans un lac, de 100 ans dans une nappe souterraine, de 1 000 ans dans l'océan et de millions d'années dans la partie intérieure de la Terre. Ces cycles macro affectent tous les éléments chimiques sur la planète, et sont déterminants pour se représenter l'impact de l'activité humaine sur les équilibres naturels.

C'est donc en ayant à l'esprit ces ordres de grandeur et ces cycles naturels que l'on peut essayer de penser les effets de l'exploitation humaine des quatre ressources identifiées plus haut (le fer, le cuivre, le lithium et les terres rares). Ces ressources sont à la base d'équilibres géopolitiques contemporains : leur inégale répartition sur la planète fixe en effet les contours des routes commerciales, mais aussi de toute une série de conflits et des problèmes de souveraineté pour l'appropriation de ces ressources. **Le fonctionnement géologique de la Terre et les équilibres géopolitiques de l'humanité doivent être pensés ensemble**, en retraçant à partir du temps profond l'histoire à la fois naturelle et humaine de ces ressources désormais stratégiques.

Épisode 1. La naissance de la Terre : constitution du stock initial

Si l'on reprend la fresque historique du départ, la première étape, c'est la genèse de la planète Terre. Lorsque le système solaire commence à se former, de petites poussières cosmiques s'agrègent progressivement pour donner naissance à des blocs de plus en plus gros. Ces blocs entrent en collision les uns avec les autres, finissant par former les protoplanètes autour du Soleil. C'est dans ce contexte, il y a environ 4,5 milliards d'années, que naît la Terre.

C'est à ce moment-là que se constitue **le stock initial des éléments chimiques des planètes du système solaire**. En ce qui concerne la Terre, ce stock initial est très nettement dominé par quatre éléments : le silicium, le fer, le magnésium, l'oxygène. Ce stock restera constant, mais sa minéralogie et sa chimie vont se complexifier au fur et à mesure, au cours de différents événements, et notamment l'apparition de la vie sur Terre.

À partir de cette chimie initiale, on assiste ainsi à des processus naturels qui peuvent être rapportés à des processus industriels de différenciation et d'enrichissement. Si la Terre est au départ une boule homogène, où le cuivre, le fer, le lithium, les terres rares sont mélangées, peu à peu les éléments métalliques vont migrer vers le centre de la terre, à cause de leur densité, et fabriquer le noyau. L'essentiel du fer et du cuivre vont alors aller dans le noyau. À l'inverse, d'autres éléments comme le lithium et les terres rares restent concentrés dans les zones plus superficielles du manteau et de la croûte terrestre,

où l'on trouve aussi un peu de cuivre et un peu de fer. Une fois cette différenciation achevée, le fonctionnement de la Terre va permettre des enrichissements locaux. C'est de cette façon que vont se former les gisements : des zones où certains éléments se concentrent suffisamment pour pouvoir être exploités par l'homme aujourd'hui.

Épisode 2. L'usine planétaire : les gisements de fer et la première crise de biodiversité

Il y a autour de 2,5 milliards d'années, un événement majeur affecte la Terre, et prend la forme d'une **Grande Oxydation**.

Auparavant, l'atmosphère terrestre primitive était principalement constituée de diazote (N_2) et de gaz carbonique (CO_2), avec très peu d'oxygène. Mais à un moment, dans les océans peu profonds, certaines bactéries – en particulier des cyanobactéries – développent la photosynthèse : elles utilisent le dioxyde de carbone, l'eau et la lumière solaire pour produire de la matière organique, et **libèrent de l'oxygène**. Ce surplus d'oxygène va profondément modifier la chimie des océans, puis de l'atmosphère, déclenchant la première crise de biodiversité. À l'époque, la vie est essentiellement bactérienne, et pour beaucoup de ces organismes, l'oxygène est un poison. Cet événement entraîne l'extinction d'une grande partie de la biosphère primitive.

Cette crise va aussi produire une transformation géologique majeure. Dans les océans, le fer était alors présent sous forme réduite (Fe^{2+}), soluble dans l'eau. L'oxygène nouvellement présent dans les océans l'oxyde en fer ferrique (Fe^{3+}), qui précipite pour former des énormes dépôts de fer oxydé. C'est ainsi que se sont formés les gisements géants que nous exploitons aujourd'hui, notamment en Australie et au Canada. Donc l'inégale répartition de la ressource en fer exploitable par l'industrie humaine aujourd'hui est d'abord et avant tout **le résultat d'un événement de bio-diversification massif de la planète**, qui s'est déroulé il y a environ 2,5 milliards d'années.

Épisode 3. Au cœur de nos smartphones : la formation des gisements de cuivre, lithium et terres rares.

Si l'on avance dans le temps et qu'on poursuit les trois autres éléments chimiques déterminés au départ (les terres rares, le cuivre et le lithium), on voit là aussi que leur exploitation contemporaine a été rendue possible par **des processus « industriels » naturels, que l'industrie humaine ne fait souvent que copier ou invertir**, à des échelles de temps toutefois incommensurables.

En ce qui concerne **les terres rares**, elles sont particulièrement présentes dans les carbonatites, qui sont le résultat d'éruptions volcaniques très anciennes. En Europe, par exemple, le volcan du Kaiserstuhl a produit, il y a plus d'une vingtaine de millions d'années, des laves riches en carbonate de calcium, chargées en terres rares. Ce sont donc des systèmes volcaniques très spécifiques qui ont été capables de produire des concentrations en terres rares suffisantes pour permettre aujourd'hui leur extraction.

En ce qui concerne **le cuivre**, l'enrichissement est aussi permis par des phénomènes de subduction, lorsqu'une plaque tectonique plonge sous une autre, provoquant des séismes et un intense volcanisme, qui produit des magmas riches en cuivre. Ces derniers remontent lentement à la surface, où ils s'enrichissent progressivement et finissent par former des gisements exploités aujourd'hui à très grande échelle. C'est le cas par exemple le long de la ceinture de feu du Pacifique, qui est une zone de subduction où l'on trouve des méga-mines de cuivre en activité.

En ce qui concerne **le lithium**, son enrichissement est le fait de deux processus naturels distincts. Le premier découle de la remontée de magmas dans les zones de subduction, comme pour le cuivre. Le second s'articule au cycle de l'eau, impliquant des ordres de grandeur très différents, sur des temps beaucoup plus courts. La pluie provoque un phénomène d'érosion et d'altération des roches riches en lithium, avant de se fixer dans des lacs. Dans des climats chauds, ces lacs subissent l'évaporation, provoquant un enrichissement de basse température, qui conduit à des gisements exploitables. C'est ainsi que se sont formés les grands *salars* des plateaux andins.

Dans tous les cas, on voit que le fonctionnement terrestre engage **un véritable processus industriel à vitesse lente**. On passe en effet de concentrations très faibles dans les roches profondes : quelques *ppb* (parties par milliard) à *ppm* (parties par million) pour des éléments comme le cuivre, le lithium ou les terres rares, à plusieurs pour cent de concentration à la surface. C'est cet enrichissement naturel qui rend aujourd'hui rentable l'exploitation humaine. Ce sont autant **d'usines géologiques**, capables, avec le temps, l'énergie interne de la Terre, et souvent grâce à l'eau, de concentrer les ressources que nous utilisons aujourd'hui à très grande échelle.

Épisode 4. Crises et solutions face à l'activité humaine

Ces équilibres géologiques sont aujourd'hui bouleversés, à la manière de la baignoire évoquée au départ. On exploite beaucoup plus vite que les gisements ne se restaurent. Ce constat nous renvoie d'ailleurs à la question des ordres de grandeur. Alors que l'exploitation se fait à l'échelle de la dizaine d'années, la fabrication des gisements excède largement le million d'années.

Comment rééquilibrer les flux, à un moment où la pression sur ces ressources est inédite (fabrication des éoliennes, des batteries etc) ? La première solution, c'est le recyclage, qui peut permettre de refermer le cycle de chaque élément. Ensuite, on peut avoir recours à des substituts. On pourrait utiliser par exemple des batteries au sodium, ou en tout cas, des ressources qui sont disponibles en plus grande quantité.

Par ailleurs, on peut aussi envisager **des solutions de geo-engineering**, qui tentent d'imiter les processus « industriels » naturels. C'est ce qui est aujourd'hui à l'étude pour tenter de décarboner l'atmosphère. En Islande, à Oman, différentes expériences tentent ainsi de capter le dioxyde de carbone et de le fixer dans des roches spécifiques, à l'image des mécanismes d'enrichissement naturels décrits plus haut. On est aujourd'hui très loin du compte, puisqu'il faudrait plusieurs dizaines de milliers d'usines de ce type pour commencer à avoir un effet significatif.

La route est longue, mais ce n'est pas une raison pour abandonner. Peut-être faut-il justement **commencer par éduquer le public à ces ordres de grandeur**, aux ruptures d'équilibre qu'entraîne l'activité humaine sur les cycles « industriels » naturels. L'humanité n'existerait pas sans la Terre, et l'on ne peut donc faire l'économie de sa compréhension. La géologie est une science du passé, un métier d'historien, mais aussi une science de l'avenir, qui se doit d'éduquer aux grands déséquilibres que suscite la présence de l'humanité sur la Terre.



Débats

Tu as évoqué la chaleur interne de la Terre et donc en un sens, l'histoire de la radioactivité. Les éléments chimiques que tu étudies sont certes peu radioactifs, mais est-ce que dans ta schématisation initiale, la radioactivité est répartie de façon homogène ?

Philippe Gillet : Quand la planète se forme, elle incorpore en effet des isotopes radiogéniques qui vont avoir des pour certains d'entre eux des périodes de demi-vie radioactive de plusieurs milliards d'années... Le manteau de la terre contient une grosse partie de ces éléments chimiques, notamment le thorium qui est y très abondant. Il y a d'autres mécanismes qui concentrent en particulier l'uranium, surtout dans la croûte continentale, ce qui le rend exploitable... Donc l'uranium est plutôt concentré dans la partie supérieure de la terre solide, mais c'est le manteau de la terre qui constitue la partie la plus radieuse. Il contient du thorium, du potassium et d'autres isotopes radiogéniques, qui continuent de se désintégrer et libérer de la chaleur.

Yves Caristan : C'est tout à fait intéressant, cette question de la radioactivité. Surtout pour expliquer les flux d'énergie qui viennent de la terre. D'autant que pendant très longtemps, jusqu'au 19^e siècle, on a pensé que toute cette énergie venait du refroidissement de la terre, qui était chaude à l'origine. Ça date de Buffon, cette idée.

Philippe Gillet : Oui, l'objectif était d'estimer l'âge de la Terre. Buffon avait fait une expérience assez extraordinaire : il avait pris des boulets de canon qu'il a chauffés, puis qu'il regardait refroidir. Et à partir de ce temps de refroidissement et de la taille du boulet, il estimait l'âge de la Terre, autour de 100 000 ans. Il était assez loin de la réalité, précisément parce qu'il pensait ce refroidissement par conduction, comme un objet chaud qui refroidit. C'est la découverte de la convection et de la radioactivité à la fin du 19^e siècle qui ont permis d'identifier les mécanismes de génération de la chaleur interne de la Terre, qui ne se contente pas de refroidir mais produit de la chaleur en permanence.

Pour revenir aux terres rares, il me semble que les minerais de terres rares sont inégalement radioactifs selon la quantité de thorium et d'uranium qu'ils contiennent. Ce qui détermine d'ailleurs l'exploitation. En Chine, les minerais de terres rares Chinois sont peu radioactifs, alors que ceux d'Australie sont beaucoup plus radioactifs et on les a abandonnés à cause de ça. Est-ce que je me trompe ?

Philippe Gillet : Effectivement, pour les terres rares, on tend de plus en plus à poser la question non seulement de l'étendue des gisements mais aussi de la qualité de ces gisements. Il y a le problème de la radioactivité mais beaucoup d'autres minerais contiennent des impuretés qui les rendent incompatibles avec des processus industriels. C'est un révélateur de la grande diversité géologique : vue de loin, la géologie semble toujours très homogène, mais vue de près, ce n'est jamais le cas !

Au début de l'exposé, il a été mentionné l'énergie émise par la terre. C'est quelque chose qui est mal connu en général. On sait que la décarbonation passera par l'électrification, mais on oublie peut-être qu'une énorme partie de de l'énergie dont on a besoin, même en industrie, c'est de la chaleur. Pourquoi finalement, oublie-t-on cette dimension, alors qu'on pourrait récupérer cette énergie émise au travers de la radioactivité interne de la terre ? C'est une énergie qui est, pour le coup, quasiment inépuisable, et répartie de façon plus homogène.

Philippe Gillet : À ce sujet, la difficulté principale, c'est le choix du caloporteur, qui va permettre de transporter cette chaleur interne. Le meilleur caloporteur, c'est l'eau, mais alors cela pose toute une série de problèmes, notamment la densité du réseau de drainage, pour ne pas que ça refroidisse...

Pour revenir sur l'épisode de la Grande Oxydation, est-ce qu'on arrive à avoir une explication un peu mécanistique de l'événement ou est-ce que c'est un processus radicalement non-linéaire ?

Philippe Gillet : C'est une question non encore résolue, même s'il est clair que c'est un événement non-linéaire. On peut le penser un peu sur le modèle de la pandémie, avec des effets de seuil exponentiels. Ce qu'on sait, quand même, c'est que c'est un processus massif : un moment de l'histoire de la Terre où ce qui était un poison, l'oxygène, devient dominant...

Yves Caristan : L'événement est aussi révélateur du couplage très fort entre la géologie et la biologie, comme l'a bien souligné l'exposé.

Finalement, on remarque qu'aujourd'hui on gère peu la fin de vie des équipements et des éléments chimiques mentionnés dans l'exposé, qui terminent souvent dans des décharges. On ne fait pas grand-chose pour préserver la concentration chimique qu'on a créée et pour la valoriser. Que pourrait-on faire pour gagner en rigueur dans le traitement des objets usagers qui contiennent des terres rares, du lithium, du cuivre, du fer ?

Philippe Gillet : Effectivement, il y a une marge de progression importante. Quand on prend l'exemple de l'aluminium, il existe des filières entières de recyclage : une cannette de soda aujourd'hui est relativement bien recyclée. Même constat pour le secteur automobile et le recyclage des plastiques des voitures. Bien sûr, faire la même chose avec un smartphone est extrêmement compliqué. Ce sont des petites quantités de matière, mélangées... Mais sur le lithium, par exemple, c'est faisable.

Pour prolonger la réflexion en matière d'ordres de grandeur, a-t-on une idée de la quantité des éléments recyclables en théorie, par rapport au stock total qu'on exploite ?

Philippe Gillet : C'est une question délicate, parce que ce sont des process industriels de recyclage qu'on connaît mal : on peut difficilement chiffrer le potentiel recyclable à ce stade de développement des filières.

Il y a des grandes avancées par exemple sur le lithium et le recyclage des batteries, avec une nouvelle réglementation européenne, et un développement sans précédent en Chine. Et le tout avec une technologie qui n'est pas tellement énergivore...

Sur les terres rares également, il existe des solutions de recyclage, avec un très gros potentiel. À La Rochelle, un projet recycle des terres rares qu'on va utiliser dans la production d'aimants permanents... On parle aussi de nouveaux procédés de recyclage de l'euporium. La question, dans le fond, ce n'est pas le recyclage en soi, c'est d'identifier ce qu'on veut recycler.

Mots-clés : ressources naturelles, cycles géologiques, ordres de grandeur, déséquilibre planétaire, temps profond, smartphone

Citation : Philippe Gillet & Yves Caristan. (2025). *Ressources naturelles : l'équilibre brisé. Quand les processus industriels et naturels s'entrechoquent : une perspective géologique*. Les soirées de l'Académie des technologies. @

Retrouvez les autres parutions de l'Académie des technologies sur notre site academie-technologies.fr

Académie des technologies. Le Ponant, 19 rue Leblanc, 75015 Paris. 01 53 85 44 44

Production du comité des travaux.

Directeur de la publication : Patrick Pélat

Rédacteur en chef de la série : Béatrice Lathuile

Auteur : Marie-Claude Tregliat

n° ISSN : en attente