

## RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT

ISSN 1268-4783

Série trimestrielle - N°111 - Juillet 2023

### Rédaction

Conseil général de l'Économie (CGE)  
Ministère de l'Économie, des Finances  
et de la Souveraineté industrielle et numérique  
120, rue de Bercy - Télédéc 797  
75572 Paris Cedex 12  
Tél. : 01 53 18 52 68  
<http://www.annales.org>

**Grégoire Postel-Vinay**  
Rédacteur en chef

**Gérard Comby**  
Secrétaire général

**Alexia Kappelmann**  
Secrétaire générale

**Daniel Boula**  
Secrétaire général adjoint

**Magali Gimon**  
Assistante de rédaction et Maquettiste

**Myriam Michaux**  
Webmestre et Maquettiste

### Publication

**Photo de couverture**  
Photo libre de droits téléchargée sur le site  
de Pixabay (<https://pixabay.com/fr/photos/mien-exploitation-mini%a8re-481754/>)  
Photo©Horjaraul

**Iconographie**  
Gérard Comby

**Mise en page**  
Magali Gimon

**Impression**  
Dupliprint Mayenne

### Membres du Comité de rédaction

**Pierre Couveinhes**  
Président du Comité de rédaction

**Patricia Blanc**

**Paul-Henri Bourrelier**

**Mireille Campana**

**Fabrice Dambrine**

**Dominique Dron**

**Jean-Luc Laurent**

**Richard Lavergne**

**Philippe Merle**

**Michel Pascal**

**Didier Pillet**

**Grégoire Postel-Vinay**

**Claire Tutenuit**

**Benjamin Vignard**

---

La mention au regard de certaines illustrations du sigle  
« D. R. » correspond à des documents ou photographies  
pour lesquels nos recherches d'ayants droit ou d'héri-  
tiers se sont avérées infructueuses.

Le contenu des articles n'engage que la seule responsa-  
bilité de leurs auteurs.

# Énergie et Sociétés

04

Énergie et Sociétés :  
constats, limites  
et perspectives  
Introduction

Didier PILLET

## Concilier croissance économique et préservation des actifs naturels

07

Pic pétrolier mondial  
et miracle du pétrole de schiste

Michel LEPETIT

19

Energy flows and the  
self-organization of societies  
as dissipative structures

François RODDIER  
and Mireille RODDIER

24

La France ne pourra atteindre  
ses objectifs climatiques  
qu'avec une planification  
ambitieuse et concertée

Emma STOKKING  
pour The Shift Project

29

Rôle de l'énergie dans la société  
de croissance considérée  
en tant que système complexe

Philippe CHARLEZ

## Énergie et taux de retour énergétique (TRE ou EROI)

34

L'EROI et son importance  
dans l'évaluation des performances  
des systèmes énergétiques

Gérard BONHOMME  
et Jacques TREINER

40

Le modèle agro-industriel  
face au déclin des énergies fossiles

Félix LALLEMAND

44

Évolution historique et tendancielle  
de l'EROI du pétrole et du gaz

Louis DELANNOY,  
Emmanuel ARAMENDIA,  
Pierre-Yves LONGARETTI  
et Emmanuel PRADOS

50

Uranium as an energy source:  
medium to long term prospects

J. W. Storm van LEEUWEN  
and Didier PILLET

59

Réflexions autour de la notion d'EROI.  
Illustration avec le photovoltaïque  
et l'hydrogène

Didier PILLET

## Enjeux et défis liés aux matières premières et à l'EROI

67

Batteries de véhicules électriques :  
quelles alternatives à la  
technologie lithium ion ?

Victoire de MARGERIE

69

Criticité et géopolitique  
des matières premières requises  
par les technologies bas-carbone

Emmanuel HACHE,  
Vincent D'HERBEMONT  
et Louis-Marie MALBEC

74

EROI minimum  
et croissance économique

Victor COURT  
et Florian FIZAINÉ

80

Projets d'exploitation de lithium  
en France et en Allemagne...  
des convergences possibles  
ou une compétition effrénée ?

Alain LIGER

89

Traductions des résumés

93

Biographies des auteurs

Ce numéro a été coordonné  
par Didier PILLET

# Énergie et Sociétés : constats, limites et perspectives

## Introduction

Par Didier PILLET

Membre permanent du Conseil général de l'économie

Avec les événements récents intervenus en Ukraine, la question énergétique s'est brusquement invitée dans l'actualité. Ce conflit russo-ukrainien et ses conséquences en termes de restrictions des livraisons de gaz et de pétrole en provenance de la Russie, sont venus nous rappeler, s'il le fallait, à quel point nos sociétés sont, dans leur fonctionnement, fortement dépendantes de l'énergie. Cette relation entre énergie et sociétés n'est bien sûr pas nouvelle. De tout temps, en effet, la disponibilité de l'énergie a déterminé le niveau de développement des sociétés.

C'est particulièrement vrai de la période couvrant les 100 dernières années qui a vu une utilisation croissante des ressources pétrolières à l'origine d'un développement économique sans précédent à l'échelle mondiale. Ce résultat tient beaucoup aux avantages attachés au pétrole, une matière liquide facilement stockable et transportable, et présentant une forte densité énergétique, en comparaison des autres formes d'énergies fossiles que sont le charbon et le gaz. L'abondance énergétique qui a accompagné la montée en puissance de la ressource pétrole a paradoxalement éclipsé le rôle central de cette forme d'énergie. Cela a privilégié un pilotage des économies majoritairement réalisé à partir d'outils monétaires et financiers, sans trop se préoccuper de l'approvisionnement énergétique nécessaire par le développement économique, considérant en quelque sorte que l'intendance suivrait, le secteur énergétique étant alors vu comme un secteur parmi d'autres secteurs de l'économie.

Les difficultés croissantes en matière d'approvisionnement énergétique et de métaux nous ramènent cependant à la base physique du fonctionnement des économies, suggérant par-là un rééquilibrage où la vision économique apporte désormais un poids plus grand aux approches physiques du développement du fait de la rareté accrue de l'énergie et des matières premières. À cet égard, sur le plan énergétique, on pourrait établir un parallèle entre deux visions, avec, d'un côté des infrastructures énergétiques assurant la fourniture et le transport de l'énergie, et d'un autre côté, des infrastructures financières assurant l'allocation des flux monétaires aux différents secteurs de l'économie. Loin d'être antinomiques, ces deux visions sont à la fois nécessaires et complémentaires l'une de l'autre. Une différence essentielle existe cependant entre ces deux visions dans la mesure où il n'existe a priori pas de limite à la création monétaire, à l'inverse de l'énergie dont les ressources fossiles (charbon, pétrole et gaz) et fissiles (uranium), qui représentent à ce jour de l'ordre de 80 % de l'énergie primaire consommée au niveau mondial, ne peuvent que décliner à l'avenir.

S'agissant des analyses portant sur la problématique de la raréfaction des ressources énergétiques et minérales, il faut bien entendu rappeler que nombre de travaux ont été réalisés ces dernières décennies, parfois de longue date. On pense à cet égard au rapport "The limits to growth", réalisé en 1972 à la demande du *Club de Rome*, et dont une édition spéciale a été produite en 2022, à l'occasion du cinquantenaire de sa première parution. Il convient ici de rappeler que ce rapport incluait des simulations informatiques selon plusieurs scénarios construits autour d'un ensemble de problématiques qui, outre la question des ressources, intégraient les questions de pollution, de démographie, de nourriture et de production industrielle.

Pour ce qui concerne l'objectif de ce numéro, il s'agit plus modestement d'apporter un ensemble de réflexions autour de l'énergie au sens large. Cela inclut des considérations sur les ressources énergétiques et minérales, et sur le rapport de leur ensemble avec le fonctionnement des sociétés. Le point de vue adopté ici est essentiellement celui du physicien, avec, le cas échéant, la mobilisation de notions théoriques empruntées à la thermodynamique. Plus particulièrement, la notion de ratio énergétique, connue, par les spécialistes du domaine, sous l'acronyme EROI (soit : *Energy Returned Over energy Invested*, ou Taux de Retour Énergétique, TRE, en français), sera précisée, à la fois dans ses définitions, ainsi que dans ses applications et implications.

Précisément, dans **une première partie** consacrée aux conditions de la croissance économique, ainsi qu'à la préservation des actifs naturels, *Michel Lepetit* traite, dans son article, de la question des ressources pétrolières, avec un focus particulier sur le pétrole de schiste américain. Dans cet article, *Michel Lepetit* aborde notamment les conséquences du franchissement du pic de production mondiale de pétrole, sur l'avenir macroéconomique, financier et environnemental de la planète.

Au-delà de la question pétrolière, et en élargissant à l'ensemble des énergies fossiles, *Emma Stokking* revient sur les travaux du *Shift Project* portant sur le plan de transformation de l'économie française qui vise à décarboner cette dernière, secteur par secteur, en favorisant la résilience et l'emploi. Dans son article, *Emma Stokking* dresse ainsi le bilan du rapport écrit sur le sujet par le *Shift Project*, depuis sa publication en 2022.

Cette première partie est complétée par 2 articles construits autour des notions physiques de *système complexe* et de *structure dissipative*.

*François* et *Mireille Roddier* montrent comment l'application de ces notions permet d'approcher le fonctionnement des cycles économiques, qui sont alors vus à travers les processus d'auto-organisation, à l'image de ce qui se passe dans le monde du vivant. Ils montrent également l'importance de la permanence des flux énergétiques alimentant de tels systèmes complexes, en insistant sur les conditions de leur maintien.

Avec le second article, *Philippe Charlez* mobilise tout particulièrement la notion de structure dissipative, appliquée ici à la société dans son ensemble, qui est alors vue comme un système « *hors équilibre* », et pour laquelle est rappelé la nécessité d'un flux permanent d'énergie la traversant, condition du maintien de la complexité de son organisation, ainsi que de son existence. À l'inverse, par similitude avec les systèmes thermodynamiques, l'auteur insiste sur l'importance de maintenir la société éloignée d'un état s'apparentant à un équilibre thermodynamique, état qui serait fortement préjudiciable au fonctionnement du système constitué par la « *société de croissance* ».

Dans une **deuxième partie**, ce numéro aborde la notion d'EROI. Plus précisément, outre une définition précise de ratio, ainsi que de la méthodologie associée à son évaluation, des exemples sont traités qui permettent d'illustrer les particularités et limites de cet outil d'évaluation des performances des systèmes énergétiques.

Dans l'un des 5 articles composant cette deuxième partie, *Gérard Bonhomme* et *Jacques Treiner* apportent une définition précise de la notion d'EROI. Par ailleurs, partant du constat de la nécessité de s'appuyer sur des critères physiques afin d'évaluer les solutions technologiques et les scénarios énergétiques envisagés dans le cadre des contraintes énergétiques et climatiques, les auteurs soulignent l'importance de l'EROI qu'ils présentent comme le principal de ces critères.

Un exemple à la fois emblématique et illustratif de l'application de la notion d'EROI est ensuite donné par *Félix Lallemand* dans le cadre du modèle agro-industriel. Dans son article, il présente les ressorts énergétiques ayant permis l'émergence de ce modèle. Il y étudie en particulier le rôle du pétrole et du gaz dans son fonctionnement, en soulignant sa vulnérabilité dans un monde où la production d'hydrocarbures fossiles connaît un déclin structurel. Sur la base de ces constats, il propose une évaluation de l'EROI du modèle agro-industriel français, et en discute la pertinence pour l'étude des systèmes alimentaires.

Avec l'article de *Louis Delannoy*, d'*Emmanuel Aramendia*, de *Pierre-Yves Longaretti* et d'*Emmanuel Prados*, est soulignée la nécessité d'évaluer l'EROI des combustibles fossiles au stade final ou utile, où l'énergie est au plus proche de la réalité des processus économiques. En procédant de la sorte, les EROIs des combustibles fossiles se trouvent être comparables à ceux des énergies renouvelables, un résultat traduisant sur ce point l'émergence d'un consensus au sein de la communauté scientifique. Dans l'article, les auteurs reviennent sur les diverses étapes ayant mené, de 1971 à 2019, à l'aboutissement de ce consensus, et en discutent les implications vis-à-vis de la transition bas-carbone.

S'agissant de la ressource uranium, l'article de *Jan Willem Storm van Leeuwen* et *Didier Pillet* pose la question de l'avenir à très long terme de la production électrique nucléaire, compte tenu du rôle crucial tenu par l'isotope  $^{235}\text{U}$  pour assurer cette production. Le point important qu'ils relèvent dans cet article concerne la diminution dans le temps de la teneur de l'uranium en  $^{235}\text{U}$  des gisements exploités, avec comme conséquence la dégradation, dans le siècle à venir, de l'EROI du nucléaire, ainsi que la remontée des émissions de gaz à effet de serre (GES) associées à l'exploitation des mines. Ils soulignent par ailleurs que le passage à l'exploitation de l'isotope  $^{238}\text{U}$ , propre à assurer un relais énergétique sur plusieurs millénaires, tout en garantissant de réelles limitations des émissions de GES, s'il doit être anticipé assez rapidement pour les sociétés et pays qui ont déjà développé une filière aux fins de pérenniser la ressource en  $^{238}\text{U}$  à très long terme, ne saurait cependant prendre sa pleine ampleur à échelle mondiale avant une centaine d'années.

Enfin, le cinquième article revient sur quelques aspects de la physique entourant la notion d'EROI et de son évaluation. Il y évoque notamment les conséquences pour l'EROI des différences entre énergies de stock et énergies de flux, tout en clarifiant le lien existant entre EROI et rendement. *Didier Pillet* souligne tout particulièrement le fait que les énergies fossiles, encore largement dominantes dans le paysage énergétique, conditionnent fortement le déploiement des énergies renouvelables, notamment à travers la construction de leurs infrastructures. Afin d'illustrer son propos, l'auteur s'appuie sur deux systèmes énergétiques appelés à jouer un rôle important dans le processus de décarbonation de l'économie, à savoir le photovoltaïque et l'hydrogène.

Si les deux premières parties de ce numéro ont été principalement consacrées aux enjeux attachés à l'énergie et à l'EROI, la **troisième partie** aborde la question des enjeux et défis liés aux matières premières, ainsi que leurs liens avec l'EROI.

Dans le premier des 4 articles consacrés à cette thématique, et après avoir rappelé les contraintes fortes rencontrées dans le domaine des ressources minérales en lien avec la transition énergétique, *Victoire de Margerie* passe en revue les alternatives aux batteries lithium-ion utilisées dans le cadre de la mobilité électrique. Ainsi, sont mises en avant des technologies de batteries telles que celles fonctionnant au sodium ou à base de fer (technologie LFP), domaines où la compétition internationale s'avère très forte. *Victoire de Margerie* précise que la diversité des solutions existantes doit permettre de s'adapter aux exigences de performance, de sécurité, de coût et d'empreinte environnementale. Elle insiste aussi sur la nécessité d'avancer rapidement sur ces sujets compte tenu des agendas très serrés en matière de transition énergétique. Elle souligne par ailleurs que l'industrie des batteries électriques pour véhicules électriques devra combiner intelligemment toutes les technologies disponibles pour utiliser au mieux les matériaux de la transition électrique.

Avec l'article d'*Emmanuel Hache*, *Vincent D'Herbemont*, et *Louis-Marie Malbec*, la question de la criticité des approvisionnements des pays en matières minérales est analysée sous l'angle géopolitique. D'un côté, il y a les pays consommateurs, qui, face aux incertitudes naissantes sur les marchés des matériaux, cherchent à développer leur autonomie dans un contexte de forte hausse de la demande, et d'offre contrainte. Et, d'un autre côté, les pays producteurs tendent à développer des stratégies visant à profiter de la manne financière de leurs ressources, et à intégrer l'aval des chaînes de valeur qu'elles permettent. À partir du contexte géopolitique incertain qui résulte de cette confrontation, les auteurs de l'article appellent l'ensemble des producteurs et consommateurs à profiter de la dynamique liée aux métaux pour structurer de manière globale les marchés, ceci afin d'aboutir à la mise en place d'une gouvernance mondiale des matériaux.

Dans l'article suivant, *Victor Court* et *Florian Fizaine* rappellent que si les notions d'énergie nette et d'EROI ont progressivement gagné en popularité depuis leur création dans les années 1970, leur évaluation s'avère néanmoins difficile. S'agissant des conséquences de la raréfaction des hydrocarbures et de la baisse tendancielle de leurs EROIs, ils signalent que plusieurs études ont essayé d'estimer l'impact d'une baisse de ces EROIs sur le fonctionnement d'une société industrielle, en tentant notamment d'estimer la valeur minimum d'EROI requise pour soutenir la croissance économique. Les auteurs de l'article soulignent que les résultats de ces études restent hétérogènes et difficiles à interpréter, d'autant qu'ils s'inscrivent dans un contexte de requalification de l'objectif à atteindre (croissance économique ou qualité de vie), auquel la science ne saurait répondre seule.

Enfin, dans le dernier article de cette troisième partie, *Alain Liger* rappelle que le lithium fait l'objet d'une forte demande au niveau mondial, et que, sous la pression du développement de l'usage des batteries rechargeables, il est classé métal stratégique par l'Europe, cette dernière étant, sur ce point, aujourd'hui totalement dépendante de producteurs extérieurs au continent. Afin d'illustrer cette problématique, l'auteur passe en revue deux projets d'exploitation de lithium, l'un en France et le second en Allemagne, montrant par là le fort niveau d'investissement industriel sur cet enjeu minier majeur, dont le sort reste cependant dépendant de la poursuite des études, de l'acceptation des projets par les populations locales et des autorisations exigées par le droit minier de chaque pays.

# Pic pétrolier mondial et miracle du pétrole de schiste

Par Michel LEPETIT

Chercheur associé au LIED (Université Paris Cité)  
et vice-président de The Shift Project

Le pic mondial de la production de pétrole brut « conventionnel » est advenu dans la décennie 2000. Il n'y a pas eu alors de pic du pétrole brut, car est alors survenu le « miracle » du pétrole de schiste américain. Face aux limites anticipées des ressources conventionnelles, l'histoire des hydrocarbures de schiste commence dès les années 1960-70 avec des recherches sur la fracturation hydraulique massive, voire la fracturation nucléaire. L'explication du « miracle » du schiste par le génie humain est donc en partie juste. L'explication par la politique monétaire, « anormale », massive, est moins reconnue. En 2020, le Covid-19 entraîne un retour à la normalité du marché pétrolier. La maturité des gisements d'hydrocarbures, conventionnels ou non, le rendement décroissant des techniques de récupération du pétrole dans les réservoirs géologiques, laissent pronostiquer que le pic mondial de la production de pétrole brut de novembre 2018 ne sera plus égalé. Le pic conventionnel, le « miracle » du schiste, et le retour à la « normalité », auront des conséquences sur l'avenir macroéconomique (croissance), financier (inflation) et environnemental (finance « verte ») de la planète.

## Introduction<sup>1</sup>

Au début du siècle, s'est produit un « miracle » énergétique, aux conséquences historiques immenses – macroéconomiques, financières, géopolitiques, environnementales, voire anthropologiques : l'avènement du « pétrole de schiste »<sup>2</sup>.

Le pétrole de schiste fit alors disparaître pour une décennie la crainte du pic mondial de pétrole.

Au début des années 2000, le monde assoiffé d'hydrocarbures liquides se voyait soudain confronté à son pic de production du pétrole dit « conventionnel ». L'approche de ce pic vit le prix du pétrole décuplé en moins d'une décennie, culminant en 2008, et déclenchant alors – *via* la perte de solvabilité des emprunteurs immobiliers – une crise financière systémique dite « crise des *subprimes* ». Puis, à la surprise générale, dans la décennie 2010, un relais de croissance de la production pétrolière mondiale apparut providentiellement aux États-Unis avec l'émergence d'abord indiscernable, ensuite spectaculaire, du pétrole de schiste.

La faiblesse des capacités productives excédentaires d'or noir au Moyen-Orient et notamment en Arabie

Saoudite (Lepetit, 2023a)<sup>3</sup>, conjuguée à une demande chinoise tonique, expliquaient la flambée des prix de la décennie 2000. La Chine s'éveillait ; et le monde trembla. À partir de 2010, l'exubérance de la production pétrolière américaine « non conventionnelle » tint la vedette. Ce pétrole de schiste, atypique, fut une surprise pour beaucoup et d'abord les géologues : la nature plus ou moins poreuse des roches renfermant ces hydrocarbures rendait possible mais complexe, et *a priori* peu rentable financièrement, son extraction du sous-sol. De fait, et là est le vrai « miracle » macroéconomique, le pétrole de schiste ne fut jamais rentable pendant toute la décennie 2010.

On voit sur le Graphique 1 (voir page suivante) que la croissance de la production américaine de pétrole brut est moins tonique dans les années 2020 que dans la décennie précédente, soutenue par un investissement moindre. Le Graphique 2 (voir page suivante) montre les évolutions mensuelles récentes du prix et de la production de pétrole brut aux États-Unis, ainsi que des perspectives à court terme plutôt atones.

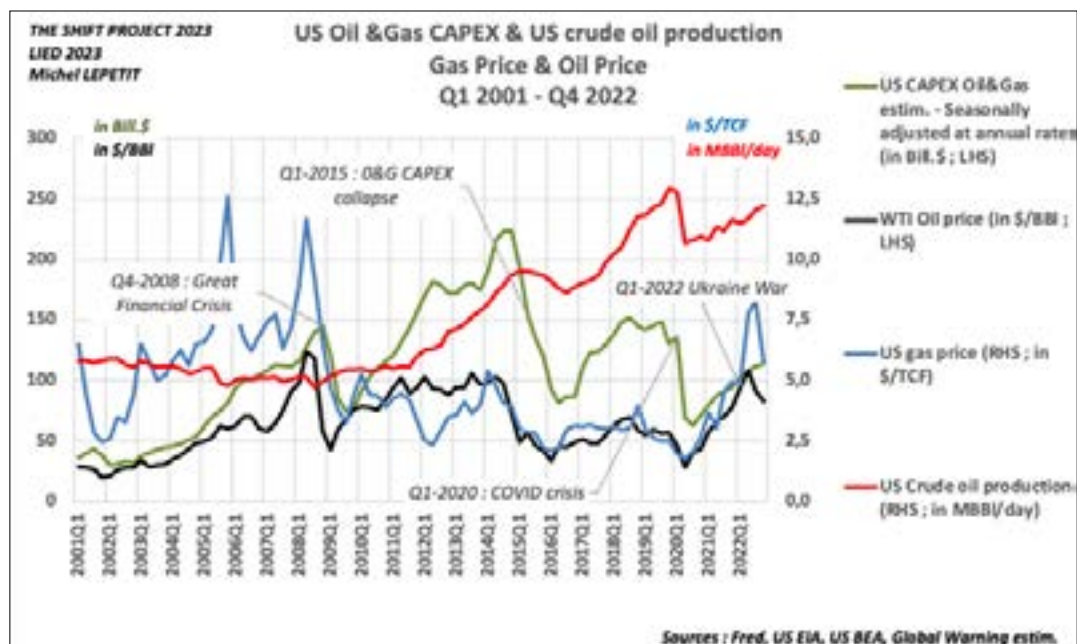
Fort d'une analyse systémique du « miracle du schiste », un pronostic historique peut être avancé : le pic mondial de la production de pétrole brut, conven-

<sup>1</sup> Je remercie ici chaleureusement les membres de l'ASPO (et notamment J. Laherrère, D. Pillet et O. Rech), du Shift Project, les services de l'US BEA et le service des archives de l'IFPEN.

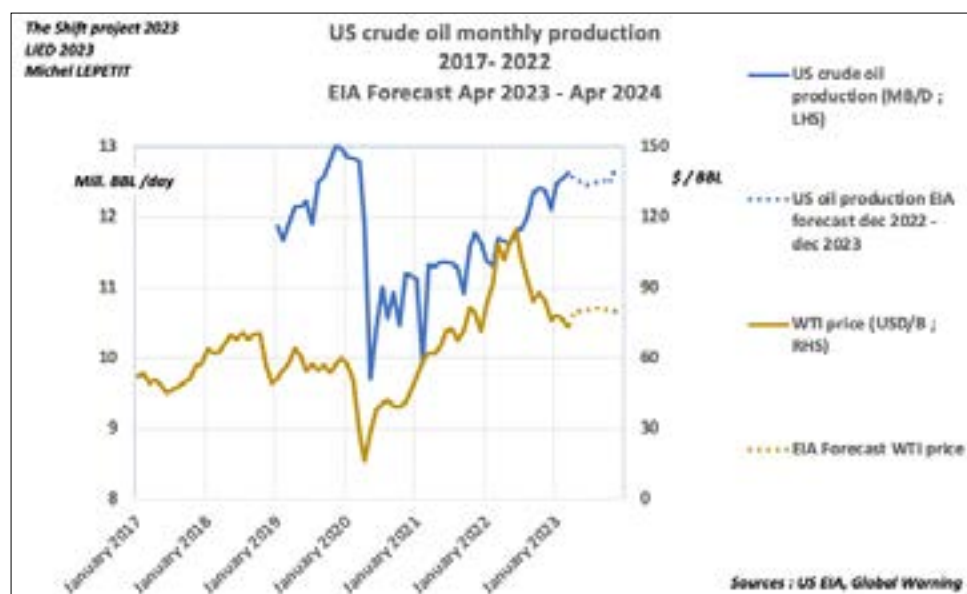
<sup>2</sup> En anglais "shale oil". Les spécialistes parlent généralement de "Light Tight Oil" (LTO) : pétrole de roche-mère ; ou pétrole de réservoir compact. On parle de même de "Tight gas" : gaz de roche-mère ; ou gaz de réservoir compact.

<sup>3</sup> Lepetit M. (2023a), « Histoire des limites de capacités productives de l'Arabie Saoudite », 7 avril 2023, repéré à <https://www.linkedin.com/pulse/le-pic-petrolier-mondial-est-advenu-en-novembre-2018-michel-lepetit/?trackingId=C2KkZ1%2B5WDTxX74WspuP%2FA%3D%3D>





Graphique 1 : Évolutions trimestrielles des prix du pétrole et du gaz, du capital estimé investi en exploration et production d'hydrocarbures (CAPEX : CAPital Expenditure) et de la production de pétrole aux États-Unis de 2001 à 2022 (Sources : Fred, US EIA, US BEA, Global Warning estimates).



Graphique 2 : Production mensuelle de pétrole brut aux États-Unis de 2017 à 2022 et prévision de l'EIA pour avril 2023 à avril 2024 (Sources : US EIA, Global Warning).

tionnel ou non conventionnel<sup>4</sup>, est probablement passé. En effet, constatant le fort déclin naturel des productions des gisements de pétrole conventionnel ; et un déclin naturel beaucoup plus fort des puits de pétrole de schiste ; constatant la médiocrité des découvertes de gisements d'hydrocarbures depuis vingt ans et en

particulier de pétrole (Blaizot, 2023)<sup>5</sup>, on peut faire le pari qu'il n'y aura pas de nouveau relais de croissance

<sup>4</sup> Autre pétrole non conventionnel : le pétrole produit à partir des sables bitumineux, essentiellement au Canada (3,3 MB/J en 2021 – voir Alberta – Oil sands facts and statistics, repéré à <https://www.alberta.ca/oil-sands-facts-and-statistics.aspx>).

<sup>5</sup> Blaizot M. (2023), "Two decades of conventional O&G discoveries - The main discoveries in 2022", ASPO, avril 2023, repéré à <https://aspo-france.files.wordpress.com/2023/04/exploration-results-aspo-april-2023-mbl.pdf>. Voir notamment les découvertes en Guyana, exception qui confirme la règle, avec 350 kB/J fin 2022, et pourraient produire 1 MB/J en 2020.



mondiale du pétrole brut (Rech, 2021)<sup>6</sup> : le temps des miracles pétroliers serait passé.

Un tel pronostic audacieux est risqué car il a déjà été posé à tort par certains au début du siècle et nécessite de s'appuyer sur une analyse historique de la situation des géants de l'extraction des hydrocarbures comme la Russie (Lepetit, 2023b)<sup>7</sup> et l'Arabie Saoudite (Lepetit, 2023a). On étudie ici le troisième géant mondial, son miraculeux pétrole de schiste, ses causes et ses limites.

## Le schiste avant 2008

L'intérêt porté aux États-Unis pour les réserves de gaz dit « gaz de schiste », apparut dès la fin des années 1960, avant même le premier choc pétrolier. Sujet stratégique pour l'Amérique aujourd'hui oublié – et auquel fait écho la question actuelle pour l'Europe de son approvisionnement en gaz (Rech *et al.*, 2022)<sup>8</sup> – le pic de production de gaz conventionnel américain remonte au début des années 1970 (US Senate, 1969)<sup>9</sup>. L'accès à de nouvelles ressources nationales était un enjeu crucial pour le gaz naturel, puisque le recours aux importations par voie maritime était encore plus limité qu'aujourd'hui. Le secours du gaz naturel liquéfié était alors expérimental et très coûteux.

Des commissions se réunirent aux États-Unis qui évaluèrent l'ensemble des ressources en hydrocarbures exploitables, dont le gaz issu de la gazéification du charbon ; ou l'exploitation du kérogène du Colorado. Parmi les ressources envisageables figuraient les gisements de gaz emprisonné dans des réservoirs géologiques compacts, « non conventionnels », présents en grandes quantités dans le sous-sol de vastes régions des États-Unis. Pour libérer ce gaz, il fallait dès l'abord « fracturer » la roche, à la différence des réservoirs conventionnels, qu'on ne fracture – éventuellement – que dans un deuxième temps, pour améliorer le taux de récupération.

Pour ce pétrole difficile à extraire de la roche dans laquelle il est piégé du fait de sa faible perméabilité, l'utilisation de la fracturation nucléaire fut envisagée, dès les années 1960. La crise de 1973 stimula la créativité des chercheurs, des ingénieurs et des économistes américains (Oil & Gas Journal, 1974)<sup>10</sup>. La *Federal Power Commission* (FPC) fut mobilisée, le gaz naturel contribuant largement à la production d'électricité du pays (FPC, 1975)<sup>11</sup>.

Des scénarios prospectifs techniques et leur évaluation économique furent minutieusement étudiés par le département de l'énergie américain dès 1976 (DOE, 1995)<sup>12</sup> en relation avec l'industrie pétrolière pour extraire ces ressources, avec deux grandes options retenues : la fracturation nucléaire et la fracturation hydraulique massive. La première voie technique donna lieu à des tests *in situ* en 1967 suivis d'études (Nixon, 1971)<sup>13</sup> mais s'avéra sans possible mise en œuvre opérationnelle. La France allait elle-même s'y intéresser à l'occasion de test d'explosions nucléaires dans le Sahara (Delort, 1970)<sup>14</sup>.

La seconde voie, la fracturation hydraulique massive, apparut plus prometteuse, s'appuyant sur la technique largement maîtrisée de la fracturation. Elle était déjà souvent mise en œuvre pour améliorer le taux de récupération sur les gisements conventionnels d'hydrocarbures matures aux États-Unis. La R&D allait permettre de l'adapter à la nature de la roche mère qui piège le « gaz de schiste » et de la perfectionner. À cette époque, les forages restaient verticaux, même si des progrès furent faits au milieu des années 1980 dans la maîtrise du forage « directionnel ».

Travaux soutenus par l'État fédéral, études et tests, évaluations économiques se succédèrent à partir du milieu des années 1970 pour extraire ces ressources. La crise du gaz américain du début de la décennie 2000 (Darley, 2004)<sup>15</sup> accompagnée d'une forte hausse des prix locaux (voir le Graphique 1), et l'avènement

<sup>6</sup> Rech. O., Blaizot M. & Lehner A. (2021), « Approvisionnement pétrolier futur de l'Union européenne - État des réserves et perspectives de production des principaux pays fournisseurs », The Shift Project, mai 2021, repéré à [https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2021/05/approvisionnement-petrolier-futur-de-lUE\\_shift-project\\_mai-2021\\_rapport-complet.pdf](https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2021/05/approvisionnement-petrolier-futur-de-lUE_shift-project_mai-2021_rapport-complet.pdf)

Cette étude focalisée sur l'approvisionnement de l'Europe, analyse notamment la Russie et l'Arabie Saoudite.

<sup>7</sup> Lepetit M. (2023b), « CIA 1977 : la crise imminente du pétrole russe et ses conséquences mondiales », 9 février 2023, repéré à <https://www.linkedin.com/pulse/cia-1977-la-crise-imminente-du-petrole-russe-et-ses-michel-lepetit/?trackingId=SKOEWxSG3YucybrGCB3i3Q%3D%3D>

<sup>8</sup> Rech. O. *et al.* (2022), « Gaz naturel : quels risques pour l'approvisionnement de l'Union européenne ? 2025, 2030 et au-delà », The Shift Project, 6 décembre 2022, repéré à <https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2022/12/Gaz-naturel-risques-approvisionnement-UE-The-Shift-Project-pour-DGRIS-Dec-22.pdf>

<sup>9</sup> US Senate (1969), Hearings by the Committee on Interior and Insular Affairs, US Senate, Subcommittee on Minerals, Materials and Fuels - Natural Gas Supply Study, November 13 and 14, 1969.

<sup>10</sup> Oil & Gas Journal (1974), Energy pinch spurs research in Rockies, February 11, 1974, "Tristate conference hears plan to compare massive hydraulic fracturing with nuclear stimulation of tight gas sands in Piceance basin. (...)".

<sup>11</sup> FPC (1975), The national gas survey – Federal Power Commission, Volumineux et extraordinaire rapport sur les ressources de gaz naturel aux États-Unis. Voir : Vol. I – Chapter 9 : "Future Domestic National Gas Supplies".

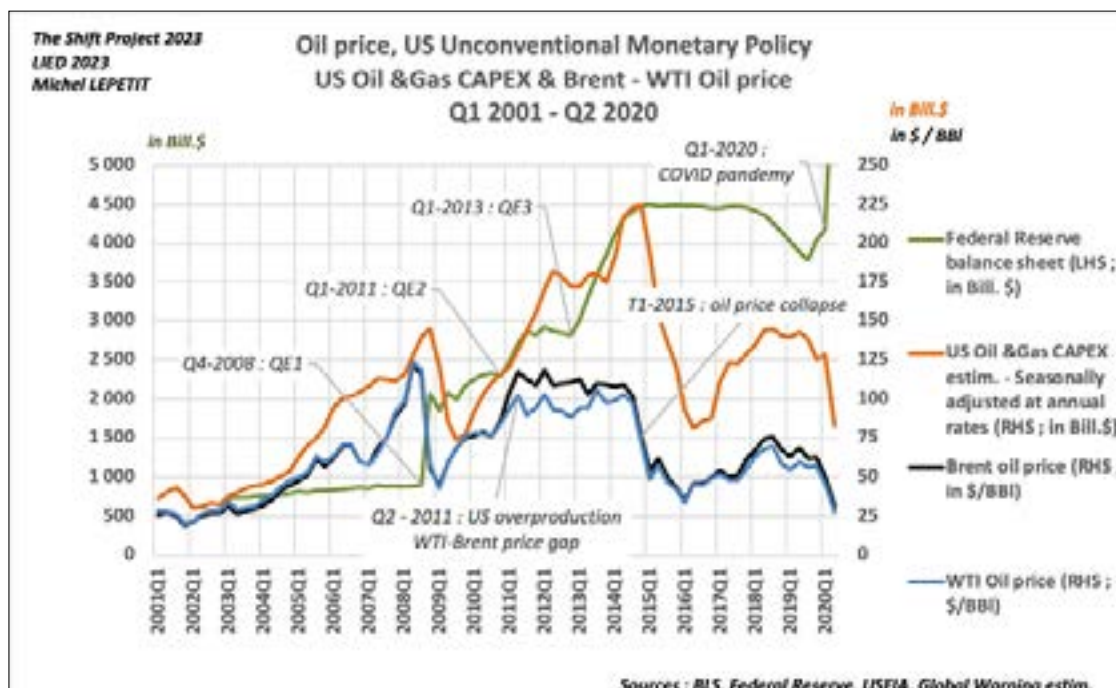
<sup>12</sup> DOE (1995), "DOE's Unconventional Gas Research Programs 1976-1995", US Department of the Interior, Minerals Management Service, Gulf of Mexico OCS Region, 1995, repéré à [https://geographic.org/unconventional\\_gas\\_research/eastern\\_gas.html](https://geographic.org/unconventional_gas_research/eastern_gas.html)

<sup>13</sup> Nixon (1971), « Discours sur l'énergie au Congrès », juin 1971, repéré à <https://www.presidency.ucsb.edu/documents/special-message-the-congress-energy-resources>

"(...) Progress in nuclear stimulation experiments which seek to produce natural gas from tight geologic formations which cannot presently be utilized in ways which are economically and environmentally acceptable. (...)".

<sup>14</sup> Delort F. & Supiot F. (1970), « Productivité des gisements d'hydrocarbures stimulés avec des explosions nucléaires », Rapport CEA-R-3968, CEA, repéré à [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/01/002/1002811.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/01/002/1002811.pdf)

<sup>15</sup> Darley J. & Heinberg R. (2006), High Noon for Natural Gas: The New Energy Crisis, Chelsea Green Publishing Co, 2006.



Graphique 3 : Prix du pétrole et politique monétaire non conventionnelle aux États-Unis du premier trimestre 2001 au deuxième trimestre 2020 (Sources : BLS, Federal Reserve, USEIA, Global Warming estimates).

du forage horizontal, sur des distances de plus en plus grandes, laissèrent enfin envisager un accès économiquement rationnel au gaz de schiste. Malgré les progrès techniques, la mise en exploitation de cette ressource restait peu rentable, du fait des taux de déplétion des puits, inconvénient majeur connu dès les années 1970 (il était alors estimé à 22 % ; il est plus élevé en 2023). Ce taux de déclin est en effet sans commune mesure avec celui d'un hydrocarbure « conventionnel » – gaz ou pétrole –, où il est de l'ordre de 3 à 5 % par année. En 2023, l'*International Energy Forum* estime que la production de pétrole de schiste qui s'élevait à 6 MB/J en 2022, déclinerait naturellement, en l'absence d'investissements, à 2 MB/J en 2027 ; et à 1 MB/J en 2030. Soit - 80 % (IEF & S&P, 2023)<sup>16</sup>.

### Politique monétaire et pétrole – de 2008 à 2020 : la soif de rêves

Le « miracle » du pétrole de schiste eut deux causes principales. La première fut bien le progrès technique, indéniable, avec la fracturation hydraulique massive et le forage horizontal. Cette cause, très médiatisée, a été largement mythifiée, séduisant nombre de thuriféraires de la libre entreprise américaine, et de son génie technique créatif. La seconde cause fut financière, qui expli-

qua l'exubérance d'investissements dans cette activité extractive risquée. Elle est moins connue, même si tous les experts de l'industrie et les analystes financiers constatèrent mois après mois, années après années, le caractère irrationnel d'un investissement massif dans le « schiste », sans jamais aucun retour pour les investisseurs (WSJ, 2014 ; Deloitte, 2020)<sup>17</sup>.

Du fait des taux historiquement bas pilotés par les banques centrales et au premier chef la *Federal Reserve*, la recherche frénétique de rendement par les investisseurs a marqué la décennie 2010. Cette proximité de la ZLB (*“Zero Lower Bound”*) : des taux de rendement nuls pour les emprunts d'État, les plus

<sup>17</sup> WSJ (2014), “The new winners and losers in America's shale boom”, *The Wall Street Journal*, April 20, 2014, repéré à <https://www.wsj.com/articles/shale-boom-winners-quality-not-quantity-of-sites-1398038202>

“(…) While these newly public companies are spending more than they make, they say they offer investors fast growth and are spending necessary money to drill wells and lay pipes that will generate positive cash flow in the next few years. (…).”

Deloitte (2020), “The great compression - Implications of Covid-19 for the US shale industry – Navigating the great compression in shale oil production”, Deloitte, repéré à <https://www2.deloitte.com/us/en/pages/energy-and-resources/articles/covid-19-implications-for-us-shale-industry.html>

“(…) The year 2020 marks the 15-year anniversary of the US shale boom, which heralded an era of US energy independence and more than doubled tight oil production over the past five to six years. However, beneath this phenomenal growth, the reality is that the shale boom peaked without making money for the industry in aggregate. In fact, the US shale industry registered net negative free cash flows of \$300 billion, impaired more than \$450 billion of invested capital, and saw more than 190 bankruptcies since 2010 (figure 1) (…).”

<sup>16</sup> IEF & S&P (2023), “Upstream oil and gas investment outlook 2023”, A report by the International Energy Forum and S&P Global Commodity Insights, Feb. 2023, repéré à <https://www.ief.org/focus/ief-reports/upstream-investment-report-2023>

sûrs) a poussé les investisseurs à prendre des risques inconsidérés. Cette politique a « fabriqué » pour la décennie suivante des classes d'actifs vulnérables. Qu'on pense au financement de l'immobilier commercial et des bureaux (EBA, 2022)<sup>18</sup> ; ou encore, au marché – plus modeste – des obligations « catastrophe » et notamment climatiques, en crise en 2023. Le financement des hydrocarbures de schiste furent de ces investissements-là pendant les années 2010 : mal compris, séduisants, risqués. Le modèle d'exploitation de ces gisements géologiquement complexes était sans précédent et la promesse faite aux investisseurs de progrès techniques à venir était en permanence renouvelée.

Un modèle simple permet de révéler l'impact des vagues successives « d'assouplissement quantitatif » massifs de la *Federal Reserve* dans la décennie 2010 (Lepetit, 2020)<sup>19</sup>. Mettant au plancher les taux des obligations d'État, taux dits « sans risque », la Fed poussa les investisseurs américains à l'indiscipline vers des investissements spéculatifs, comme le gaz et le pétrole de schiste. Une sorte d'« exubérance irrationnelle » s'empara alors des marchés financiers, dont témoigne le Graphique 3 : les montants investis aux États-Unis (*CAPEX : CAPital EXpenditure*) s'affranchirent du lien historique avec les seuls prix du pétrole<sup>20</sup>.

Cette « indiscipline » du marché aura été lourde de conséquences. Sur la décennie 2010-2019, ce sont près de 900 milliards de dollars qui ont été investis dans l'industrie américaine du schiste, risquée, sans retour financier. Ce surinvestissement frénétique dans l'industrie pétrolière se matérialisa sous des formes extrêmement variées, en capital, en garantie ou en dette<sup>21</sup>, et entraîna même une surproduction de pétrole. Cette surproduction localisée d'abord aux États-Unis début 2011 fit bientôt pression sur les prix mondiaux (voir le Graphique 3)<sup>22</sup>. Elle eut un caractère fortement désinflationniste, compris par peu d'économistes (Stroebel, 2020 ;

Artus, 2021 ; Lepetit, 2022)<sup>23</sup>. La fin du « miracle » du schiste à la fin de la décennie 2010 a ainsi contribué à faire naître le « mystère » de l'inflation dans la décennie 2020. Cette décennie 2010 exubérante et sans inflation, son explication monétaire fournit un éclairage utile sur la crise inflationniste des années 2020 post-Covid et sur l'incompréhension générale qui entoure la résurgence globale actuelle de l'inflation.

## La fin du conte de fées et le retour à la discipline après 2020

Les analystes se sont régulièrement interrogés pendant les années 2010, mais les investisseurs restaient toujours attirés par cette promesse de rendement futur (WSJ, 2014 ; Domanski D. *et al.*, 2015<sup>24</sup> ; Deloitte, 2020). La crise de la Covid-19 et l'effondrement momentané des besoins de mobilité dans le monde entraînèrent une chute brutale de la demande mondiale de pétrole et par conséquent du prix d'un carburant qui ne peut être surstocké. Le lundi 20 avril 2020, le cours du WTI devint même négatif et il s'ensuivit une nouvelle vague de faillites dans l'industrie du schiste. Ce fut la fin du rêve.

La remontée des taux d'intérêt post-Covid a fait oublier – probablement pour longtemps – les temps glorieux de l'abondance de capitaux et de l'insouciance des investisseurs des années 2010 (EIA, 2022)<sup>25</sup>. Début 2021, le retour à une discipline stricte chez les investisseurs, la recherche rationnelle de rentabilité, mit pratiquement fin à une décennie de faillites chroniques dans l'industrie du schiste. Le cabinet d'avocats Haynes & Boone, expert du secteur, avait développé un tableau de bord trimestriel des faillites de l'industrie du schiste, à partir du début 2015. Il publia un dernier observatoire en février 2022, expliquant que dorénavant, celui-ci n'avait plus de raisons d'être. En sept ans, pour l'industrie pétrolière américaine, ce furent 321 milliards de dollars de dettes, de 274 sociétés pétrolières essentiellement

<sup>18</sup> EBA (2022), "Banks exposed to downside risks as residential real estate markets get overheated – Residential real estate exposures of EU Banks: risks and mitigants", rapport de l'Autorité bancaire européenne, 10 October 2022, repéré à <https://www.eba.europa.eu/banks-exposed-downside-risks-residential-real-estate-markets-get-overheated-eba-report-finds>

<sup>19</sup> Lepetit M (2020), « Politique monétaire non conventionnelle et pétrole non conventionnel sont-ils liés ? », The Shift Projet, rapport du 26/11/20, repéré à <https://theshiftproject.org/article/politique-monetaire-neutralite-carbone/>

<sup>20</sup> Voir aussi les compléments de cet article, mis en ligne à l'adresse <https://www.linkedin.com/in/michel-lepetit/>

<sup>21</sup> Marché actions cotées (et notamment *via* la gestion passive) ; Marché obligataire (dont le marché à haut rendement ("High Yield") (et notamment *via* la gestion passive)) ; Prêts bancaires (notamment les "Reserve-based loans") ; Prêts de fonds d'investissement (notamment les "Distress funds") ; Capital-risque et actions non-cotées ; "Hedge funds" ; Fusions et acquisitions ; "Volumetric production payment" ; DrillCos ("Drilling joint ventures")...

<sup>22</sup> Le décalage d'ampleur historique entre le prix du baril au Texas (WTI) et le prix du baril de Brent (marché international) reflète la surproduction locale ainsi que l'engorgement des moyens de transports.

<sup>23</sup> Stroebel F. *et al.* (2020), "A Structural investigation of quantitative easing", Deutsche Bundesbank Discussion Paper 2020, repéré à <https://www.bundesbank.de/en/publications/research/discussion-papers/a-structural-investigation-of-quantitative-easing-856942>

Artus P. (2021), « Le retour à l'économie des années 1970 », *Les Échos* du 08/04/2021, repéré à <https://www.lesechos.fr/idees-debats/cercle/opinion-le-retour-a-leconomie-des-annees-1970-1305380>

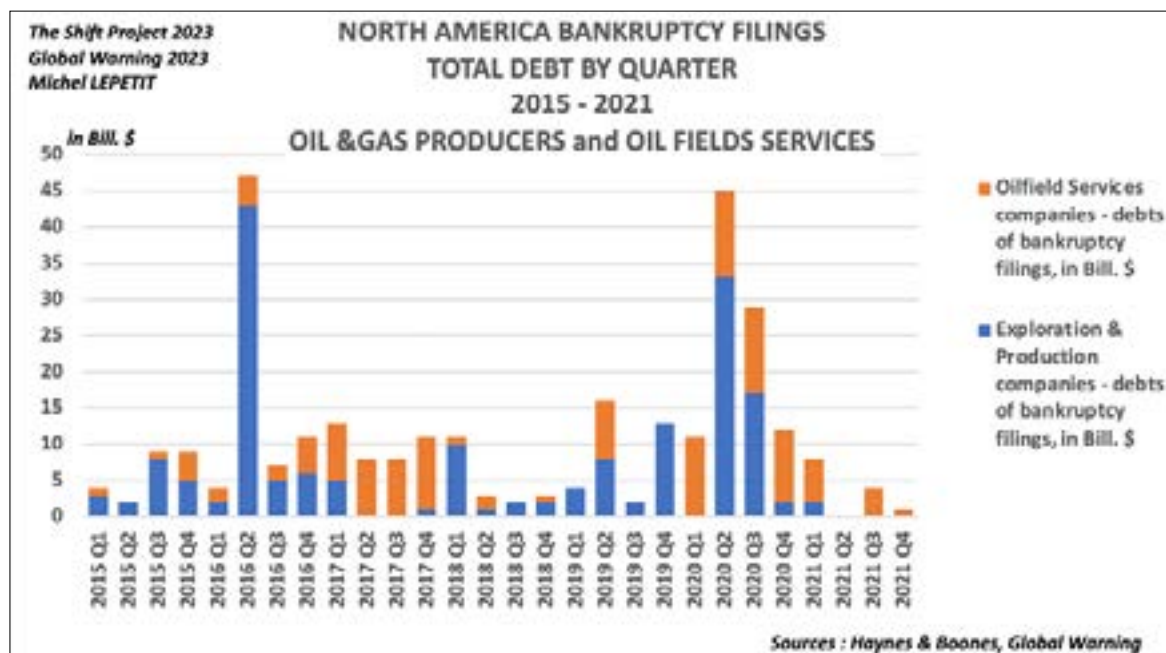
Lepetit M. (2022), « Énergie et inflation », Institutionnels, lettre d'information n°67 de l'AF2I, Octobre 2022, repéré à <https://www.af2i.org/publications/>

<sup>24</sup> Domanski D. *et al.* (2015), "Oil and debt", *BIS Quarterly Review*, March 2015, repéré à [https://www.bis.org/publ/qtrpdf/r\\_qt1503f.htm](https://www.bis.org/publ/qtrpdf/r_qt1503f.htm)

<sup>25</sup> EIA (2022), "US EIA - Annual Energy Outlook", EIA March 3, 2022, repéré à <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/production/sub-topic-01.php>

"(...) **Producers are more dependent on capital from cash flow.** The oil and natural gas industry was already headed toward relying on capital from cash flow instead of debt and equity. Covid-19 has accelerated this trend, leaving producers more dependent on internal sources of cash flow because outside funding sources are less available or require higher rates of return.(...)"





Graphique 4 : Faillites et dettes trimestrielles totales des producteurs de pétrole et de gaz et de services pétroliers en Amérique du nord de 2015 à 2021 (Sources : Haynes & Boone, Global Warming).

texanes mises en faillite<sup>26</sup>, qui ont été restructurées, souvent annulées (Haynes & Boone, 2022)<sup>27</sup>.

Le Graphique 4 reconstitué à partir des derniers rapports publiés représente les volumes trimestriels entre 2015 et 2021, des dettes concernées par ces faillites, pour les sociétés d'exploration et de production, ainsi que pour les sociétés de services, en milliards de dollars. Cette chronique montre d'une part la vague de faillites du printemps 2016 qui suivit une forte baisse des prix, due notamment à la surproduction des pétroliers américains ; d'autre part la vague de faillites post-Covid puis son tarissement.

## Le pic historique de 2018 du pétrole brut mondial

Le marché pétrolier américain est donc redevenu « discipliné » depuis 2020. Le marché pétrolier mondial, redevenu ainsi « normal », est par conséquent confronté aux mêmes contraintes que dans la décennie

2000. L'indigence des capacités productives excédentaires inutilisées en pétrole conventionnel d'une part, et le rythme soutenu du déclin des puits à maturité d'autre part, devraient entraîner de graves conséquences.

Pour faire face au déclin des puits en activité, l'IEF avec d'autres experts (IEF & S&P, 2023) estime que les investissements en exploration et production d'hydrocarbure devront rester soutenus, ne serait-ce que pour maintenir la production. Sans investissement, par rapport à 2022, la production « conventionnelle » des pays non membres de l'OPEP déclinera selon l'IEF de 5 MB/J en 2027 ; et de 8 MB/J en 2030.

Le pic mensuel de la production mondiale de pétrole brut (84,5 MB/J) atteint en novembre 2018 sera en conséquence difficilement égalé. Selon les chiffres de l'US EIA, la baisse de production entre novembre 2018 et novembre 2022 serait déjà de l'ordre de 2,2 MB/J. Certes, même si la production de pétrole brut stagne dorénavant voire diminue, la production d'hydrocarbures liquides – dont fait partie le pétrole brut – pourrait continuer de progresser, et dépasser éventuellement les volumes atteints fin 2018. Pour autant, de même que le gaz n'est pas du liquide, les liquides de gaz (propane et butane) ne sont pas du pétrole brut.<sup>28</sup>

L'Arabie Saoudite, et derrière elle l'OPEP+, donc la Russie, ne semble pas encline à fournir un effort substantiel pour endiguer le déclin structurel de la production mondiale de brut (Lepetit, 2023a). La Russie en guerre ne le pourra pas plus (Lepetit, 2023b). Les États-Unis, objet du présent article, ne réitéreront pas leur miracle.

<sup>26</sup> On parle de «chapter 11». Pour les entreprises du schiste, parfois récidiviste, on parla même de «chapter 22».

<sup>27</sup> Haynes & Boone (2022), «Oil patch Bankruptcy Monitor», Final Report, January 31, 2022, repéré à [https://www.haynes-boone.com/-/media/project/haynesboone/haynesboone/pdfs/energy\\_bankruptcy\\_reports/oil\\_patch\\_bankruptcy\\_monitor.pdf?rev=e57d3129b7504ea190df5d33dbacae44&hash=F461E-4FE13446BE821B8AE9080C349E6](https://www.haynes-boone.com/-/media/project/haynesboone/haynesboone/pdfs/energy_bankruptcy_reports/oil_patch_bankruptcy_monitor.pdf?rev=e57d3129b7504ea190df5d33dbacae44&hash=F461E-4FE13446BE821B8AE9080C349E6)

« (...) En vérité, nous ne nous attendions pas à suivre les faillites de sociétés pétrolières et gazières aussi longtemps, mais le niveau sans précédent et soutenu de l'activité de déclaration de faillite depuis 2015 – impliquant un total de plus de 321 milliards de dollars de dettes garanties et non garanties – a exigé notre vigilance continue (...) Heureusement pour nos clients producteurs de pétrole et de gaz et nos investisseurs, le raz-de-marée de déclarations a finalement reflué à un point où nous pouvons cesser ces rapports sur les faillites (...) ».

<sup>28</sup> Il s'ensuit une décote de ces produits, de l'ordre de 23 % aux États-Unis sur la décennie 2010. US EIA - Hydrocarbon gas liquids explained - Prices for hydrocarbon gas liquids, repéré à <https://www.eia.gov/energyexplained/hydrocarbon-gas-liquids/prices-for-hydrocarbon-gas-liquids.php>

La « discipline » retrouvée du pétrole de schiste américain permet en effet aux grands producteurs comme l'Arabie Saoudite, d'arbitrer des réductions de production. Consciente de la force de la demande mondiale, sans crainte de voir un autre acteur se substituer à eux (comme les producteurs indépendants américains dans la période d'exubérance des années 2010), l'Arabie Saoudite peut orchestrer une baisse de production de l'OPEP+. La modeste baisse des volumes exportés est alors largement compensée par la significative hausse des prix, seule capable d'effacer la demande de pétrole correspondant à cette baisse. On est en train de redécouvrir la faible élasticité de la demande de pétrole à son prix, hors récession économique brutale.

## Le pic de productivité du schiste ?

Depuis le début de 2020 et la vague terminale de faillites qui a frappé l'industrie du schiste, le rêve s'est évanoui. Les nouvelles vagues de création monétaire qui ont accompagné l'irruption de la pandémie ne déclenchèrent plus d'exubérance chez les investisseurs, du moins pour notre secteur d'activité. En l'absence de dopant monétaire, analystes et observateurs ont relevé la – toute relative (voir le Graphique 1 de la page 8) – modération de l'effort d'investissement de l'industrie du schiste américain. La discipline financière signifia un retour aux fondamentaux, à la géologie, à la physique. L'extraction de ces hydrocarbures reste complexe, le taux de déclin des puits est toujours très élevé.

Pire, sans son dopant des années 2010 qui pouvait faire illusion, l'activité extractive a laissé apparaître les premiers signes de temps plus difficiles pour le schiste : des gisements plus matures, moins productifs. Ces auspices d'un potentiel déclin à venir ne sont pas sans rappeler les mêmes difficultés rencontrées par le pétrole conventionnel, dans un passé proche. Certes, le génie technique américain a permis chaque année d'augmenter la longueur des forages horizontaux (de 4 000 pieds en moyenne en 2007 à 9 000 pieds en 2022), semblant gagner ainsi régulièrement en efficacité et en productivité. Cependant, les meilleurs gisements de schiste aux États-Unis ont été évidemment exploités les premiers, notamment dans la décennie 2010 de l'exubérance.

Dès mars 2022, l'US EIA alerta sur l'avenir du pétrole de schiste, et sur les incertitudes concernant l'ampleur des réserves exploitables techniquement, mais aussi – c'est implicite – économiquement, dans le sous-sol du pays (EIA, 2022)<sup>29</sup>.

En avril 2022, la Banque mondiale signalait les coûts élevés de la future production de schiste aux États-

Unis, masqués par les turbulences de la pandémie (Banque mondiale, 2022)<sup>30</sup>.

Fin 2022, la Reserve fédérale de Dallas révéla cette évolution préoccupante depuis quelques mois via ses enquêtes trimestrielles. Ainsi, un panel d'entreprises pétrolières fut interrogé au dernier trimestre 2022 sur le principal facteur freinant la croissance de leur production : 27 % des 90 répondants pointèrent « la base d'actifs [pétroliers] arrivant à maturité » (Fed, 2022a)<sup>31</sup>.

En janvier 2023, un article du *Financial Times* très documenté annonça la fin du « shale boom » (FT, 2023a)<sup>32</sup>.

En mars 2023, des voix influentes s'élevèrent lors d'une conférence publique au Texas pour avertir que les beaux jours du schiste étaient probablement derrière nous (WSJ, 2023 ; FT, 2023)<sup>33</sup>.

<sup>30</sup> Banque mondiale (2022), «Commodity Markets Outlook», World Bank, April 2022, repéré à <https://openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/da0196b9-6f9c-5d28-b77c-31a936d5098f/content>

«(...) In the United States, the IEA estimates an additional production increase of 0.5 mb/d could be achieved beyond the expected increase of 1.3 mb/d. However, this would lead to major production cost increases and push capacity to its limits. Amid recent low levels of new drilling, companies have been increasing production by bringing online «drilled but uncompleted» (DUC) wells. By fracking these wells, companies have been able to bring onstream new production without incurring the additional cost of drilling new wells. However, as a result the stockpile of DUCs has fallen sharply, reducing the potential for this channel to allow companies to easily increase production in the future. Further increases in production will require additional labor and other resources (such as sand) and will also take longer to come onstream. (...)»

<sup>31</sup> Fed (2022a), «Dallas Fed Energy Survey - Oil and gas expansion still solid; cost increases moderate, supply-chain delays persist», Federal Reserve Bank of Dallas, Dec. 12 2022, repéré à <https://www.dallasfed.org/research/surveys/des/2022/2204>

NB : Pour la première fois, cette possibilité de réponse était proposée derrière « l'inflation des coûts et/ou les goulets d'étranglement » (32 %) et devant « la disponibilité des capitaux » (16 %). Voir aussi les réponses à la question posée dans le Dallas Fed Survey du second trimestre 2022 : «Which of the following is the primary reason driving uncertainty regarding your firm's outlook?»

<sup>32</sup> FT (2023a), «What the end of the US shale revolution would mean for the world - Fracking catapulted America to the top of the energy hierarchy, but low yields and a lack of reinvestment threaten that position», *Financial Times*, January 16, 2023, repéré à [https://www.ft.com/content/60747b3b-e6ea-47c0-938d-af515816d0f1?accessToken=zWAAAYW--fa0kc9gdHs75u-pHwNOTja9RWBbQ8Q.MEYCIQDr0p7KBdzpXJ4A6Efd-mix1hbbhWf36\\_5CtkQcN1HnWdglhAOdxIHJ44IOAsVSYx-QQIQPUM393-ZftGr8asPqQbFXzX&sharetype=gift&token=4cf61103-844e-4d11-80bb-3170ed5e23a0](https://www.ft.com/content/60747b3b-e6ea-47c0-938d-af515816d0f1?accessToken=zWAAAYW--fa0kc9gdHs75u-pHwNOTja9RWBbQ8Q.MEYCIQDr0p7KBdzpXJ4A6Efd-mix1hbbhWf36_5CtkQcN1HnWdglhAOdxIHJ44IOAsVSYx-QQIQPUM393-ZftGr8asPqQbFXzX&sharetype=gift&token=4cf61103-844e-4d11-80bb-3170ed5e23a0)

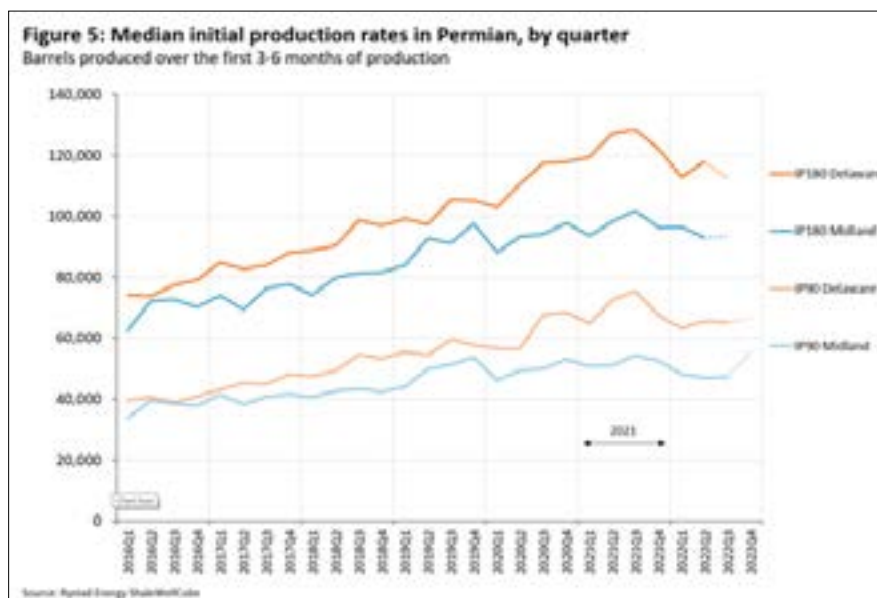
«(...) But that transformative age is drawing to a close, say analysts, with unpredictable consequences. High costs and labour shortages now bedevil the shale patch. Wall Street wants profits paid back to investors, not reinvested in new rigs. Even with crude prices at \$80 a barrel, a price far above the long-term average, shale producers still fear to splurge capital. To top it off, new wells are yielding less oil. (...)»

<sup>33</sup> WSJ (2023), «U.S. Shale Boom Shows Signs of Peaking as Big Oil Wells Disappear - America's biggest oil gushers are shrinking, evidence that companies have drilled through much of their best wells», *The Wall Street Journal*, March 8, 2023, repéré à [https://www.wsj.com/articles/u-s-shale-boom-shows-signs-of-peaking-as-big-oil-wells-disappear-2ade0f3f?mod=hp\\_lead\\_pos1](https://www.wsj.com/articles/u-s-shale-boom-shows-signs-of-peaking-as-big-oil-wells-disappear-2ade0f3f?mod=hp_lead_pos1)

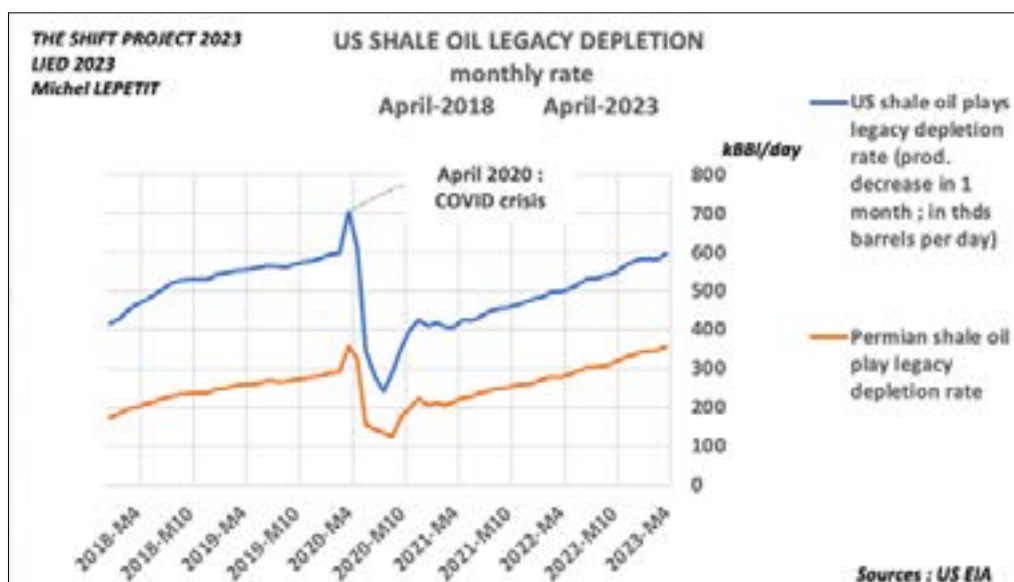
FT (2023b), «Oil executives warn of higher prices now that Opec is back 'in charge'», *Financial Times*, March 8, 2023, repéré à <https://www.ft.com/content/f1674a6e-39ae-4abb-ae2a-40febf58d6b9>

<sup>29</sup> EIA (2022), «US EIA - Annual Energy Outlook», EIA March 3, 2022, repéré à <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/production/subtopic-01.php>

«(...) Tight oil is primarily driving the growth in the oil production outlook, followed by offshore resources. (...). However, estimates of technically recoverable tight or shale crude oil and natural gas resources are uncertain. (...)»



Graphique 5 : Taux médians de production dans le bassin du Permian, par trimestre de 2016 à 2022 (Source : Rystad).



Graphique 6 : Déclin de la production mensuelle de pétrole de schiste américain entre avril 2018 et avril 2023 (Source : US EIA).

En mars 2023, le cabinet Rystad reconnut que plusieurs indicateurs d'activité de l'industrie du schiste étaient inquiétants et que le pic de productivité dans le célèbre bassin Permien avait peut-être été atteint à la mi-2021. Le déclin de la productivité resterait toutefois modéré (Rystad, 2023 ; Graphique 5)<sup>34</sup>.

<sup>34</sup> Rystad (2023), "Evidence at odds with claims of dramatic shale productivity degradation - Talk of degradation overblown, as ample top-tier locations remain untapped", Rystad Energy Shale Whitepaper, March 31, 2023, repéré à [https://pages.rystadenergy.com/Shale\\_Productivity\\_Degradation-report-website\\_request\\_Mar2023](https://pages.rystadenergy.com/Shale_Productivity_Degradation-report-website_request_Mar2023)

"(...) Indeed, 2022 was the first year where there was some evidence of oil wells not being as productive as the year prior. There is a risk that 2021 was the year of peak productivity, but we are now entering a plateau, rather than observing precipitous declines that some fear could mark the beginning of the end of shale. (...)".

En mars 2023, la Fed de Dallas intitula son enquête du premier trimestre 2023 : « La croissance du secteur du pétrole et du gaz stagne en raison de la hausse des coûts et de la détérioration des perspectives d'avenir » (Fed, 2023)<sup>35</sup>.

Les chiffres d'activité des différents gisements de l'industrie du schiste publiés chaque mois par l'US EIA sont un témoignage des problèmes à venir, alors que

<sup>35</sup> Fed (2023), "Dallas Fed Energy Survey - Oil and gas expansion stalls amid surging costs and worsening outlooks", Federal Reserve Bank of Dallas, March 29, 2023, repéré à [https://www.dallasfed.org/research/surveys/des/2023/2301?utm\\_source=MarketingCloud&utm\\_medium=email&utm\\_campaign=23.03.29+Energy+Survey%2c+SWE+Chargers&utm\\_content=https%3a%2f%2fwww.dallasfed.org%2fresearch%2fsurveys%2fdes%2f2023%2f2301](https://www.dallasfed.org/research/surveys/des/2023/2301?utm_source=MarketingCloud&utm_medium=email&utm_campaign=23.03.29+Energy+Survey%2c+SWE+Chargers&utm_content=https%3a%2f%2fwww.dallasfed.org%2fresearch%2fsurveys%2fdes%2f2023%2f2301)



le déclin du volume de la production globale ne cesse de prendre de l'ampleur<sup>36</sup> (voir le Graphique 6 de la page précédente). En cas d'interruption de l'activité de forage, c'est une production de 600 000 barils par jour qui disparaîtrait au bout d'un mois, près de 1,2 millions de barils par jour au bout de deux mois, etc.

## Conséquences sur l'investissement impactant le climat

Le mythe d'une baisse volontaire de la demande de pétrole à l'échelle mondiale paraît révolu<sup>37</sup>. Ce mythe a participé à l'effondrement des performances de l'investissement dit « socialement responsable » (ISR), peut-être discrédité pour longtemps. Pendant la décennie 2010, la performance de larges pans de l'investissement ISR s'est nourrie de la sous-performance artificielle de l'industrie pétrolière, pénalisée par la pression déflationniste du pétrole de schiste sur les prix mondiaux du pétrole. Avec la fin du « miracle » des années 2020, le retour de la discipline financière, et donc le retour de la rentabilité financière de l'industrie pétrolière<sup>38</sup>, sonne le glas de cette surperformance de nombreux indices ISR. La remontée des taux d'intérêt a en outre sanctionné des secteurs d'activité spéculatifs comme le digital – secteur d'activité prétendument bas-carbone –, induisant ainsi une sous-performance chronique de ces indices<sup>39</sup>.

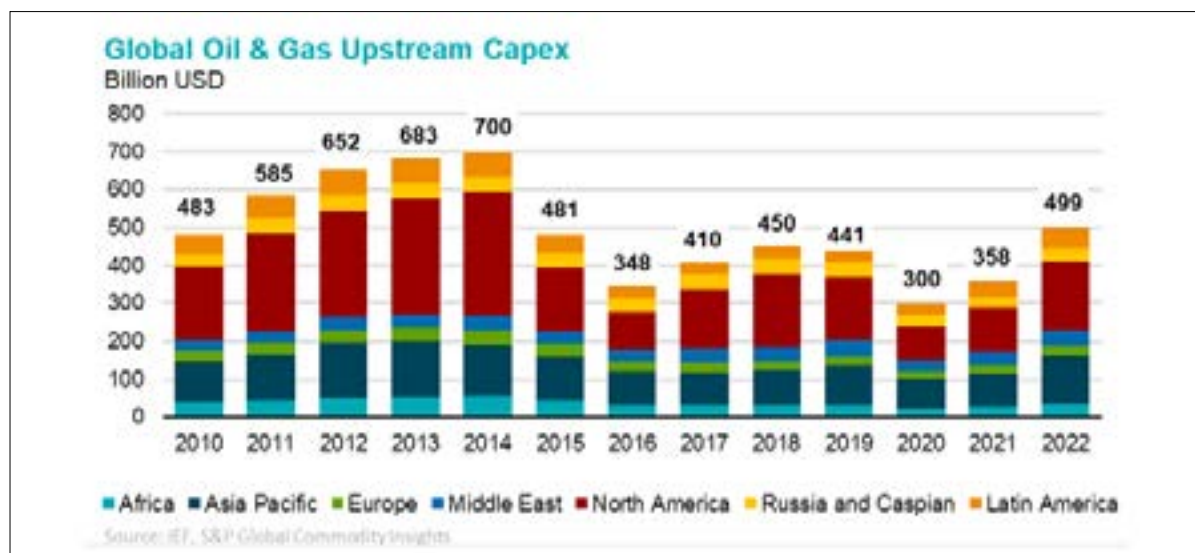
Avec une production de plus en plus contrainte géologiquement, des gisements de plus en plus matures et la médiocrité des découvertes, les prix du pétrole devraient

augmenter sur la longue durée. Le prix du baril en 2022 a déclenché des décisions d'investissements à hauteur de 499 milliards de dollars dans les hydrocarbures (IEF & S&P, 2023 ; Graphique 7)<sup>40</sup>. Montant insuffisant pour relancer la production de pétrole brut à la hausse mais suffisant pour endiguer un déclin rapide de l'offre. Ce déclin, s'il était piloté, serait pourtant nécessaire face à la contrainte climatique : il y aurait urgence en 2023 à réduire les investissements dans l'extraction d'hydrocarbures si l'on veut conserver une planète habitable.

Ce mythe « pic de la demande » mondiale de pétrole n'est pas sans rappeler le « pic de la consommation » de pétrole conçu par certains macroéconomistes pour tenter d'expliquer la crise économique des années 1970, sans recourir à l'explication par le choc énergétique. La crise de 1973 aurait été due au niveau élevé d'équipement des foyers américains à cette époque, ce suréquipement freinant alors la consommation des ménages. Ces deux « pics » mythiques de la demande de pétrole (1973 ; XXI<sup>e</sup> siècle) illustrent la capacité de la science économique à nier la réalité de la centralité de l'énergie. Dans les deux cas, les thèses ne s'appuient sur aucune démonstration explicative quantifiée.

## Le mythe de l'influence du climat

À défaut de démontrer une quelconque baisse de la demande, certains macroéconomistes ont tenté de montrer l'existence d'une contrainte des politiques climatiques sur l'offre de pétrole.



Graphique 7 : Dépenses d'investissement en amont dans le secteur du pétrole et du gaz de 2010 à 2022 (Source : US International Energy Forum).

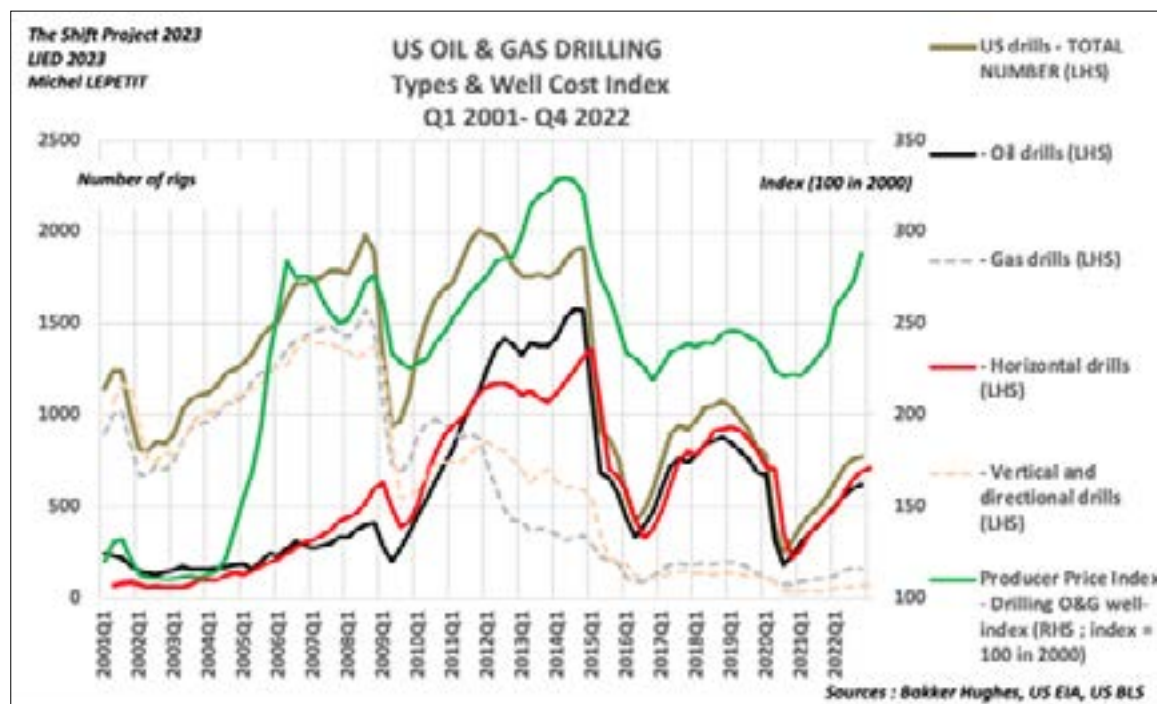
<sup>36</sup> US EIA - Drilling activity report.

<sup>37</sup> Voir toutefois les prévisions de l'AIE à l'adresse <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022/outlook-for-energy-demand>

<sup>38</sup> Compléments de cet article, mis en ligne à l'adresse <https://www.linkedin.com/in/michel-lepetit/>

<sup>39</sup> Voir aussi les compléments de cet article mis en ligne à l'adresse <https://www.linkedin.com/in/michel-lepetit/>

<sup>40</sup> IEF & S&P (2023), "Upstream oil and gas investment outlook 2023", A report by the International Energy Forum and S&P Global Commodity Insights, Feb. 2023, repéré à <https://www.ief.org/focus/ief-reports/upstream-investment-report-2023>



Graphique 8 : Forages pétroliers et gaziers aux États-Unis, indice des coûts par type de puits du premier trimestre 2001 au premier trimestre 2022 (Sources : Bakker Hughes, US EIA, US BLS).

En avril 2022, le FMI (IMF, 2022)<sup>41</sup> s'est risqué en publiant une analyse de l'hypothétique impact des politiques climatiques sur l'investissement pétrolier. Ses équipes ont cherché une inflexion qui se serait produite après 2015 – année de la COP 21 à Paris – entre prix du pétrole et montant des investissements. C'est faire grand cas de la pression sociétale sur les compagnies indépendantes américaines (Fed, 2022b)<sup>42</sup>, de la capacité des « majors » de l'industrie à s'engager sur des trajectoires d'investissement décarbonées ; et à tenir

ces engagements, comme en témoignent les perspectives d'investissements pétroliers anticipés pour 2023 (IEF & S&P, 2023).

Les économistes de la BCE (Schnabel, 2022)<sup>43</sup> et de la BRI (Karsten, 2022)<sup>44</sup> ont tenté d'expliquer le lien distendu à partir de 2000 entre prix du pétrole et investissements dans la production d'hydrocarbures. Ils ont analysé, non pas le montant des investissements dans l'exploration et la production pétrolière, mais le nombre de plateformes de forage en activité. La chose étant fort rare, il est heureux que des macro-économistes se réfèrent ainsi au monde réel, physique. Malheureusement, cette approche est biaisée car elle ne distingue pas les forages de pétrole et de gaz ; ni les forages horizontaux et verticaux. Enfin, elle ne prend pas en compte la forte inflation des coûts de production (voir le Graphique 8).

Ces tentatives d'explications par les macroéconomistes de l'atonie – toute relative – de la production récente de pétrole de schiste, en cherchant des ruptures soit

<sup>41</sup> IMF (2022), "World Economic Outlook", IMF April 2022, repéré à <https://www.imf.org/en/Publications/WEO/Issues/2022/04/19/world-economic-outlook-april-2022>

"Special feature: Market developments and the pace of fossil fuel divestment".

Voir : Commodity special feature: online – Chapter 1 Annex 1.SF.1. – A1. Estimating the price elasticity of global oil and gas investment, repéré à <https://www.imf.org/-/media/Files/Publications/WEO/2022/April/English/ch1annex.ashx>

"(...) Swings in capital expenditure are not unusual in the oil and gas industry, though. Using data from 1970 to 2019, an empirical analysis shows that oil and gas prices are the main drivers of capital expenditure (...) Fossil fuel investment followed a typical boom-bust cycle over the past decade. However, since oil and gas prices declined 50 percent between 2014 and 2016 and then recovered partially, the 40 percent decline in capital expenditure between 2014 and 2019 was deeper than the model's prediction, which suggests a 20 to 25 percent decline. While many factors could have been involved, the next section explores the role the clean energy transition may have played."

<sup>42</sup> Fed (2022b), Oil and gas expansion still solid; cost increases moderate, supply-chain delays persist, Dallas Fed Energy Survey, premier trimestre 2022, repéré à <https://www.dallasfed.org/research/surveys/des/2022/2201#tab-questions>

Question : "Which of the following is the primary reason that publicly traded oil producers are restraining growth despite high oil prices?" Réponse : ["investor pressure to maintain capital discipline": 60% ; ["Environmental, social and governance issues": 10%).

<sup>43</sup> Schnabel I. (2022), "Looking through higher energy prices? Monetary policy and the green transition", Banque centrale européenne, 8 janvier 2022, repéré à <https://www.ecb.europa.eu/press/key/date/2022/html/ecb.sp220108~0425a24eb7.en.html>

Voir la diapositive n°4 : "Oil production is responding more slowly to rising prices".

"(...) Last year's strong economic expansion, for example, was characterised by an atypically slow response of US shale oil production to rising oil prices, as such investments may no longer prove profitable to investors over the medium term – at least not to the same extent as they have done in the past, or as returns may become even more volatile (...)"

<sup>44</sup> Karsten A. (2022), "The return of inflation, BIS Geneve", April 5, 2022, repéré à <https://www.bis.org/speeches/sp220405.pdf>  
Voir le graphique n°7 : "Energy supply has been slow to respond".

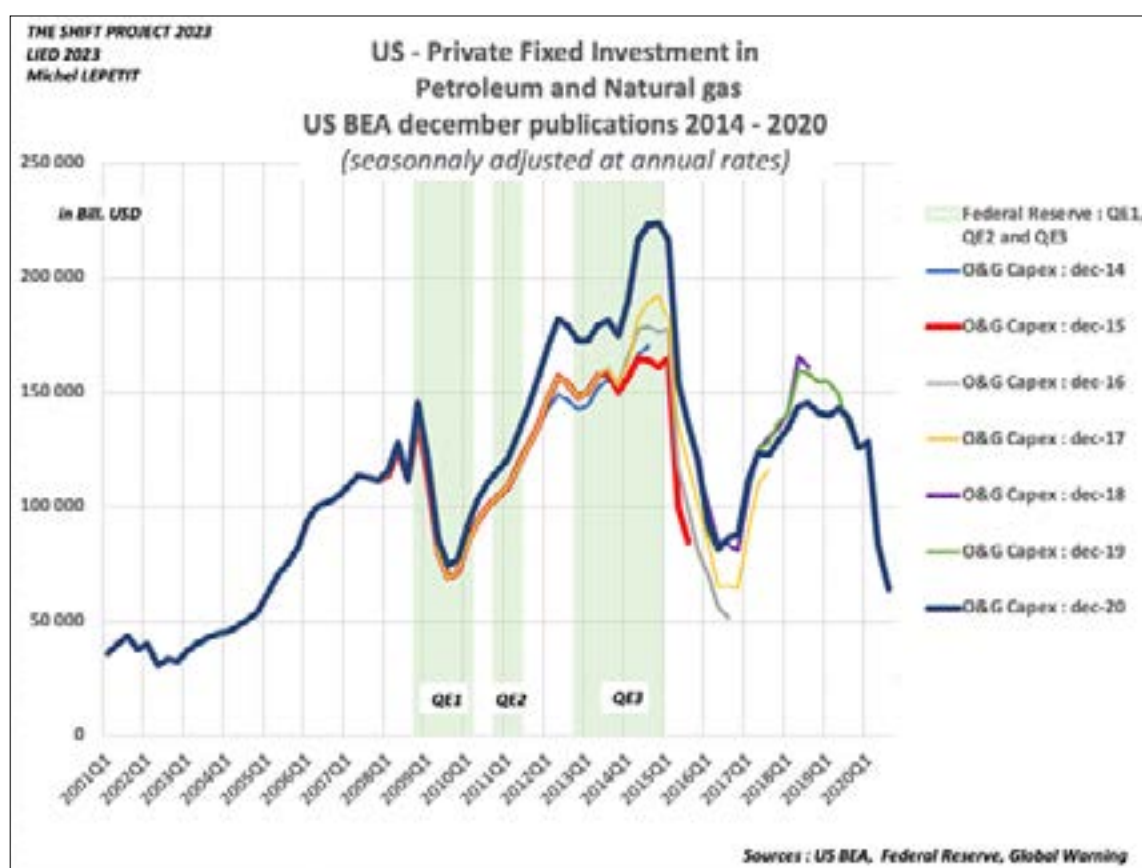
en 2015, soit en 2020, dans le lien entre « investissement » et « prix du pétrole » sont peu convaincantes, et arrivées tardivement. De fait, jusqu'en 2019, les macroéconomistes ont été trompés par les données fournies par l'administration américaine.

En effet, le comportement « irrationnel » des investisseurs dans le pétrole de schiste, et par conséquent leur sensibilité à la politique monétaire américaine, ont été longtemps masqués dans les données émanant de l'administration statistique américaine. Le Graphique 9 montre la reconstitution, à partir des données du BEA publiées chaque trimestre, de la chronique d'investissements dans l'industrie pétrolière. On voit comment en décembre 2015, cette série temporelle pouvait paraître étroitement corrélée au prix du pétrole (*The Economist*, 2016)<sup>45</sup>, comme par le passé. Il est d'ailleurs probable que les modèles économétriques internes du BEA aient favorisé cette erreur qui porta en cumul sur plus de 500 milliards de dollars ! Il fallut attendre la fin 2018 pour que les données soient corrigées, et fassent apparaître la chronique extraordinaire par ses à-coups et par son ampleur.

## Conséquences du pic de la production mondiale de pétrole brut

Comme indiqué en introduction, les conséquences du pic de la production mondiale de pétrole brut lié à l'histoire du pétrole de schiste seront macroéconomiques, financières (Lepetit, 2022), géopolitiques (FT, 2023)<sup>46</sup>, macroprudentielles, environnementales, voire anthropologiques.

Sur le plan macroéconomique, pour l'industrie des hydrocarbures, un monde après le pic pourrait voir la rentabilité du secteur croître anormalement. Premier scénario : la forte rentabilité des acteurs de l'industrie diminuerait le recours à la dette. Les investisseurs financiers pourraient alors exhiber, sans réel effort, une trajectoire « bas-carbone », sans que cette baisse des émissions attribuées n'ait d'impact sur la planète. Second scénario : la pression de l'opinion publique exigerait la nationalisation d'un secteur pétrolier devenu



Graphique 9 : Investissements privés dans le pétrole et le gaz naturel aux États-Unis du premier trimestre 2001 au premier trimestre 2020 (Sources : US BEA, Federal Reserve, Global Warming).

<sup>45</sup> The Economist (2016), "The oil conundrum - Plunging prices have neither halted oil production nor stimulated a surge in global growth", Jan 23, 2016, repéré à <https://www.economist.com/briefing/2016/01/23/the-oil-conundrum>

Voir le graphique n°3 : "Energy sapping : US private fixed investment in energy".

Voir aussi les compléments de cet article mis en ligne à l'adresse <https://www.linkedin.com/in/michel-lepetit/>

<sup>46</sup> Voir l'évolution en vingt ans des relations entre l'Arabie Saoudite, la Chine et les États-Unis. FT (2023), "China casts itself as Middle East peacemaker with global ambition - Diplomatic deal between Riyadh and Tehran bolsters expectations in region of what Beijing can deliver", *Financial Times*, March 14, 2023, repéré à <https://www.ft.com/content/9d832121-022b-4b56-bf84-95a237e698e8>

rentier, sans utilité sociale puisque sa raison d'être est avant tout la recherche d'hydrocarbures.

Par ailleurs, la baisse non voulue de la demande de pétrole brut entre 2018 et 2023 s'inscrit dans un processus de longue durée initié au début des années 1970, qui a vu un ralentissement tendanciel inéluctable de la productivité dans le monde. Confronté à un accès de plus en plus difficile au pétrole, énergie sans substitut, l'humanité a vu sa productivité économique ralentir tendanciellement depuis un demi-siècle. Le « miracle » du schiste, cette source d'énergie bien moins efficace que le pétrole conventionnel, n'a pu inverser la tendance. Sur le temps long, la croissance économique mondiale ralentit tendanciellement de manière inéluctable (Banque mondiale, 2023<sup>47</sup> ; FMI, 2023<sup>48</sup>).

La baisse de la demande qui accompagnera ce pic pétrolier sera donc macroéconomique et, à ce jour, non volontaire. En conséquence, cette baisse sera probablement chaotique, accompagnée de récessions économiques régionales et/ou continentales, et/ou de conflits locaux. Il serait donc urgent d'organiser volontairement, de planifier cette baisse de la demande (The Shift Project, 2022)<sup>49</sup>. À défaut de la mythique taxe carbone pour les particuliers – frappée d'opprobre par le mouvement des « gilets jaunes » – et de son signal-prix volontaire, il faudra probablement réguler et contraindre, en s'inspirant des économies de guerre. Pour le pétrole, planifier une baisse significative des vitesses sur route est de ce point de vue une piste intéressante dans le pilotage de cette baisse de la consommation, en France et en Europe pour commencer.

L'EROI (*Energy Return On energy Invested*) est un concept séduisant pour expliquer physiquement cette décline tendancielle de la productivité mondiale. L'EROI est présent tout au long du présent article, par exemple et singulièrement dans la fracturation nucléaire, dans l'importance des infrastructures gazières... Cependant l'EROI n'explique pas tout. Si l'EROI des hydrocarbures de schiste est faible comparativement à celui des hydrocarbures conventionnels de l'OPEP, il fait abstraction de l'environnement juridique favorable de la propriété du sous-sol aux États-Unis ; ou de l'existence au Texas d'immenses infrastructures pétrolières et gazières préexistantes à la décennie 2010 ; ou encore du dynamisme des hommes et femmes de cette industrie. Mais surtout, l'EROI ne peut rendre compte de la cause financière qui explique le miracle macroéconomique du pétrole de schiste.

<sup>47</sup> Banque mondiale (2023), "Falling long-term growth prospects: Trends, expectations, and policies", Banque mondiale, Mars 2023, repéré à <https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/5c24beac-0ebb-4732-8078-d6252fca4a08>

<sup>48</sup> FMI (2013), "IMF World Economic Outlook 2023", April 11, 2023, repéré à <https://www.imf.org/en/Publications/WEO>

<sup>49</sup> The Shift Project (2022), PTEF : Plan de transformation de l'économie française – 2022

Voir notamment les rapports du PTEF qui proposent des premières réductions : (1) sur la mobilité longue distance (110 km/h sur autoroute) ; et (2) sur le fret (80 km/h).



# Energy flows and the self-organization of societies as dissipative structures

By François RODDIER

French physicist and astronomer

And Mireille RODDIER

Associate professor and program director of architecture, University of Michigan

Complex system studies have shown that, under a sufficient flow of energy, dissipative structures appear and self-organize into periodic oscillations characteristic not only of Carnot cycles, but also of biological and economic cycles. We have also seen that the emergence of such cycles is the outcome of a common thermodynamic process known as the principle of maximum entropy production (Roddier, 2012). What happens when the flow of energy, which the system has structured itself to dissipate most efficiently, significantly decreases? Here we argue that this unsolicited shortage might be salutary to our interconnected ecosystems if we learn to couple our centrifugal phases of innovation and production with antagonistic centripetal phases of restauration and maintenance. Otherwise, whether we continue to exponentially consume energy from unforeseen new sources, or too abruptly cease all energy consumption without a process of adaptation, our globally interconnected ecosystems may prove too fragile to recover.

“A people can be just as dangerously overpowered by the wattage of its tools as by the caloric content of its foods, but it is much harder to confess to a national overindulgence in wattage than to a sickening diet. (...) Calories are both biologically and socially healthy only as long as they stay within the narrow range that separates enough from too much.” – Ivan Illich, *Energy and Equity* (1973).

## Thresholds and critical points

In the wake of the half-century anniversary of the Club of Rome's report “The Limits to Growth”, another text of obstinate relevance recently celebrated its 50<sup>th</sup> anniversary with a fresh new edition: Ivan Illich's *Tools for Conviviality*. In the first chapter, Illich introduces his concept of threshold as the limit beyond which innovations in science and technology create more damage than they can resolve. He swiftly followed up with the publication of the essay *Energy and Equity* (*Le Monde*, 1973) in which he elaborated upon the example of motorized traffic to illustrate the risks naturally posed by a surplus of affluence and/or energy flow.

Let's borrow the scenario. Imagine a highway mildly busy with a continuous flow of cars traveling at a constant velocity. As the volume of cars increases, the traffic reaches a point where it cannot maintain its speed constant: unpredictable episodes of periodic deceleration and acceleration begin to appear. The return to a continuous flow necessitates reducing either the volume or speed of cars or increasing the number of lanes. It can be posited that, for a specific flow (volume of cars per number of lanes), a critical speed limit can be

determined beyond which traffic becomes unstable and increasingly more chaotic. Similarly, the temperature of a specific volume of water under a specific heat flux will rise linearly by conduction until a critical point, beyond which cyclical convection currents appear, characteristic of a phase transition. If the heat flux due to conduction is proportional to the temperature gradient within the pot of water, we see that past the critical point, the heat flux due to convection is exponential, proportional to the square of the gradient.

To generalize: under a critical point, an energy flow is proportional to the gradient of a scalar quantity, be it temperature, pressure, time, speed, wealth, etc. As long as the gradient remains small, the flow remains proportional and laminar. The dissipation of energy is linear. Once the gradient exceeds its critical value, the energy flow grows much faster than the gradient and dissipates non-linearly. The study of non-linear systems, or complex systems, gained the increased attention of physicists in the second half of the 20<sup>th</sup> century.

Ilya Prigogine coined the term dissipative structure to reference the spontaneous appearance of complex and orderly if unpredictable dynamic structures that emerge when a sufficient energy flow sets a thermodynamic

system in a state of non-equilibrium. Such structures can take the form of convection cycles when a pot of water is on the stove; of cyclones when high pressure gradients create strong enough winds; of planetary hydrologic and seasonal cycles as generated by the temperature gradient between the heat of the sun and the 3°K cosmological background that can substantially absorb it; of life cycles themselves as first theorized by Prigogine; of boom-and-bust economic cycles as further postulated by Benoit Mandelbrot. These periodic structures are sustained by a continuous flow of energy. Prigogine showed that dissipative structures self-organize in order to maximize their dissipation of energy – or to maximize their production of entropy. For example, the temperature difference between the poles and the equator would increase beyond stability were it not for the formation of atmospheric currents which self-organize as a means to redistribute heat from the equator towards the poles, breaking down into smaller currents along the way. Plants, just like animal bodies or societies, self-organize in order to dissipate their energy most efficiently, maximizing their entropy production (Roddier, 2012).

The Danish physicist Per Bak illustrated self-organized criticality with grains of sand being poured into a pile, as in an hourglass. Up-close observations reveal that when the sand exceeds a critical slope, avalanches occur, returning the slope to, or possibly below its critical value. Thus, the slope of the sand pile randomly oscillates around its critical value without ever stabilizing. Per Bak showed that, just like avalanches, earthquakes, forest fires, epidemics, mass-extinctions, traffic jams, neural activity and economic cycles all fluctuate around their respective critical values according to a “1/f noise”, meaning that, for example, the amplitude of earthquakes along a fault line are inversely proportional to their frequency. Per Bak, an expert in phase transitions, compared the process of self-organized criticality to the phase transitions observed in a fluid when its state oscillates near the critical point between a liquid and a gaseous phase.

## Phase transitions

Physicists distinguish between abrupt phase transitions and continuous phase transitions. Continuous phase transitions are observed just above critical points, which are defined by specific pressures and temperatures per fluids. For example, below its critical point, water boils into vapor with the initial appearance of bubbles and vapor condenses back into water by first forming water droplets or fog. These are abrupt phase transitions between a liquid and a gas state. Above its critical point at a pressure of 220 atm and temperature of 374°C, the liquid and gas parts reach the same density, forming a homogeneous fluid that creates a continuous transition between liquid and gas phases. The light-reflecting surface that previously separated the denser liquid from the less dense gas disintegrates and the fluid itself starts to scatter light – a phenomenon known as critical opalescence. If the temperature is then cooled below the critical point, droplets form and grow. Denser than the rest of the fluid, they fall to the bottom.

The temperature and pressure of critical points vary greatly from one fluid to another. Fluids with high critical points are the most condensable. Fluids with lower critical points, such as carbon dioxide (5 atm and 31.3°C) are much less condensable and behave closer to ideal gases. Figure 1 shows that above the critical point, the isotherms tend towards those of ideal gases: a hyperbolic surface defined by the equation of state  $P.V = n.R.T$ , where  $P$  is the pressure,  $V$  the volume,  $T$  the temperature, and  $n$  is the number of moles of the substance.  $R$  is a universal constant for ideal gases close to 8.31 Joules/K. Below the critical point, the isotherms contain a zone of condensation in which liquid and gas phases coexist. The Dutch physicist Johannes Van der Waals introduced the first equation of state for real gases which represented the behavior of gases when condensed into liquids. The Van der Waals equation,  $(P + a/V^2).(V-b) = n.R.T$ , adds two corrective terms  $a$  and  $b$  to that of ideal gases – one to the pressure and the other to the volume. Figure 1 shows that below the critical point, the isotherms of Van der Waals correspond to the unstable condensation zone that characterizes an abrupt phase transition.

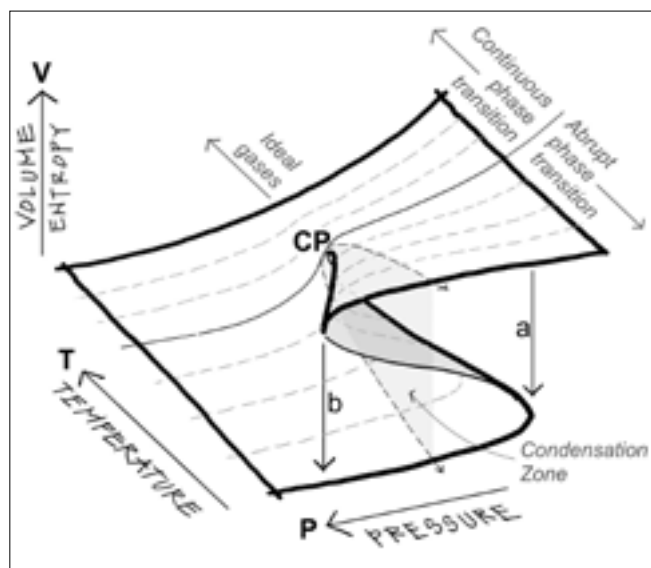


Figure 1. The surface shows the Van der Waals isotherms. Under a heat flux, the state of a fluid oscillates clockwise around its critical point. Whereas the transition from liquid to gas is continuous above the critical temperature, we can see that below the critical temperature isotherm, the transition from gas to liquid is abrupt.

We have previously explained how, just like fluids, living organisms and ecosystems self-organize into dissipative structures to maximize their energy dissipation (Roddier, 2012). Van der Waal observed that for real gases, pressure had to be increased with an additional value inversely proportional to the volume ( $a/V^2$ ) due to the dipole forces of attraction between molecules. In the case of living organisms, the reaction is not electrostatic but chemical, and enzymes replace electrons as the catalyst that accelerate the cycles. We have further expounded the ways in which money serves as the catalyst for the self-organization of economic cycles, just as language does for our societies (Roddier, 2018). We will come back to them.



Figure 2 transposes the terms of Figure 1 to the economy. The concept of “temperature” in the economy can be defined as the amount of energy necessary to produce a unit of entropy (Roddier, 2015). If money is a measure of information and entropy measures the loss of information, we can measure the production of entropy in the economy in terms of money spent. The temperature of the economy is inversely proportional to the cost of energy. In Figure 2, the variable  $T$  represents supply, which increases proportionally to a product's exchange value. The variable  $P$  represents demand, which increases proportionally to use value. As the figure shows, when energy influx increase supply, heating the economy beyond the critical point, the volume of production is inversely proportional to the demand, and the isotherms turn into hyperbolas. When applied to the economy, Van der Waals's supplemental value  $a/V^2$  originally applied to specific molecules in gases is now applied to specific goods, the economic potential of which is inversely proportional to its production volume, such as distribution services like communication or public transportation. The minimal volume of production “ $b$ ” insures the survival of the system. The fold in the surface reflects what the topologist mathematician René Thom called fold bifurcations – structurally unstable catastrophe geometries. Applied to the economy, it refers to a crisis phase. The point CP refers to the critical point around which the economy follows clockwise cycles of oscillations between continuous phases of growth and abrupt transitions of recessions.

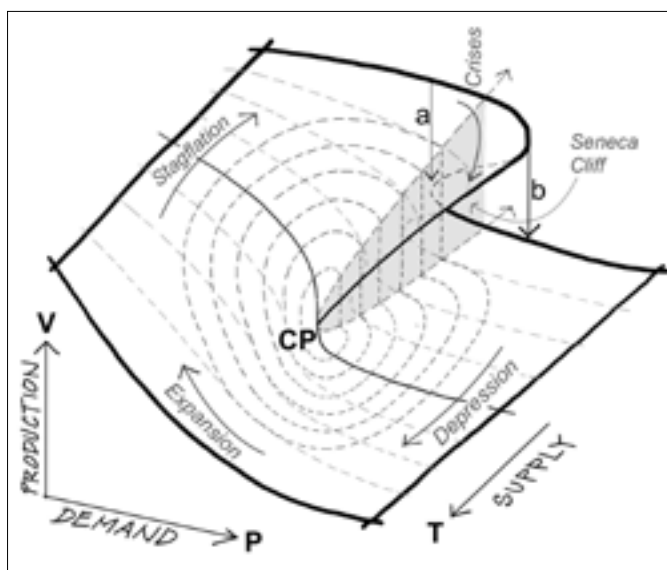


Figure 2. The state of an economy can be described by a point on the surface of Van der Waals. Each ring represents an economic system circling clockwise at a linear velocity in the plane (P,T) around the critical point.

## Economic life cycles

We have seen that economic cycles self-organize like convection cycles in a pot of boiling water (or like any other Carnot cycle). Such types of cycles can be divided into four clear phases compared in Figure 3. In reference to the economy, the four cycles have been described along the four consecutive phases: depres-

sion, expansion, stagflation, and crisis (Turchin and Nefedov, 2009). In the late 1970s, the German economist Gerhard Mensch had already described the process through which phases of innovation always followed economic crises through what he called a “metamorphosis model of long-term instability”. His model, reproduced in Figure 4, shows that during the crisis phase, two economies co-exist in the same way that liquid and gas co-exist in the same fluid during an abrupt phase transition. At any time, production can drop from the upper level down to the lower level from which a new economy emerges. Mensch's arrows  $a$  and  $b$ , between which successive economies overlap, correspond to the arrows of the same name in Figure 2 (Van der Waals's corrective terms).

	Carnot cycle	Convection cycle	Seasonal cycle	Economic cycle
1	Isothermal expansion	Temperature rises	Winter (germination)	Depression
2	Adiabatic expansion	Ascension (expansion)	Spring (growth)	Expansion
3	Isothermal compression	Temperature drops	Summer (climax)	Stagflation
4	Adiabatic compression	Descent (compression)	Fall (regression)	Crisis



Figure 3. Comparison between the Carnot cycle, and the convection, seasonal, and economic cycles.

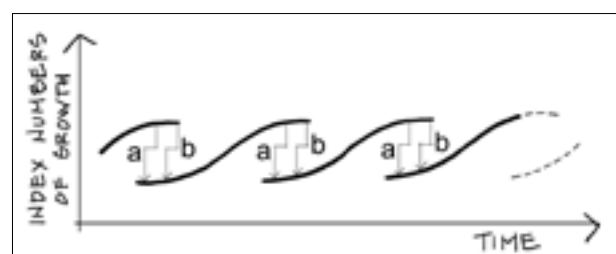


Figure 4. Gerhard Mensch's metamorphosis model (Source: Mensch, 1979, 73).

As the economy cycles around the critical point, we can verify Bak's  $1/f$  noise distribution: the frequency of the crises is inversely proportional to their magnitude. The

smaller and more autonomous an economic system – i.e. the tighter it cycles around the critical point – the less significant its collapse. The more global and interconnected a system, the more efficient it becomes but also the more fragile, leading to avalanche catastrophes that affect entire ecosystems. The Italian physicist Ugo Bardi coined such collapses “the Seneca Effect”, after the Roman philosopher who first observed the pattern. The biologist Robert Ulanowicz similarly observed how, past an optimal degree of interconnectivity, natural ecosystems quickly tend towards collapse.

We noted above how cycles of energy dissipation are accelerated through autocatalytic processes. By studying trophic interactions in biological ecosystems, Ulanowicz observed how, when energy and material resources are abundant, they are drawn into centrifugal growth-enhancing autocatalytic cycles which necessitate a continuously increasing amount of material and energy flow to sustain. On the other hand, under declining availability of external resources, flows are rerouted into a closed configuration that only engages equiponderant transfers. We see how the structures oscillate between open dissipative systems, which become very fragile, and closed configurations that tend towards a (dangerous) state of equilibrium. For Ulanowicz, although shortages in energy and resources may lead a system towards decay and disintegration, if the decline is gradual enough, fragmentary subsystems can reach a harmonic stability when sustained by the coupling of cycles in opposite phases of expansion and recession – pairs whose opposite behavior patterns are, paradoxically, a form of collaboration.

For example, imagine riding a bicycle at a fast pace: it's easy enough to imagine that your speed can be maintained using only one pedal. Now if you are faced with a hill, you will have recourse to the second pedal in order to avoid falling over. In the same way, the 2CV Citroën sets its two cylinders in opposite phases of expansion and compression. The biologist Élie Bernard-Weil called these Ago-Antagonistic Systems – referring to systems that are cooperating (agonistically) by acting in opposition (antagonistically).

## Ago-antagonistic couples

Biologists have observed the ubiquity of ago-antagonistic mechanisms in nature. These binary systems monitor and regulate our energy dissipation. Think of our bodies: glucose (sugar) is one of our principal sources of energy. Our pancreas produces both insulin and glucagon, respectively reducing or increasing our sugar levels as needed, since both surplus and shortage can be lethal. Our system also distinguishes two separate nervous systems, the sympathetic and parasympathetic. One sustains our need for activity (flight or fight), the other for rest. Together, they maintain a tight equilibrium midway between workaholicism and chronic fatigue – both on the rise in high energy consuming societies. Oil can be seen as the glucose of our societies, and we are as addicted to it as children can be to candy, alternating between sugar highs and sugar crashes. What form can insulin take for our collective?

Regardless of resource limitations, our energy consumption ineluctably needs to diminish for our collective wellbeing. While it could lead to our extinction as some predict, the end of abundance could also lead our societies towards a more holistic self-care, one that undiscernibly includes the wellbeing of all the ecosystems in which we partake. This would require finding and maintaining the narrow equilibrium between our efficiency (our ability to mass-process volumes of relevant matter-flow, energy-flow and information-flow) and our resilience (the capacity to adapt to deviations, privilege flexibility, diversity, and non-transactional interactions).

Whether we consciously prepare for the emerging transition, or whether we are more violently forced into it because of shortsightedness or denial, the “parasympathetic” half of our global system is gaining traction. In opposition to a phase of growth, we can qualify it as a phase of restauration, maintenance, and care. We will credit Ivan Illich for calling attention to the concept of vernacular values (Illich, 1981). The vernacular realm, in Illich's definition, expands and contracts in opposition to what he calls the shadow economy. Vernacular activities – whether in the form of information (language, currency), material, or energy flows – entirely resist and oppose the terms of industrialization, standardization, or growth. To globally normative, mass-produced buildings, we can oppose vernacular architecture, which foregrounds the use of local materials in response to local climatic conditions. To the mass-standardization of our commodities and taste, which lose relevance over time, we can oppose the idiosyncratic constructs and local knowhow that result from specific needs, and which gain value with generations. To vehicular languages, the *linguae francae* of trade that maximize imperial expansion, we can oppose vernacular languages, the living dialects that evolve to maximize and maintain diversity. To global currencies we can oppose vernacular currencies, complementary systems of exchange, that, as the economist Bernard Lietaer made clear, soften the rigidity of an economic system that only accommodates a small concentration of our populations (Lietaer *et al.*, 2012).

Complementary currencies should operate in collaboration with and in opposition to dominant currencies: where the latter foster competition, future speculation, monopoly, anonymity, exchange value, and increase over time when stocked, the former must privilege collaboration, unmediated transactions, diversity, community, use-value, and a decrease in value when stocked, prompting continuous redistribution. Both Lietaer and Ulanowicz have qualified the mechanism that regulates efficiency as having yin qualities, whereas the autocatalytic process that maximizes it holds yang qualities.

We have already suggested that, as energy supplies dwindle and the temperature of the economy shrinks, the value of a new complementary currency would lay the groundwork for a future economy (Roddier, 2015). This new currency would be useless, unless it performs in complementary and oppositional ways to the dominant currency: being utilized for food, service, salaries,

and renewable energies, and saving the Euro (Dollar, etc.) for the purchase of commodities and withering stock energies, while taxing both forms of currency differently as a way to privilege necessary incentives. Just like a linguistic system or an urban structure, a monetary system is an ideological tool that privileges certain flows over others. The more we utilize such tools to prepare for the rise of the incoming yin society, the easier and less violent our transition.

## Bibliography

BAK P. (1996), *How nature works: The science of self-organized criticality*, New York, Springer.

BARDI U. (2017), *The Seneca effect*, Springer.

BERNARD-WEIL E. (1994), « La théorie des systèmes ag-antagonistes », *Le Débat*, 106(4), pp. 106-120.

ILLICH I. (1973), *Tools for conviviality*, Harper & Row.

ILLICH I. (1974), *Energy and equity*, Harper & Row.

ILLICH I. (1981), *Shadow work*, London, Marion Boyars.

LIETAER B., ARNSPERGER C., GOERNER S. & BRUNNHUBER S. (2012), "Money and sustainability – The missing link", A report from the Club of Rome, Axminster: Triarchy Press Ltd.

LIETAER B. (2018), *Créer une monnaie complémentaire*, Lormont, Le Bord de l'eau.

MENSCH G. (1979), *Stalemate in technology*, Cambridge, MA, Ballinger.

RODDIER F. (2012), *Thermodynamique de l'évolution*, Artignosc-sur-Verdon, Éditions Parole.

RODDIER F. (2015), « La thermodynamique des transitions économiques » (video), Think tank workshops, The Shift Project, March 12.

RODDIER F. (2018), *De la thermodynamique à l'économie - le tourbillon de la vie*, Artignosc-sur-Verdon, Éditions Parole.

TURCHIN P. & NEFEDOV S. A. (2009), *Secular cycles*, Princeton, NJ, Princeton Press.

ULANOWICZ R.E. (2009), "Increasing entropy: Heat death or perpetual harmonies?", *International Journal of Design & Ecodynamics*, 4(2), pp. 83-96.

# La France ne pourra atteindre ses objectifs climatiques qu'avec une planification ambitieuse et concertée

Par Emma STOKKING pour The Shift Project



Créé en 2010 par Jean-Marc Jancovici, Michel Lepetit et Geneviève Ferone-Creuzet, The Shift Project est un think tank qui œuvre en faveur d'une économie libérée de la contrainte carbone. Association loi 1901 d'intérêt général, guidée par l'exigence de la rigueur scientifique, sa mission consiste à éclairer et à influencer le débat sur la transition énergétique en France et en Europe. Tous les travaux publiés par The Shift Project sont accessibles sur le site <https://theshiftproject.org>.

Le *think tank* The Shift Project a publié début 2022 son « Plan de transformation de l'économie française<sup>1</sup> », un vaste programme qui vise à décarboner l'économie, secteur par secteur durant le quinquennat 2022-2027, en favorisant la résilience et l'emploi. Plus d'un an après sa publication, le diagnostic qu'il dresse et les propositions qu'il présente restent adaptés face aux crises climatiques et énergétiques actuelles.

La crise énergétique qui touche l'Europe depuis plus d'un an n'a pas commencé avec la guerre en Ukraine. Elle a commencé six mois plus tôt, en septembre 2021, quand les deux plus gros importateurs mondiaux de gaz, l'Union européenne et la Chine, ont relancé leurs activités économiques après la pandémie. C'est à ce moment-là que les prix du gaz se sont véritablement envolés. Nous sommes entrés dans l'ère des limites physiques à la croissance, et il y a fort à parier que ce que nous observons sur le gaz se produise prochainement sur le pétrole et sur un certain nombre de métaux critiques.

Pour bien le comprendre, il faut avoir conscience du fait que nous sommes pris dans un étau qui a tendance à se resserrer.

D'un côté de cet étau, on trouve le dérèglement climatique. Les scientifiques du GIEC nous alertent depuis des décennies sur les effets des activités humaines et en particulier de la combustion des énergies fossiles sur le climat. Pour autant, la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère et la température moyenne à la surface du globe ne cessent d'augmenter : il est fort probable que nous dépassions 2°C d'augmentation de température à la surface du globe d'ici 2050, et 3°C voire plus d'ici 2100. Or, à titre de comparaison, 5°C correspondent à la différence de température entre le climat stable qui a permis l'émergence des civilisations, et la dernière ère glaciaire, il y a 20 000 ans, période durant laquelle

la Scandinavie était recouverte d'une calotte glaciaire de 3 kilomètres d'épaisseur qui descendait jusqu'à Londres... où on pouvait d'ailleurs se rendre à pied puisque le niveau de la mer était 120 mètres plus bas qu'aujourd'hui. Les effets du dérèglement climatique font désormais partie de notre quotidien. Comme le dit le climatologue Robert Vautard, « il nous faut éviter l'ingérable et gérer l'inévitable ». On en voit déjà des manifestations violentes à travers le monde. En France, plus de 60 000 hectares de forêt sont partis en fumée l'été dernier, un record absolu qui touche l'ensemble des régions métropolitaines. Partout, le cycle de l'eau est fortement perturbé : la sécheresse qu'a connue la France ces derniers mois n'est qu'un avant-goût de ce qui nous attend. Après la Loire à vélo, la Loire à pied semble avoir de beaux jours devant elle.

De l'autre côté de cet étau : le déclin rapide de l'approvisionnement de l'Europe en ressources fossiles. Quand bien même nous déciderions de ne rien faire, ou de ne pas faire assez, pour enrayer le dérèglement climatique, les robinets de pétrole et de gaz se refermeront d'eux-mêmes bien plus tôt qu'on ne le pense, et pour des raisons qui sont géologiques et économiques avant d'être géopolitiques. Plus précisément, la production des principaux fournisseurs de l'Europe en pétrole brut devrait reculer de 12 % en 2030 par rapport à 2019<sup>2</sup>, et le déficit actuel d'approvisionnement en

<sup>1</sup> *Climat, crises : Le plan de transformation de l'économie française*, The Shift Project, Odile Jacob, janvier 2022.

<sup>2</sup> « Pétrole : quels risques pour les approvisionnements de l'Union européenne ? », The Shift Project, mai 2021.



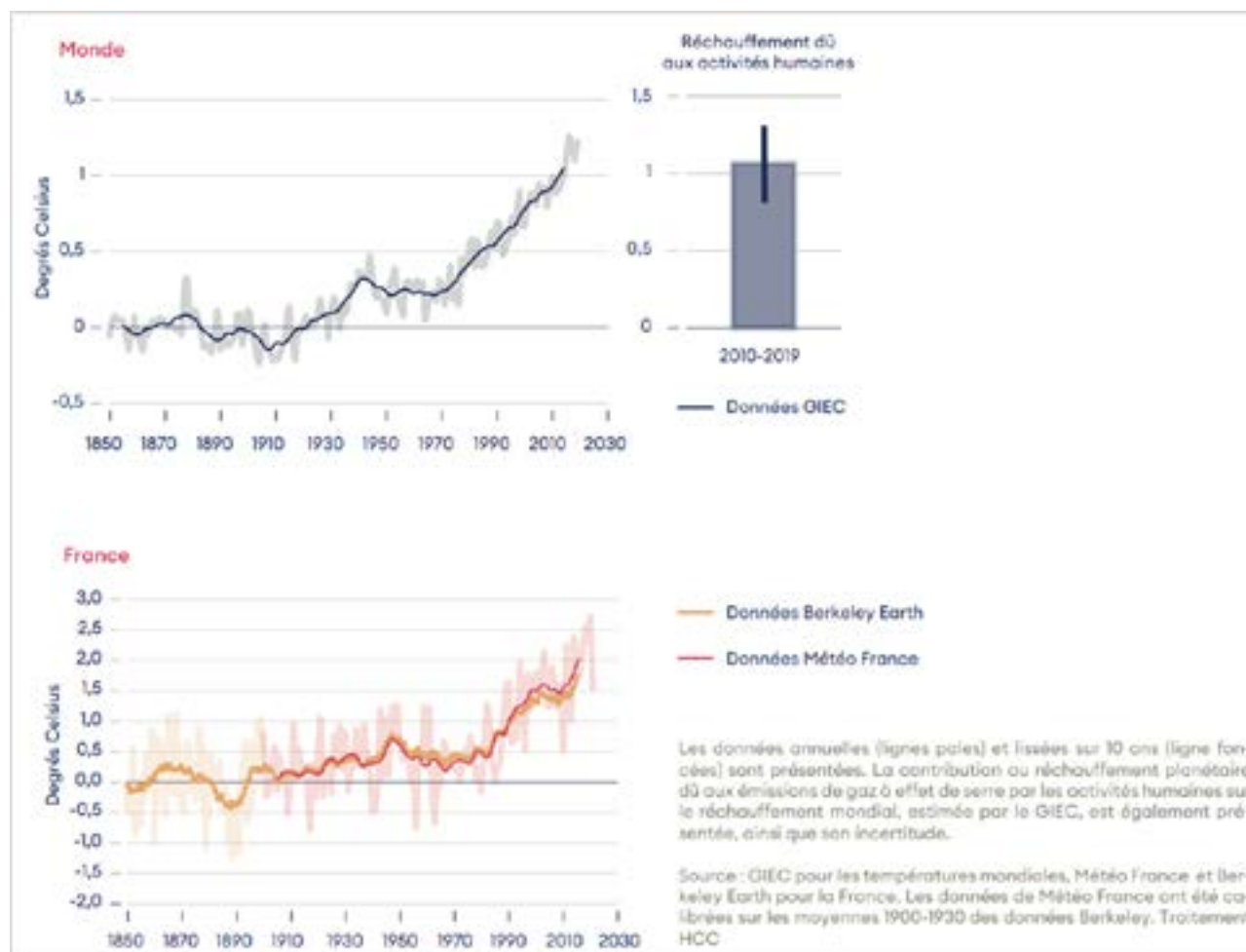


Figure 1 : Changement de température par rapport aux moyennes de 1850 à 1900 (Source : Rapport annuel 2022, Haut Conseil pour le Climat).

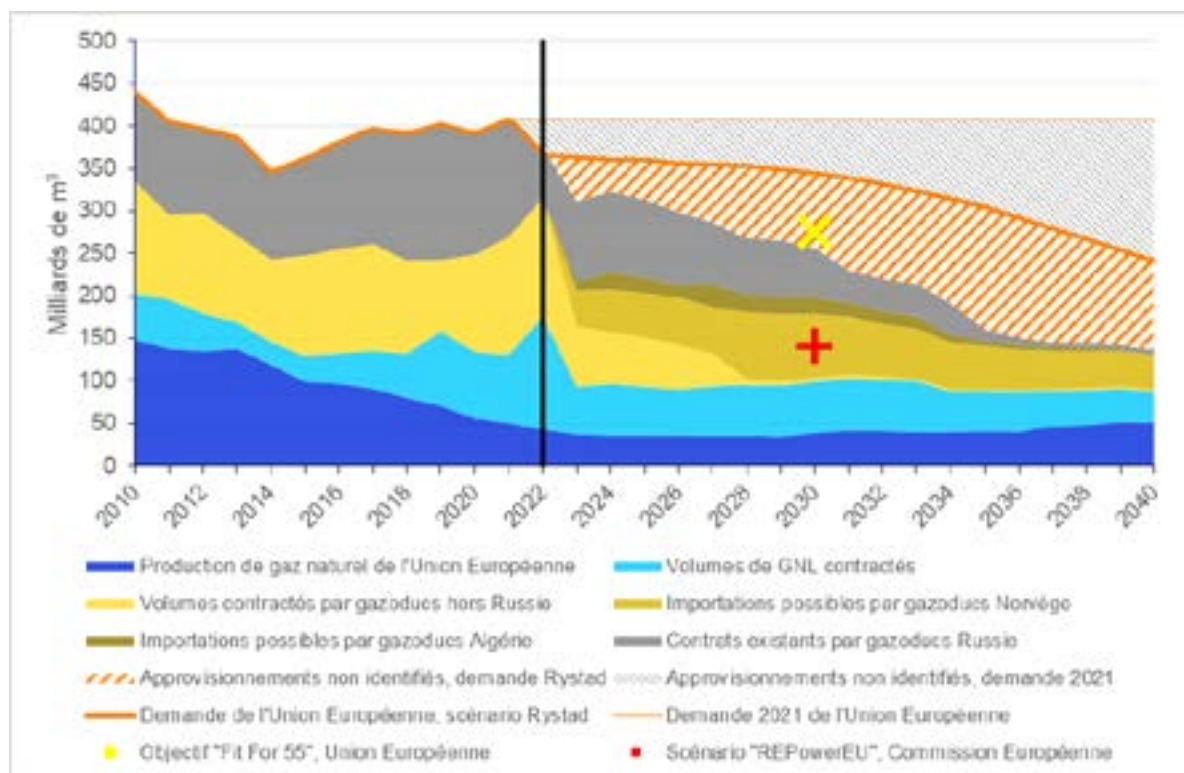


Figure 2 : Comparaison entre la demande de l'UE et ses approvisionnements sur la période 2010-2040 (Source : The Shift Project, d'après les données Rystad Energy de novembre 2022).

gaz va s'aggraver quelle que soit l'issue du conflit en Ukraine. À l'heure actuelle, en cas d'arrêt durable des approvisionnements russes, ce qui semble hautement probable, la part des approvisionnements non identifiés atteindrait en 2025 pas moins de 40 % de la demande de l'Union européenne à cette date<sup>3</sup>.

Cet étau est ce que nous appelons la double contrainte carbone. Au sein du *Shift Project*, cela fait plus de douze ans que nous nous efforçons d'éclairer le débat public sur cette double contrainte afin d'aider les acteurs politiques et économiques à prendre des décisions aussi informées – et décarbonées – que possible. Cette double contrainte étant par définition physique, nos analyses sont fondées sur des données physiques objectives et sur des modèles systémiques, tout en reconnaissant le caractère hautement imprévisible de notre environnement.

Au printemps 2020, lors du premier confinement, nous nous sommes lancés dans le projet le plus ambitieux de l'histoire du *Shift* : concevoir un plan pour identifier, secteur par secteur, les leviers de décarbonation permettant de rester dans le cadre fixé par l'Accord de Paris. Si la France veut respecter cet accord, elle doit réduire ses émissions de gaz à effet de serre de 80 % d'ici 2050, soit d'au moins 5 % par an tous les ans. 5 % par an, c'est *grosso modo* la réduction que nous avons justement connue en 2020 avec la pandémie, deux confinements et deux mois d'arrêt quasi complet de l'économie. Respecter l'Accord de Paris requiert donc une transformation profonde de l'ensemble de l'économie et un changement de paradigme complet.

Nous sommes convaincus que cette transformation repose sur deux piliers : l'anticipation, pour mener à bien les changements structurels indispensables à la décarbonation, et la concertation, pour susciter l'adhésion du plus grand nombre à la bifurcation nécessaire. C'est pourquoi le Plan de transformation de l'économie française, ou PTEF, a été pensé comme un plan d'action pour les années et décennies à venir, et conçu avec l'aide de centaines de professionnels des secteurs étudiés. Il présente des actions précises à mettre en œuvre dès le début de l'actuel mandat politique, et des leviers de transformation à plus long terme. Au total, près d'un millier de personnes ont directement participé à son élaboration, avec le soutien de 4 000 donateurs. Enfin, parce que la question de l'acceptabilité est centrale, des milliers de personnes ont donné leur avis sur les propositions du PTEF dans le cadre de la *Big Review*, la grande consultation menée par l'association des *Shifters*.

### Progrès technologique (autant que possible), sobriété (autant que nécessaire), nouveaux usages et gouvernance adaptée

Que dit le PTEF ? Prenons trois exemples : un secteur « amont » qui est celui de l'industrie (deuxième secteur le plus émissif, *ex aequo* avec l'agriculture), un secteur « usage », celui de la mobilité longue distance (le secteur des transports étant de loin le plus émissif), et enfin un secteur « service », celui de la santé, qui repré-

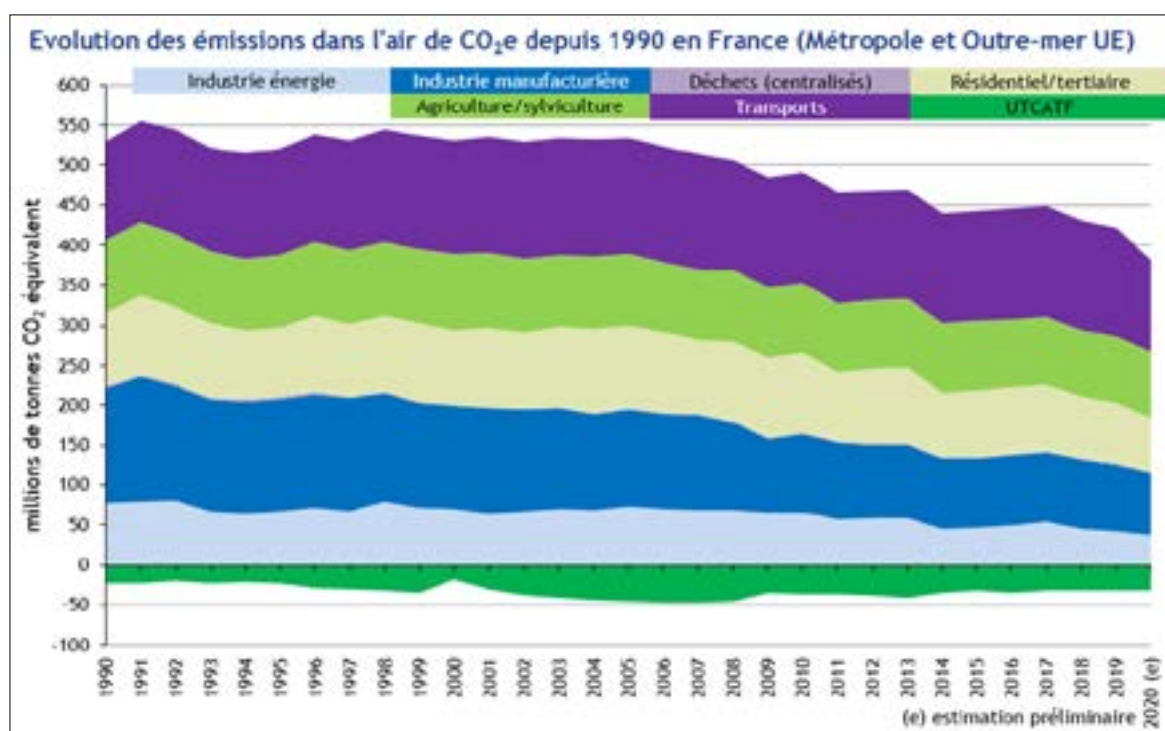


Figure 3 : Évolution des émissions de CO<sub>2</sub> équivalent depuis 1990 en France (Source : CITEPA).

<sup>3</sup> « Gaz naturel : quels risques pour l'approvisionnement de l'Union européenne ? », The Shift Project, décembre 2022.



sente une part significative des émissions du pays et qui se préoccupe encore bien peu de sa décarbonation.

L'industrie française repose intégralement sur des chaînes logistiques longues et dépendantes au pétrole. Le fait que certaines aciéries aient dû arrêter temporairement leurs activités avec le prix élevé du gaz montre aussi à quel point le manque d'anticipation peut être coûteux. L'industrie représente près d'un cinquième des émissions territoriales, soit bien plus que son poids économique. Décarboner l'industrie est un enjeu incontournable, tant pour assurer sa propre résilience que pour rendre la transformation du reste de l'économie possible. Une partie des activités industrielles françaises ont été décarbonées depuis les années 1990, principalement dans le secteur de la chimie, mais cet effort reste insuffisant, et c'est sur l'industrie lourde (métallurgie et ciment) que pèse la principale part des efforts à mener. Seule une combinaison de trois familles de leviers permet d'atteindre l'objectif de réduction des émissions : 40 % grâce aux leviers de progrès continu (efficacité énergétique, etc.), 40 % grâce aux leviers de rupture technologique (hydrogène produit par électrolyse, capture et stockage du carbone, etc.), et enfin 20 % grâce aux leviers de sobriété. Le PTEF, parfois plus ambitieux que les feuilles de route des professions concernées, permet notamment grâce à la sobriété de décarboner l'ensemble Acier-Ciment-Chimie (soit 70 % de l'industrie lourde) de plus de 80 % à horizon 2050. Les technologies de rupture sont un pari à pousser... qui reste un pari. Les risques d'échec étant bien plus forts sur les leviers technologiques de rupture, il faudra recourir à une sobriété plus intense si leur déploiement échoue dans les années à venir.

Le PTEF prévoit également des changements profonds au niveau des usages. La mobilité longue distance des Français, qui concerne les vacances, les loisirs, les visites à des proches ou encore le travail, va, elle aussi, devoir se décarboner à un rythme de 5 % de réduction annuelle des émissions de gaz à effet de serre. Or, le secteur est aujourd'hui très dépendant du pétrole : les voyages de longue distance reposent à 90 % sur des modes de transport carbonés comme la voiture et l'avion. Pour rendre le voyage résilient aux chocs énergétiques, la mobilité longue distance doit s'électrifier et le trafic aérien progressivement décroître. Nous proposons de développer de nouvelles offres de voyages intracontinentaux qui passent par le train, mais aussi des offres de séjours attractifs qui permettent de voyager moins souvent en restant plus longtemps sur place. Le voyage résilient et décarboné s'appuiera sur des infrastructures adaptées aux effets du changement climatique, sur des services ferroviaires attractifs, et sur la mise en place d'une gouvernance carbone du tourisme à différents échelons territoriaux.

Concernant la santé enfin, rares sont les analyses traitant de l'effet du secteur sur le changement climatique lui-même. Or, cet effet est significatif puisque ses émissions de gaz à effet de serre représentent entre 6,6 et 10 % du total national<sup>4</sup>. Il est donc inévitable que

le secteur de la santé fasse lui aussi sa part dans la baisse des émissions de 5 % par an. Cela permet aussi de limiter sa dépendance aux énergies fossiles et les vulnérabilités qui en découlent : la pression qui pèsera sur les services de santé en raison des modifications environnementales pourra difficilement être supportée par un système subissant sans préparation une diminution de son approvisionnement énergétique. Le dérèglement climatique devrait en effet profondément perturber notre système de santé du fait de la dégradation des écosystèmes et de l'impact des crises climatiques sur la santé des populations et les infrastructures de soin : propagation de maladies, augmentation des températures, ou encore aggravation des inondations et des sécheresses. Or, le secteur est aujourd'hui fortement dépendant des énergies fossiles, que ce soit pour ses approvisionnements en médicaments et dispositifs médicaux, pour les trajets des patients et des professionnels, ou encore pour le chauffage des bâtiments. Accroître la résilience du secteur de la santé impose de placer la notion de sobriété au centre des pratiques de soin et des modes de vie, en renforçant la prévention afin de limiter les actes et les prescriptions évitables. Cela suppose de comprendre d'où proviennent les émissions et de former les personnels soignants et les acteurs de la santé publique aux enjeux environnementaux. Cela suppose également de raisonner à long terme : s'attaquer à des sujets complexes comme la rénovation énergétique des bâtiments, la gestion des achats hospitaliers, la sobriété numérique ou la décarbonation des moyens de transport nécessite de sortir d'une logique de court terme et d'annualité budgétaire. Et parce que le PTEF repose sur une approche systémique, il s'agit aussi de mettre en avant dans des politiques transversales santé-environnement les co-bénéfices en termes de santé, de climat et de réduction des inégalités qui existent entre la transformation de l'économie – devenant plus sobre et résiliente – et l'évolution vers un système de santé renforçant les mesures de préventions ciblées et à grande échelle. Un exemple concerne les déplacements quotidiens à vélo, en bus ou à pied, qui coûtent moins cher que l'achat, l'assurance et l'entretien d'une voiture individuelle, qui produisent des bénéfices sur la santé de la personne qui se déplace (cardio-vasculaires, bien-être, etc.), et qui réduisent drastiquement les émissions de gaz à effet de serre.

## L'emploi au cœur de la transformation bas-carbone du pays

Comme nous l'avons évoqué, l'ampleur inédite de la transformation proposée par le PTEF et son caractère systémique supposent qu'elle soit anticipée, discutée et planifiée à l'échelle de la société et sur une base factuelle. C'est d'autant plus vrai pour la question cruciale de l'emploi : il s'agit d'en faire l'un des moteurs d'une décarbonation organisée et réussie, plutôt qu'une variable d'ajustement soumise à la brutalité des choix faits dans l'urgence. Selon les analyses menées par le *Shift Project*, l'évolution quantitative est très variable

<sup>4</sup> « Décarboner la santé pour soigner durablement », rapport V2, avril 2023.

d'un secteur à l'autre, mais l'ensemble des métiers sera concerné par des évolutions qualitatives<sup>5</sup>.

Quantitativement, la décarbonation du logement apparaît par exemple comme négativement impactée en termes de besoins de main-d'œuvre avec une perte nette de près de 90 000 emplois pour le secteur dans son ensemble selon un scénario moyen<sup>6</sup>. Il y aurait en effet une augmentation de l'ordre de 100 000 emplois dans la rénovation (sur la base de l'objectif d'un million de rénovations globales et performantes par an), et une diminution de l'ordre de 190 000 emplois dans la construction neuve (sur la base d'une construction de 250 000 logements neufs par an). L'industrie automobile serait la plus touchée négativement avec plus de 300 000 emplois perdus, du fait du recul de l'usage de la voiture, et par conséquent des ventes et de la production, entraînant une baisse à proportion de l'emploi<sup>7</sup>. Cela serait partiellement compensé par la relocalisation de la production industrielle, notamment de batteries, par l'installation et la maintenance de bornes de recharge, et par les emplois créés dans l'industrie du vélo et les services associés.

Qualitativement, des transformations clés concernent le nécessaire développement des compétences sur les enjeux énergie-climat et sur l'évaluation, le pilotage et le contrôle carbone. Dans l'enseignement<sup>8</sup>, des disciplines essentielles à la transformation bas-carbone de secteurs comme l'industrie et l'agriculture prendront de l'ampleur. Les formations, qu'elles soient initiales ou continues, et les dispositifs d'aide à la reconversion devront être repensés avec le prisme de la décarbonation. Actuellement, les études prospectives sur l'emploi et les compétences n'intègrent que trop peu les enjeux de décarbonation. Or, cette intégration doit être complète et concerner tous les secteurs si nous voulons pouvoir adapter la formation à la bonne échelle et à la bonne vitesse. La question épineuse des reconversions possibles entre secteurs exigera de plus une coordination intersectorielle forte, ainsi qu'une meilleure attractivité des métiers et des secteurs qui devront croître fortement : conditions de travail, revenus, mais aussi reconnaissance sociale. Le soutien aux TPE-PME qui concentrent la création d'emplois est également indispensable.

Le PTEF propose un cadre clair pour la conception et la mise en œuvre d'une réelle politique industrielle à l'échelle de la transformation bas-carbone. Elle doit combiner objectifs climat, résilience et emploi, en articulant les actions à court et à long terme avec des objectifs chiffrés. À cette « doctrine », le PTEF adjoint une stratégie de compétitivité économique pérenne, selon trois dimensions : compétence des individus et

des organisations, résilience locale des chaînes de valeur, réglementation forte et pensée sur le long terme pour l'investissement et l'innovation dans la transition.

La décarbonation de la France se fera de gré ou de force. Si nous voulons qu'elle soit choisie plutôt que subie, cela repose sur une planification rigoureuse et sur une concertation avec l'ensemble des acteurs de chaque secteur de l'économie. Depuis que nous discutons avec les organisations syndicales et patronales, nous constatons que l'idée de planification, longtemps déconsidérée, est devenue prioritaire. Le vice-président du MEDEF a reconnu dès septembre 2021<sup>9</sup> que la planification écologique était une nécessité. Moins d'un an plus tard, le gouvernement d'Elisabeth Borne mettait en place un Secrétariat général à la planification écologique (SGPE). Les enjeux climatiques et énergétiques seront-ils suffisamment intégrés aux feuilles de route de nos dirigeants économiques et politiques ? Il est de notre devoir de nous en assurer.

Pour en savoir plus sur le PTEF : rendez-vous sur [www.ilnousfautunplan.fr](http://www.ilnousfautunplan.fr)

Pour en savoir plus sur le Shift Project : rendez-vous sur [www.theshiftproject.org](http://www.theshiftproject.org)

<sup>5</sup> « L'Emploi : moteur de la transformation bas-carbone », The Shift Project, décembre 2021.

<sup>6</sup> « Habiter dans une société bas-carbone », The Shift Project, octobre 2021.

<sup>7</sup> « La transition bas-carbone, une opportunité pour l'industrie automobile française ? », The Shift Project, novembre 2021.

<sup>8</sup> Voir également les travaux du *Shift Project* sur l'enseignement supérieur <https://theshiftproject.org/lavenir-de-la-planete-dans-lenseignement-superieur/>

<sup>9</sup> Voir la table ronde organisée lors de l'ouverture officielle de l'UniverShifté 2021, 25 septembre 2021, <https://www.youtube.com/watch?v=JV26IsoG16A&t=7000>

# Rôle de l'énergie dans la société de croissance considérée en tant que système complexe

Par Philippe CHARLEZ

Expert en questions énergétiques à l'Institut Sapiens

Reposant sur trois piliers (un contexte : la démocratie libérale ; un catalyseur : la technologie ; et un aliment : l'énergie), la société de croissance est une gigantesque structure dissipative hors équilibre. Nécessitant un flux d'énergie rentrant considérable (162 PWh, en 2021), elle produit 90 T \$ de richesses, mais émet 35 Gt de CO<sub>2</sub> dans l'environnement.

Comme toute structure dissipative, la société de croissance est un système ouvert (libre échange), ordonné (ordre, autorité) et inégalitaire (inégalités sociales). La réduction de la pauvreté passant par la création de richesses, elle est donc indissociable d'ouverture, d'ordre et d'inégalités. En revanche, et contrairement à ce qui est ancré dans l'imaginaire collectif, l'égalitarisme, le désordre et la fermeture (qui correspond à l'équilibre thermodynamique) ne réduisent pas la pauvreté, mais, au contraire, l'accroissent.

## Le concept de structure dissipative

Albert Einstein considérait la thermodynamique comme « la seule science au contenu universel ». Pourtant, les scientifiques en ont au tout début restreint l'application aux seuls « états d'équilibre » : lorsqu'on laisse évoluer naturellement un système fermé, il converge vers un état égalitaire (pressions, températures...), désordonné et irréversible associé à une perte totale de mouvement et d'information. À l'équilibre, les flux s'arrêtent et le système ne peut plus fournir aucun travail : l'équilibre thermodynamique peut être qualifié de « mort clinique » du système.

Pour lutter contre cette situation mortifère pourtant de loin la plus probable, la nature a imaginé le concept de « structure dissipative », théorisé au début des années 1970 par le chimiste belge Ilya Prigogine. Maintenu en permanence hors équilibre, car ouverte sur son milieu extérieur (c'est-à-dire son environnement), ordonnée mais inégalitaire, une structure dissipative y puise des ressources matérielles et énergétiques, en conserve l'énergie de haute valeur (on parle de thermodynamique d'énergie « libre ») pour son fonctionnement propre et y rejette des déchets.

Tous les systèmes naturels inertes (galaxies, étoiles, planètes) mais aussi vivants (végétaux, animaux) survivent de cette façon dans un univers cherchant pourtant à tout instant à leur imposer l'équilibre thermodynamique. Le corps humain n'échappe pas à la règle : vous mangez et vous respirez (flux d'énergie rentrant), vous bougez, vous pensez et vous maintenez votre température à 37°C (énergie libre) et vous rejetez dans l'environnement du CO<sub>2</sub> et des excréments (flux de déchets sortant). Quant à l'équilibre thermodyna-

mique du corps humain, il correspond tout simplement à la mort clinique : votre température retourne à celle de la pièce (égalité), votre corps est dispersé dans l'humus du sol (désordre) et vous perdez la richesse de vos mouvements et l'information stockée dans votre cerveau.

Plus une structure dissipative est complexe, et plus elle réclame un flux important d'énergie<sup>1</sup>. Ainsi, par unité de masse, le cerveau humain consomme 15 millions de fois plus d'énergie qu'une galaxie !

## Premières incursions de l'humanité hors équilibre

En tant que chasseur cueilleur, l'« homme animal » vivait en quasi équilibre thermodynamique avec son environnement, attendant la générosité de la nature pour lui fournir sa nourriture. Il n'est donc pas étonnant que son espérance de vie « a-sociétale » ne fût que de 28 ans.

En inventant le feu, il y a environ 500 000 ans, l'homme a rompu son équilibre thermodynamique originel. Les applications domestiques du feu (chauffage, cuisson des aliments) ont accru significativement son espérance de vie, qui est passée en quelques milliers d'années de 28 à 33 ans. Mais, en consommant des ressources (bois) et en émettant des déchets (fumée et cendres), l'homme primitif transforma progressivement son organisation sociale en structure dissipative. Au fur

<sup>1</sup> CHAISSON Éric J. (2014), "The Natural Science Underlying Big History", *The Scientific World Journal*, volume 2014, article ID 384912, 41 pages.

et à mesure de ses nouvelles inventions (la pierre et le harpon au paléolithique, puis l'agriculture, le cuivre, le bronze, le fer et la roue au néolithique), il améliora ses conditions de vie, mais, en parallèle, augmenta significativement sa consommation de ressources et ses émissions de déchets. Comme toute structure dissipative, la société antique qu'il inventa devint aussi de plus en plus ouverte (échanges commerciaux), ordonnée (organisation, autorité) et inégalitaire, avec notamment le développement de l'esclavage à grande échelle.

Pourtant assez rapidement l'« horloge technologique » s'arrêta et le développement humain stagna pendant plusieurs millénaires. Ainsi, entre le char de Ramsès II poursuivant Moïse à travers la mer Rouge, celui de Ben Hur combattant Messala dans les arènes de Rome et la diligence du début du XIX<sup>e</sup> siècle, on observe aucune percée technologique (voir la Figure 1). Ces observations sont confirmées par les travaux de l'économiste britannique Angus Madison<sup>2</sup>, lequel à partir de standards sociétaux a reconstitué l'histoire de la croissance économique depuis l'Empire Romain. Entre l'Antiquité et le début du XIX<sup>e</sup> siècle, l'homme ne parvint pas à améliorer son niveau de vie. Ainsi, sous le premier Empire, l'espérance de vie est de 35 ans, soit seulement deux petites années de plus qu'au temps des hommes des cavernes !

Alors que durant vingt siècles, le PIB mondial était resté quasi stationnaire (voir la Figure 2), il décolla d'abord lentement à partir de la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> siècle,



Figure 1 : Entre l'Antiquité et le début du XIX<sup>e</sup> siècle, l'homme n'enregistre pratiquement aucun progrès technique.



Figure 2 : Évolution du PIB mondial depuis l'An mille (d'après Madisson).

<sup>2</sup> [https://www.lemonde.fr/idees/article/2010/02/22/angus-maddison-met-le-chiffre-au-service-de-la-pensee-par-pierre-jacquet\\_1309494\\_3232.html](https://www.lemonde.fr/idees/article/2010/02/22/angus-maddison-met-le-chiffre-au-service-de-la-pensee-par-pierre-jacquet_1309494_3232.html)

puis sa croissance s'accéléra exponentiellement après le second conflit mondial. À l'échelle de l'humanité, la croissance économique et le développement humain qui en résulte apparaissent comme des anomalies historiques. D'où la question clé : quelles sont les raisons structurelles d'une telle rupture dans l'évolution des sociétés humaines ?

## Les trois piliers du développement humain

La société de croissance repose sur trois piliers : un contexte (la démocratie libérale), un catalyseur (la technologie) et un aliment (l'énergie).

Elle est née à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, dans un contexte amorcé 250 ans plus tôt par la révolution copernicienne (combat séculaire contre le géocentrisme gravé dans la Bible !), puis a été progressivement consolidée par les Lumières, durant la seconde moitié du XVIII<sup>e</sup> siècle. Si l'humanité ne s'était pas libérée d'un carcan religieux qui avait confisqué la pensée pendant vingt siècles, la Révolution industrielle n'aurait pas été rendue possible. Les travaux de Madison démontrent, sans ambiguïté, la corrélation à la fois temporelle et spatiale entre la naissance de la croissance économique et l'émergence de la démocratie libérale.

Sur le plan technologique, la machine à vapeur de l'écossais James Watt a changé du tout au tout notre regard sur le monde. Transformant miraculeusement le « feu des hommes des cavernes » en énergie mécanique, elle dégagait une force mécanique puissante et maîtrisable. Il serait toutefois injuste d'attribuer à Watt le monopole technologique de la révolution industrielle. Cinquante ans plus tard, l'Anglais Michael Faraday produisit du courant électrique en faisant tourner un disque dans l'entrefer d'un aimant. Pourquoi se fatiguer ? La machine à vapeur de Watt pouvait sans effort faire tourner le disque de Faraday. En moins d'un demi-siècle, les deux savants avaient découvert le principe du générateur électrique. Vingt ans plus tard, le Croate Nikola Tesla inversa le processus en utilisant le courant électrique pour faire tourner le disque de Faraday. Le moteur à induction fermait la boucle : le « feu des hommes des cavernes » pouvait à souhait se transformer en énergie mécanique et en électricité (voir la Figure 3 page suivante). Plus besoin du labeur de l'homme et du travail du cheval pour produire, les machines travaillaient à leur place avec une efficacité démultipliée.

Malheureusement, si « le feu des hommes des cavernes » était venu à manquer, les géniales inventions de Watt, Faraday et Tesla se seraient rapidement transformées en froides et immobiles pièces de musée. Si la technologie est le catalyseur endogène de la croissance, l'énergie en est l'aliment exogène. Il n'est donc pas étonnant que dès le début de la révolution industrielle, la croissance économique se soit goulument nourrie d'énergies en général, et d'énergies fossiles en particulier. En 2021, ces dernières représentaient toujours 82 % de la consommation mondiale d'énergie primaire.



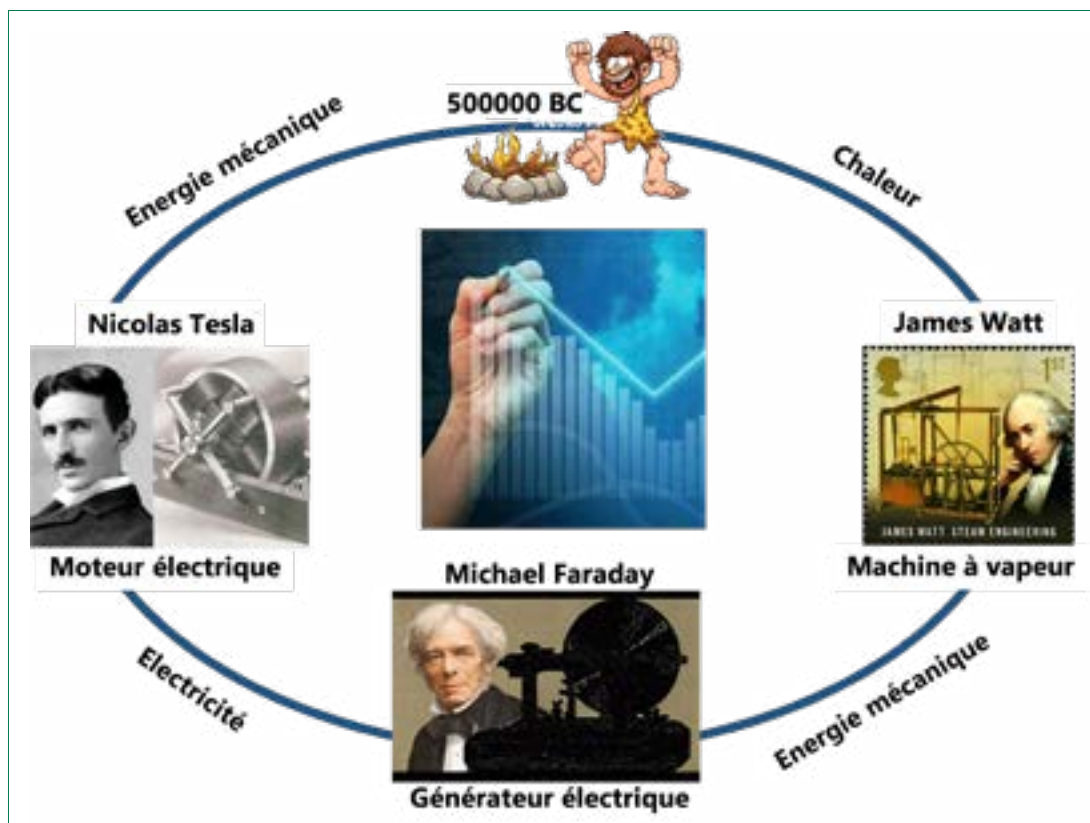


Figure 3 : La boucle technologique.

## La société de croissance : une gigantesque structure dissipative

Comme tous les systèmes naturels inertes et vivants, la société de croissance est une structure dissipative hors équilibre (voir la Figure 4). Son flux d'énergie entrant (162 PWh) a produit en 2021 90 T \$ de richesses et rejeté 35 Gt de  $\text{CO}_2$  dans l'environnement. Elle met en lumière deux paramètres fondamentaux :

- d'une part, l'intensité énergétique, qui correspond à la quantité d'énergie entrante rapportée à la richesse produite. Plus l'intensité énergétique est faible, et plus le système énergétique est performant, puisqu'une même production de richesses requiert moins d'énergie. Réduire l'intensité énergétique relève à la fois de mesures technologiques dans les

transports, l'habitat, l'industrie et la génération électrique, mais aussi de comportements énergétiques plus vertueux ;

- et, d'autre part, l'intensité carbone, qui représente la quantité de déchets produits (tonnes de  $\text{CO}_2$ ) par unité d'énergie entrante. Réduire l'intensité carbone nécessite de remplacer les énergies très carbonées (charbon, pétrole) par des énergies moins carbonées (gaz naturel) ou décarbonées (nucléaire, hydroélectricité, énergies renouvelables). La décarbonation du MWh passera essentiellement par une électrification des usages dans les transports (voiture électrique, hydrogène vert), l'habitat (pompes à chaleur) et l'industrie (réduction du minerai de fer à l'hydrogène, utilisation de fours à arc électrique dans la sidérurgie, les verreries et les cimenteries).

Le produit intérieur brut (PIB) mesure, quant à lui, la somme monétaire des biens (richesses matérielles) et des services (richesses intellectuelles) produits sur une année. La société de croissance ne peut donc se maintenir hors équilibre qu'aux dépens de son environnement. Un processus admirablement résumé par l'économiste roumain Georgescu-Roegen<sup>3</sup> : « la joie de vivre se nourrit de basse entropie puisée dans l'environnement ».

Comme toute structure dissipative, la société de croissance est un système ouvert (libre échange), ordonné (ordre, autorité) et inégalitaire (inégalités sociales).

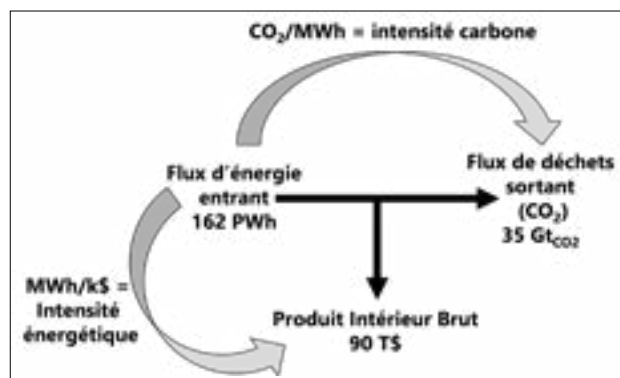


Figure 4 : Le modèle énergétique de la société de croissance.

<sup>3</sup> GEORGESCU-ROEGEN Nicholas (1970), *La Décroissance – Entropie, Écologie, Économie*, Éditions Sciences de la Terre.

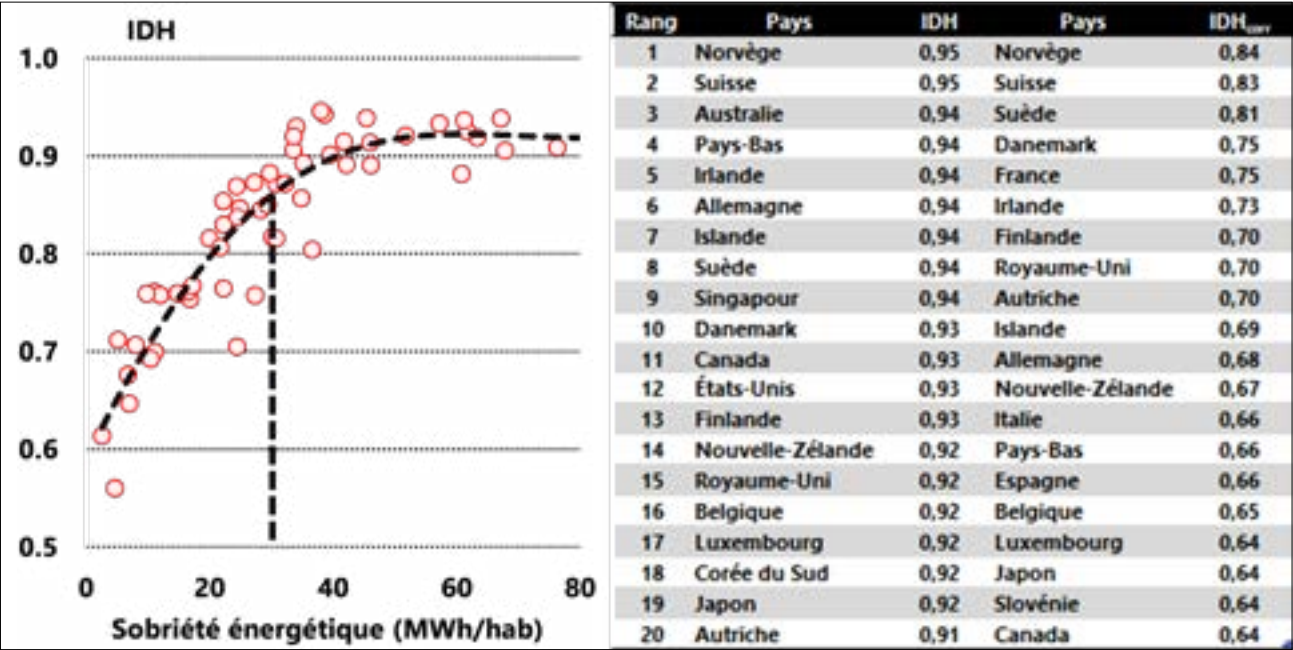


Figure 5 : Évolution de l'IDH en fonction de la consommation d'énergie – Indice de développement humain avant et après corrections environnementales – Source : UN, Banque mondiale, BP Statistical Review 2020.

La réduction de la pauvreté passant par la création de richesses, elle est donc indissociable d'ouverture, d'ordre et d'inégalités. En revanche, et contrairement à ce qui est ancré dans l'imaginaire collectif, l'égalitarisme (qui correspond à un équilibre thermodynamique), le désordre et la fermeture de l'économie accentuent la pauvreté.

### Croissance économique, énergie et développement humain

Est-il besoin de chiffres pour démontrer l'extraordinaire aptitude de la croissance économique à stimuler le développement humain ? Les messages que nous envoient les différents indicateurs sont tellement limpides qu'il peut paraître inutile de les commenter.

À la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, la mortalité infantile, en France, était encore de 15 %. Elle est tombée à 5 % en 1950 et à 1 % au début des années 1980. Depuis 2010, elle est tombée à 0,3 % dans la plupart des pays développés. À l'autre extrémité de la vie, la croissance économique a été le principal propulseur de l'espérance de vie. Au milieu du XVIII<sup>e</sup> siècle, la durée de vie moyenne d'un Terrien n'excédait pas 35 ans. Durant les Trente Glorieuses, l'espérance de vie était voisine de 65 ans. Elle est aujourd'hui supérieure à 80 ans. Les dépenses de santé vont évidemment de pair avec la croissance de la richesse. Tandis que les pays les plus pauvres dépensent annuellement moins de 100 \$/hab. pour la santé, dans les pays les plus développés, ces dépenses dépassent souvent les 5 000 \$. Richesses, dépenses de santé, mortalité infantile et espérance de vie sont bien évidemment étroitement liées. L'environnement n'y échappe pas. N'en déplaise à certains, l'écologie est un « sport de riches » très peu pratiqué dans les pays pauvres.

La richesse n'est pas que matérielle. Elle est aussi synonyme d'éducation et de comportements plus vertueux. Si la croissance économique n'est en rien une garantie d'honnêteté, elle y contribue indirectement par le truchement des règles logiques qu'elle impose à la société. Dans les faits, les démocraties libérales sont de loin les pays les moins corrompus.

Publié tous les ans par l'ONU et combinant trois indicateurs principaux (PIB/hab., espérance de vie et nombre d'années d'éducation à partir de 15 ans), l'indice de développement humain (IDH) établit une hiérarchie du développement. L'énergie étant le principal « aliment de la croissance », elle est par construction un ingrédient majeur du développement humain. Le développement optimal se situe entre un « socle de pierre » de 30 MWh, au-dessous duquel l'entrée dans le sous-développement peut s'avérer très rapide, et un « plafond de verre » de 50 MWh, au-dessus duquel on entre dans une société de gaspillage énergétique (voir la Figure 5 ci-dessus – Graphique de gauche), le surcroît de consommation n'augmentant que marginalement le niveau de développement. Ainsi, pour des niveaux de développement similaires, un Américain (80 MWh/hab.) consomme annuellement deux fois plus qu'un Européen (40 MWh/hab.). Il existe donc une marge importante d'optimisation énergétique de notre société de croissance. Hélas, au gaspillage énergétique vient se superposer la croissance démographique. Même si les pays de l'OCDE optimisent leur consommation, le louable objectif consistant à amener les 8 milliards de Terriens actuels au-dessus du socle de pierre n'est pas compatible avec une réduction de la consommation mondiale. Il conduirait à une consommation annuelle d'énergie de 240 PWh, soit 50 % de plus que les 162 PWh consommés en 2021.



## Vers un développement durable reposant sur une croissance soutenable

En ramenant l'intensité énergétique des pays émergents au niveau de celle de l'Europe, le PIB mondial actuel serait obtenu avec 2,5 fois moins d'énergie ; en ramenant l'intensité carbone du monde à hauteur de celle de la France, les émissions seraient réduites de moitié. Autrement dit, les meilleures technologies et les meilleurs comportements pourraient permettre de faire 5 fois mieux. Les réserves quant à l'optimisation de notre société de croissance sont donc considérables. Encore faut-il transcender nos résistances tant sur le plan collectif qu'individuel, privilégier les faits à l'intérêt et à la croyance, la science à l'idéologie. En d'autres termes, le développement humain peut être « durable » s'il repose sur une croissance « soutenable » prenant en compte non seulement les aspects économiques et sociétaux, mais aussi les aspects énergétiques et environnementaux.

En 1987, la Commission Brundtland<sup>4</sup> a ouvert la voie au concept de « développement durable », qui repose sur la gestion simultanée de trois capitaux complémentaires mais non substituables : le sociétal, l'économique et l'environnemental. La stabilité d'un tel modèle<sup>5</sup> demande que les sphères économique et sociétale soient contraintes par la sphère environnementale.

La transition énergétique s'inscrit dans ce concept et s'appuie sur trois piliers en parfaite bijection avec les trois capitaux du développement durable. Le premier est sociétal et se devra d'assurer la sécurité énergétique aux 1,3 milliard de Terriens n'ayant pas aujourd'hui accès à l'électricité, notamment en Afrique<sup>6</sup>. Le second est économique et concerne la compétitivité des entreprises, qui, dans de nombreux secteurs d'activité, est conditionnée par les prix des énergies. Le troisième, environnemental, relève de la problématique climatique. Il requiert une réduction impérative et rapide de notre consommation d'énergie en général, et des énergies fossiles en particulier. Comme le répète souvent le patron de TotalEnergies, Patrick Pouyanné, l'énergie doit être à la fois « disponible, abordable et propre ».

Or, si le calcul actuel de l'IDH tient compte des aspects économiques (richesse par habitant) et sociétaux (éducation et santé), il ignore la dimension environnementale. Une dimension qui bouleverserait de façon très significative la hiérarchie mondiale du développement (voir la Figure 5 de la page précédente – Tableau de droite). En prenant en compte dans la détermination de l'IDH l'intensité énergétique et l'intensité carbone<sup>7</sup>, la France qui ne fait pas partie du top 20 intègrerait le top 5, alors

que Singapour, l'Australie, la Corée du Sud et surtout les États-Unis disparaîtraient d'un top 20 composé de dix-sept pays européens (le premier pays non européen, la Nouvelle-Zélande, occupant la douzième place). La hiérarchie européenne serait elle-même profondément bouleversée : le Danemark passerait de la dixième à la quatrième place et le Royaume-Uni de la quinzième à la huitième, alors que les Pays-Bas régresseraient de dix places, et l'Allemagne, malgré son très coûteux Energiewende, de cinq.

Une telle révision du concept de développement devrait réconcilier deux visions opposées de la société : l'une conservatrice issue des Trente glorieuses privilégie l'économie et le sociétal aux dépens de l'environnement, et serait même négationniste quant à la réalité du réchauffement climatique et de ses conséquences ; tandis que l'autre, écologiste, hypertrophie le pilier Climat et promeut une société décroissantiste sacrifiant le développement humain sur l'autel du climat.

La nature est trop précieuse pour l'endommager mais le développement humain est trop précieux pour y renoncer. À tout instant, ressasons-nous cette parole prémonitoire de Francis Bacon : « on ne commande à la nature qu'en obéissant à ses lois ».

<sup>4</sup> Nom donné à la Commission en reconnaissance de l'action du Premier ministre norvégien Gro Harlem Brundtland, qui présida la Commission mondiale de l'environnement et du développement.

<sup>5</sup> Économiste au département Environnement de la Banque mondiale, H. Dally est étroitement attaché à la théorie de la Steady State Economy.

<sup>6</sup> EUROGROUP (2015), « L'énergie en Afrique à l'horizon 2050 ».

<sup>7</sup> CHARLEZ Ph. (2022), « L'utopie de la croissance verte. Les lois de la thermodynamique sociale », Éditions J.-M. Laffont.

# L'EROI et son importance dans l'évaluation des performances des systèmes énergétiques<sup>1</sup>

Par Gérard BONHOMME

Professeur émérite à l'Institut Jean Lamour – Campus Artem – Université de Lorraine,  
et président de la commission Énergie & Environnement de la Société française de physique

Et Jacques TREINER

Chercheur associé au Laboratoire interdisciplinaire des énergies de demain  
et président du comité d'experts du Shift Project

Satisfaire les besoins en énergie de nos sociétés, dans un contexte de lutte contre le réchauffement climatique et de perspectives d'épuisement des stocks de combustibles fossiles et de ressources minérales, requiert de mettre en œuvre des solutions alternatives à bas-carbone. Le coût du MWh est sans doute un critère utile, mais, comme nous le montrons dans cet article, des critères physiques sont indispensables pour évaluer les solutions technologiques et les scénarios énergétiques envisageables. Le principal de ces critères fondés sur des grandeurs physiques est le taux de retour énergétique (EROI), qui mesure l'efficacité d'un système à fournir à la société une énergie utile pour des secteurs d'activité autres que le secteur énergétique lui-même.

## Introduction

Les sociétés humaines sont soumises, pour ce qui concerne la gestion de leur approvisionnement énergétique, à des contraintes analogues à celles des individus vis-à-vis de leur nourriture. Pour se maintenir et se développer, une société ne doit consacrer qu'une fraction de ses ressources énergétiques à l'obtention de ces mêmes ressources. L'essor de nos sociétés industrielles n'a été rendu possible que par la mise en œuvre de ressources énergétiques comme le charbon et le pétrole, qui ont démultiplié les capacités de transformation de la matière, tout en ne consacrant qu'une faible partie de l'énergie à l'obtention de ces ressources. L'évaluation de l'accès à des ressources énergétiques permettant d'assurer le bon fonctionnement de nos sociétés complexes nécessite de s'appuyer sur des critères fondés sur des grandeurs physiques objectives. La seule prise en compte de critères économiques à court terme est insuffisante et souvent trompeuse. Le premier point à considérer est donc celui de la quantité d'énergie dont une société peut disposer, compte tenu de l'autoconsommation du secteur énergétique lui-même. Le concept d'EROI permet une approche physique de ce point fondamental.

<sup>1</sup> Cet article est adapté d'un article original à paraître prochainement dans le cadre d'un numéro spécial sur l'énergie de la revue *Reflets de la physique*.

## Taux de retour en énergie (EROI)

### Définition et méthodologie

Pour survivre dans un environnement donné, tout animal doit être capable de fournir, à travers son métabolisme, l'énergie associée au travail qu'il lui a fallu dépenser pour acquérir sa nourriture et celle de ses petits, au travail correspondant à différentes activités vitales (battements du cœur, respiration, reproduction, confection du nid ou du terrier, etc.), à la chaleur produite pour assurer le maintien de sa température (s'il est à sang chaud) et à l'énergie chimique liée au renouvellement de ses cellules. Il aura d'autant plus de possibilités de pouvoir se livrer à l'ensemble des activités vitales précitées que la fraction de l'énergie musculaire dépensée pour acquérir de la nourriture sera faible. Cela dépend non seulement des performances intrinsèques de l'organisme, mais aussi de l'abondance de la nourriture et de la facilité à l'obtenir. C'est justement dans le cadre de l'écologie qu'a été introduite une grandeur mesurant le rapport entre l'énergie mise à la disposition du métabolisme (la nourriture) et l'énergie investie pour obtenir la première à partir de l'environnement. Dans le cas du métabolisme humain, l'on peut comprendre ainsi que la dépense énergétique d'un groupe de chasseurs-collecteurs ait pu varier dans d'assez grandes proportions, selon qu'il suffisait à ses

membres de tendre les bras pour collecter une nourriture abondante ou que ceux-ci aient dû, au contraire, parcourir de vastes distances pour chasser un gibier qui était rare.

De façon plus générale, et pour n'importe quel système énergétique, il est intéressant de considérer l'énergie mise à disposition –  $E_{\text{out}}$  – rapportée à l'énergie investie pour l'obtenir –  $E_{\text{in}}$ . Ce rapport est appelé EROI, de l'acronyme anglais "Energy Return On Invested".

$$EROI = \frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{in}}}$$

L'EROI mesure les performances d'un système dans l'extraction de l'énergie utilisable à partir de son environnement, ce qu'il ne faut surtout pas confondre avec son efficacité à convertir la chaleur obtenue en brûlant un combustible (la nourriture) en d'autres formes d'énergie, en particulier en énergie mécanique, une efficacité que l'on mesure au travers de son rendement thermodynamique. Les êtres vivants comme les machines thermiques sont envisagés ici comme des multiplicateurs d'énergie (ou plutôt d'exergie<sup>2</sup>), le facteur amplificateur étant défini par l'EROI.

Si l'on raisonne à l'échelle de la société tout entière,  $E_{\text{out}}$  désigne l'énergie primaire totale mise à disposition en investissant l'énergie  $E_{\text{in}}$ , qui représente l'autoconsommation du secteur énergétique. De là, on peut exprimer la fraction d'énergie nette restant disponible pour d'autres usages que la production d'énergie par la relation :

$$\frac{E_{\text{out}} - E_{\text{in}}}{E_{\text{out}}} = 1 - \frac{1}{EROI}$$

<sup>2</sup> L'énergie est la grandeur physique qui permet de quantifier toutes les transformations internes et tous les échanges avec le milieu extérieur pour n'importe quel système thermodynamique. Le concept d'énergie peut donc revêtir des formes très diverses. On connaît bien sûr la différence fondamentale entre chaleur et travail, que, justement, le concept d'énergie a permis de réunir au début de la construction de la science thermodynamique et de la découverte de ses lois fondamentales (premier et second principes). Le concept d'exergie a été introduit pour prendre en compte la capacité d'une forme donnée d'énergie à être convertie en travail mécanique. L'exergie désigne ainsi la quantité maximale de travail qui peut être récupérée et, de là, la qualité d'une forme donnée d'énergie peut être caractérisée par la fraction d'exergie qu'elle contient. L'évaluation de cette fraction implique de considérer une transformation thermodynamique. L'énergie stockée dans les combustibles fossiles, qui est mesurée par l'enthalpie de combustion (pouvoir calorifique inférieur ou supérieur selon l'état de référence), est en principe et idéalement de la pure exergie, qui correspond alors à l'énergie libre de Gibbs : on peut ainsi imaginer sa transformation totale en travail dans un cycle de Carnot, dont le rendement de conversion est donné par  $1 - T_0/T$ , dans la limite d'un rapport de températures infinies entre la source froide et la source chaude, ce qui n'est bien entendu jamais le cas dans la réalité. Mais ce contenu en enthalpie ne suffit pas à caractériser la qualité d'une forme d'énergie portée par un vecteur énergétique (électricité, chaleur, etc.). Pour l'électricité, il s'agit aussi de pure exergie, mais pour la chaleur, dont seule une partie peut être convertie en travail mécanique dans un cycle thermodynamique, la fraction exergétique est mesurée par le rendement du cycle de Carnot idéal, et dépend évidemment de sa température (voir, par exemple, V. Court (<https://doi.org/10.1007/s41247-019-0059-6>) [2]).

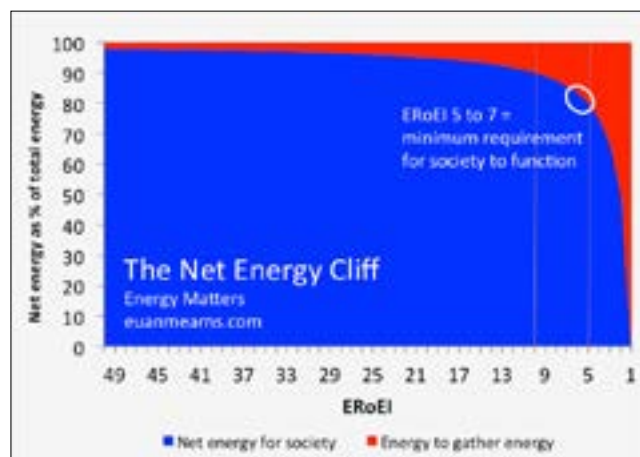


Figure 1 : « Falaise » du taux d'énergie disponible pour les autres usages que sa propre production [1].

La variation de cette fraction (en pourcents) en fonction des EROI décroissants est représentée sur la Figure 1. Elle manifeste une décroissance très rapide en-deçà d'un EROI voisin de 5, d'où l'introduction du terme de « falaise de l'énergie », traduisant le fait que si l'EROI passe en dessous de 5, il ne reste dès lors que très peu d'énergie disponible pour satisfaire d'autres besoins que celui de la recherche d'énergie elle-même<sup>3</sup>.

Comment utiliser ce concept d'EROI pour caractériser les systèmes énergétiques mis en œuvre dans nos sociétés ?

Le premier exemple d'utilisation concerne le cas de l'approvisionnement en combustibles fossiles. Le cas particulier du pétrole et du coût énergétique de son extraction sert même de référence. Cet exemple permet aussi d'illustrer les diverses façons de caractériser un système énergétique par la notion d'EROI.

- EROI-standard ( $EROI_{\text{st}}$ ) : c'est, en sortie de puits, le rapport du nombre de tonnes de pétrole extraits à son équivalent énergétique, exprimé en tonne-équivalent pétrole (tep), dépensé pour son extraction. Ainsi, dans les meilleures années de l'extraction pétrolière, ce nombre était de l'ordre de 100:1. Aujourd'hui, l'EROI du pétrole est de l'ordre de 30:1, et tombe même en dessous de 10:1 pour les sables bitumineux.

<sup>3</sup> Un être vivant convertit une partie de sa ration alimentaire quotidienne en énergie musculaire, qui lui permet d'agir sur son environnement, notamment pour se déplacer dans le but de collecter sa nourriture. Un EROI seuil correspondrait alors à la situation où il devrait mobiliser la totalité de cette énergie musculaire pour la collecte de sa nourriture, ce qui ne lui laisserait évidemment aucun surplus. Pour un être humain, on trouve, en retenant un rapport entre une puissance moyenne dissipée estimée à 125 W et une puissance musculaire moyenne d'environ 25 W, un EROI seuil de 5 (= 125/25). Cela correspond bien sûr, dans ce cas, à l'inverse du rendement de la conversion de l'apport en nourriture en énergie musculaire. Cette valeur minimale montre qu'il existe déjà un seuil essentiel correspondant à la nécessité pour le métabolisme de satisfaire tous ses propres besoins en énergie. Il en va de même pour une société qui doit pouvoir s'alimenter et, au-delà, pouvoir assurer, au meilleur coût énergétique et sans impacter négativement les besoins de son propre métabolisme, son approvisionnement en énergie et ressources à partir de son environnement.

- EROI-point d'utilisation ( $EROI_{pu}$ ) : le pétrole brut n'est pas utilisable en tant que tel. Il convient de le transporter jusqu'à une raffinerie (d'où un premier coût énergétique investi), de le raffiner (autre coût investi), puis de le transporter jusqu'à un réseau de distribution (troisième coût investi). L'énergie investie est donc supérieure à l'énergie correspondant au cas précédent, si bien que  $EROI_{pu} < EROI_{st}$ .

### L'évolution de l'EROI au cours du temps et selon la géographie

L'EROI d'une ressource énergétique varie au cours du temps. La disponibilité de la ressource, son abondance et le progrès technologique affectent à la fois le numérateur ( $E_{out}$ ) et le dénominateur ( $E_{in}$ ). La question se pose différemment pour les énergies de stock et les énergies de flux.

Concernant les combustibles fossiles, l'analyse de séries longues est rendue difficile par le manque de données techniques permettant d'effectuer une comptabilité en termes purement énergétiques. Une approche consiste alors à prendre les coûts monétaires (les prix) comme « proxy », c'est-à-dire comme de bonnes représentations des coûts énergétiques. L'idée est que toute dépense énergétique correspond à des transformations de la matière, ces transformations mettant en jeu du travail et du capital qui ont, tous deux, une valeur monétaire. Cette approche présente évidemment des biais, associés notamment au fait que tout mouvement purement spéculatif introduit des fluctuations non significatives du point de vue énergétique.

Une analyse parmi les plus récentes et les plus complètes présente différentes façons de lisser ces fluctuations de façon à dégager des tendances lourdes [3]. Elle indique que l'EROI du pétrole et celui du gaz sont passés par leurs maximums respectifs dans les années 1930 et 1940, avec des valeurs respectives de 50 :1 et de 150 :1. Celui du charbon est en revanche toujours croissant. Ces tendances doivent être mises en corrélation avec la production annuelle de ces différentes ressources : on s'attend en effet à ce qu'au début de l'exploitation, la découverte de nouveaux gisements et la maîtrise progressive de leur extraction fassent croître leur EROI, mais qu'avec l'épuisement d'une ressource de stock et, de fait, la moindre richesse des gisements, leur extraction soit de plus en plus difficile et exige la mise en œuvre de techniques de plus en plus coûteuses, ce qui fait décroître l'EROI.

Pour les énergies de flux, qui, elles, sont bien inépuisables, la variabilité de l'EROI se pose non seulement en termes de progrès technologiques, mais également en termes de disponibilité géographique et de quantités suffisantes pour répondre à la demande.

Deux études détaillées récentes [4, 5] se sont intéressées à la disponibilité et à la qualité des ressources pour l'éolien et le solaire selon les localisations géographiques. On s'attend naturellement à ce que l'EROI varie en fonction du flux disponible selon la localisation. En utilisant un maillage complet de la surface terrestre et en prenant en compte les potentiels et les surfaces disponibles par cellule, les auteurs obtiennent des esti-

mations des quantités d'énergie accessibles. Dans le cas particulier de la production d'électricité à partir du flux solaire, les auteurs ont déterminé pour les différentes technologies (solaire photovoltaïque et solaire à concentration) les quantités d'énergie accessibles par plage d'EROI. Au niveau mondial, avec une surface disponible de l'ordre de 5 %<sup>4</sup> de la surface totale des terres, le potentiel photovoltaïque maximal accessible avec un EROI supérieur à 9 s'élève à 184 EJ/an, soit 51 150 TWh, dont 67 % pour l'Afrique et... 0 % pour l'Europe (à comparer aux quelques 25 000 TWh d'énergie électrique consommées aujourd'hui). Or, l'EROI calculé par les auteurs est déjà nécessairement surévalué, car il ne prend pas en compte les dépenses énergétiques liées au stockage. Le résultat pour l'Europe est particulièrement significatif : en considérant des valeurs d'EROI aussi petites que 4, le potentiel maximal pour le solaire photovoltaïque se monte à 10 EJ/an, soit 2 780 TWh/an (à comparer à la consommation électrique annuelle actuelle, de 3 330 TWh). Ce résultat correspond bien à ceux mis en évidence par Prieto et Hall [6] et par Weißbach *et al.* [7] (sans stockage), comme on va le voir ci-après.

Un autre exemple est donné à travers la biomasse. Son utilisation pour la production d'électricité est considérée dans le paragraphe suivant. Mais une approche plus pertinente, au regard de son utilisation depuis l'invention de l'agriculture (et du stockage des ressources), tient compte des usages majoritaires de la biomasse dans le monde : en tant que nourriture et source de chaleur. On trouvera des analyses intéressantes des taux de retour en énergie pour différents types de pratiques agricoles dans les travaux récents de Carl Jordan [8], et de S. Harchaoui et P. Chatzimpiros [9].

### EROI des sources d'énergie électrique

Avec la part de plus en plus importante prise par l'électricité, il convient de se demander comment adapter le concept d'EROI à des sources électrogènes de façon à pouvoir les comparer.

Dans ce cas, on choisira pour  $E_{out}$  l'énergie électrique produite. Il s'agit donc ici de l'EROI-standard.

Précisons à ce niveau la nécessité de prendre en compte une différence fondamentale entre les sources pilotables, que sont les centrales thermiques traditionnelles, et les sources électrogènes non pilotables, que constituent les éoliennes ou les parcs photovoltaïques. La puissance électrique variable délivrée au cours du

<sup>4</sup> Il s'agit simplement d'un ordre de grandeur. On trouvera une discussion complète dans l'article de Dupont E. *et al.* Dans leurs estimations, les auteurs ont pris en compte des taux de couverture variables selon les régions et les types de technologies mises en œuvre (centrales solaires, solaire de toiture, etc.). On retrouve cet ordre de grandeur de 5 % dans d'autres travaux, par exemple, ceux de MacKay D. ([https://www.withouthotair.com/c6/page\\_41.shtml](https://www.withouthotair.com/c6/page_41.shtml)) et de Perez M. et Perez R. (2022) (<https://doi.org/10.1016/j.seja.2022.100014>). Mais le point essentiel est que les estimations faites à partir de ce taux de 5 % de la quantité d'énergie récupérable annuellement diffèrent considérablement selon le seuil d'EROI choisi. Pour Dupont *et al.*, elles varient de 1 194 EJ (332 000 TWh), en l'absence de fixation d'un seuil, à 184 EJ (51 110 TWh), pour un EROI > 9.



temps ne peut être prise en compte pour constituer l'énergie utilisable que si elle répond à tout instant à la demande du réseau. La situation peut être comparée à celle d'un être vivant qui, dans un environnement donné, ne serait pas en mesure de collecter sa nourriture à un rythme correspondant aux besoins de son métabolisme. En l'absence de possibilité de stockage d'une partie de la nourriture collectée, celle-ci serait irrémédiablement perdue, avec une incidence majeure sur l'EROI.

Notons cependant que la capacité d'un réseau électrique à intégrer en temps réel la production de sources intermittentes non pilotables dépend du taux de pénétration de ces sources. On peut reprendre la comparaison précédente. Un agriculteur-éleveur peut profiter occasionnellement des ressources en gibier offertes par la forêt voisine, évitant par là même de puiser dans ses réserves.

Les calculs doivent être faits pour l'ensemble du cycle de vie de l'installation, tel qu'illustré par la Figure 2. Il est nécessaire de prendre en compte les coûts énergétiques de la construction de l'installation, de son fonctionnement et de sa maintenance, ainsi que de son démantèlement. On comprend aisément que la durée de vie de l'installation soit déterminante dans la détermination de l'EROI final. On notera que la notion souvent utilisée de « temps de retour en énergie » ne mesure que le temps nécessaire à une installation pour fournir, lors de son fonctionnement, une quantité d'énergie correspondant à celle investie lors de sa construction.

L'évaluation de ces différents coûts énergétiques, qui implique la détermination de ceux de l'extraction, de la mise en œuvre des matériaux et de l'autoconsommation de l'installation, est une tâche ardue. Cette part est représentée en rouge et en orange dans la phase

d'exploitation commerciale du schéma ci-dessus (voir la Figure 2). L'étude complète a été effectuée par une équipe de physiciens allemands (voir la référence bibliographique [7]), dont les résultats seront résumés dans le paragraphe suivant. Compte tenu de la difficulté à déterminer de façon purement physique chaque coût énergétique, nombre d'auteurs, s'appuyant sur le fait que les prix jouent un rôle comparable à celui de l'énergie en matière de mesure universelle des transformations de la matière associées à la création de biens et de services, évaluent les différents termes impliqués dans le calcul des énergies d'entrée et de sortie à partir de leurs équivalents en coûts monétaires. Cela conduit à des difficultés de comparaison, surtout si le lien entre coûts monétaires et coûts énergétiques est établi en termes d'énergie primaire.

En outre, l'examen précis des limites du système à considérer fait d'ailleurs apparaître une différence fondamentale entre les énergies de stock et les énergies de flux. Pour les énergies de stock alimentant des sources pilotables, les équipements auxiliaires qui consomment une partie de l'énergie produite par l'installation sont pour l'essentiel ceux de mise en œuvre des techniques d'extraction minière et, lorsqu'il s'agit de combustible nucléaire, les dispositifs d'enrichissement. Pour les énergies de flux, il est nécessaire de prendre en compte, en tant qu'équipements auxiliaires, les dispositifs de stockage nécessaires pour que l'énergie électrique délivrée réponde vraiment à une demande sociétale : les réseaux électriques fonctionnent en effet avec de la puissance garantie, et non de la puissance intermittente [10]. La prise en compte de cette caractéristique n'est pas toujours effective, alors que son incidence sur l'EROI est, comme on va le voir, tout sauf négligeable.

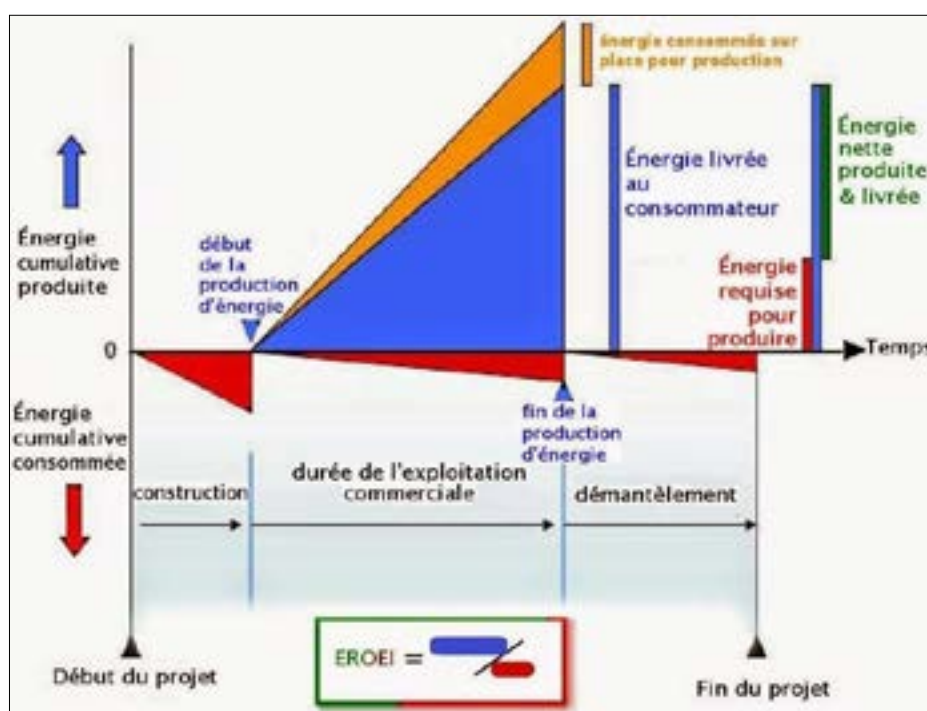


Figure 2 : Schéma simplifié pour l'analyse de cycle de vie d'un système énergétique, d'après la référence bibliographique [7].

## Résultats et discussion

Nous rapportons ici (voir la Figure 3) les résultats obtenus par Weißbach *et al.* En dépit d'inévitables marges d'incertitude, ces résultats fournissent des indications fiables pour les principaux systèmes électrogènes : centrales thermiques alimentées en combustibles carbonés fossiles, à partir de la biomasse, ou en combustible nucléaire ; installations convertissant directement les flux solaire et éolien en énergie électrique.

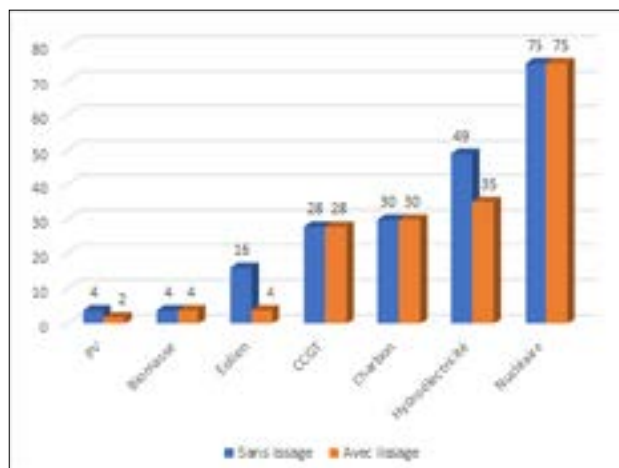


Figure 3 : EROI des principales technologies de production d'énergie électrique [7]. Pour les sources pilotables, les valeurs lissées et non lissées sont identiques. Pour les sources intermittentes, on tient compte du stockage de l'énergie qui permet d'obtenir une production régulière et équilibrée par rapport à la demande (Précision : le sigle CCGT (Combined Cycle Gas Turbine) correspond aux centrales à gaz à cycle combiné). Dans le cas de l'hydroélectricité dite au fil de l'eau, considérée par les auteurs, la valeur lissée correspond à la mise en place de STEP (stations de transfert d'énergie par pompage). Pour le nucléaire, on considère une durée de vie des réacteurs de 60 ans et un enrichissement par centrifugation.

On constate pour le solaire et l'éolien l'énorme incidence sur l'EROI de la prise en compte des dispositifs de lissage et d'équilibrage entre la demande et la production électrique (stockage de l'énergie ou puissance de soutien, par exemple les centrales à gaz). On notera à ce sujet la différence d'ordre de grandeur qui existe entre les fluctuations de la demande journalière d'électricité (typiquement de l'ordre de 10 % de la puissance moyenne appelée) et les fluctuations de la production issue des sources intermittentes, qui sont de l'ordre de la puissance moyenne délivrée (éolien), voire de la puissance installée (solaire PV). C'est ce qui motive le fait de tenir compte des dispositifs de lissage. On remarque aussi sans surprise que plus les sources sont diffuses, plus l'EROI est faible. Quant au nucléaire, on pourrait s'attendre à une valeur de l'EROI encore plus élevée compte tenu de la concentration de cette forme d'énergie<sup>5</sup>. Il n'en est rien. Cela tient essentiel-

lement au coût énergétique élevé de l'enrichissement de l'uranium, ainsi qu'à un faible taux d'utilisation du combustible dans les réacteurs actuels.

La faible performance du solaire photovoltaïque pourrait interroger. Elle fait du reste l'objet d'après débats. Mais les valeurs obtenues par Weißbach *et al.* (pour l'Allemagne) sont, *in fine*, comparables à celles obtenues par Prieto et Hall (pour l'Espagne), tout en utilisant une méthodologie différente. Une comparaison détaillée des deux approches a été effectuée, ce qui est souvent un exercice rendu difficile par la variété des hypothèses faites, en particulier concernant les conditions aux limites considérées et la prise en compte ou non de la gestion de l'intermittence. En effet, les résultats d'analyses se limitant aux panneaux photovoltaïques, bien qu'intéressantes pour évaluer entre elles des technologies, ne sauraient être directement comparées à celles qui considèrent l'installation dans son ensemble, y compris son intégration dans le réseau électrique.

## EROI sociétal<sup>6</sup>

Il est possible d'obtenir une estimation d'un EROI sociétal à partir du poids du secteur de l'énergie dans la formation du produit intérieur brut (PIB). Pour les pays de l'OCDE, cet EROI équivaut à environ 7 %. L'inverse de ce poids donne une valeur comprise entre 14:1 et 15:1. Si l'on pondère cette valeur par le rapport entre l'énergie primaire et l'énergie finale qui, en France, est de 1,9, cela conduit à un EROI sociétal de 7,5 :1. Cette valeur est très inférieure aux valeurs de l'EROI des sources d'énergie, majoritairement fossiles. Cela s'explique par le fait que l'EROI sociétal, contrairement à l'EROI-standard, tient compte des systèmes nécessaires pour que l'énergie soit utilisable par les consommateurs.

Le faible poids du secteur énergétique dans la formation du PIB ne doit pas être pris pour une indication de sa faible importance économique. En effet, l'énergie ne constitue pas un domaine à part, puisqu'elle intervient dans tous les secteurs d'activité, dont elle détermine les capacités de production<sup>7</sup>.

Un aspect à ne pas négliger est l'impact de l'EROI des sources utilisées, et de son évolution temporelle, sur la consommation totale d'énergie. En effet, plus l'EROI

<sup>5</sup> Rappelons qu'une masse de matière engagée dans une réaction nucléaire met en jeu une énergie de l'ordre de plusieurs millions de fois supérieure à celle d'une même masse engagée dans une réaction chimique.

<sup>6</sup> Une évaluation d'un EROI sociétal à partir de grandeurs physiques nécessiterait, par analogie avec l'énergie musculaire dépensée par un être vivant pour prélever sa nourriture sur son environnement, de comptabiliser toutes les dépenses en exergie effectuées pour extraire de l'environnement les ressources nécessaires pour alimenter les chaudières, construire les installations de captage ou de stockage et les infrastructures de distribution de toutes les formes d'énergies prélevées et mises à la disposition de la société. Un seuil absolu pourrait être estimé en considérant que la totalité de l'énergie mécanique et électrique disponible serait consommée par le secteur énergétique, ce qui ne laisserait évidemment rien pour satisfaire les autres besoins essentiels au fonctionnement de la société.

<sup>7</sup> Voir BONHOMME G. & SAFA H. (2023), « L'impact de l'énergie sur le développement des sociétés humaines et l'économie globale », in *Reflets de la physique*, numéro spécial « Énergie » (à paraître).

de ces sources sera bas et plus il faudra augmenter la production d'énergie totale de façon à maintenir la quantité d'énergie nette destinée à couvrir les services énergétiques dont la société a besoin. Deux études récentes [11, 12] examinent ce point dans le cadre de scénarios élaborés pour substituer des ressources renouvelables aux combustibles fossiles dans la production d'énergie électrique.

## Conclusion

De nombreux scénarios de transition énergétique cherchant à respecter les Accords de Paris sur le climat et visant la neutralité carbone pour 2050 ne se fondent que sur les seuls critères de coûts pour la mise en œuvre de sources bas-carbone. Il est pourtant nécessaire de s'appuyer sur des critères physiques objectifs, dont l'un des plus importants est l'EROI. Cette question est fondamentale à l'échelle de toute société, car le maintien et le fonctionnement de ses structures et services (éducation, santé, arts, etc.) ne peuvent être garantis que si l'énergie nette – c'est-à-dire l'énergie totale disponible diminuée de l'autoconsommation du secteur énergétique – est suffisante. À cet égard, le cas très débattu des énergies de flux, en particulier électrogènes, doit être analysé selon ce critère. En revanche, d'autres aspects essentiels, qui interviennent déjà dans l'évaluation de l'EROI, comme la disponibilité des flux, les surfaces mobilisées et les besoins en ressources minérales (voir VIDAL O. (2013) [13]), doivent être analysés de façon distincte.

## Bibliographie

- [1] EUAN MEARNES, <http://euanmearns.com/eroei-for-beginners/>
- [2] COURT V. (2019), "An Estimation of Different Minimum Exergy Return Ratios Required for Society", *BioPhysical Economics and Resource Quality* 4:11, <https://doi.org/10.1007/s41247-019-0059-6>
- [3] COURT V. & FIZAIN F. (2017), "Long-Term Estimates of the Energy-Return-on-Investment (EROI) of Coal, Oil, and Gas Global Productions", *Ecological Economics* 138, pp. 145-159, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.03.015>
- [4] DUPONT E., KOPPELAAR R. & JEANMART H. (2018), "Global available wind energy with physical and energy return on investment constraints", *Applied Energy* 209, pp. 322-338, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.085>
- [5] DUPONT E., KOPPELAAR R. & JEANMART H. (2020), "Global available solar energy under physical and energy return on investment constraints", *Applied Energy* 257, 113968, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113968>
- [6] PRIETO P. & HALL C. (2013), "Spain's Photovoltaic Revolution: The Energy Return on Investment", Springer.
- [7] WEIßBACH D. *et al.* (2013), "Energy intensities, EROIs, and energy payback times of electricity generating power plants", *Energy* 52, pp. 210-221, <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.029> ; *et* (2018), "Energy intensities, EROI (Energy Returned on Invested), for electric energy sources", *EPJ Web of Conferences* 189, 00016, <http://doi.org/10.1051/epjconf/201818900016>
- [8] JORDAN C. F. (2016), "The Farm as a Thermodynamic System: Implications of the Maximum Power Principle",

*Biophysical and Economical Resource Quality* 1:9, <https://doi.org/10.1007/s41247-016-0010-z>

[9] HARCHAOU S. & CHATZIMPIROS P. (2018), "Energy, Nitrogen, and Farm Surplus Transitions in Agriculture from Historical Data Modeling. France, 1882-2013", *Journal of Industrial Ecology* 23, pp. 412-425, <https://doi.org/10.1111/jiec.12760>

[10] FONTECAVE M. & GRAND D. (2021), « Les scénarios énergétiques à l'épreuve du stockage des énergies intermittentes », *Comptes Rendus Chimie*, tome 24, n°2, pp. 331-350, <https://doi.org/10.5802/crchim.115>, <https://comptes-rendus.academie-sciences.fr/chimie/articles/10.5802/crchim.115/>

[11] CAPELLÁN-PÉREZ I., DE CASTRO C. & GONZÁLEZ L. J. M. (2019), "Dynamic Energy Return on Energy Investment (EROI) and material requirements in scenarios of global transition to renewable energies", *Energy Strategy Reviews* 26, November, 100399, <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100399>

[12] DE CASTRO C. & CAPELLÁN-PÉREZ I. (2020), "Standard, Point of Use, and Extended Energy Return on Energy Invested (EROI) from Comprehensive Material Requirements of Present Global Wind, Solar, and Hydro Power Technologies", *Energies* 13, 3036, <https://doi.org/10.3390/en13123036>

[13] VIDAL O. *et al.* (2013), "Metals for a low-carbon society", *Nature Geoscience* 6, pp. 894-896, <https://doi.org/10.1038/ngeo1993>

# Le modèle agro-industriel face au déclin des énergies fossiles

Par Félix LALLEMAND

Docteur en écologie

Le modèle agro-industriel prédomine aujourd'hui dans les systèmes alimentaires des pays industrialisés. Dans cet article, nous présentons les ressorts énergétiques ayant permis l'émergence de ce modèle. Nous étudions le rôle du pétrole et du gaz dans son fonctionnement et cherchons à caractériser sa vulnérabilité dans un monde où la production d'hydrocarbures fossiles connaît un déclin structurel. Nous proposons une évaluation de l'EROI (Energy Return On Investment) du modèle agro-industriel français et discutons de la pertinence de cet indicateur pour l'étude des systèmes alimentaires.

## Les énergies fossiles, carburants de la révolution verte

Au cours de la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle, les systèmes agricoles des pays occidentaux ont connu une profonde mutation. En France, entre 1960 et 2010, la production agricole de biomasse a doublé (Harchaoui et Chatzimpiros, 2018). Dans le même temps, la surface des terres cultivées et des pâtures a diminué de 10 % et le nombre de travailleurs agricoles est passé d'environ six millions – un quart de la population active – à moins de un million (Desriers, 2007). Cette période a donc été marquée par une augmentation forte à la fois des rendements (production à l'hectare) et de la productivité (production par travailleur).

Côté rendement, la hausse a reposé sur trois évolutions techniques majeures : les engrais minéraux, les pesticides de synthèse et la sélection variétale<sup>1</sup>. Le rendement du blé tendre est ainsi passé de 15 quintaux par hectare en moyenne en 1950 à 70 en 2000. Un élément essentiel a consisté en la mise au point du procédé Haber-Bosch qui permet, à partir de gaz fossile, de transformer le diazote atmosphérique en ammoniac. Il est ainsi devenu possible de produire des engrais azotés en masse et de lever l'une des principales limites à la croissance des plantes.

Côté productivité, le pétrole a révolutionné le machinisme agricole. Les tracteurs et machines automotrices ont remplacé les animaux de trait à une vitesse vertigineuse, mettant fin en seulement 20 ans à une culture attelée vieille de plus de 2 000 ans (Mazoyer et Roudart, 2002 ; Harchaoui et Chatzimpiros, 2018). Il est devenu possible pour un agriculteur des années 1980, équipé de machines modernes, de cultiver seul plus de 100 hectares, là où son grand-père travaillait difficilement à peine plus de 10 hectares (voir la Figure 1).

<sup>1</sup> Dans certains territoires et pour certaines cultures, la plus grande facilité de mise en œuvre de l'irrigation a également joué un rôle important dans l'augmentation des rendements.

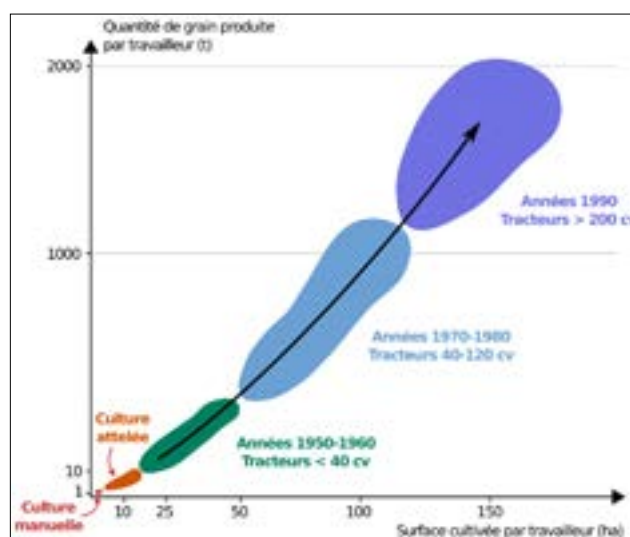


Figure 1 : Productivité du travail agricole en fonction des systèmes techniques mis en œuvre. Les énergies fossiles ont permis une augmentation, d'une part, de la surface cultivée et, d'autre part, des rendements (non figuré). La productivité a été multipliée par 100 en quelques décennies – Source : figure adaptée par l'auteur de Mazoyer et Roudart (2002), *Histoire des agricultures du monde. Du néolithique à la crise contemporaine*, Paris, Le Seuil, seconde édition.

En un demi-siècle, le système agricole est passé d'une situation d'autonomie énergétique, avec autoconsommation d'une partie de la biomasse produite, à une dépendance presque totale aux énergies fossiles (voir la Figure 2 page suivante). Gaz et pétrole n'ont pas simplement apporté de l'azote et de l'énergie mécanique supplémentaires au système agricole, ils sont aussi venus se substituer à des productions qui remplissaient jusque-là ces fonctions. La surface de légumineuses – plantes pouvant fixer le diazote atmosphérique – est ainsi passée de 3,2 millions d'hectares en France au milieu des années 1960 à 200 000 hectares aujourd'hui (Harchaoui et Chatzimpiros, 2018). Remplacer les deux millions de tonnes d'azote actuellement fournies par les engrais minéraux impliquerait de couvrir la France de



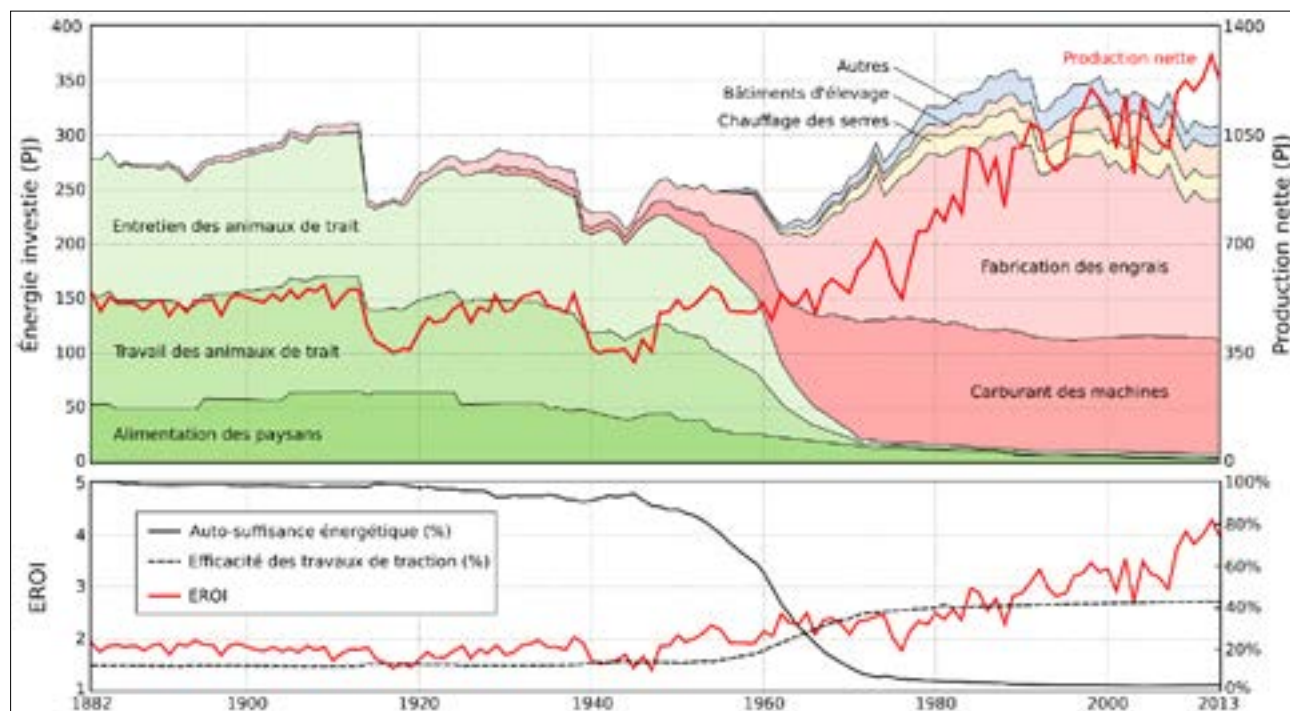


Figure 2 : Illustration du haut : évolution de l'énergie investie dans le système agricole français et de l'énergie nette produite par ce dernier, après déduction de la part consacrée à l'alimentation des animaux d'élevage. Autres : irrigation, fabrication des pesticides, alimentation animale importée. Graphique du bas : évolution de l'auto-suffisance énergétique des fermes, de l'efficacité énergétique des travaux de traction et du taux de retour énergétique (EROI) – Source : figure traduite et adaptée par l'auteur à partir de Harchaoui et Chatzimpiros (2018), "Energy, Nitrogen, and Farm Surplus Transitions in Agriculture from Historical Data Modeling. France, 1882–2013", *Journal of Industrial Ecology* 23(2), pp. 412-425.

huit millions d'hectares de légumineuses, soit 30 % de la surface agricole (Harchaoui et Chatzimpiros, 2018). Le pétrole a, quant à lui, remplacé les fourrages et le grain auparavant destinés à l'alimentation des animaux de trait. En 1929, en France, un tiers des surfaces céréalières – soit 3,5 millions d'hectares – était consacré à la production d'avoine (ministère de l'Agriculture, 1936), essentiellement utilisée pour l'alimentation des chevaux.

Par la hausse des rendements et leur effet de substitution, les énergies fossiles ont conduit à une explosion de la quantité de biomasse agricole disponible. Une fraction est venue nourrir une population plus nombreuse, tandis que la majeure partie a trouvé ses débouchés dans l'alimentation d'un nombre croissant d'animaux d'élevage et, dans une moindre mesure, dans la fabrication d'agrocarburants.

## La transformation des filières agro-industrielles

Au-delà de la production agricole, l'essor des énergies fossiles – et tout particulièrement du pétrole – a profondément modifié l'organisation spatiale et logistique des activités de transformation et de distribution des produits agroalimentaires. Dans la France du début du XX<sup>e</sup> siècle, le coût élevé du transport de marchandises rendait nécessaire un maillage dense d'unités de transformation. Le pétrole bon marché et le développement du fret routier et maritime ont mis fin à cette contrainte. Les réseaux d'approvisionnement se sont étendus ; les chaînes de production se sont complexifiées et internationalisées. D'importantes économies d'échelle ont été

rendues possibles, permettant aux entreprises ayant pu réaliser les investissements requis de fortement réduire leurs coûts de production et de s'imposer sur les marchés. Il s'en est suivi un double mouvement de spécialisation et de concentration des activités, l'un et l'autre se renforçant mutuellement.

Ainsi, le nombre de minoteries en France est passé d'environ 40 000 au début du XX<sup>e</sup> siècle à 6 000 en 1950 et à 400 dans les années 2010 ; une trentaine d'entre elles réalisant les deux tiers de la production de farine (Astier, 2016 ; Association nationale de la meunerie française, 2019). Le pays comptait 102 sucreries en 1960, elles n'étaient plus que 25 en 2012 (Bourges, 2012). Pour les abattoirs, le chiffre est passé de 1 700 en 1964 à 265 cinquante ans plus tard (Jourdan et Hochereau, 2019), une vingtaine d'entre eux traitant la moitié des volumes (Le Cain, 2008). Plus récemment, le nombre d'unités de production de lait liquide est passé de 943 en 1981 à 57 en 2011 (Ricard, 2014) et, aujourd'hui, 10 sites industriels concentrent environ 70 % de la production nationale pour chaque grand groupe de produits laitiers (FranceAgriMer, 2016). La spécialisation de certaines régions agricoles a accompagné cette réorganisation industrielle, avec parfois une division spatiale du travail à grande échelle. On peut citer, par exemple, la spécialisation de la Bretagne et des Pays de la Loire dans l'élevage, avec une délocalisation au Brésil et en Argentine de la production des protéines végétales nécessaires à l'alimentation des animaux. Autre exemple emblématique, la spécialisation de la province espagnole d'Almeria dans la culture de fruits et légumes sous serres.

## Bilan énergétique du système alimentaire

Produire des aliments revient à mobiliser différentes formes d'énergie afin de convertir de l'énergie solaire en nourriture. On peut appréhender l'efficacité énergétique du procédé en calculant son EROI (Energy Return On Investment, ou taux de retour énergétique), le rapport entre l'énergie que l'on récupère sous forme de nourriture et l'énergie investie pour l'obtenir.

Pour le système agricole, en incluant les besoins énergétiques amont pour la fabrication des intrants, l'EROI est passé de 2 à 4 au cours du processus d'industrialisation (voir la Figure 2 page précédente). La quantité d'énergie investie dans le système de production a légèrement augmenté, tandis que l'énergie disponible « en sortie de ferme » a plus que doublé. Il est important de noter que la simple valeur de l'EROI ne permet pas de connaître la part de la production agricole qui est utilisée en interne pour l'alimentation des animaux d'élevage. Or, en France, celle-ci s'élevait à environ 64 % au début des années 2000<sup>2</sup>. Comme l'efficacité énergétique de l'élevage est peu élevée – aujourd'hui, on ne récupère en moyenne dans les aliments d'origine animale que 8 % de l'énergie initialement contenue dans la ration des bêtes (Harchaoui et Chatzimpiros, 2018) –, l'EROI est d'autant plus faible que les productions animales sont importantes.

Au-delà de l'activité agricole, la production d'aliments finis, leur mise à disposition et leur préparation en vue de les consommer nécessitent des étapes supplémentaires. En considérant un large éventail des activités requises pour nourrir la population française, Carine Barbier et ses collègues (2019) ont estimé l'empreinte énergétique<sup>3</sup> du système alimentaire à 31,6 millions de tonnes équivalent pétrole pour l'année 2012 (voir la Figure 3). D'après cette étude, l'énergie utilisée pour l'activité agricole et l'industrie agroalimentaire représente 27 % de l'empreinte totale, la part du fret est de 22 % et celle de l'industrie agroalimentaire de 16 %. Les ménages ont également un certain poids (22 %), notamment lié à l'absence d'économies d'échelle au regard de leurs déplacements ou de l'utilisation des équipements de leur foyer. L'étude ne précise pas la part des énergies fossiles dans ce mix, mais l'on peut supposer qu'elle est proche de la part dans l'énergie finale consommée en France, soit environ 65 % (ministère de la Transition écologique, 2021).

Connaissant la disponibilité alimentaire moyenne en France (soit 3 537 kcal par habitant et par jour (données FAOSTAT, 2023), l'EROI du système alimentaire dans

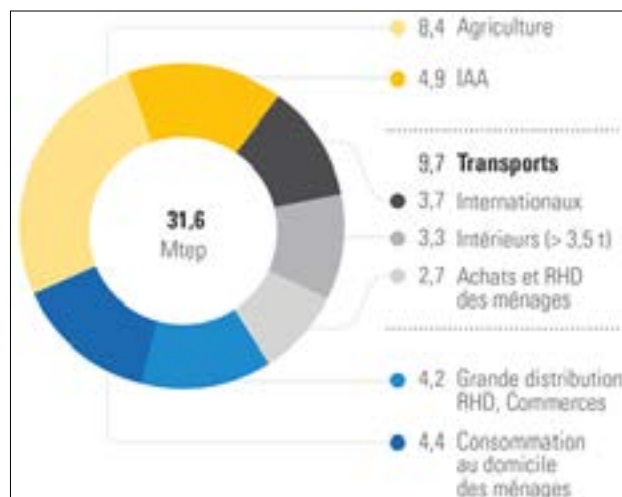


Figure 3 : Répartition sectorielle de l'empreinte énergétique du système alimentaire français en 2012. Le poste « Agriculture » comprend l'énergie utilisée sur les exploitations, celle nécessaire à la fabrication des intrants et celle liée à la construction des machines et des bâtiments agricoles. IAA : industries agroalimentaires ; RHD : restauration hors domicile – Source : figure issue de Barbier et al. (2019), *L'empreinte énergétique et carbone de l'alimentation en France*, Paris, Club « Ingénierie Prospective Énergie et Environnement ».

son ensemble peut être évalué à 0,27. Autrement dit, il faut investir 3,7 calories – majoritairement sous forme d'énergies fossiles – pour en récupérer une sous forme de nourriture.

## Limites de l'EROI et perspectives

L'EROI est un indicateur relativement intuitif. Cependant, son intérêt dans l'étude des systèmes alimentaires est limité. Premièrement, le périmètre à considérer est sujet à discussion. Au-delà des étapes de production, de transformation, de distribution et de préparation des aliments, de nombreuses autres activités pourraient légitimement être prises en compte : alimentation et transport des travailleurs, administration, recherche, conseil, communication, gestion des déchets et des impacts du système alimentaire sur l'environnement ou la santé, etc. Deuxièmement, l'EROI ne suffit pas pour juger l'efficacité du système. Comme évoqué plus haut, l'élevage constitue une utilisation très inefficace des ressources, lorsque des terres arables sont cultivées pour l'alimentation des animaux. La simple valeur de l'EROI ne permet pas de connaître la part de la production agricole dédiée à cet usage. Troisièmement, l'EROI ne donne aucune information sur la soutenabilité du système alimentaire. Celle-ci dépend avant tout du type d'énergie investie et de sa disponibilité future.

Au-delà de l'EROI, l'analyse énergétique du modèle agro-industriel moderne demeure instructive. La forte dépendance de notre système alimentaire aux hydrocarbures fossiles est une vulnérabilité évidente dans un contexte où leur disponibilité va connaître un déclin structurel. Pour autant, ce risque reste très peu considéré et documenté. Sans politiques adaptées, agriculteurs et industriels vont être mis en difficulté par

<sup>2</sup> Valeur moyenne calculée entre 2000 et 2004 à partir des données de production FAOSTAT (2023) et des données issues de Harchaoui et Chatzimpiros (2018) : coefficients d'énergie brute par produit agricole, coefficient agrégé d'efficacité de conversion énergétique des animaux d'élevage et production primaire nette du secteur agricole.

<sup>3</sup> L'empreinte énergétique correspond à l'énergie nécessaire pour produire la nourriture effectivement consommée par la population, importations incluses et exportations exclues.

l'augmentation de leurs coûts de production et de celle des contraintes budgétaires qui pèsent sur les consommateurs (Benoit et Mottet, 2023). La sécurité alimentaire va, quant à elle, se dégrader parmi les ménages les plus fragiles et le risque de rupture des chaînes d'approvisionnement en nourriture va s'accroître.

Il est néanmoins possible de maintenir une disponibilité alimentaire satisfaisante dans un environnement de plus en plus contraint (Les Greniers d'Abondance, 2022). Cela implique une généralisation des pratiques agricoles sobres en intrants, une forte réduction des productions animales en concurrence avec l'alimentation humaine et une réorganisation modulaire et territoriale des filières alimentaires. La marge de manœuvre des agriculteurs, des entreprises et des consommateurs dans le cadre économique et politique actuel est cependant très limitée, il est nécessaire de revoir les règles qui déterminent le fonctionnement du système alimentaire. Des propositions politiques basées sur des modèles ayant fait leurs preuves et ne nécessitant aucune révolution technologique existent (Les Greniers d'Abondance, 2022). Leur mise à l'agenda constitue néanmoins un réel défi tant elles s'éloignent du paradigme dominant et s'opposent aux intérêts à court terme de nombreux acteurs économiques. Un engagement fort de la puissance publique pour prévenir les risques sociaux et économiques associés à cette transition vers un système alimentaire sevré des énergies fossiles est indispensable.

## Bibliographie

ASSOCIATION NATIONALE DE LA MEUNERIE FRANÇAISE (2019), *Fiche statistique 2018*.

ASTIER M. (2016), *Quel pain voulons-nous ?*, Paris, Le Seuil.

BARBIER C. et al. (2019), *L'empreinte énergétique et carbone de l'alimentation en France*, Paris, Club « Ingénierie Prospective Énergie et Environnement ».

BENOIT M. & MOTTET A. (2023), "Energy scarcity and rising cost: Towards a paradigm shift for livestock", *Agricultural Systems* 205, 103585.

BOURGES B. (2012), « Deux siècles d'industrie sucrière en France », Syndicat national des fabricants de sucre.

DESRIERS M. (2007), « L'agriculture française depuis cinquante ans : des petites exploitations familiales aux droits à paiement unique », *Agreste Cahiers* 2, pp. 3-14.

FAOSTAT (2023), "FAO statistical database", Rome, The Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FRANCEAGRIMER (2016), « La transformation laitière française : état des lieux et restructuration », *Les études de FranceAgriMer*.

HARCHAOU S. & CHATZIMPIROS P. (2018), "Energy, Nitrogen, and Farm Surplus Transitions in Agriculture from Historical Data Modeling. France, 1882–2013", *Journal of Industrial Ecology* 23(2), pp. 412-425.

JOURDAN F. & HOCHEREAU F. (2019), « La mise en application d'un règlement de protection animale au regard de la structuration des abattoirs français », *Anthropology of food*, S13.

LE CAIN B. (2016), « Trop concentrés, multi-espèces : pourquoi les abattoirs français sont critiqués », *Le Figaro*, avril.

LES GRENIERS D'ABONDANCE (2022), *Qui veille au grain ? Sécurité alimentaire : une affaire d'État*, Gap, Éditions Yves Michel.

MAZOYER M. & ROUDART L. (2002), *Histoire des agricultures du monde. Du néolithique à la crise contemporaine*, Paris, Le Seuil, seconde édition.

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE (1936), « Statistique agricole de la France : résultats généraux de l'enquête de 1929 ».

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE (2021), « Chiffres clés de l'énergie. Édition 2021 », Service des données et études statistiques (SDES).

RICARD D. (2014), « Les mutations des systèmes productifs en France : le cas des filières laitières bovines », *Revue géographique de l'Est* 54(1-2).

# Évolution historique et tendancielle de l'EROI du pétrole et du gaz

Par Louis DELANNOY, Emmanuel ARAMENDIA,  
Pierre-Yves LONGARETTI et Emmanuel PRADOS  
Équipe de recherche STEEP (laboratoire Jean Kuntzmann, INRIA Grenoble)

Au fur et à mesure de leur exploitation, les combustibles fossiles deviennent plus difficiles d'accès et nécessitent plus d'énergie pour être extraits. La baisse continue de l'EROI du pétrole et du gaz semble dès lors préoccupante, étant donné que ces deux sources d'énergie représentent encore 52 % de la consommation énergétique globale. Toutefois, ces ratios sont mesurés au stade de l'énergie primaire et devraient plutôt être estimés au stade final ou utile, où l'énergie est au plus proche de la réalité des processus économiques. En suivant ce principe, les EROI des combustibles fossiles sont déjà aujourd'hui comparables voire inférieurs à ceux des énergies renouvelables, y compris lorsque des technologies de stockages d'énergie de court terme sont intégrées au calcul. Ce résultat fait partie du consensus émergent de la communauté scientifique d'analyse énergétique nette, mais sa dissémination se heurte aux fréquents malentendus sur l'EROI hérités de l'absence de méthodologie formelle avant les années 2010. Pour remédier à cette situation, nous résumons les diverses étapes ayant mené à l'aboutissement de ce consensus émergent, présentons l'EROI du pétrole et du gaz au stade primaire, final et utile de 1971 à 2019, et discutons les implications vis-à-vis de la transition bas-carbone.

## Contextualisation

La question du ratio de la quantité d'énergie nécessaire pour produire un baril de pétrole ou un mètre cube de gaz, par rapport à l'énergie fournie à la société lors de leur utilisation, préoccupe la communauté scientifique depuis les années 1980. L'EROI correspond à l'inverse de ce ratio, divisant la production totale d'énergie par l'apport d'énergie dans le système devant être consommée pour produire cette énergie. Si l'une des premières mentions est à mettre au crédit de M. K. Hubbert<sup>1</sup>, à qui nous devons la théorie du pic pétrolier, le sujet est rapidement repris et développé en profondeur par Cutler Cleveland, Robert Costanza, Charlie Hall, et Robert Kaufman. Ces derniers sont les premiers à estimer le rendement énergétique de la production pétrolière aux États-Unis (Cleveland *et al.*, 1984) et l'énergie nette des ressources en gaz dans le golfe du Mexique (Cleveland et Costanza, 1984). Cleveland poursuit ce travail en examinant le schéma général de l'extraction du charbon et des ressources pétrolières, et l'EROI qui en découle de 1954 à 1997 (Cleveland, 1992), puis en actualisant les calculs pour le pétrole aux États-Unis de 1954 à 1987 (Cleveland, 2005).

<sup>1</sup> « Cependant, il existe un coût différent et plus fondamental [à la production de pétrole] qui est indépendant du prix monétaire. Il s'agit du coût énergétique de l'exploration et de la production. Tant que le pétrole est utilisé comme source d'énergie, lorsque le coût énergétique de la récupération d'un baril de pétrole devient supérieur au contenu énergétique du pétrole, la production cessera, quel que soit le prix monétaire », Réponse aux remarques de David Nissens, traduction par nos soins.

C'est à la même époque, et sous l'impulsion de Charles Hall, que la communauté d'analyse énergétique nette commence à se montrer plus active dans l'application et la dissémination du concept d'EROI, comme en témoignent les propositions de méthodologie formelle et nomenclature unifiée par Mulder et Hagens (2008) et Murphy *et al.* (2011). Cet effort se voit renforcé par la montée en puissance du débat sur le pic pétrolier et la crise financière mondiale – qui peut être relié à la stagnation de la production de pétrole conventionnel (Hamilton, 2009) – catalysant la publication de nombreux travaux<sup>2</sup> par de nouveaux auteurs. Notons par exemple la modélisation de l'EROI et de la production énergétique nette du pétrole *offshore* dans le golfe du Mexique (Gately, 2007), et la première évaluation de l'EROI mondial du pétrole et du gaz à la tête du puits entre 1992 et 2006 (Gagnon, 2009).

Un élément fondateur pour la structuration de la communauté est l'édition spéciale sur l'EROI dans le journal *Sustainability* en 2011, où les analyses sur le pétrole et le gaz sont nombreuses. Citons notamment Brandt (2011), qui explore la production énergétique nette du pétrole en Californie de 1955 à 2005 ; Guilford *et al.* (2011), qui évaluent l'EROI à long terme pour le pétrole et le gaz américains ; Moerschbaecher et Day Jr. (2011), qui calculent l'EROI de la production de pétrole et de gaz dans les eaux profondes du golfe du Mexique en 2009 ; et Sell, Murphy et Hall (2011), qui examinent l'EROI des puits de gaz de réservoir étanche dans le bassin des

<sup>2</sup> Voir par exemple Hall, Powers et Schoenberg (2008).



Appalaches. Cette première salve de travaux est suivie dans l'édition suivante du même journal par une estimation de l'EROI de la production conventionnelle de gaz naturel au Canada (Freise, 2011), du schiste bitumineux (Cleveland et O'Connor, 2011), de la production d'hydrates de méthane (Callarotti, 2011) et du pétrole et gaz norvégiens de 1991 à 2008 (Grandell, Hall et Höök, 2011). *Sustainability* continue de publier régulièrement des analyses d'EROI, comme celle du champ pétrolifère de Daqing en Chine (Hu *et al.*, 2011) mais fait face à une concurrence accrue d'autres journaux comme *Energy Policy* du fait de la meilleure compréhension de l'EROI par la communauté scientifique au sens large.

Les années 2010 connaissent une profusion de travaux ayant trait à l'EROI du pétrole et du gaz à diverses échelles géographiques et temporelles, revue par Delannoy *et al.* (2021a, 2021b). La grande majorité s'attarde toutefois à estimer l'EROI des processus d'extraction, sans prendre en compte toute la chaîne de conversion et de distribution<sup>3</sup>. Ce manque est comblé à l'échelle globale par Brockway *et al.* (2019), qui estiment l'EROI primaire (à l'extraction) et final (à la distribution) des combustibles fossiles baissant respectivement de 40 à 30 et de 7 à 6, de 1995 à 2011. Ce résultat novateur, salué pour sa rigueur, remet en question la supposée primauté de l'EROI des fossiles sur celui des renouvelables et ce faisant, se heurte à une frange d'utilisateurs avertis de l'EROI mais n'ayant pas suivi les récents développements au sein de la communauté scientifique. Afin d'y répondre, celle-ci se mobilise et établit une liste de 9 points faisant partie du consensus émergent (Delannoy *et al.*, 2023), dont quatre concernent le pétrole et le gaz :

- l'EROI primaire du pétrole est inférieur à celui du gaz, qui est lui-même inférieur à celui du charbon. Les deux premiers sont en baisse constante depuis les années 1950 en raison de l'épuisement progressif des réserves les plus facilement accessibles ;
- les combustibles fossiles conventionnels tendent à avoir un EROI primaire inférieur à celui du gaz et du pétrole de réservoirs étanches produits par fracturation, mais supérieur à celui d'autres combustibles non conventionnels (sables bitumineux, huile de schiste extraite, méthane de houille, etc.) ;
- l'EROI primaire des ressources énergétiques fossiles s'améliore dans un premier temps au fur et à mesure que la technologie se développe, avant de diminuer

en raison d'une baisse de la qualité de la ressource extraite<sup>4</sup> ;

- l'EROI agrégé des combustibles fossiles au point d'utilisation diminue au fil du temps, bien qu'à un rythme lent. Ceci est dû au fait que l'investissement énergétique le plus important n'est pas l'énergie nécessaire à l'extraction, mais l'énergie ultérieure nécessaire au traitement et à la livraison – qui est largement indépendante du type de pétrole ou de gaz pour chacune de ces deux catégories de combustible fossile (ce point est explicité plus en détail dans la partie intitulée Stades final et utile).

Un autre point du consensus émergent souligne qu'aujourd'hui, l'EROI au point d'utilisation de l'électricité produite à partir de combustibles fossiles est souvent inférieur à celui de l'électricité d'origine photovoltaïque, éolienne et hydraulique, même lorsque les besoins énergétiques des technologies de stockage à court terme sont pris en compte (Raugei *et al.*, 2020 ; Slameršak *et al.*, 2022). La comptabilisation des besoins énergétiques liés aux dispositifs de stockage est toutefois plus pertinente au niveau du système énergétique d'un pays ou d'une région qu'au niveau d'une technologie de production d'électricité individuelle, car chaque technologie, si elle était déployée isolément, nécessiterait une certaine capacité de stockage pour réussir à suivre la demande d'électricité (Raugei *et al.*, 2015 ; Carbajales-Dale *et al.*, 2015).

Un dernier aspect essentiel concerne l'extension de l'analyse au stade utile de l'utilisation de l'énergie (Aramendia *et al.*, 2021), c'est à dire au stade où l'énergie est effectivement échangée contre des services énergétiques, qui dépend de l'efficacité du dispositif d'utilisation finale utilisé (voir la Figure 1 à la page suivante). En effet, des vecteurs énergétiques différents peuvent être utilisés pour des utilisations finales similaires avec des efficacités finales très différentes. Par exemple, l'efficacité du moteur d'un véhicule électrique (fourchette 86-96 %) a une efficacité bien supérieure à celle d'un véhicule à combustion interne traditionnel (fourchette 21-35 %) (Paoli et Cullen, 2020). Une étude récente (Aramendia *et al.*, 2023) montre que la prise en compte de ces efficacités de conversion de l'énergie finale en utile est essentielle pour comprendre l'EROI « effectif » des énergies fossiles, que nous explorerons dans la suite. Cette étude montre aussi que la prise en compte de ces efficacités est cruciale pour comparer les énergies renouvelables, qui vont majoritairement produire de l'électricité, aux énergies fossiles, en général utilisées avec des efficacités bien plus basses.

<sup>3</sup> Il est de plus en plus important de se concentrer sur le point d'utilisation car : (i) les besoins énergétiques du traitement, du raffinage et d'autres processus en aval des combustibles fossiles peuvent être plus importants que ceux de leur extraction, et (ii) la plupart des systèmes d'énergie renouvelable fournissent directement des vecteurs énergétiques finaux, généralement de l'électricité, ce qui rend l'analyse au stade de l'énergie finale essentielle pour comparer les systèmes d'énergie renouvelable et les systèmes d'énergie fossile.

<sup>4</sup> Par exemple, l'EROI standard du brut issu des sables bitumineux a augmenté depuis que les premières mines produisant du bitume sont devenues opérationnelles (Guay-Boutet, 2023). Au contraire, de nombreux grands gisements de pétrole conventionnel ont déjà connu des baisses marquées de leur EROI standard en raison des exigences de la récupération assistée et de l'épuisement global des ressources, comme le montre le déclin de la quantité des réserves « 2P » (prouvées et probables) restantes (Laherrère, Hall et Bentley, 2022).

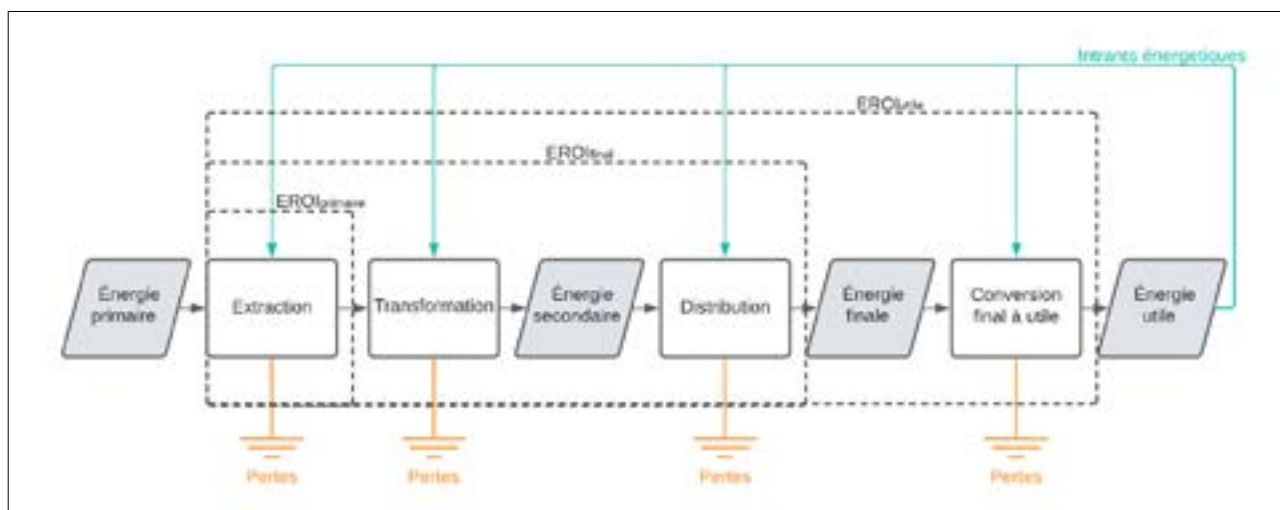


Figure 1. EROI au stade primaire (EROIprimaire), au point d'utilisation (EROIfinal) et utile (EROIutile). L'élargissement du cadre considéré réduit généralement l'EROI, tout en accentuant les incertitudes (Source : Adapté de Delannoy *et al.*, 2023).

## Données historiques

Nous montrons ici l'évolution historique, au niveau mondial, de l'EROI du pétrole et du gaz, basée sur une méthodologie issue des tableaux entrées-sorties (*input-output tables*) (Aramendia *et al.*, 2022) appliquée au flux énergétiques (physiques) rapportés par l'Agence Internationale de l'Énergie (voir Aramendia *et al.*, 2023 pour plus de détails).

### Stade primaire : déclin de l'EROI

La Figure 2 montre l'évolution historique, au niveau mondial, de l'EROI du pétrole et du gaz au stade primaire – l'évolution ne peut pas être séparée de manière rigoureuse en termes de pétrole et gaz avec les données de l'Agence Internationale de l'Énergie, celles-ci étant agrégées. Cependant, étant donné que l'extraction du pétrole et du gaz a souvent lieu de manière conjointe, le calcul d'un EROI moyen conjoint reste une hypothèse raisonnable.



Figure 2. Taux de retour énergétique moyen, au stade primaire, du pétrole et du gaz au niveau mondial (1971-2019) (Source : Aramendia *et al.*, 2023).

Conformément à l'idée reçue de déclin du taux de retour énergétique au fur et à mesure du déclin de la qualité des ressources, l'EROI moyen a bien fortement diminué depuis 1971, d'une valeur d'environ 40 à une

valeur d'environ 20, soit un doublement des besoins énergétiques à l'extraction. Notons aussi que depuis l'essor de l'exploitation du pétrole et du gaz de roche-mère (aussi dits « de schiste »), l'EROI moyen s'est stabilisé. La longévité de ce plateau est toutefois questionnée du fait de l'exploitation accrue d'autres formes de liquides pétroliers ou de gaz non conventionnels à EROI plus faible (Delannoy *et al.*, 2021a ; 2021b).

### Stades final et utile : une dynamique moins évidente

La Figure 3 montre l'évolution historique, au niveau mondial, de l'EROI du pétrole et du gaz aux stades final et utile, tous vecteurs énergétiques confondus (combustibles et électricité).



Figure 3. Taux de retour énergétique moyen, aux stades final et utile, du pétrole et du gaz au niveau mondial (1971-2019) (Source : Aramendia *et al.*, 2023).

L'EROI au stade final a bien décliné au cours du temps, mais de manière bien moins marquée qu'au stade de l'énergie primaire ; d'environ 9,9 en 1971 à environ 8,6 en 2019, ce qui correspond à une augmentation des besoins énergétiques de 15 %. Le fait que l'EROI au stade final diminue bien moins qu'au stade primaire est dû au fait que les phases de transformation de l'énergie primaire en énergie finale sont les plus demandeuses d'énergie, particulièrement dans le cas du pétrole pour lequel la raffinerie constitue de loin le procédé le plus

énergivore (Brandt, 2011 ; Yáñez *et al.*, 2018) – de l'ordre de 80-90 % de la consommation énergétique. Cela implique que 1) un EROI primaire en forte diminution a une influence modérée sur l'EROI final, et 2) une augmentation de l'efficacité énergétique (même modérée) dans le procédé de conversion de l'énergie primaire en énergie finale peut compenser dans une certaine mesure une diminution de l'EROI primaire.

Par exemple, pour que l'EROI au stade final diminue jusqu'à 5 (soit une augmentation des besoins énergétiques de 72 %), et en supposant une efficacité énergétique des procédés de transformation de l'énergie primaire en finale (raffinerie, etc.) constante, l'EROI au stade primaire devrait chuter de sa valeur actuelle d'environ 20 à une valeur d'environ 7,5, soit une augmentation des besoins énergétiques à l'extraction primaire de 167 %, alors que ceux-ci ont mis 5 décennies (1971-2019) à doubler. De plus, l'efficacité énergétique des procédés de transformation de l'énergie primaire en énergie finale a augmenté au cours du temps (par exemple, la consommation moyenne d'énergie par unité d'énergie raffinée a diminué d'environ 10 % de 1971 à 2019 d'après les données de l'Agence Internationale de l'Énergie), et continuera *a priori* à faire de même, mitigeant ainsi le risque posé par le déclin de l'EROI au stade primaire<sup>5</sup>.

Au sujet de l'EROI au stade utile, la Figure 3 montre deux éléments cruciaux. Premièrement, l'EROI utile est bien plus bas que l'EROI final (environ 2,7 en 2019). Cela est dû aux efficacités de conversion de l'énergie finale en énergie utile, qui sont en moyennes très basses pour les énergies fossiles. Deuxièmement, la figure montre que contrairement à ses équivalents aux stades primaire et final, l'EROI utile n'a pas diminué au cours du temps, mais a été relativement constant (dans la fourchette 2,5-2,7), malgré des besoins énergétiques en augmentation pour produire l'énergie finale. Cela est dû principalement aux efficacités de conversion de l'énergie finale en énergie utile qui ont légèrement augmenté au cours du temps. Aramendia *et al.* (2023) estiment notamment l'augmentation de l'efficacité moyenne de 51 à 74 % pour le gaz, et de 30 à 33 % en moyenne pour les produits pétroliers, pour les utilisations sous forme de combustible (hors électricité). Ces augmentations ont compensé la diminution de l'EROI aux stades primaire et final.

Les valeurs d'EROI au niveau de l'énergie utile cachent cependant des différences significatives. En effet, les utilisations du pétrole et du gaz diffèrent : le gaz (haut EROI final) est fortement utilisé dans les applications de chauffage et dans l'industrie, et les produits pétroliers (EROI final bien plus bas) sont majoritairement utilisés dans les applications de mobilité. Or, l'efficacité de conversion de l'énergie finale en utile varie selon l'uti-

lisation ; par exemple, un moteur thermique présente une efficacité d'environ 30 % alors qu'une chaudière récente présente une efficacité d'environ 90 %. Comme illustré par la Figure 4, l'EROI sera bien plus élevé pour une utilisation sous forme de chaleur à basse température (par exemple, chauffage résidentiel) que pour une utilisation dans un procédé industriel (par exemple, métallurgique).



Figure 4. Taux de retour énergétique moyen, au stade utile, du pétrole et du gaz au niveau mondial (1971-2019), pour les utilisations en chaleur et en travail (Source : Aramendia *et al.*, 2023).

## Implications des EROI du pétrole et du gaz sur la transition énergétique

La sensibilité de l'EROI final du pétrole et du gaz (et *a fortiori*, au stade utile) vis-à-vis de l'EROI primaire est modérée : une diminution importante de l'EROI primaire est nécessaire pour entraîner un déclin notable de l'EROI final. De plus, aujourd'hui, l'EROI utile des énergies renouvelables est, contrairement aux idées reçues, supérieur en moyenne à celui des énergies fossiles (Aramendia *et al.*, 2023) ce qui suggère que la transition bas-carbone peut se révéler être bénéfique d'un point de vue de l'EROI agrégé (Slameršak *et al.*, 2022). *A priori* donc, la quantité d'énergie nette disponible au cours des prochaines années devrait être suffisante pour permettre l'investissement énergétique nécessaire à la transition (manufacture des technologies bas-carbone, extension et modification des infrastructures existantes, etc.). L'EROI n'est toutefois qu'un aspect de la question car un choc énergétique structurel (notamment pour le pétrole, dont la fourniture est quasiment à flux tendu, avec très peu ou pas de marge d'augmentation de la production) pourrait réduire la fourniture d'énergie nette, et occasionner des conséquences macroéconomiques freinant la transition.

Dans un scénario de transition lente (incompatible avec les objectifs climatiques de l'Accord de Paris de 2015), le déclin de l'EROI primaire du pétrole et du gaz peut toutefois avoir des effets importants, comme des augmentations à long terme des prix de l'énergie et des prix généraux (King et Hall, 2011 ; Heun et de Wit, 2012) ainsi qu'une faible croissance du PIB (Jackson et Jackson, 2021). En d'autres termes, la transition énergétique pourrait devenir plus difficile à réaliser si elle n'est pas amorcée suffisamment tôt, ce qui pourrait être source de tensions géopolitiques qui elles-mêmes ralentiraient la transition (Delannoy *et al.*, 2021a).

<sup>5</sup> À titre d'exemple, le ministère de l'Énergie américain estime que le potentiel de réduction de consommation d'énergie dans les raffineries du pays est de 13 % (meilleures technologies actuellement disponibles), et pourrait atteindre (au maximum absolu) 38 % avec de nouvelles technologies (US Department of Energy, 2015) - Yáñez *et al.* (2018) estime le potentiel avec les meilleures technologies actuellement disponibles à 17 % pour les raffineries colombiennes.



La baisse de l'EROI au stade primaire a cependant peu d'impacts pour les scénarios de transition rapide, qui font eux face aux importants investissements énergétiques initiaux colossaux (Capellán-Pérez *et al.*, 2019) pouvant donner lieu à des taux d'emploi et d'inflation élevés (Jacques *et al.*, 2022). Il apparaît donc nécessaire qu'une fraction importante de l'énergie utilisée soit redirigée vers ces investissements essentiels. La faisabilité d'une transition énergétique rapide et juste est par conséquent tributaire de l'abandon de certains usages non essentiels de l'énergie (par exemple, les avions), le passage à des chaînes de conversion plus efficaces (par exemple, le remplacement d'une voiture à essence par une voiture électrique ou un vélo) et plus globalement la réduction de la consommation discrétionnaire d'énergie, nécessaire afin d'éviter que l'augmentation de l'efficacité énergétique se traduise en hausse de la consommation d'énergie via l'effet rebond. Ce dernier point semble majeur étant donné les hypothèses d'efficacité énergétique des scénarios existants, décorrélées des tendances historiques tout comme de leur potentiel effet rebond (Brockway *et al.*, 2021). En ce sens, nous appelons à développer des scénarios alternatifs qui réalisent une convergence Nord-Sud permettant des conditions de vie décentes pour toutes et tous (Vogel *et al.*, 2021 ; Millward-Hopkins *et al.*, 2020) et cohérente d'un point de vue énergétique et des ressources, tout en étant compatible avec les objectifs climatiques de l'accord de Paris.

## Références

- ARAMENDIA E., BROCKWAY P. E., PIZZOL M. & HEUN M. K. (2021), "Moving from final to useful stage in energy-economy analysis: A critical assessment", *Applied Energy*, vol. 283, p. 116194.
- ARAMENDIA E., BROCKWAY P., TAYLOR P., NORMAN J. & HEUN M. (2023), "Chapter 4: Estimation of fossil fuels useful stage energy return on investment and implications for renewable energy systems" in *Exploring the useful energy implications of the global energy transition: a net energy perspective*, PhD thesis, University of Leeds.
- ARAMENDIA E., HEUN M., BROCKWAY P. & TAYLOR P. (2022), "Developing a multi-regional physical supply use table framework to improve the accuracy and reliability of energy analysis", *Applied Energy*, vol. 310, p. 118413.
- BRANDT A. R. (2011), "Oil Depletion and the energy efficiency of oil production: The case of California", *Sustainability*, vol. 3, issue 10, pp. 1833-1854.
- BROCKWAY P. E., OWENA., BRAND-CORREAL I. & HARDT L. (2019), "Estimation of global final-stage energy-return-on-investment for fossil fuels with comparison to renewable energy sources", *Nature Energy*, vol. 4, issue 7, pp. 612-621.
- BROCKWAY P. E., SORRELL S., SEMIENIUK G., HEUN M. K. & COURT V. (2021), "Energy efficiency and economy-wide rebound effects: A review of the evidence and its implications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 141, p. 110781.
- CALLAROTTI R. C. (2011), "Energy return on energy invested (EROI) for the electrical heating of methane hydrate reservoirs", *Sustainability*, vol. 3, issue 11, pp. 2105-2114.
- CAPELLÁN-PÉREZ, I., DE CASTRO, C., MIGUEL GONZÁLEZ, L.J. (2019), "Dynamic energy return on investment (EROI) and material requirements in scenarios of global transition to renewable energies", *Energy Strategy Reviews*, vol. 26, issue 7, pp. 100399.
- CARBAJALES-DALE M., RAUGEI M., FTHENAKIS V. & BARNHART C. (2015), "Energy return on investment (EROI) of solar PV: An attempt at reconciliation [point of view]", *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers*, vol. 103, issue 7, pp. 995-999.
- CLEVELAND C. J. (1992), "Energy quality and energy surplus in the extraction of fossil fuels" in *the U.S. Ecological Economics*, vol. 6, issue 2, pp. 139-162.
- CLEVELAND C. J. (2005), "Net energy from the extraction of oil and gas in the United States", *Energy*, vol. 30, issue 5, pp. 769-782.
- CLEVELAND C. J., COSTANZA R., HALL C.A.S. & KAUFMANN R. (1984), "Energy and the U.S. economy: A biophysical perspective", *Science*, vol. 225, issue 4665, pp. 890-897.
- CLEVELAND C. J. Jr. & COSTANZA R. (1984), "Net energy analysis of geopressed gas resources in the U.S. Gulf Coast Region", *Energy*, vol. 9, issue 1, pp. 35-51.
- CLEVELAND C. J. & O'CONNOR P. A. (2011), "Energy return on investment (EROI) of oil shale", *Sustainability*, vol. 3, issue 11, pp. 2307-2322.
- DELANNOY L., LONGARETTI P.-Y., MURPHY D. J. & PRADOS E. (2021a), "Peak oil and the low-carbon energy transition: A net-energy perspective", *Applied Energy*, vol. 304, p. 117843.
- DELANNOY L., LONGARETTI P.-Y., MURPHY D. J. & PRADOS E. (2021b), "Assessing global long-term EROI of gas: A net-energy perspective on the energy transition", *Energies*, vol. 14, issue 16, p. 5112.
- DELANNOY L., AUZANNEAU M., ANDRIEU B., VIDAL O., LONGARETTI P.-Y., PRADOS E., MURPHY D.J., BENTLEY R.W., CARBAJALES-DALE M., RAUGEI M., HÖÖK M., COURT V., KING C.W., FIZAIN F., JACQUES P., HEUN M.K., JACKSON A., GUAY-BOUTET C., ARAMENDIA E., WANG J. & HALL C.A.S. (2023), "Emerging consensus on net energy paves the way for improved integrated assessment modeling", Soumis à *Energy and Environmental Science*.
- FREISE J. (2011), "The EROI of conventional Canadian natural gas production", *Sustainability*, vol. 3, issue 11, pp. 2080-2104.
- GAGNON N., HALL C.A.S. & BRINKER L. (2009), "A preliminary investigation of energy return on energy investment for global oil and gas production", *Energies*, vol. 2, issue 3, pp. 490-503.
- GATELY M. (2007), "The EROI of U.S. offshore energy extraction: A net energy analysis of the Gulf of Mexico", *Ecological Economics*, vol. 63, issues 2-3, pp. 355-364.
- GUAY-BOUTET C. (2023), "Estimating the disaggregated standard EROI of Canadian oil sands extracted via open-pit mining, 1997-2016", *Biophysical Economics and Sustainability*, vol. 8, issue 1.
- GUILFORD M. C., HALL C.A.S., O'CONNOR P. & CLEVELAND C. J. (2011), "A new long-term assessment of energy return on investment (EROI) for U.S. oil and gas discovery and production", *Sustainability*, vol. 3, issue 10, pp. 1866-1887.
- GRANDELL L., HALL C.A.S. & HÖÖK M. (2011), "Energy return on investment for Norwegian oil and gas from 1991 to 2008", *Sustainability*, vol. 3, issue 11, pp. 2050-2070.
- HALL C.A.S., POWERS R. & SCHOENBERG W. (s. d.), "Peak oil, EROI, investments and the economy in an uncertain future" in *Biofuels, solar and wind as renewable energy systems*, pp. 109-132.
- HAMILTON J.D. (2009), "Causes and consequences of the oil shock of 2007-08", *Brookings Papers on Economic Activity*.



- HEUN M. K. & DE WIT M. (2012), "Energy return on (energy) invested (EROI), oil prices, and energy transitions", *Energy Policy*, vol. 40, pp. 147-158.
- HU Y., FENG L., HALL C.A.S. & TIAN D. (2011), "Analysis of the energy return on investment (EROI) of the huge daqing oil field in China", *Sustainability*, vol. 3, issue 12, pp. 2323-2338.
- JACKSON A. & JACKSON T. (2021), "Modelling energy transition risk: The impact of declining energy return on investment (EROI) ", *Ecological Economics*, vol. 185, p. 107023.
- JACQUES P., DELANNOY L., ANDRIEU B., YILMAZ D., JEANMART H. & GODIN A. (2022), "Assessing the economic consequences of an energy transition through a biophysical stock-flow consistent model", *SSRN Electronic Journal*.
- KING C. W. & HALL C.A.S. (2011), "Relating financial and energy return on investment", *Sustainability*, vol. 3, issue 10, pp. 1810-1832.
- MILLWARD-HOPKINS J., STEINBERGER J.K., RAO N. D. & OSWALD Y. (2020), "Providing decent living with minimum energy: A global scenario", *Global Environmental Change*, vol. 65, pp. 1-10.
- MOERSCHBAECKER M. & DAY JR. J. W. (2011), "Ultra-deepwater Gulf of Mexico oil and gas: Energy return on financial investment and a preliminary assessment of energy return on energy investment", *Sustainability*, vol. 3, issue 10, pp. 2009-2026.
- MULDER K. & HAGENS N. J. (2008), "Energy return on investment: Toward a consistent framework", *Ambio*, vol. 37, issue 2, pp. 74-79.
- MURPHY D. J., HALL C.A.S., DALE M. & CLEVELAND C. (2011), "Order from chaos: A preliminary protocol for determining the EROI of fuels", *Sustainability*, vol. 3, issue 10, pp. 1888-1907.
- LAHERRERE J., HALL C.A.S. & BENTLEY R. (2022), "How much oil remains for the world to produce? Comparing assessment methods, and separating fact from fiction", *Current Research in Environmental Sustainability*, vol. 4, pp. 1-19.
- PAOLI L. & CULLEN J. (2020), "Technical limits for energy conversion efficiency", *Energy*, vol. 192, p. 116228.
- RAUGEI M., CARBAJALES-DALE M., BARNHART C., FTHENAKIS V. (2015), "Rebuttal: 'Comments on 'Energy intensities, EROIs (energy returned on invested), and energy payback times of electricity generating power plants' – Making clear of quite some confusion'", *Energy*, vol. 82, pp. 1088-1091.
- RAUGEI M., LECCISI E. & FTHENAKIS V. M. (2020), "What are the energy and environmental impacts of adding battery storage to photovoltaics? A generalized life cycle assessment", *Energy Technology*, vol. 8, issue 11, p. 1901146.
- SELL B., MURPHY D. & HALL C.A.S. (2011), "Energy return on energy invested for tight gas wells in the Appalachian Basin, United States of America", *Sustainability*, vol. 3, issue 10, pp. 1986-2008.
- SLAMERŠAK A., KALLIS G. & O'NEILL D. W. (2022), "Energy requirements and carbon emissions for a low-carbon energy transition", *In Nature Communications*, vol. 13, issue 1.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY (2015), "Bandwidth study on energy use and potential energy saving opportunities in the U.S. petroleum refining".
- VOGEL J., STEINBERGER J. K., O'NEILL D. W., LAMB W. F. & KRISHNAKUMAR J. (2021), "Socio-economic conditions for satisfying human needs at low energy use: An international analysis of social provisioning", *Global Environmental Change*, vol. 69, p. 102287.
- YÁÑEZ E., RAMÍREZ A., URIBE A., CASTILLO E. & FAAL A. (2018), "Unravelling the potential of energy efficiency in the Colombian oil industry", *Journal of Cleaner Production*, vol. 176, pp. 604-628.

# Uranium as an energy source: medium to long term prospects

By J. W. Storm van LEEUWEN

Member of the Nuclear Consulting Group

And Didier PILLET

Member of the General Economic Council

Uranium is the only metal used as energy source.<sup>1</sup> The extraction of uranium from the Earth's crust involves a complex chain of physical and chemical separation processes and the consumption of large quantities of energy, and of different chemicals.

The energy and chemicals consumed during extraction increase exponentially with decreasing ore grade, accompanied by an exponentially increasing emission of CO<sub>2</sub>. The grades of the available uranium resources decrease with time, because the mining companies mine the richest resources first, and because these offer the highest return of investment. Above phenomena cause the existence of the "energy cliff" and the "CO<sub>2</sub> trap". They thus call into question, for the century to come, the viability of a nuclear based solely on <sup>235</sup>U extracted from natural uranium whose geological occurrence couldn't suffice to make it self-evidently an energy resource.

One way to overcome this <sup>235</sup>U limitation would be to exploit <sup>238</sup>U resources. Nevertheless, this requires the industrial development and worldwide deployment of reactors operating in fast neutron mode (e.g. FNR). However a significant share of the energy produced by such reactors is difficult to envisage at a world level before the end of this century, as we shall see in this article.

## Introduction – Purpose of the article

When we talk about the civil use of uranium, we are of course thinking of energy production, and particularly electricity production, which is the almost exclusive application of uranium in this sector. Currently, the fleet of reactors in operation worldwide is based on the fission of <sup>235</sup>U. This isotope of uranium represents 0.7% of natural uranium, while the remaining 99.3% is composed of <sup>238</sup>U, which is envisaged for energy use in the context of the deployment of future generation IV reactors, known as "fast neutron reactors" (or FNR), as opposed to current reactors which operate in a thermal neutron regime. The main advantage of FNR lies in the energy potential they would allow by exploiting <sup>238</sup>U, thus multiplying by a factor of about 100 the amount of energy produced, compared to the exploitation of <sup>235</sup>U alone.

<sup>1</sup> It should be noted, however, that some metals (e.g. alkali metals) are likely to react with air or water by releasing heat. However, they cannot be considered as a source of energy in the same way as uranium insofar as, in their case, we are in the field of chemical reactions, whereas in the case of uranium, it's nuclear reactions which are involved. The latter are, as we know, far more energetic than the former, where the energy spent on extracting and refining metals must be compensated for by the energy released by the heat-producing chemical reactions, which is hardly the case. Nevertheless, we have to notice that numbers of metals (e.g. copper, cobalt, boron, beryllium, etc.) play a crucial role in energy systems, whether they are renewable or nuclear in nature.

In France, the lessons learned from the work carried out in the field of fast reactors are largely due to the feedback from the operation of the Phénix reactor, an industrial demonstrator with an electrical power of 250 MWe, connected to the grid between 1973 and 2010, and whose material balances made it possible to establish a rate of <sup>239</sup>Pu overgeneration of 1.16. The practical implementation of fast reactors has thus been demonstrated in France on a pre-industrial scale. More recently, a French programme called ASTRID (FNR-Na reactor) was launched in 2010, one of the objectives of which was to resolve a problem of core instability in case of coolant loss. It was initially intended to lead to a pilot, but the decision was taken in the summer of 2019 to terminate the project.

Outside France, several prototypes or industrial pilots of the FNR type have been built in recent decades. Of particular note are the Russian BN600 and BN800 demonstrators, commissioned in April 1980 and June 2014 respectively, and still in operation. In addition, new generation IV reactors are currently under study in several countries, notably in China and Russia.

However, what has to be noticed is that after decades of research in seven countries (USA, UK, France among others), along with investments of some 100 billion dollars, the breeder concept didn't go beyond the pre-industrial level. Therefore, the global deployment of FNR technology is still not in sight and will most likely not be

effective at large scale before the end of this century, as explained below. During this transition period, nuclear electricity production will thus again rely mainly on  $^{235}\text{U}$ , and the question of the availability of natural uranium by 2100 is therefore raised.

So, after recalling some available figures on the world's uranium resources, and providing some details on the main techniques for exploiting uranium deposits, this article will analyse the geological factors likely to limit the associated energy yield rates, as well as the expected consequences, for this century, in terms of limiting greenhouse gas emissions. Finally, some considerations on the prospects for the deployment of FNR technology in France, and on a global scale will also be presented.

It should also be noted that this article only deals with physical limits on a global scale, without taking into account the geostrategic stakes of the main countries for access to mineral resources.

## About recoverable uranium resources

In terms of natural uranium resources, while the baseline data used in this article is not the most recent, having been established by the IAEA, OECD and NEA in 2008 [22], this has relatively little impact here as the objective of the article is not to establish precisely the current state of uranium resources, but, as said in the introduction, it is more on the limiting factors of its production in the foreseeable future.

Nevertheless, the total amount of uranium represented by this diagram, which is 5.469 Tg (1 teragram = 1 million metric tonnes), corresponding with the total resources (RAR + Inferred cost category up to 130 USD/kg U), is quite similar to the 2022 Red Book [23] figures which

states 6.078 Tg, partly due to the fact that during the past decades no large new recoverable uranium deposits have been discovered as illustrated below (Figure 1).

Practically, the nuclear industry distinguishes sometimes two categories of uranium resources, based on economic considerations: conventional and unconventional resources. Conventional resources are deposits of the kind now being mined, and, when uranium can be extracted in an economic way, the rock containing this uranium is called "ore" which is then an economic notion. As far as unconventional resources are concerned, they are resources from which uranium is only recoverable as a minor by-product, such as uranium associated with phosphate rocks, non-ferrous ores, carbonatite, black shale and lignite.

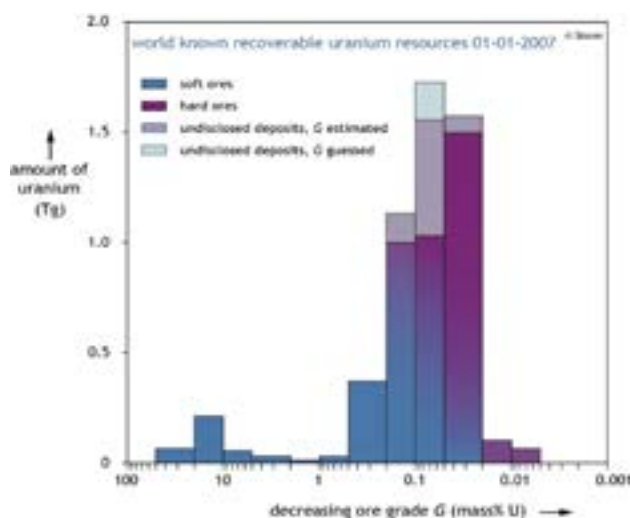


Figure 2. World known recoverable uranium resources in 2007 (Source: Red Book 2008).

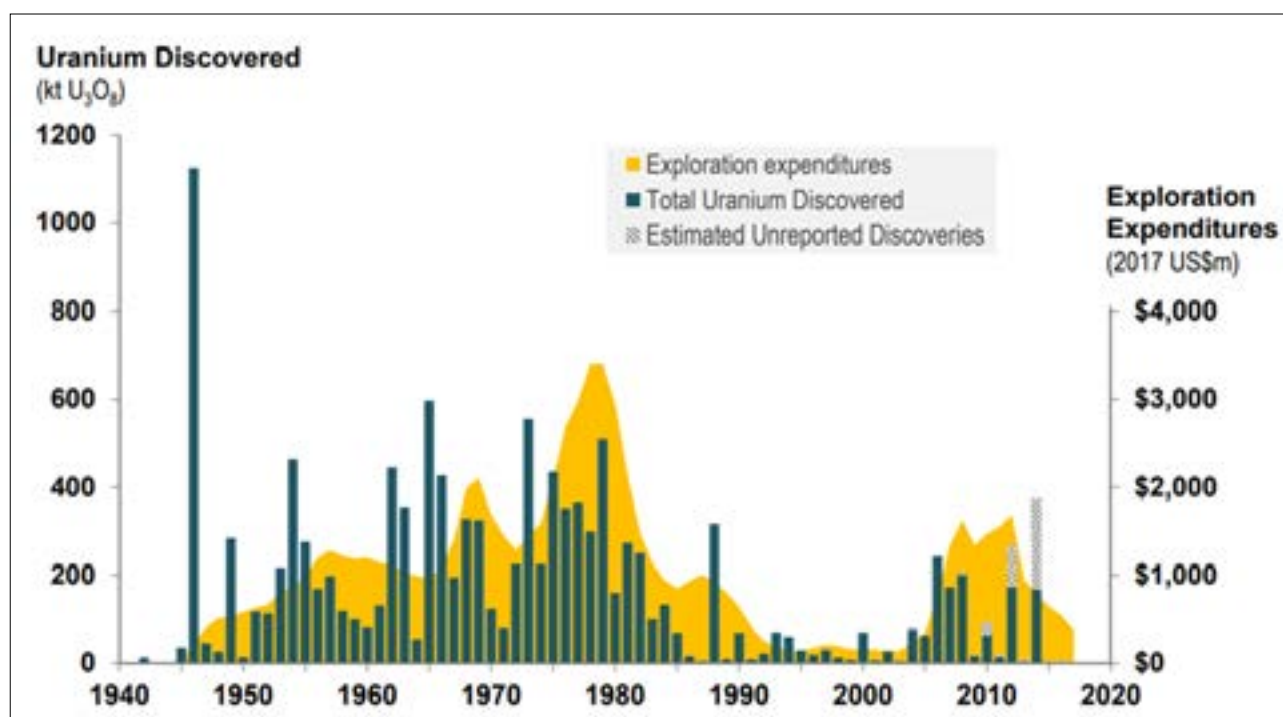


Figure 1. World exploration expenditures, versus uranium discovered (1940-2016).

In addition, uranium occurs in many kinds of minerals in the earth's crust. In this article the conventional ores are divided into two groups (Figure 2):

- soft ores, easily mineable and millable, e.g. sandstones and calcretes, with typical grades ranging from more than 10% down to about 0.02%  $U_3O_8$ ;
- hard ores, hard to mine and mill, e.g. quartz pebble conglomerates, with grades varying typically from about 0.1% down to the mineralisation limit (see box here-after). Some high-grade vein-type ores are also hard to mill.

## Main processing methods currently used

It should be noted that, in addition to the declared resources, the Red Book generally also mentions the processing method envisaged for their uranium extraction. These types of exploitation, of which there are three, are briefly as follows.

### Open pit mining

This processing method involves extracting rock or minerals from an open pit. In this respect, it is important to take into account the thickness of the upper layers of waste rock in order to estimate the mining costs, and the economics of the project.

### Underground mining

This is a processing method used when any ore body lies a considerable distance below the surface, and especially when the amount of waste that has to be removed in order to uncover the ore through surface mining becomes economically prohibitive.

### In Situ Leaching (ISL)

This processing method, also known as in situ recovery (ISR) in North America, involves leaving the ore where it is in the ground, and recovering the minerals from it by dissolving them and pumping the pregnant solution to the surface where the minerals can be recovered.

In general, the extraction of any metal from its ore involves a number of physical transformations and chemical equilibria (Figure 4), all governed by basic physical and chemical laws, which cannot be circumvented by technology. In particular, from the Second Law of thermodynamics, it follows that separation never can be complete, and there always will be losses in the processes.

For this article, the reference uranium mine is the Ranger mine, an open pit mine that may be taken as a world-averaged mine.<sup>2</sup> Underground mining is generally more energy intensive than open pit mining. Differences in specific energy consumption and  $CO_2$

emissions between individual uranium mines are substantial, due to widely varying conditions.

It should also be noted that mines applying the In Situ Leaching (ISL) method have, in some respects, a different flowsheet. Nevertheless, the specific energy consumption and accompanying  $CO_2$  emission of ISL mines may be considered similar to those of open-pit mines, as large numbers of injection and production wells are to be drilled due to clogging, and as large volumes of leaching liquids are consumed. In addition, apart from energy consideration, the harmful impact of ISL on the environment can be high [40] and irreversible.

## Extraction yield, as a function of the ore grade

Basically, the industrial processes to extract metal from the Earth's crust consume chemicals and energy, and emit  $CO_2$  and other greenhouse gases. For energy, two factors contribute to the specific extraction energy: 1) the dilution factor,  $1/G$ , where  $G$  is the grade of the ore, and 2) the extraction yield  $Y$ , also called the recovery factor, or recovery yield, which represents the ratio of the mass of metal actually extracted, over the mass of metal present in the treated amount of rock.

In case of an open pit mining, as it is of course for all the other technologies, losses occur at all stages of the extraction process, as illustrated in Figure 3. More specifically, as far as the leaching and subsequent solvent extraction phase, the lower the concentration of uranium in the liquor, the higher the entropy of the uranium and the less complete its separation from the liquor, which means the greater is the fraction lost in the waste streams. However, a low yield may always be improved by application, if any, of more selective separation processes, but at the expense of much higher specific energy requirements.

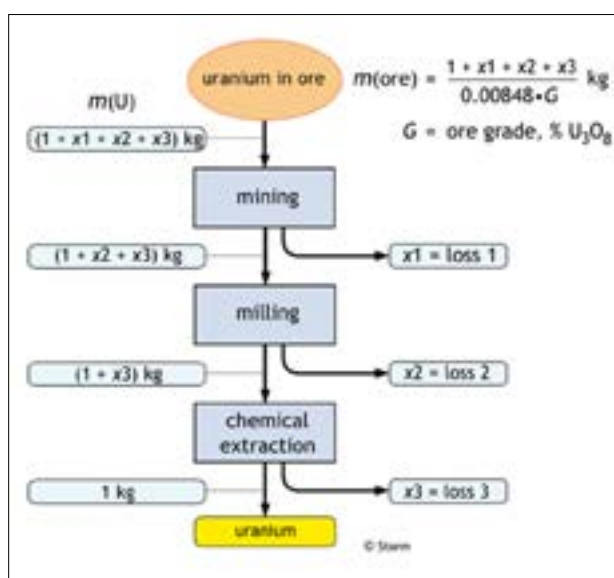


Figure 3. Losses in mining and milling processes in case of an open pit mine.

<sup>2</sup> The Ranger's mine in Australia, is one of the cheapest operating mines in the world, due to its favourable conditions. The flowsheet presented in Figure 4, representative of Ranger mine's one, is used as reference in this study. Many open-pit and underground uranium mines in the world operate according a similar flowsheet.



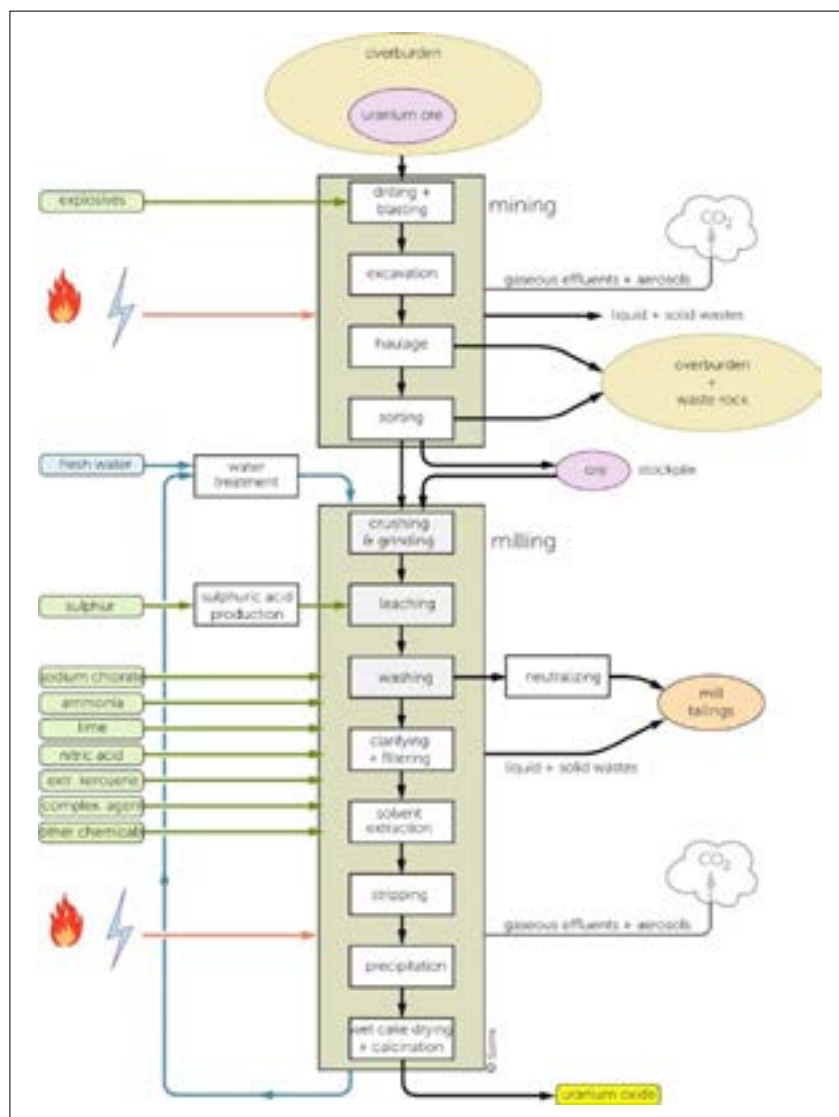


Figure 4. Process of mining and milling in case of an open pit mine.

### About the mineralization limit

Mineralization limit is an important notion, quite unknown and very rarely mentioned. This is a notion that is not included, for instance, in the Red Book, even if the indications on the reserves of certain deposits sometimes mention a consideration of extraction yields, but with little consideration on energy expenditures.

For all natural elements, the mineralization limit corresponds to a content below which they cannot exist in mineral form, but are present in the form of separate grains of minerals, and dispersed at atomic scale among the other constituents of the rock. Concerning uranium, this limit corresponds roughly at grades below 0.01%  $U_3O_8$ . Hence, to extract uranium from rock types below the mineralisation limit, the whole rock has to be brought into solution. Conversely, if uranium is present as separate minerals, the lixiviation process starts with selectively dissolving the uranium minerals, and subsequently discarding the other minerals from the processed rocks.

To put it another way, in his book: "Extracted. How the Quest for Mineral Wealth is Plundering the Planet" [42], Ugo Bardy defines the mineralization barrier as the threshold below which the only way to extract an element is to work from the undifferentiated crust, what means a very important extra energetic cost, compared with an extraction from ore.

From the above considerations, it follows that it must exist a relationship between the uranium content of an ore and its recovery rate. In order to approach this relationship, a large number of data from current and past operations have been mobilised for this. This has led to the graph shown Figure 5.

The data used for this graph may seem perhaps outdated, but during the past 4-5 decades the extraction techniques applied in the uranium industry have not changed significantly. The study in [Mudd 2011] shows that the blue curve in Figure 5 can be considered as the upper limit of achievable extraction efficiencies with current extraction technologies.

The grey squares in this figure are also taken from the empirical data in [1], while the red points and bars, which are those used in this study, have been taken from references [2] to [15].<sup>3</sup>

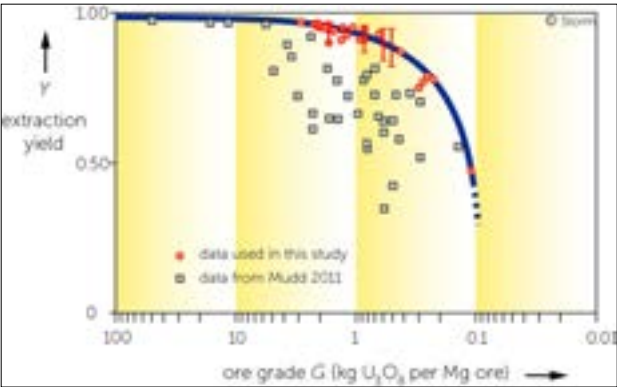


Figure 5. The extraction yield of uranium from ore as a function of the ore grade.

### Energy consumption and CO<sub>2</sub> emission of the recovery of uranium

Along with the above definitions, it follows that the specific energy consumption increases exponentially with decreasing ore grade G, and with extraction yield Y. More precisely, the thermal energy requirements of the recovery of one kilogram of uranium leaving the mill,  $J_{m+m(U)}$ , as function of the ore grade G, counted in kg

uranium per Mg ore, and the recovery yield Y, can be calculated via the following equation:

$$J_{m+m(U)} = \frac{J_{m+m(ore)}}{Y \cdot G}$$

$J_{m+m(U)}$  = specific energy consumption, GJ/kg uranium  
 $J_{m+m(ore)}$  = specific energy consumption, GJ/Mg ore  
Y = extraction yield = fraction of recovered U  
G = ore grade, kg U/Mg ore

However, it should be noted here that the specific energy consumption calculated in with this equation excludes the embodied energy of the used chemicals, namely the energy needed to fabricate the chemicals.

As far as the CO<sub>2</sub> emission attached with the mining and milling of the ore, it can be simply derived from the energy  $J_{m+m(ore)}$  in considering that the electricity consumed at uranium mines is generally generated by oil-fuelled generators.<sup>4</sup> This way, all energy inputs of mining and milling may be considered to be provided by fossil fuels.

Moreover, it will be here assumed a thermal-to-electric conversion efficiency of 40% to calculate the all-thermal energy input of mining and milling. Hence, assuming the specific CO<sub>2</sub> emission of the used fossil fuels (diesel oil and fuel oil) is 75 gCO<sub>2</sub>/MJ, the specific CO<sub>2</sub> emission can be calculated by the following equation:

$$Y_{m+m(U)} = 75 \cdot \frac{J_{m+m(2th,ore)}}{Y \cdot G}$$

$Y_{m+m(U)}$  = specific CO<sub>2</sub> emission, kg CO<sub>2</sub> /kg uranium  
 $J_{m+m(2th,ore)}$  = specific all-thermal energy consumption, GJ/Mg ore  
Y = extraction yield = fraction of recovered U  
G = ore grade, kg U/Mg ore

Considering the great diversity of uranium mining conditions around the world (type of deposit, type of operation, logistical chains, access to water and energy, overburden ratios, hauling distances, etc.), the choice made for this article was limited to taking into account an “average” operation, as illustrated by the choice of the Ranger mine taken as a reference. The only distinction made here is that between “soft” and “hard” ores. This has led to the following figures (Table 1) being used for our purpose.

quantity	unit	soft ores	hard ores
total thermal energy investment mining	GJ/Mg ore	1.237	1.843
total thermal energy investment milling	GJ/Mg ore	1.508	8.67
total thermal energy investment mining + milling	GJ/Mg ore	2.745	10.51
CO <sub>2</sub> emission mining + milling	kg CO <sub>2</sub> /Mg ore	206	788

Table 1. Summary of specific energy investment and CO<sub>2</sub> emission of uranium mining + milling at mines with average overburden ratio and hauling distance.

<sup>3</sup> For further details see: <https://www.stormsmith.nl/index.html>

<sup>4</sup> In recent years, however, we have seen the gradual introduction of battery-powered construction vehicles. However, there is still a lot to be done in this area, especially as for many mining sites, especially those far from electrical infrastructure, the question of electricity production is difficult to resolve without recourse to fossil resources.

Finally, taking into account all these hypotheses and data, two graphs can be derived which illustrate: 1) the energy consumption related to the recovery of uranium (mining and milling), as function of the ore grade (Figure 6); and 2) the CO<sub>2</sub> emissions related to the recovery of uranium (mining and milling), again as function of the ore grade (Figure 7).

Concerning energy, Figure 6 shows a blue band representing the grades of deposits currently in production around the world. Obviously, because the richest ores are mined first, for these offer the highest return of investments for the mining companies, the remaining resources will contain deposits with lower uranium grades, and the average uranium content of available uranium resources will then decrease with time.

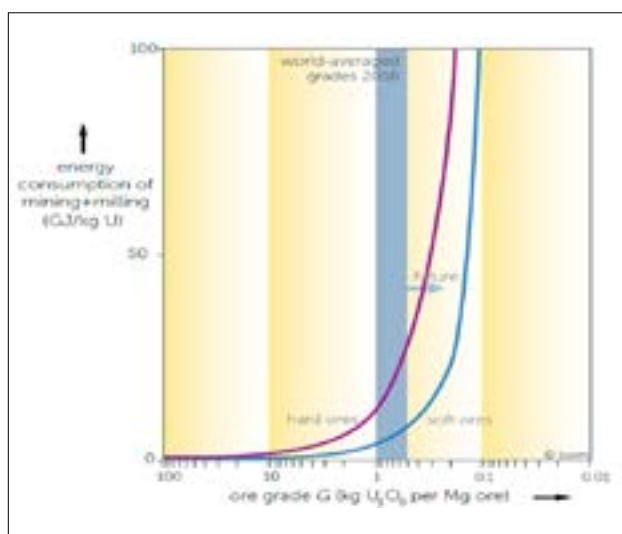


Figure 6. Energy consumption of the recovery of uranium from the earth's crust (mining + milling) as function of the ore grade.

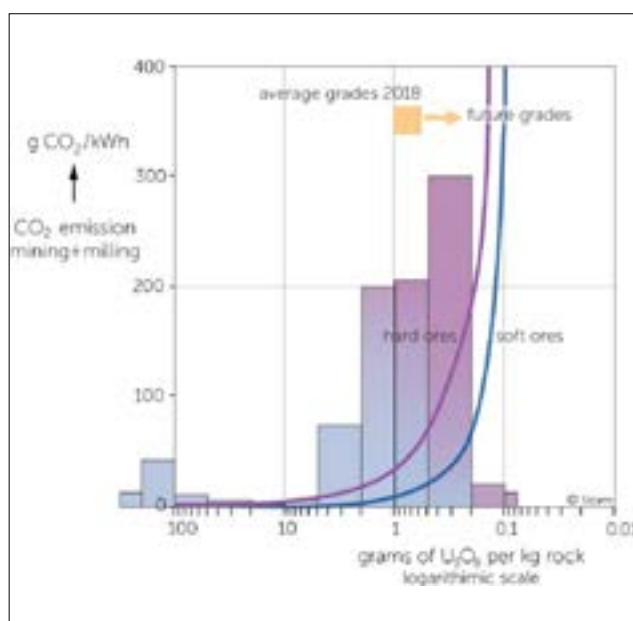


Figure 7. CO<sub>2</sub> emissions of the recovery of uranium from the earth's crust (mining + milling) as function of the ore grade.

## Toward the Energy cliff...

With regard to the energy balance of uranium extracted from ore, there is a threshold below which no net energy production from an uranium deposit is possible. In other words, by falling below this threshold, an uranium ore could no longer be considered as an energy source, because the extraction of, say, one kg of natural uranium would consume more energy (noted "E<sub>invested</sub>" hereafter, and which is limited here to the energy expended in the extraction processes alone than the energy (noted "E<sub>returned</sub>" hereafter) than that can be generated from one kg of natural uranium.

This can be illustrated by what is called the Energy Returned Over energy Invested<sup>5</sup> (or EROI, see article from J. Treiner and G. Bonhomme for details). In its basic expression, it is defined as follows:

$$EROI = E_{\text{returned}} / E_{\text{invested}}$$

from which we can easily derive the net energy produced in the extraction process, namely:

$$E_{\text{net}} = E_{\text{invested}} * (EROI - 1)$$

So, as to have a net energy positive, EROI must be superior to one, this critical value corresponding to the threshold mentioned above. This conducts to the notion called the "energy cliff", as represented Figure 8, based on <sup>235</sup>U technologies, and where the net energy production of nuclear power will fall to zero.

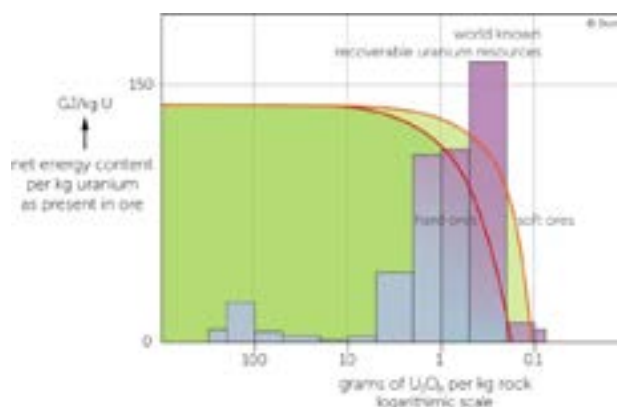


Figure 8. Energy cliff: Net energy content of natural uranium obtained from <sup>235</sup>U, and as function of the ore grade.

It can therefore be seen that, for U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> contents below 100 ppm, and considering the most favourable case of soft ores, the net energy derived from uranium ore mining takes on negative values. It should also be noted that the variation in net energy, described as a function of the content in grams of U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> per kilo obtained from the uranium deposit, is simply the result of a comparison between the data presented in Figure 6, and the energetic potential of one kilo of uranium, based solely on the exploitation of <sup>235</sup>U.

<sup>5</sup> As pointed out above, it should be borne in mind that the energy ratios presented here do not include the energy consumption further down the energy production cycle.

Moreover, given the presence of a mineralogical barrier below the 100 ppm limit (see box above), the energy used in the uranium extraction process is bound to increase sharply, leading to a sharp deterioration in the energy balance. This is illustrated Figure 9 below where this energy expenditure is then multiplied by a factor of around 100.

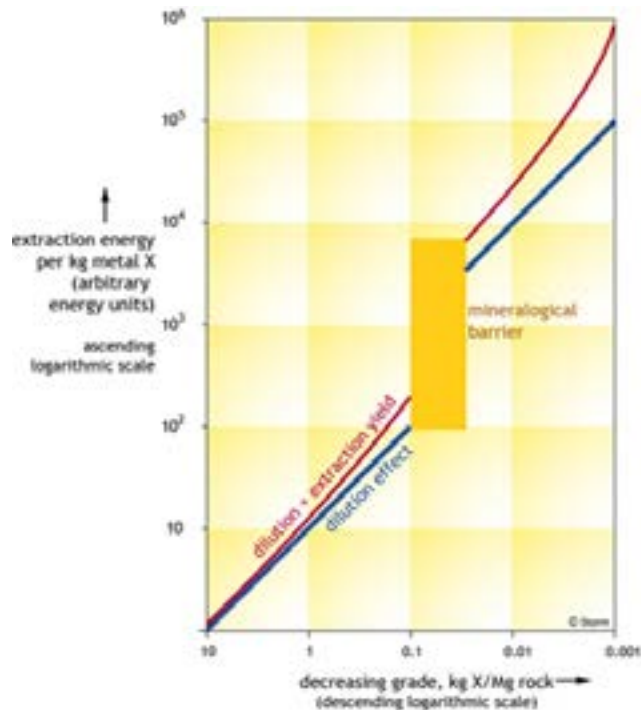


Figure 9. Mineralogical barrier and specific extraction energy of a scarce metal X from the earth's crust.

...and toward the CO<sub>2</sub> trap

As highlighted above, the world average available ore grade of uranium decreases with time. As a result, the specific CO<sub>2</sub> emission of uranium recovery, and consequently of nuclear generated electricity, rises with time, and steeply at low grades. To put it more precisely, Figure 7 shows that at a grade of 130-100 gU/Mg ore, and based on <sup>235</sup>U technologies, the specific CO<sub>2</sub> emission of nuclear recovery surpasses that of gas-fired electricity generation, which is of the order of 400 gCO<sub>2</sub>/kWh: this is called the CO<sub>2</sub> trap.

To put these figures into perspective, and assuming that the world nuclear capacity remains at the current level, at about 370 GWe,<sup>6</sup> the specific CO<sub>2</sub> emission of nuclear recovery will grow to values of gas fired power plant within the lifetime of new nuclear build. This is what is illustrated as scenario 1 in Figure 10 below.

If, instead of scenario 1, we consider a scenario 2 assuming a constant growth of 2% in the share of nuclear power in world electricity consumption, CO<sub>2</sub> emissions of nuclear recovery will surpass those of gas fired plants about twenty years sooner than in scenario 1, as shown in Figure 10.

About the transition of the French nuclear fleet: from PWR to FNR

As mentioned above, the deployment of reactors based on fast neutron technologies will hardly be possible before the end of this century, as illustrated in Figure 11 for the French nuclear fleet. This roadmap shows one of the scenarios for the deployment of these reactors which

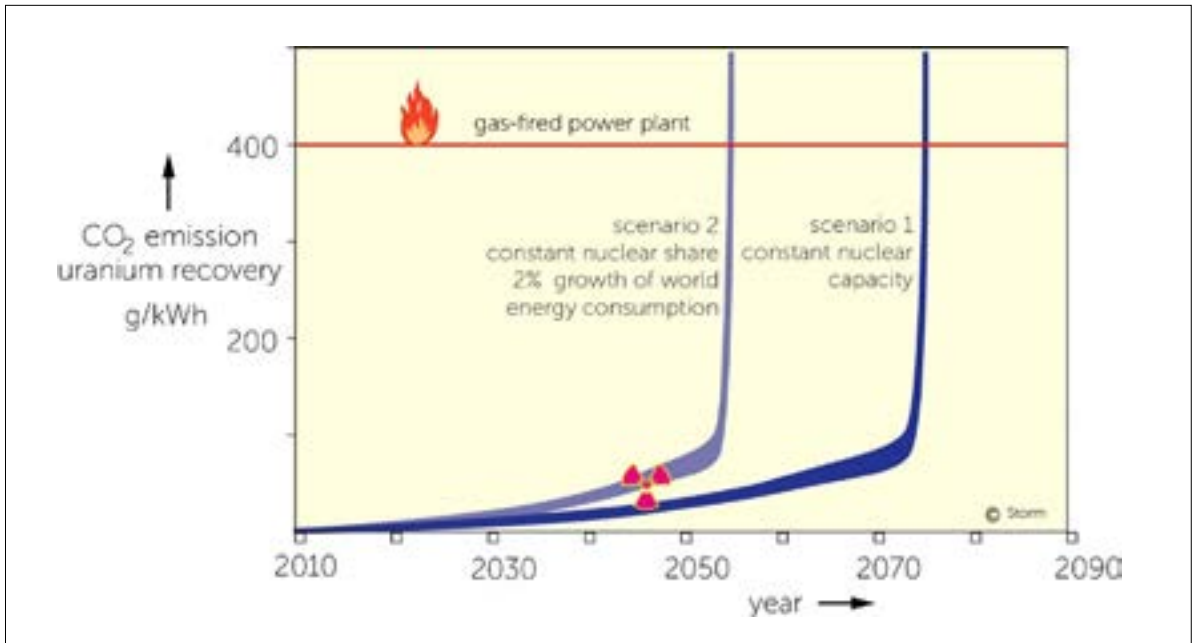


Figure 10. CO<sub>2</sub> emissions in a constant share scenario, and in a constant capacity scenario, both based on <sup>235</sup>U technologies.

<sup>6</sup> World nuclear capacity in 2021 (Source: WNA, “World nuclear performance, 2022” [28]).



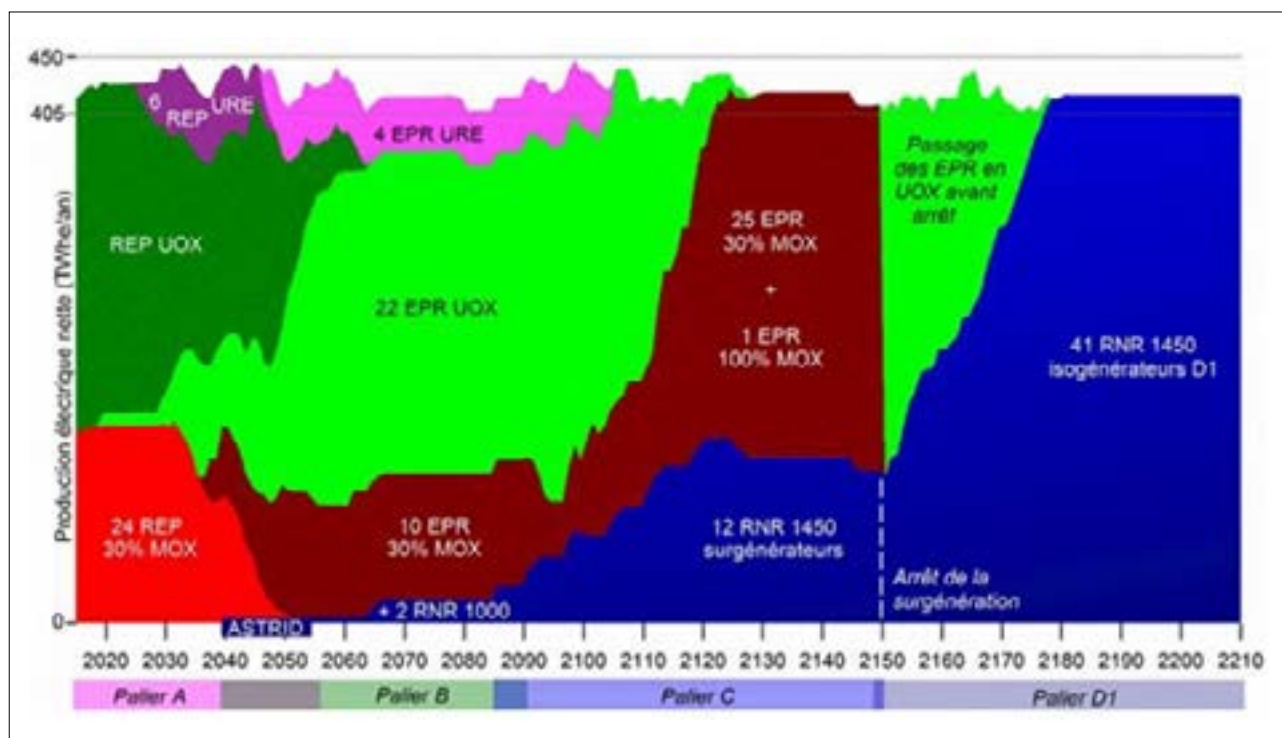


Figure 11. Scenario for the development of the French nuclear fleet leading to a 100% FNR fleet (Source: CEA/DEN/DISN/ACF, 25/10/2018).

was envisaged for the French fleet in the framework of the ASTRID project. It has been defined just before the abandonment of this project, what has thus postponed the date of deployment of such a reactor fleet.

In any case, it can be seen that, although France has the necessary tools for the reprocessing of fuels, as well as for the manufacture of MOX fuels, the deployment of FNR-type reactors is anything but immediate. This is even more true on a global scale, especially since a rapid deployment of FNRs would require a sufficient quantity of  $^{239}\text{Pu}$ , of the order of 18 tonnes of Pu per initialized GW, which represents the Pu inventory over the entire cycle.<sup>7</sup> As an example, France currently has around 360 tonnes of mobilizable Pu, i.e. potentially the possibility of initializing around twenty GW of FNRs.

## Conclusions

The main lesson of this article concerns the occurrence, by 2100, of a degradation of the energy ratios (EROI) attached to the exploitation and use of  $^{235}\text{U}$ . If, as pointed out in the article, the data used in this article certainly need updating, this does not detract from the facts that:

- uranium is a metal that has to be extracted from the Earth's crust, whose geological occurrence couldn't suffice to make it self-evidently an energy resource;

<sup>7</sup> Instead of using  $^{239}\text{Pu}$  to initialize a FNR, it is also possible to use  $^{238}\text{U}$  enriched to about 30%, but this would require sufficient enrichment capacity, and would put further pressure on  $^{235}\text{U}$  availability.

- the amount of extraction energy per kg of uranium increases exponentially with decreasing ore grade, so as to lead toward a negative net energy, what has been labelled "energy cliff";
- the same holds true for the coupled  $\text{CO}_2$  emission which will finally reach and go through values of natural gas fuelled power plant, what has been labelled "CO<sub>2</sub> trap".

One solution to this problem would be to turn to the use of  $^{238}\text{U}$  by the fateful deadline of 2100, but, as mentioned above, this requires taking FNR technology beyond a pre-industrial stage, and thus into the commercial phase, which is still not in sight. However, it is only when FNR technology is deployed that it would be possible to solve both the nuclear energy constraint and the one attached to  $\text{CO}_2$  emissions. As we have seen, these constraints are largely attributable to the mining and milling of natural uranium. Thus with the use of  $^{238}\text{U}$ , which is naturally available in the form of hundreds of thousands of tonnes of depleted uranium, these constraints would disappear, with the prospect of energy autonomy over several thousand years and, as the icing on the cake, virtually zero  $\text{CO}_2$  emissions per kWh.

## References

- [1] *Uranium mining & CO<sub>2</sub> accounting*, AusIMM Uranium Conference, Perth, 8 June 2011, Mudd G M.
- [2] *Assessment of uranium and thorium resources in the United States and the effect of policy alternatives*, Burnham et al., 1974.
- [3] *Total energy analysis of nuclear and fossil fueled power plants*, Franklin et al., 23 November 1971.

- [4] *Statistical data of the Uranium industry*, GJO-100, 1980.
- [5] *Extraction of uranium and thorium and other metals from granite*, Huwlyer et al., 1975.
- [6] *Ore-processing technology and the uranium supply outlook*, James & Simonsen, 1978.
- [7] *South African uranium industry plans for expansion*, James et al., 1978.
- [8] *Energie-analyse van de totale kernenergie cyclus gebaseerd op licht water reactoren*, Kistemaker, 1975.
- [9] *Aanvulling op: Energie-analyse van de totale kernenergie-cyclus gebaseerd op lichtwater reactoren*, Kistemaker, 1976.
- [10] *Uranium from the Chatanooga shale: some problems involved in development*, Mutschler et al., 1976.
- [11] *Total energy investment in nuclear power plants*, Technical Report ESL-31, Rombough & Koen, 1975.
- [12] *Milling technology of uranium ores*, Ross & Guglielmin, 1968.
- [13] *Net energy from nuclear power*, Rotty et al., 1975.
- [14] *The impact of new technology on the economics of uranium production from low-grade ores*, Simonson et al., 1980.
- [15] *Manpower, materials, equipment and utilities required to operate and maintain energy facilities*, SRI, 1975.
- [16] *BP statistical review of world energy 2020*, [www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf](http://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf)
- [17] *Review of environmental impacts of the acid in-situ leach uranium mining process*, CSIRO 2004, <http://large.stanford.edu/courses/2018/ph241/bashti1/docs/csiro-aug04.pdf>
- [18] *Ranger operation, energy resources of Australia Ltd (ERA)*, 2006, <http://www.energyres.com.au>
- [19] *Valencia Uranium Deposits*, Forsys 2007, [www.forsysmetals.com](http://www.forsysmetals.com)
- [20] *Valencia Project*, Namibia, 2007, [www.forsysmetals.com](http://www.forsysmetals.com)
- [21] *An environmental critique of in situ leach mining: The case against uranium solution mining*, Mudd G, 1998, <https://users.monash.edu.au/~gmudd/files/1998-07-InSituLeach-UMining.pdf>
- [22] *Uranium 2007: Resources, Production and Demand*, Red Book 2008.
- [23] *Uranium 2019: Resources, Production and Demand*, Red Book 2020.
- [24] *Guidebook to accompany IAEA map: world distribution of uranium deposits*, IAEA, Vienna, 1996.
- [25] *Energy return on investment*, WNA-eroi, 2016, <http://www.world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/energy-analysis-of-power-systems.aspx>
- [26] *Data world uranium mines outside China and Soviet union*, Nuclear Assurance Corporation, Zürich, 1982.
- [27] *The energy analysis of burner reactor power systems*, Mortimer N D, 1977.
- [28] *World nuclear capacity in 2021, World nuclear performance*, 2022, WNA.
- [29] *Sustainability aspects of uranium mining: Towards accurate accounting?* Mudd G M & Diesendorf M, 2007.
- [30] *Uranium mining in Australia and Canada*, WNA, March 2007, [www.world-nuclear.org/](http://www.world-nuclear.org/)
- [31] *In situ leach (ISL) mining of uranium*, WNA, July 2014, <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/in-situ-leach-mining-of-uranium.aspx>
- [32] *Uranium mining overview*, WNA 2016, <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/uranium-mining-overview.aspx>
- [33] *Australia's uranium and who buys it*, WNA, February 2006, [www.world-nuclear.org/](http://www.world-nuclear.org/)
- [34] *Preliminary assessment on nuclear fuel cycle and energy consumption*, Orita Y, 1995.
- [35] *Supply of uranium*, WNA-75 2010, updated November 2016, [www.world-nuclear.org/](http://www.world-nuclear.org/)
- [36] *Uranium in Canada*, WNA, May 2011, [www.world-nuclear.org/](http://www.world-nuclear.org/)
- [37] *Geology of uranium deposits*, WNA-Ugeol 2015, Geology of uranium deposits - World Nuclear Association.pdf, <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/uranium-resources/geology-of-uranium-deposits.aspx>
- [38] *Trekopje EIA*, Turgis Mining Consultants, November 2007, <https://www.mining-technology.com/contractors/project/turgis-consulting/>
- [39] *Australia's uranium deposits and prospective mines*, UIC, May 2005, [www.uic.com.au/pm.html](http://www.uic.com.au/pm.html)
- [40] *WISE Uranium Project*, 2015, [www.wise-uranium.org](http://www.wise-uranium.org)
- [41] *Impacts of uranium in-situ leaching*, WISE Uranium Project, 2015, <http://www.wise-uranium.org/>
- [42] *Extracted. How the quest for mineral wealth is plundering the planet*, Ugo Bardy, 2014.

More details on the subjects addressed in this article can be found in the following reports on: [www.stormsmith.nl](http://www.stormsmith.nl) [reports]:

- m01 Uranium-Plutonium breeder systems
- m20 Reprocessing of spent fuel
- m24 Thorium for fission power
- m26 Uranium mining + milling
- m27 Unconventional uranium resources
- m28 Uranium from seawater
- m29 Uranium for energy resources
- m35 Energy cliff and CO<sub>2</sub> trap
- m44 Process analysis of the Ranger mine

# Réflexions autour de la notion d'EROI. Illustration avec le photovoltaïque et l'hydrogène

Par Didier PILLET

Membre permanent du Conseil général de l'économie

Dans le cadre de la transition énergétique et du processus de décarbonation de l'économie, les énergies « bas-carbone » sont appelées à jouer un rôle de premier plan. On pense bien sûr aux énergies renouvelables telles que le photovoltaïque et l'éolien, ainsi qu'au nucléaire dont l'empreinte carbone reste à ce jour relativement basse. Cependant, s'agissant de l'implémentation de leurs infrastructures de base, ces systèmes énergétiques restent pour l'heure encore fortement dépendants des énergies fossiles. Ces dernières présentant encore de nos jours des ratios énergétiques (EROI) relativement favorables, ce qui influe sur les EROIs des systèmes photovoltaïques et éoliens, et qui conduit à surestimer leurs performances énergétiques. Un regard attentif des principes physiques à la base de l'évaluation des EROIs de ces deux systèmes, fondés tous les deux sur l'exploitation de flux énergétiques, permet par ailleurs de mieux cerner leur potentiel réel sur le plan des performances énergétiques. Un éclairage est tout particulièrement apporté concernant le photovoltaïque pour ce qui concerne le périmètre à prendre en compte dans l'évaluation de l'énergie consommée dans le cadre de l'implémentation de ce système énergétique. Enfin, la façon dont intervient la notion de rendement dans l'évaluation des EROIs, une notion particulièrement sensible pour ce qui concerne la production de l'hydrogène, fait ressortir toute l'importance qu'il y a à disposer d'une base énergétique sous-jacente à la fois abondante, bon marché, et présentant des EROI relativement élevés, autant d'éléments indispensables à la bonne marche de l'économie, et qui complique singulièrement le processus de sa décarbonation.

## Introduction

Le calcul de l'EROI (*Energy Return Over energy Invested* ou Taux de Retour Énergétique, TRE, en français) est souvent présenté comme devant nécessairement aboutir à des valeurs supérieures à l'unité mais est-ce toujours le cas ? Et un EROI inférieur à l'unité fait-il sens ? Que se passe-t-il lorsque plusieurs formes d'énergie interviennent dans le calcul de ce ratio ? Par ailleurs, quels liens peut-on établir entre la notion d'EROI, dont on s'attache d'une manière générale à vérifier qu'il est bien supérieur à l'unité, et la notion de rendement intervenant dans les processus physique de conversion, dont on sait qu'il présente des valeurs systématiquement inférieures à l'unité ? Dans cet article, nous serons amenés à revisiter quelques principes physiques qui, de manière générale, sous-tendent le fonctionnement des systèmes énergétiques à la base du fonctionnement de nos sociétés.

Nous aborderons ces questions à travers quelques exemples emblématiques, en traitant notamment le cas du photovoltaïque et de l'hydrogène, actuellement au cœur des stratégies de transition énergétique et de décarbonation, stratégies dont nous examinerons les conditions de réalisation, en se replaçant dans une perspective élargie à l'ensemble des énergies bas-carbone.

## Une énergie présentant un EROI inférieur à l'unité : est-ce problématique ?

La notion d'EROI<sup>1</sup> est, de manière classique, souvent illustrée par la nécessité pour un être vivant de ne pas dépenser plus d'énergie dans la recherche de sa nourriture, que celle nécessitée par son métabolisme. De la même manière, transposé dans le cadre du fonctionnement d'une économie, ce principe implique que l'énergie dépensée pour extraire l'énergie indispensable au fonctionnement de cette économie n'excède pas la quantité minimale nécessaire au maintien de cette dernière.

Pourtant, en prenant l'exemple du secteur alimentaire<sup>2</sup>, ce n'est pas ce que l'on observe dans la mesure où, au sein des pays développés tout au moins, le ratio dit « de la fourche à la fourchette » peut aller jusqu'à

<sup>1</sup> Pour plus de détails sur la notion d'EROI, voir dans ce numéro, l'article de Jacques Treiner et Gérard Bonhomme.

<sup>2</sup> Ce sujet est traité plus en détail dans l'article de Félix Lallemand, inclus également dans ce numéro.

des valeurs de l'ordre de 1 à 8<sup>3</sup>. Autrement dit, dans ce cas extrême, pour une calorie arrivant dans l'assiette, l'ensemble de la filière aura dépensé l'équivalent énergétique de 8 calories.

L'explication de ce qui peut paraître une anomalie se trouve, on le sait, dans la très forte dépendance de cette filière aux énergies hydrocarbonées, à savoir le pétrole et le gaz, ce qui, par exemple, peut faire dire à certains que l'agriculture devrait en fait être définie comme une sorte de « pétroculture », tant est grande cette dépendance. À y regarder de plus près, on assiste en fait, dans ce cas précis, à une conversion énergétique passant d'une énergie hydrocarbonée, à une énergie protéinique. Et comme dans tout processus de conversion d'une forme d'énergie en une autre, il existe des pertes que l'on traduit par un rendement, dont la valeur est systématiquement inférieure à l'unité.

Ces pertes sont bien sûr payées par le surplus énergétique procuré, de manière sous-jacente, par les systèmes énergétiques présentant des ratios énergétiques favorables, au premier rang desquels figurent les systèmes pétroliers, gaziers, mais aussi charbonniers. Ces systèmes ont en plus la particularité d'offrir des quantités d'énergie à la fois abondantes et relativement peu chères, tout au moins encore pour les deux à trois décennies à venir, et en excluant bien entendu les fluctuations conjoncturelles des prix de l'énergie.

Par ailleurs, pour ce qui concerne en particulier le secteur alimentaire, si des énergies fossiles abondantes et peu chères contribuent effectivement à procurer une alimentation abondante, et surtout bon marché, sa dépendance aux énergies hydrocarbonées ne tarde pas à se signaler par une flambée des prix alimentaires lorsque les prix de ces énergies subissent eux-mêmes une envolée. C'est par exemple ce qui s'est produit en 2007-2008 avec la forte augmentation des prix du pétrole, et qui s'est traduit par ce que l'on a appelé les émeutes de la faim.

Plus récemment la brusque montée des prix du gaz observée en 2021-2022 a, cette fois-ci, entraîné une pression passagère à la hausse du prix des engrais azotés, ce qui, prolongé sur une plus grande période, ne manquerait pas de se répercuter sur les prix pratiqués tout le long de la chaîne de production alimentaire.

On voit donc que, pour un système énergétique donné, un EROI inférieur à l'unité peut faire sens si l'on considère qu'il correspond à une conversion énergétique permettant de produire une énergie sous une forme utile à une application donnée. Ainsi, si le gaz et le pétrole ne sont pas assimilables tels quels par un organisme vivant, leur utilisation dans le convertisseur constitué de l'ensemble de la chaîne alimentaire permet d'obtenir la forme d'énergie appropriée pour ce même organisme.

On l'a vu avec l'alimentaire, mais on pourrait également, autre exemple parmi bien d'autres, évoquer la fabrication de carburant synthétique à partir de charbon (CTL, ou *Coal to Liquid*) qui est un autre type de conversion énergétique, permettant cette fois-ci de produire une

forme d'énergie assimilable par un moteur à combustion interne. Il y a là aussi un prix énergétique à payer, celui correspondant aux pertes de conversion, ces dernières se traduisant, comme on l'a vu, par un rendement inférieur à l'unité.

Le point important à retenir pour toutes ces configurations d'EROI inférieur à l'unité, c'est qu'elles ne sont pas nécessairement problématiques, mais qu'elles ne peuvent être viables énergétiquement et économiquement que dans la mesure où elles sont supportées par des sources d'énergie, à la fois abondantes, bon marché et présentant des ratios énergétiques importants. C'est bien sûr, comme signalé plus haut, le rôle joué actuellement, et en tout premier lieu par les énergies fossiles : pétrole, gaz, mais aussi charbon.

## Qu'en est-il d'une énergie présentant un EROI supérieur à l'unité ?

On pourrait affirmer d'emblée d'une énergie dont l'EROI est supérieure à 1 qu'elle ne pose *a priori* pas de problème de viabilité. Qu'en est-il en réalité ? Pour répondre à cette question, il faut revenir sur ce qui a permis, et qui permet encore, l'obtention de ces ratios énergétiques supérieurs à l'unité.

Tout d'abord un constat : en matière énergétique, aucune transformation, ni aucune conversion ne peut se réaliser sans pertes. Cette affirmation est une simple conséquence des lois de la physique, en l'occurrence celles de la thermodynamique, qui nous autorisent ici à généraliser les observations faites à partir des quelques exemples donnés plus haut. Dit autrement, les processus de conversion énergétique présentent tous, systématiquement, des rendements inférieurs à l'unité.

Comment alors expliquer l'existence d'EROIs supérieurs à l'unité ? Ce paradoxe n'est bien sûr qu'apparent comme on va le voir dans deux contextes particuliers, à savoir : le cas des énergies de stock, et celui des énergies de flux.

### Le cas des énergies de stock

Si l'on considère les énergies fossiles, pétrole, gaz et charbon, on parle volontiers, et à juste titre, d'énergie de stocks. Des stocks, fort importants par ailleurs, qui ont été constitués sur des périodes de l'ordre de dizaines de millions d'années, et qui sont à l'origine le résultat de processus de conversion énergétique présentant des rendements de quelques pourcents. Ce sont là des rendements similaires à ceux observés lors de la conversion du rayonnement solaire en matières organiques et végétales, celles-ci assurant par là même une fonction de stockage de l'énergie solaire. Des rendements certes faibles, mais qui sur des durées de l'ordre de dizaines de millions d'années ont conduit à la constitution des stocks très importants de matières énergétiques fossiles que nous avons appris à exploiter pour assurer à la fois notre développement économique, ainsi que les progrès techniques qui ont permis la progression de notre niveau de vie.

<sup>3</sup> Ce ratio varie bien évidemment d'une région à l'autre, ou d'un pays à l'autre.



Du point de vue de la comptabilité énergétique, ces stocks ont pu être exploités en ne considérant que le coût énergétique associé à leur extraction, leurs contenus énergétiques intrinsèques pouvant être considérés comme un cadeau de la nature, et donc gratuits d'un point de vue économique. C'est ainsi que, à ses débuts dans les années 1930, le développement de l'industrie pétrolière au Texas a pu présenter un ratio énergétique (EROI) de l'ordre de 100 :1 en sortie de puits, c'est à dire que pour extraire 100 barils de pétrole, il n'en coûtait qu'un seul baril. On constate depuis une lente érosion de ce ratio, traduisant la difficulté croissante qu'il y a à extraire ce pétrole dont les gisements exploités sont de plus en plus profonds et difficiles d'accès.

Ce qui est dit ici avec le pétrole peut être repris pour le charbon et le gaz naturel, dont les stocks ont été de la même manière constitués sur de très grandes périodes, selon des processus présentant des rendements relativement faibles, et dont on jouit actuellement sans contrepartie aucune, si ce n'est à travers les coûts minimaux, à la fois économique et énergétique, nécessités pour leur extraction.

Pour ce qui concerne l'uranium dont on tire de l'énergie très majoritairement à partir de l' $^{235}\text{U}$ , l'un de ses isotopes, la constitution de ses stocks est de nature très différente de celle des énergies fossiles. Ceux-ci se sont en effet constitués à la suite de l'effondrement du cœur d'étoiles massives, donnant lieu aux événements de type « supernovæ » intervenant à partir de la fusion du fer, les mécanismes de fusion nucléaire des éléments au-delà du fer étant endothermiques. La matière externe de ces étoiles, soufflée par l'onde de pression générée par le contre-choc de la matière interne se fracassant sur le cœur, est alors traversée, durant une poignée de secondes, par un énorme flux de neutrinos et de neutrons, ces derniers étant à l'origine de la formation des éléments plus lourds que le fer, dont l'uranium, par captures successives. Comme pour les autres énergies de stocks évoquées ci-dessus, la ressource uranium est également soumise à un phénomène de déplétion, conduisant de la même façon à une lente érosion des ratios énergétiques de cette filière énergétique<sup>4</sup>.

### Le cas des énergies de flux

Avec les énergies de flux, il ne s'agit plus d'extraire des matières énergétiques, mais de capter l'énergie portée par un flux. Cela s'accompagne généralement d'une conversion d'une forme d'énergie à une autre.

C'est ainsi le cas du rayonnement solaire capté par un ensemble de cellules photovoltaïques dont la fonction est de transformer le rayonnement électromagnétique du flux solaire, en électricité. Du point de vue énergétique, et pour être plus précis, l'opération consiste à convertir l'énergie des photons émis par une source lumineuse (ici le soleil), en une énergie électrochimique qui consiste à faire passer les électrons présents au sein de la cellule, d'un niveau de potentiel électrique, à un niveau supérieur, permettant ainsi la circulation d'un

courant électrique lorsque les deux pôles du groupe de cellules sont refermés sur un récepteur.

Nombre d'exemples pourraient être donnés pour illustrer la séquence captation-conversion. Parmi ceux-ci, on peut bien sûr citer les systèmes éoliens où de l'énergie mécanique, portée par l'air en mouvement, est convertie là aussi en électricité, mais selon un autre principe que dans le cas du photovoltaïque, en l'occurrence celui basé sur l'induction magnétique. Un autre exemple intéressant est celui des grands barrages hydroélectriques où c'est cette fois-ci de l'énergie gravifique qui intervient en convertissant l'énergie potentielle de gravitation, en énergie mécanique, elle-même convertie en énergie électrique par turbinage de l'eau de pluie captée sur l'ensemble du bassin versant du cours d'eau alimentant le barrage.

Pour chacun des systèmes énergétiques basés sur des énergies de flux, le calcul de l'EROI tire avantageusement partie du caractère gratuit, au sens monétaire et énergétique, de l'énergie associée à ces flux (par exemple, solaire, éolien, hydroélectricité)<sup>5</sup>. Cela conduit généralement à des ratios supérieurs à l'unité. Ceux-ci seront plus ou moins importants selon les rendements associés aux processus de conversion, ainsi que selon la quantité d'énergie utilisée lors des phases de construction des infrastructures et d'exploitation de ces dernières.

Si l'on devait illustrer les propos ci-dessus à partir d'un système énergétique, le cas de la pompe à chaleur (PAC) s'y prêterait fort bien. Ainsi, à partir du schéma simplifié de principe d'une PAC en mode chauffage (voir la Figure 1 de la page suivante), on voit que l'expression du *Coefficient de performance* (COP),  $\varepsilon = Q_2/W$ , ne fait intervenir que la chaleur utile  $Q_2$ , ainsi que le travail  $W$  qui est l'unique composante « payante », au sens économique, de l'expression du COP. En revanche, la chaleur  $Q_1$ , qui est fournie par l'environnement extérieur, est considérée comme gratuite et n'intervient donc pas dans le calcul du COP. Ce prélèvement de chaleur est bien sûr compensé par les apports de chaleur extérieurs, comme l'énergie solaire.

On aura noté au passage la relation  $Q_2 = Q_1 + W$  qui est la traduction du principe de conservation de l'énergie,

<sup>5</sup> À y regarder de plus près les quelques exemples donnés ici peuvent se ramener à l'énergie dispensée par le soleil qui alimente de fait : 1) le cycle de l'eau (avec très schématiquement les étapes suivantes : évaporation → condensation → précipitation → puis stockage dans les barrages hydroélectriques et retour dans le milieu naturel) ; 2) les différentiels de pression au sein de l'atmosphère, entre les zones équatoriales chaudes et les zones polaires, ceci se traduisant par des mouvements de masses d'air, plus ou moins importants selon les paramètres d'insolation. Par ailleurs si l'on remonte un peu plus la chaîne énergétique, on constatera que ce flux d'énergie solaire est en fait alimenté par l'énorme masse d'hydrogène transformée chaque instant en hélium au centre du soleil, où de l'énergie nucléaire est ainsi convertie en chaleur, de l'hydrogène constitué par ailleurs dans les toutes premières minutes d'existence de l'Univers (voir « Les 3 premières minutes de l'Univers », par Steven Weinberg). Et à chacune de ces étapes de conversion sont bien sûr attachés des processus physiques présentant des rendements inférieurs à l'unité, voire très inférieurs pour l'énergie solaire captée par la surface terrestre.

<sup>4</sup> Voir à ce sujet, dans ce même numéro, l'article de J. W. Storm van Leeuwen et Didier Pillet.

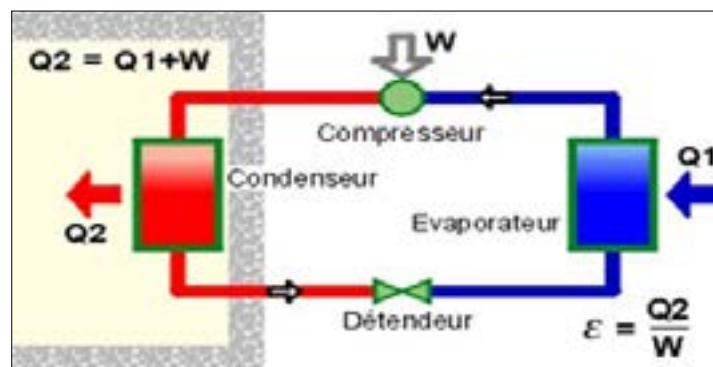


Figure 1 : Échanges énergétiques lors du fonctionnement d'une PAC en mode chauffage (Source : [http://www.ef4.be/fr/pompes-a-chaaleur/copy\\_types-de-pac](http://www.ef4.be/fr/pompes-a-chaaleur/copy_types-de-pac)).

et qui correspond au *premier principe de la thermodynamique*. Mais le *second principe de la thermodynamique* n'est pas bien loin. En effet, le schéma ci-contre, dans sa présentation de la PAC, peut être considéré comme décrivant une situation de fonctionnement idéal, c'est-à-dire sans pertes, et caractérisé par des rendements égaux à l'unité. En réalité, il n'en est rien comme l'illustre la Figure 2 ci-dessous où l'on notera l'influence du périmètre d'évaluation du COP sur les performances de la PAC.

### Quelques considérations annexes sur l'EROI

On notera au préalable que si l'évaluation de l'énergie obtenue par un système énergétique ne pose généra-

lement pas de difficulté particulière, il n'en va pas de même de l'énergie relative aux phases de construction/exploitation du système énergétique en question. C'est ce que nous allons illustrer dans les paragraphes qui suivent avec le cas du photovoltaïque, avant d'examiner les enjeux attachés à l'hydrogène dans le cadre de la transition énergétique et de la décarbonation de l'économie.

### Impact des consommations énergétiques associées au photovoltaïque

Comme on l'a évoqué ci-dessus, pour un système énergétique, quel qu'il soit, la difficulté majeure relative à l'évaluation d'un ratio énergétique tel que l'EROI, réside dans l'évaluation du périmètre à prendre en compte dans les phases de construction et d'exploitation du système dans son ensemble. C'est notamment

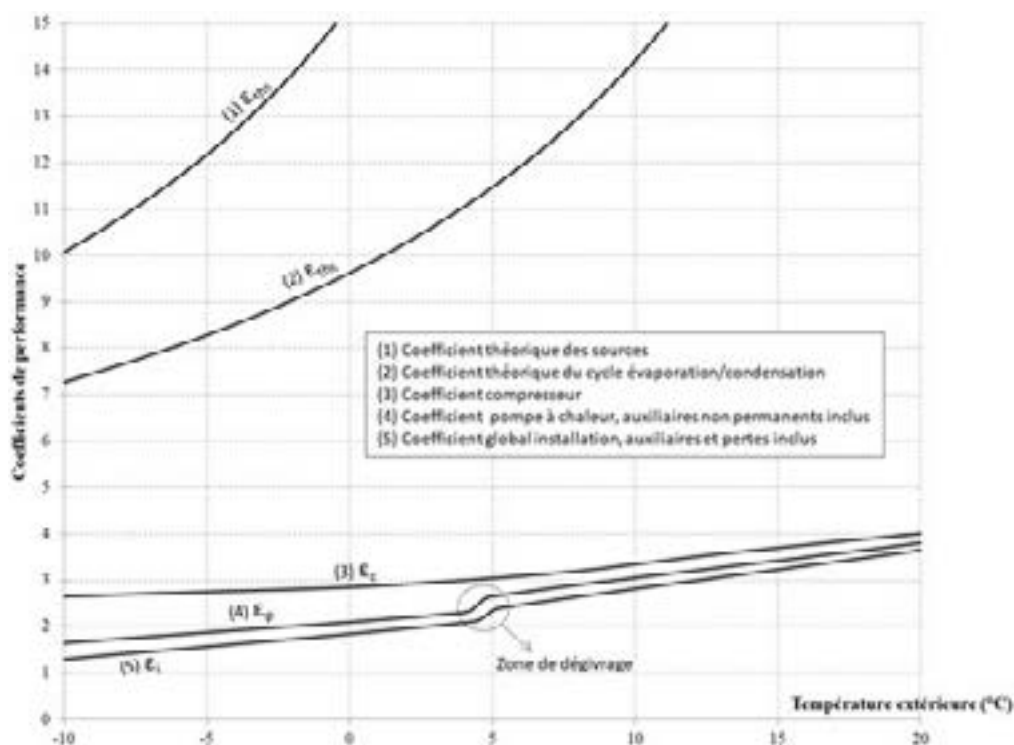


Figure 2 : Coefficients de performance pour une PAC Air-Air, avec une température intérieure de 19°C (Source : *La pompe à chaleur*, Jacques Bernier, 2004, Éd. PYC Livres).

le cas du photovoltaïque où la fourchette des valeurs avancées dans la littérature s'avère très large.

### Périmètre associé à la partie haute de la fourchette de valeurs de l'EROI

Dans la partie haute de la fourchette des EROIs du photovoltaïque, on trouve les études traditionnelles d'analyse du cycle de vie et de délai de retour de l'énergie des systèmes solaires photovoltaïques.

Celles-ci donnent souvent des estimations assez favorables, à savoir que l'énergie investie dans la construction de capteurs solaires peut être « remboursée » par le dispositif en un ou deux ans. Ainsi, si la durée de vie des capteurs est de 25 ans, une hypothèse courante, cela donne un retour sur investissement énergétique compris typiquement dans une fourchette allant de 12:1 à 25:1<sup>6</sup>, ce qui représente des ratios plutôt favorables. *N.B.* : la notation utilisée, ici et dans le reste de l'article, pour le calcul de l'EROI indique que ce ratio se rapporte toujours à l'unité.

Cependant, ces analyses ne se concentrent généralement que sur les processus de base de la fabrication de lingots, de *wafers*, de cellules et de modules<sup>7</sup>, bien qu'elles incluent parfois les coûts énergétiques des équipements directs associés tels que : onduleurs, *trackers*<sup>8</sup>, et, le cas échéant, les structures métalliques.

### Périmètre associé à la partie basse de la fourchette de valeurs de l'EROI

L'évaluation exhaustive des consommations énergétiques intervenant dans la construction et l'exploitation d'un système énergétique quel qu'il soit, nécessite d'aller plus loin que la prise en compte des consommations énergétiques des processus de base de la fabri-

cation des éléments constitutifs de ce système. À titre d'exemple, s'agissant de l'évaluation de l'EROI associé

au solaire photovoltaïque en Espagne, une démarche intéressante a été entreprise dans ce sens par *Pedro Prieto* et *Charles Hall*<sup>9</sup>. Celle-ci a consisté en l'utilisation de l'ensemble des données tirées de la réalisation de grands projets photovoltaïques espagnols, durant la période allant de 2009 à 2011.

Ainsi, afin d'évaluer ce ratio aussi précisément que possible, Pedro Prieto, alors en charge de ces grands projets, a dépassé le simple inventaire des consommations directes d'énergie en élargissant le périmètre des données énergétiques prises en compte dans l'évaluation de l'EROI, ce qui conduit naturellement bien sûr à diminuer le ratio établi à partir des consommations énergétiques des processus de base.

Pour cette analyse, outre les évaluations des dépenses énergétiques directes, les activités connexes au secteur du photovoltaïque ont été prises en compte, allant des simples activités de terrassement, aux activités financières attachées à la réalisation des projets pilotés par Pedro Prieto, en passant par l'impact associé à l'utilisation de centrales à gaz pour gérer l'intermittence de la production photovoltaïque. Lorsque les évaluations des consommations énergétiques des différents postes considérés se sont avérées malaisées, voire impossibles, l'analyse s'est appuyée sur les montants des dépenses effectuées dans chacun de ces postes. Pour cela un tableau de conversion « énergie <-> monnaie » a été utilisé, en distinguant les grands secteurs économiques et industriels.

Au final, la valeur de l'EROI du photovoltaïque obtenue, à l'aide de cette méthodologie, par les auteurs de l'étude, est de l'ordre de 2,45:1, soit une valeur proche de celle obtenue par ailleurs par Murphy *et al.* (2011). Cette valeur s'avère en outre similaire à celle obtenue par ces deux auteurs, en évaluant les coûts énergétiques par la simple multiplication du coût monétaire d'un projet d'un gigawatt, par l'intensité énergétique de l'économie espagnole, soit un EROI de l'ordre de 2,41:1.

Toutefois, dans cette approche, conscients de possibles imprécisions, ou autres biais tels que les double comptages, *Pedro Prieto* et *Charles Hall* ont réalisé une étude de sensibilité de la méthode, ce qui les a conduit à proposer une fourchette d'évaluation de l'EROI du photovoltaïque espagnol comprise entre 1:1 et 7,35:1.

Par comparaison avec la fourchette comprise entre 12:1 et 25:1 donnée plus haut, ces résultats montrent la nécessité qu'il y a, pour le calcul des EROIs, à prendre en compte de manière aussi exhaustive que possible les contributions indirectes de l'énergie consommée dans les phases de construction et d'exploitation d'un système énergétique.

<sup>6</sup> Voir *Spain's photovoltaic revolution – The energy return on investment*, by Pedro A. Prieto and Charles A.S. Hall, 2013.

<sup>7</sup> La terminologie utilisée ici est celle correspondant à la chaîne de transformation partant des matières minérales brutes, à la réalisation de modules solaires. Ainsi, en prenant pour exemple la technologie du silicium monocristallin, le *lingot* est la structure cylindrique obtenue par croissance d'une amorce de cristal de silicium. L'étape suivante est le découpage de ce lingot en tranches ("*wafer*" en anglais) de l'ordre de 250 microns. Ensuite, intervient une étape de dopage où certains éléments chimiques (bore et phosphore, dans le cas du silicium) sont implantés dans le substrat de silicium afin de conférer à ce dernier des propriétés semi-conductrices (en constituant ainsi ce que l'on appelle une jonction PN, au comportement similaire à celui d'une diode). Ainsi dopées, les tranches de silicium sont découpées en *cellules*, ces dernières étant ensuite assemblées pour constituer les *modules* solaires recherchés.

<sup>8</sup> Dans le cas du photovoltaïque, la fonction d'un *tracker* est de suivre la course du soleil afin de maximiser la conversion du rayonnement solaire en électricité. Ainsi, pour un capteur plan ordinaire, il s'agira simplement d'orienter en permanence ce capteur, de sorte qu'il demeure perpendiculaire aux rayons du soleil. Il existe par ailleurs des situations où, en plus du suivi de la course du soleil, il est nécessaire de concentrer le rayonnement capté. C'est par exemple le cas de l'utilisation de cellules solaires comportant 2 jonctions PN, chacune exploitant une partie différente du spectre solaire, ce dernier étant ainsi utilisé de manière plus efficace que dans le cas d'une mono jonction. Néanmoins, afin de compenser le coût important de fabrication de ce type de cellules, la taille du capteur se limite souvent à une seule cellule, d'où la nécessité de concentrer le rayonnement solaire sur cette dernière, par exemple à l'aide de lentilles de Fresnel.

<sup>9</sup> *ibid.*



### Le photovoltaïque : une filière reposant encore trop sur les fossiles

À ce jour, la construction d'un système photovoltaïque, qui nécessite de disposer d'énergie, et de matières premières, repose encore fortement sur la disponibilité d'énergies carbonées, que ce soit pour générer l'électricité nécessaire à tous les étages des processus de fabrication, ou bien encore pour générer la chaleur nécessaire à la transformation de la matière brute pour, par exemple, la fabrication de lingots, sans oublier l'énergie utilisée pour alimenter toute la machinerie de l'extraction et du traitement des minerais.

Ainsi, dans un monde où le mix électrique serait quasiment composé de systèmes d'énergie renouvelable, du type photovoltaïque, il faudrait que ces derniers assurent tous les services aujourd'hui assurés par les énergies fossiles, ce qui, à l'évidence, dégraderait les ratios énergétiques du photovoltaïque, un système énergétique dont on a pu noter le peu de marge disponible. Cela fait ressortir une fois de plus toute l'importance de disposer d'un socle énergétique à la fois ample, peu onéreux et présentant des EROIs confortables, ce dont on bénéficie actuellement avec les trois énergies fossiles que sont, en premier lieu le pétrole, puis le gaz et enfin le charbon.

Pour sortir véritablement cette filière de la dépendance des fossiles, il apparaît donc nécessaire, sans qu'*a priori* cela soit pour autant suffisant, de continuer à travailler sur l'amélioration des rendements des cel-

lules, ce qui augmenterait mécaniquement la quantité d'énergie convertie, et donc l'EROI. Sur ce plan, les développements observés ces dernières années font apparaître des progrès en matière de rendement unitaire, comme illustré par la Figure 3 ci-dessous, où l'on note en particulier l'émergence de technologies prometteuses telles les *perovskites*<sup>10</sup>, et surtout les cellules tandem *perovskite*/Si, avec des rendements atteignant respectivement à ce jour 26 et 33 %.

Ces progrès s'accompagnent également d'une réduction du volume des matières nécessaires à la fabrication de ces cellules, ce qui réduit d'autant les consommations énergétiques lors de la fabrication de ces dernières, et améliore donc l'EROI associé à ces filières technologiques.

### L'hydrogène dans le cadre de la transition énergétique et de la décarbonation

En matière de décarbonation et de transition énergétique, l'hydrogène est actuellement l'objet d'une attention particulière. Replacé dans la perspective, à horizon 2050, d'une fin programmée des énergies fossiles, ce double objectif est en fait dépendant de la capacité à mobiliser tout le potentiel des énergies peu émettrices de gaz à effet de serre (GES), au premier rang desquelles on trouve le solaire photovoltaïque, l'éolien et le nucléaire. Cela appelle plusieurs commentaires.

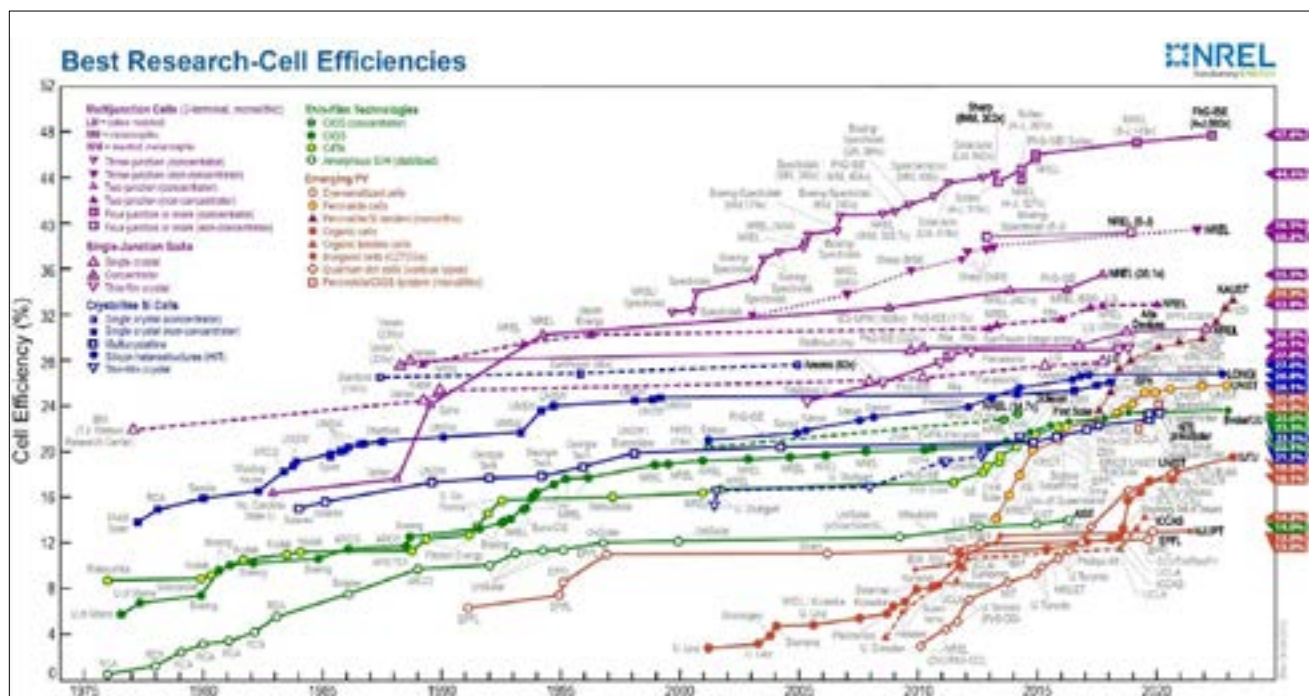


Figure 3 : Performances des diverses technologies de cellules photovoltaïques depuis 1975 (Source : <https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/best-research-cell-efficiencies.pdf>).

<sup>10</sup> La **pérovskite**, du nom du minéralogiste russe L.A. Perovski, est une structure cristalline commune à de nombreux oxydes. Ce nom a d'abord désigné le titanate de calcium de formule  $\text{CaTiO}_3$ , avant d'être étendu à l'ensemble des oxydes de formule générale  $\text{ABO}_3$  présentant la même structure. Lorsque ce minéral est associé au silicium, on parle alors de tandem Perovskite/Si.



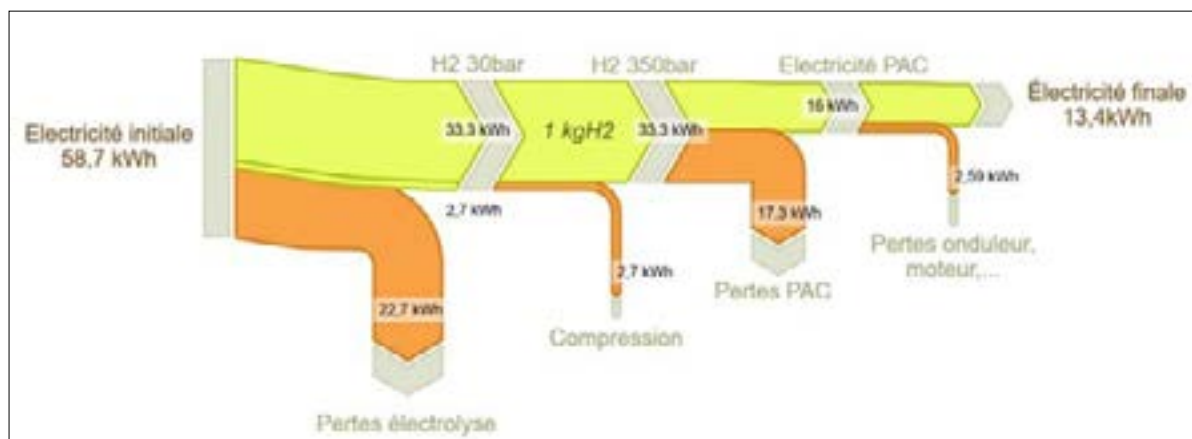


Figure 4 : Rendement de la chaîne hydrogène – cas du “power to H<sub>2</sub> to power” (Source : ADEME, voir [https://www.connaissancesdesenergies.org/sites/default/files/pdf-pt-vue/rendement-chaine-h2\\_fiche-technique-02-2020.pdf](https://www.connaissancesdesenergies.org/sites/default/files/pdf-pt-vue/rendement-chaine-h2_fiche-technique-02-2020.pdf)).

### Une production d'hydrogène au service de la transition énergétique

Il y a tout d'abord la question de la production d'hydrogène, dont on sait qu'elle est affectée d'un rendement inférieur à l'unité, comme illustré par la Figure 4 ci-dessus dans le cas d'une application “power to H<sub>2</sub> to power”.

D'une manière générale, les applications énergétiques basées sur l'hydrogène, s'avèrent très contraintes par le rendement énergétique des conversions successives. Comme cela a été rappelé plus haut, cela n'est guère surprenant compte tenu des rendements associés aux processus de conversion énergétique, systématiquement inférieurs à l'unité. Ainsi, dans la mesure où les meilleures technologies ne permettent pas d'envisager des rendements de la chaîne « électricité-hydrogène-électricité » supérieurs à 30 %, l'EROI associé à cette chaîne ne peut donc guère dépasser 0,3:1.

On se retrouve ainsi dans le cas de figure, évoqué plus haut, d'un EROI inférieur à l'unité. Dans l'exemple considéré ici, l'hydrogène a de fait un rôle de vecteur énergétique<sup>11</sup>, où production et consommation sont séparées par une étape intermédiaire de stockage, permettant notamment le transport de l'énergie, soit, majoritairement, directement sous forme d'hydrogène (hydrogène comprimé, ou cryogénique), soit sous forme d'ammoniac (NH<sub>3</sub>), cette solution s'avérant très prometteuse. Ceci permet, entre autres, de pallier les inconvénients du caractère intermittent des énergies renouvelables de type photovoltaïque et éolien.

Mais la production d'hydrogène peut également avoir pour but de fournir un carburant décarboné pour des moyens de transport difficilement envisageables sur la seule base d'une utilisation de l'électricité, comme c'est le cas de l'aérien. Notons que la nécessité d'une telle transition de ce secteur vers des énergies décarbonées justifie, comme on a pu le voir plus haut, de passer par un processus de conversion pénalisé par un rendement inférieur à 1, et donc un EROI inférieur à l'unité, pourvu que l'on dispose par ailleurs d'une source énergétique pouvant dégager une marge suffisante permettant de compenser la perte d'énergie correspondant à ce rendement.

### Une production d'hydrogène au service de la décarbonation

La question de l'utilisation de l'hydrogène dans le processus de décarbonation évoqué ci-dessus à propos des carburants participe en fait d'une stratégie plus large englobant les processus industriels les plus émetteurs, la priorité étant de décarboner l'hydrogène à usage industriel (raffineries, engrais, sidérurgie). Cependant, à ce jour, la production d'hydrogène reste encore fortement dépendante des énergies fossiles, avec un taux de production de l'ordre de 95 % obtenu à partir du méthane. Le chemin vers la décarbonation totale de l'hydrogène est donc encore long<sup>12</sup>.

À terme cela passera par une production d'hydrogène entièrement basée sur des énergies faiblement carbonées, telles que le nucléaire, le photovoltaïque et l'éolien, sans oublier la grande hydroélectricité. Mais on retrouve ici la même difficulté que celle évoquée plus haut avec le photovoltaïque, où était pointé le nécessaire découplage entre production électrique et énergies fossiles, ceci afin de parvenir à une réduction drastique des GES, tout en procurant un socle énergétique suffisant pour assurer le fonctionnement des rouages de l'économie, et répondre ainsi à ses besoins.

<sup>11</sup> Jusqu'à très récemment, on admettait que l'hydrogène ne pouvait exister à l'état natif. On sait maintenant que de l'hydrogène est relâché en continu à la surface de la Terre, sans que, à ce jour, l'on puisse le collecter de manière industrielle. Ce phénomène a donné lieu, en 2015, à l'édition d'un livre écrit par deux géologues, Alain Prinzhofer et Éric Deville, intitulé *Hydrogène naturel, la prochaine révolution énergétique ?*. Ainsi, dans ce cas particulier d'une production d'hydrogène à partir du sous-sol terrestre, l'hydrogène se présente en définitive comme une source énergétique, plutôt qu'un vecteur énergétique.

<sup>12</sup> Voir le numéro des Annales des Mines consacré à l'hydrogène, [https://annales.org/ri/2022/ri\\_novembre\\_2022.html](https://annales.org/ri/2022/ri_novembre_2022.html)

## Une transition énergétique et bas-carbone qui s'avère délicate

Si l'on excepte la possibilité de développer les technologies de type CCS (*Carbon capture and storage*, soit en français : *Captage et stockage du carbone*) ou CCUS (*Carbon capture, utilization and Storage*, soit en français : *Captage, utilisation et stockage du carbone*) qui ont d'ores et déjà donné lieu à l'implantation de quelques dizaines d'installations à travers le monde, la disparition à terme des énergies fossiles du mix énergétique, qu'elle soit programmée au regard des enjeux climatiques, ou imposée *in fine* par la géologie, nous conduit à un mix énergétique composé de technologies bas-carbone, dont le solaire photovoltaïque et thermique ; l'éolien ; l'hydroélectricité, la biomasse et le nucléaire.

La double stratégie de transition énergétique et de décarbonation de l'économie suppose bien sûr, comme souligné plus haut, de disposer d'une, ou plusieurs formes d'énergie externes présentant, d'une part, un EROI largement supérieur à l'unité, et d'autre part d'être disponible en quantité suffisante en entrée du système énergétique, de manière à dégager un bilan net en énergie<sup>13</sup> propre à assurer le fonctionnement de l'économie dans tous ses compartiments. Il faut de surcroît que ces énergies soient faiblement carbonées, ce qui laisse peu de candidats en lice pour réaliser ce double objectif.

Parmi ceux-ci on a vu que le photovoltaïque présente finalement peu de marge de manœuvre sur le plan énergétique. Par ailleurs son implémentation à l'échelle mondiale reste encore très dépendante des énergies fossiles. En conséquence, la suppression de ces dernières du paysage énergétique mondial dégraderait un peu plus les performances de ce système énergétique.

S'agissant de l'éolien, aucune étude similaire à celle menée par Pedro Prieto et Charles Hall n'a pu être repérée par l'auteur de ces lignes. Néanmoins, on peut relever au moins un point commun avec le photovoltaïque, à savoir la dépendance forte existant à ce jour vis-à-vis des fossiles. Pour ce qui concerne l'EROI, les meilleures évaluations (autour de 15 pour l'éolien terrestre) placent l'éolien à des niveaux similaires au photovoltaïque. Une étude approfondie, similaire à celle de Prieto et Hall pour le photovoltaïque, serait cependant nécessaire pour une évaluation plus fine des possibilités de l'éolien dans la perspective de la transition énergétique et bas-carbone.

Enfin, il reste bien sûr à considérer le potentiel du nucléaire dans cette même perspective de transition énergétique et bas-carbone. Le point de vue de l'auteur de ces lignes est qu'il ne faut surtout pas négliger la transition des technologies de réacteurs à neutron thermiques, largement dominantes au niveau mondial à ce jour, pour aller vers des technologies de réacteurs à

neutrons rapides. C'est à dire<sup>14</sup> passer d'une exploitation de l'<sup>235</sup>U, à celle de <sup>238</sup>U capable à la fois de centupler les perspectives énergétiques du nucléaire sur le long terme, mais aussi de diminuer drastiquement les émissions de GES.

## Bibliographie

- AGATOR J.-M., CHÉRON J., NGÔ C. & TRAP G. (2008), *Hydrogène - Énergie de demain ?*, Éd. Omniscience.
- BARDI U. (2015), « Le grand pillage – comment nous épuisons les ressources de la planète », nouveau rapport choc au Club de Rome, Éd. Les petits matins (pour la traduction française).
- BERNIER J. (2004), *La pompe à chaleur : déterminer, installer, entretenir*, Éd. PYC Livres.
- MEADOWS D. (2004), « Les limites à la croissance », Édition spéciale des 50 ans du rapport au Club de Rome, Réédition du rapport "The limits to growth, the 30-Year update", Éd. L'écopoché.
- MURPHY D.J., HALL C.A.S., DALE M. & CLEVELAND C. (2011), "Order from chaos: A preliminary protocol for determining the EROI of fuels", *Sustainability*, repéré à <https://www.mdpi.com/2071-1050/3/10/1888>
- PRIETO P.A. & HAL C.A.S. (2013), *Spain's photovoltaic revolution - The energy return on investment*, Springer, 144 pages.
- PRINZHOFFER A. & DEVILLE É. (2015), *Hydrogène naturel, la prochaine révolution énergétique ?* Éd. Belin.
- RAX J.-M. (2015), *Physique de la conversion d'énergie*, Éd. EDP Sciences.

<sup>13</sup> Ce bilan peut se résumer assez simplement par la relation :  $E_{\text{nette}} = E_{\text{investie}} \cdot (\text{EROI} - 1)$ . On voit ainsi que la quantité nette d'énergie,  $E_{\text{nette}}$ , est d'autant plus grande que la quantité d'énergie disponible pour le système,  $E_{\text{investie}}$ , est grande, et que la valeur de l'EROI, ici supposée supérieure à l'unité, est grande.

<sup>14</sup> Comme cela est détaillé dans l'article de J. W. Storm van Leeuwen et Didier Pillet du présent numéro.

# Batteries de véhicules électriques : quelles alternatives à la technologie lithium ion ?

Par Victoire de MARGERIE

Fondatrice et vice-présidente du World Material Forum

L'arrêt d'ici à 2035 de la production des véhicules à moteurs thermiques au profit principalement de véhicules électriques pose le défi des matières premières requises par ces derniers. La très forte croissance actuelle de leur production ne suffira pas pour répondre à la demande, le recyclage, bien qu'essentiel, pas plus, dans la mesure où il n'y aura pas assez de véhicules à recycler à moyen terme et où demeurent des pénuries prévisibles en cuivre et en nickel et des aléas géopolitiques pour le reste. L'acceptabilité de voitures à faible autonomie est limitée. Les innovations technologiques auront donc un rôle crucial à jouer : batteries au fer, au soufre ou au sodium, réduction des consommations de matériaux critiques dans d'autres activités... Si le progrès technique a dans le passé permis de résoudre nombre d'autres problèmes complexes, le rythme imposé de cette transition est ici sans précédent.

Le Parlement européen a approuvé le projet de réglementation mettant fin à la vente de véhicules neufs à moteur thermique en 2035. Il n'y a donc plus de doute sur le choix politique fait – même si certains soubresauts se manifestent en Allemagne –, et ce choix est populaire, même si tout le monde sait que ce ne sera pas facile. Oui, les voitures électriques sont plus lourdes et coûtent plus cher ; oui, les recharger est compliqué ; oui, la disparition des moteurs thermiques va créer des problèmes sociaux ; oui, nous sommes dépendants pour l'approvisionnement en certains matériaux critiques ; oui, les financements vont être complexes à trouver pour pouvoir faire en même temps les investissements supplémentaires nécessaires en exploration minière et en infrastructures de charge et de recyclage... Mais, aujourd'hui, le temps de la discussion est passé et nous allons faire cet effort, car « sinon nos enfants ne nous le pardonneraient pas », comme l'a dit le Commissaire européen, Frans Timmermans.

Tous les rapports publiés récemment (ceux de l'AIE, de la Bank of America...) prévoient donc, d'ici à 2040, des hausses à « double digit » de la demande de tous les matériaux dits « de la transition énergétique » (cuivre, nickel, lithium, cobalt...). Et ils estiment aussi que les investissements prévus par les groupes miniers sur cette période ne couvriront que la moitié de cet accroissement de la demande. Sans oublier qu'il s'écoule entre sept et dix ans entre la découverte d'un gisement et sa mise en production. L'espoir vient bien sûr du recyclage. Mais même si les technologies de recyclage sont prometteuses – comme celle développée par la *start-up* Momentum Technologies qui vient de lever 20 M\$ pour industrialiser son procédé MSX au Texas – on n'aura pas des quantités suffisantes de batteries à recycler

avant 2030... Et les prévisions de pénurie à partir de 2025 s'amoncellent, et ce d'autant plus que l'extraction de ces métaux est concentrée dans des pays dits « à risque géopolitique », comme la Chine, la Russie ou la République démocratique du Congo.

Donc, nous sommes loin d'être prêts... Mais il faut se rappeler que toutes ces projections s'appuient sur l'idée d'une fabrication des batteries électriques à partir de la technologie « Lithium Ion/Graphite », dite « classique », car c'est cette dernière que vont utiliser les « giga-usines » qui sont en train de se construire partout dans le monde, comme celle de Northvolt qui vient d'entrer en service en Suède ou celle de Verkor dont la construction sur le territoire de Dunkerque vient d'être annoncée en parallèle à la publication du rapport Varin et dont le démarrage est prévu en 2025. Cette technologie lithium ion est certes la plus performante (aujourd'hui) en termes d'autonomie et de temps de charge, mais c'est aussi celle qui requiert le plus de matières premières critiques (cuivre, nickel, lithium, etc.). Et pour l'instant, seulement 10 % des matières premières nécessaires à ces *gigafactories* seront « produites » en Europe en 2025...

Les annonces récentes d'Imerys et d'Eramet en ce qui concerne le lithium sont bienvenues. Mais on ne voit rien venir en matière de cuivre ou de nickel. Et depuis la recommandation du rapport Varin, en janvier 2022, on attend toujours l'annonce de la création d'un fonds européen pour investir dans l'exploration, l'extraction et le raffinage de ces métaux (chez nous, comme dans les pays « amis »). La Commission européenne vient d'annoncer son Critical Materials Act, qui est le bienvenu sur le plan de la simplification des autorisations administratives. Mais toujours rien en matière de finan-

cement des investissements miniers... Sans oublier que les fonds privés hésitent à investir dans l'extraction et le raffinage des métaux considérés, car ces activités ne sont toujours pas incluses dans la taxonomie des investissements durables. Aux États-Unis, le système de financement est, quant à lui, bien rodé avec l'introduction à la bourse de New York de nombreux nouveaux projets miniers soit aux États-Unis soit en *friendshoring*.

La seule vraie bonne nouvelle, c'est que les technologies pourront encore une fois nous aider : la variété des choix technologiques en matière de batteries électriques est en effet quasi infinie.

On pourrait ainsi rendre plus performantes certaines technologies de batteries existantes (par exemple, au fer) ou développer de nouvelles technologies (au soufre ou au sodium).

Dans ce cas, bien sûr, l'eau de mer, le soufre ou le minerai de fer sont plus accessibles et moins chers, mais encore faut-il démontrer que ces nouveaux types de batteries sont ou seront performants (en termes de sécurité, d'autonomie, de temps de charge ou de durée de vie). À quoi s'ajoute la question de savoir si l'on pourra les fabriquer sur les lignes de production des batteries lithium ion en cours d'installation (ou plutôt, l'on sait déjà que l'on pourra les fabriquer, mais avec une réserve forte tenant au niveau très élevé, selon les estimations, des dépenses d'investissement complémentaires nécessaires).

En tout cas, la course a commencé. La *start-up* française Tiamat et son homologue suédoise Altris sont à la manœuvre pour convertir la recherche fondamentale en batteries au sodium en concrétisation industrielle. Aux États-Unis, la *start-up* Mitrachem vient de lever 20 M \$ pour utiliser l'intelligence artificielle afin d'améliorer les batteries LFP (à base de fer). Et la *start-up* Zeta Energy vient de lever 23 M \$ pour financer la construction de son usine pilote de batteries au soufre au Texas.

Donc, il existe une belle variété de solutions technologiques qui peuvent être modulées en fonction des caractéristiques de chacune des grandes régions du monde afin d'offrir aux utilisateurs de batteries électriques la meilleure solution en termes de performance, de sécurité, de coût et d'empreinte environnementale.

On pourrait aussi jouer sur la notion de performance et investir massivement dans les infrastructures de charge (qui demandent du ciment et de l'acier, disponibles en abondance), quitte à sacrifier la performance des batteries en matière d'autonomie : toutes les batteries n'auraient pas besoin d'afficher 600 km d'autonomie, s'il y avait des stations de charge tous les 10 km – et encore moins si l'usage de ces batteries était limité aux déplacements en centre-ville. On pourrait ainsi se « contenter » de consacrer la plus grande autonomie qu'offrent les batteries au sodium à certains segments d'utilisateurs, et donc réduire l'importation de matériaux critiques. La difficulté réside alors dans l'acceptabilité pour les clients d'avoir à recharger très fréquemment leurs véhicules.

Enfin, l'on pourrait aussi aller plus vite dans le développement des chimies alternatives : Tiamat, si elle était

financée plus vite, pourrait industrialiser plus rapidement sa deuxième génération de batteries au sodium qui se présente comme plus performante... Du côté du soufre, ça avance plus vite..., mais au Texas : au travers de sa deuxième génération de batteries lithium au soufre, Zeta Energy, à Houston, promet ainsi pour 2024 la même efficacité volumétrique et gravimétrique que les batteries lithium ion, et ce en ayant résolu le problème des dendrites et en remplaçant le nickel et le cobalt par du soufre, amplement abondant aux États-Unis comme chez nous.

En fait, de la même façon que l'emballage alimentaire a besoin de tous les matériaux disponibles (verre, aluminium, acier et polymères) pour répondre aux besoins de nos citoyens, tout en investissant continuellement pour utiliser ces matériaux de la meilleure des façons et en moindre quantité (grâce à un recyclage de qualité comme le fait notre super *start-up* française Carbios avec le recyclage enzymatique des bouteilles en PET), l'industrie des batteries électriques doit combiner intelligemment toutes les technologies disponibles pour mieux et moins utiliser tous les matériaux de la transition électrique.

Avec une vraie différence : l'industrie alimentaire a eu trente ans pour s'adapter, alors que l'industrie des batteries doit le faire d'ici à 2035, c'est-à-dire en l'espace de seulement douze ans...



# Criticité et géopolitique des matières premières requises par les technologies bas-carbone

Par Emmanuel HACHE, Vincent D'HERBEMONT  
et Louis-Marie MALBEC  
IFP Énergies nouvelles

Depuis 2010 et la crise des terres rares, les pays consommateurs de ressources minérales, soucieux de la sécurisation de leurs approvisionnements pour subvenir à leurs besoins stratégiques, tentent d'établir des critères quantitatifs pour évaluer leur criticité. Néanmoins, ces indicateurs manquent souvent de vision à long terme et complète de la chaîne de valeur, de la mine au produit final, qui devient nécessaire face à l'incertitude naissante sur les marchés des matériaux. Cette forte incertitude découle d'une part de la recherche d'autonomie des pays consommateurs dans un contexte de forte hausse de la demande et d'offre contrainte, et d'autre part des stratégies envisagées par les pays producteurs visant à profiter de la manne financière de leurs ressources sans pour autant reprimariser leur économie. Dans ce contexte géopolitique incertain, l'ensemble des producteurs et consommateurs devraient profiter de la dynamique liée aux métaux pour structurer de manière globale les marchés, en intégrant les critères sociaux et environnementaux et en mettant en place une gouvernance mondiale des matériaux.

Indispensables au déploiement des équipements bas-carbone, les métaux utilisés dans les batteries de véhicules électriques, l'éolien, le solaire et l'hydrogène pourraient constituer de véritables freins à la double transition énergétique et digitale. Lors de la conférence de présentation du règlement européen sur les matériaux critiques le 16 mars 2023, Thierry Breton, Commissaire européen au marché intérieur a déclaré<sup>1</sup> : « Vous l'aurez bien compris : il n'y pas de Pacte Vert européen possible sans base manufacturière Clean Tech ni sans source d'approvisionnement sûre et durable en matériaux critiques [...] Pas de batteries sans lithium ; pas d'éoliennes sans terres rares ; et pour nos munitions, il nous faut du tungstène ». Il a ainsi mis en exergue le caractère stratégique des métaux et l'importance de sécuriser leur approvisionnement. Cet article examine les enjeux des métaux dans la transition écologique mondiale. L'évaluation par les États du caractère critique des matériaux sera analysée ainsi que les limites des différentes approches. Les bases relatives à la construction d'une nouvelle géopolitique des métaux dans un monde en voie de décarbonation seront ensuite discutées.

## Criticité, évaluation des besoins et dynamique de production

### Les matrices de criticité et leurs limites

La qualification du caractère critique<sup>2</sup> ou stratégique<sup>3</sup> des ressources minérales a connu de nombreuses évolutions depuis la fin de la Première Guerre mondiale et durant la guerre froide. Du décret sur les matériaux critiques et stratégiques de juin 1939 aux premiers travaux de la Commission Paley aux États-Unis en 1951 baptisé *Resources for Freedom*<sup>4</sup>, les questions relatives aux matières premières étaient centrées sur les seules préoccupations du secteur de la défense. Elles ont notamment conduit à la mise en place de stocks stratégiques de matières premières aux États-Unis, mais également en Europe. La fin de la guerre froide et la dynamique de mondialisation des années 1990 ont permis aux acteurs de progressivement délaisser

<sup>1</sup> Remarks by Executive Vice-President Dombrovskis and Commissioner Breton at the press conference on the Critical Raw Materials Act, the EU's long-term competitiveness strategy, and 30 years of the Single Market, Site de la Commission européenne (consulté le 6 avril 2023).

<sup>2</sup> Métal aux propriétés remarquables pouvant entraîner des impacts industriels ou économiques négatifs importants liés à un approvisionnement difficile, sujet à des aléas (Site internet Mineral Info : <https://www.mineralinfo.fr/fr/securite-des-approvisionnements-pour-leconomie/substances-critiques-strategiques#substance-rare-stratgique-ou-critique>).

<sup>3</sup> Métal indispensable à la politique économique d'un État, à sa défense, à sa politique énergétique ou à celle d'un acteur industriel spécifique, *Ibid*.

<sup>4</sup> Commission Paley (1952), <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015028172412;view=1up;seq=9>

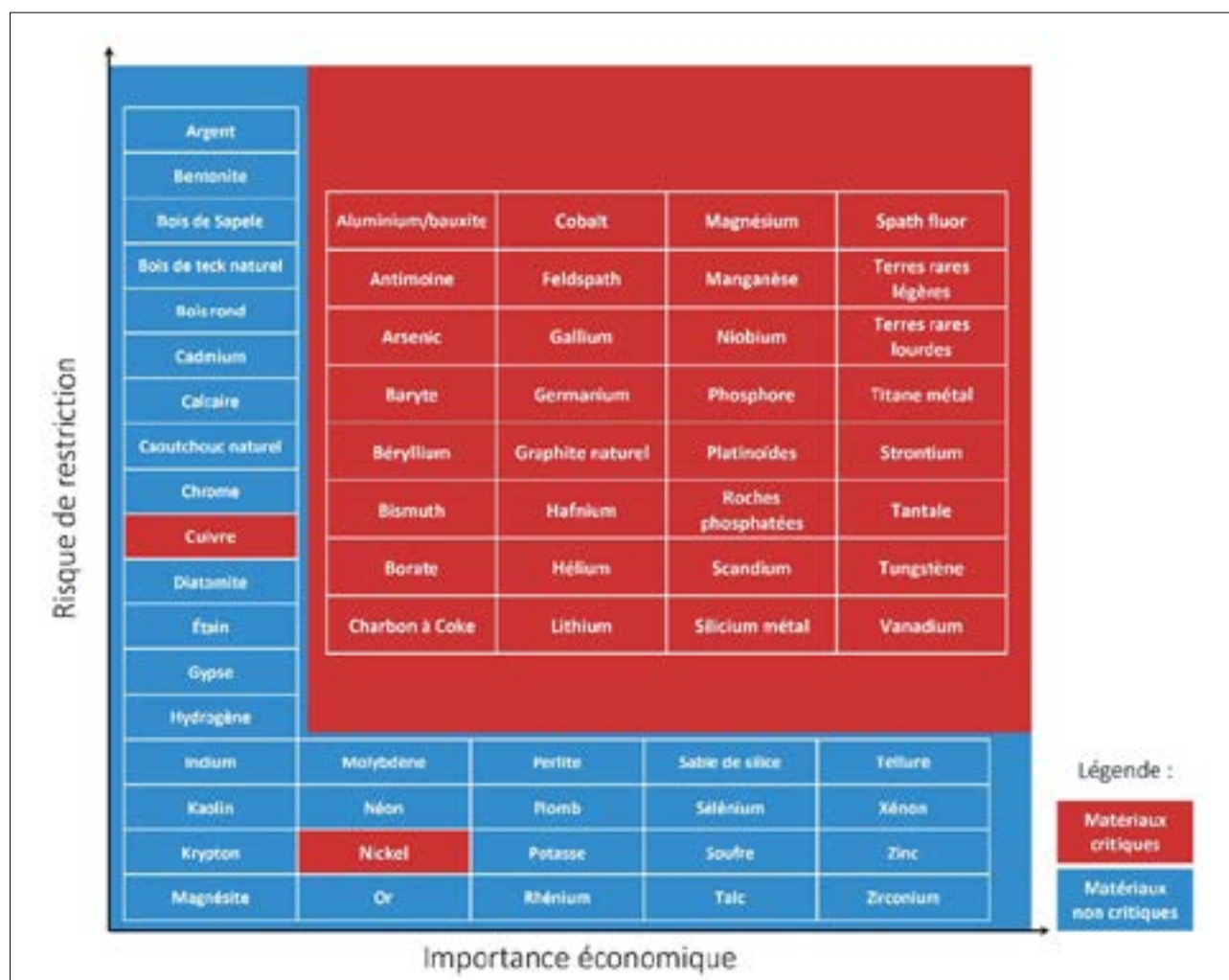


Figure 1 : Matrice simplifiée de la Commission européenne (Source : auteurs, inspiré de la Commission européenne, 2023).

les questions de sécurisation des approvisionnements pour se concentrer sur la recherche de matériaux au meilleur prix. Ce paradigme économique sera rompu suite à la crise des terres rares<sup>5</sup> en 2010, qui mettra en évidence la dépendance des pays occidentaux à la Chine sur les questions métalliques. Les analyses de criticité vont dès lors se généraliser en Europe, aux États-Unis et au Japon en développant des méthodologies d'évaluation reposant sur deux critères principaux<sup>6</sup> (importance économique du matériau et risque de restriction sur la production), eux-mêmes dépendant d'une multitude d'indicateurs sous-jacents. Positionnés sur une matrice à deux axes, les matériaux deviennent ainsi critiques s'ils dépassent un certain seuil. Près de 50 matériaux sont considérés comme critiques aux États-Unis dans la dernière matrice datant de 2022, 30 au Japon et désormais 34 en Europe.

Le concept de criticité dépend ainsi de la zone géographique et de l'entité étudiée (un pays, une filière, etc.) et

va évoluer en fonction des développements technologiques ou géopolitiques (Hache *et al.*, 2019). Il n'existe donc pas d'approche universelle et comme l'écrivent Eggert *et al.* « La criticité est dans les yeux de celui qui la regarde » (Eggert, 2011).

Le dernier règlement européen sur les matières premières (Critical Raw Material Act), publié en mars 2023, marque une évolution méthodologique notable. En parallèle d'une liste de matériaux critiques, une seconde liste de matériaux dits « stratégiques » a été réalisée. Même si ces matériaux n'ont pas passé le seuil nécessaire pour être considérés comme critiques, ils sont désormais ajoutés à la liste européenne en raison de leur importance dans des domaines sensibles (aérospatiale, défense) ou liés à la transition écologique et numérique. Ainsi, le cuivre et le nickel sont apparus dans la liste européenne en 2023, allant dans le sens d'un constat partagé par de nombreuses études prospectives étudiant la criticité des matériaux à long terme (Seck *et al.*, 2020 ; IEA, 2021 ; Vidal *et al.*, 2013).

Ce renouvellement méthodologique ne permet toutefois pas de combler la principale lacune des matrices de criticité : leur absence de profondeur prospective et la nécessité d'appréhender à long terme la demande en matériaux.

<sup>5</sup> Les éléments de terres rares désignent un ensemble de 17 éléments chimiques (Scandium, Yttrium, Lanthane, Cérium, Praséodyme, Néodyme, Prométhium, Samarium, Europium, Gadolinium, Terbium, Dysprosium, Holmium, Erbium, Thulium, Ytterbium et Lutécium).

<sup>6</sup> Les matrices peuvent être complétées par une dimension sur les impacts environnementaux (Graedel *et al.*, 2012).

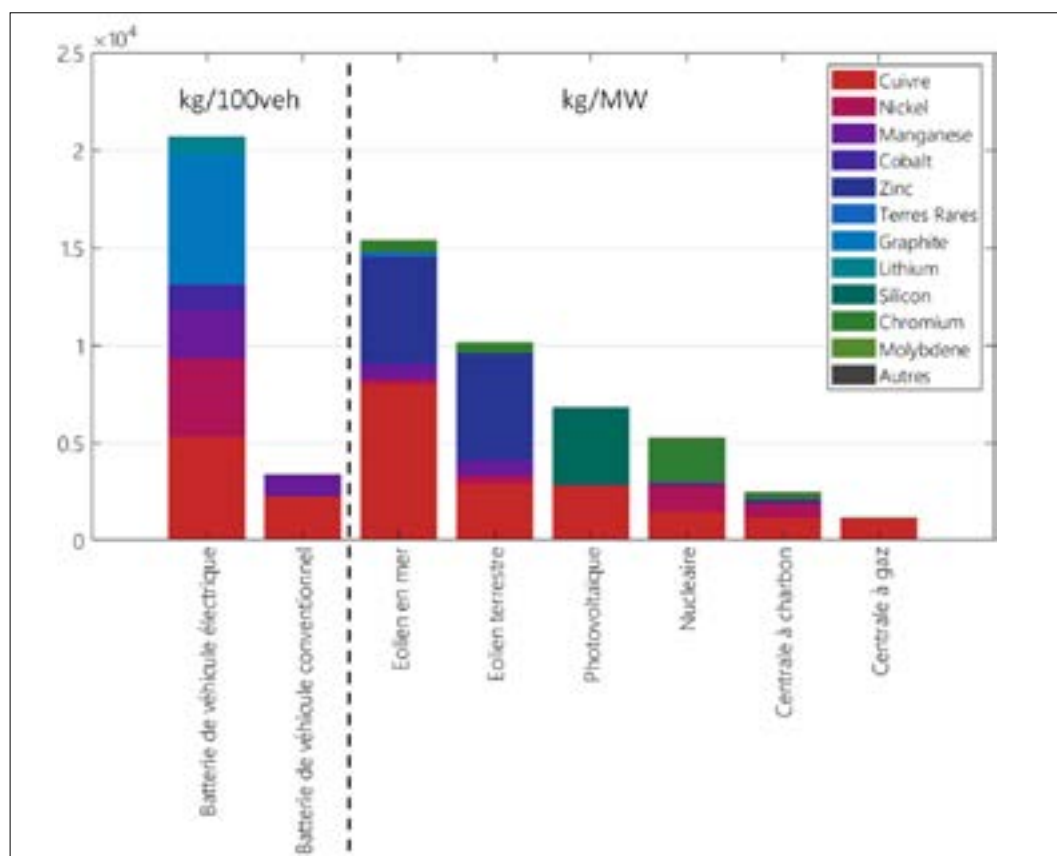


Figure 2 : Contenu en matériaux des technologies (Source : AIE).

### La nécessaire prise en compte des contraintes futures de marché

Depuis le milieu de la décennie 2010, plusieurs rapports internationaux ont clairement identifié le caractère métallique de la transition écologique, et mettent très souvent en évidence l'importance des métaux entrant dans la composition des batteries lithium-ion (Nickel, Lithium, Cobalt), ainsi que du cuivre. (IEA, 2023 ; BloombergNEF, 2023 ; Seck *et al.*, 2020). En 2020, la Banque mondiale<sup>7</sup> chiffrait l'impact de la transition écologique sur les métaux – une multiplication par six de la demande de cobalt, de graphite et de lithium à l'horizon 2050. En 2021, l'Agence internationale de l'énergie (AIE) estimait pour sa part que la demande pour les seuls besoins d'électrification des transports pourrait être multipliée par 42 pour le lithium, 20 pour le nickel et le cobalt, et 3 pour le cuivre d'ici 2040 (IEA, 2021). L'intensité matériaux des technologies bas-carbone comparée aux technologies existantes est un facteur explicatif majeur de l'explosion prévisible de la demande (voir la Figure 2).

Ces estimations sont toutefois réalisées dans un contexte d'incertitudes marquées quant à l'évolution des nouvelles chimies de batteries, à de possibles ruptures technologiques ou comportementales et à l'importance des politiques publiques permettant

d'atténuer la pression sur la demande (recyclage, mobilité soutenable, etc.). À ces interrogations s'ajoutent celles relatives à la chaîne de valeur de production des métaux : le temps d'ouverture d'une mine (environ 10 ans), l'acceptabilité des projets, les impacts environnementaux et les besoins de financement sont autant de problématiques à intégrer pour la future production de métaux. Enfin, il paraît nécessaire d'appréhender non pas la seule activité extractive mais de réfléchir à la résilience globale de la chaîne de valeur des métaux en analysant les questions relatives aux activités de raffinage et, *in fine*, à la conception et à la production d'équipements bas-carbone (Bonnet *et al.*, 2018)

### Les conséquences géopolitiques

Les politiques de sécurisation des besoins des pays consommateurs et les stratégies de pays producteurs risquent d'impacter de manière durable l'ordre international et la géopolitique des énergies.

### À la recherche d'une autonomie stratégique

Différentes options s'offrent aux pays consommateurs pour limiter la dépendance extérieure (production nationale, recyclage, etc.) bien qu'aucun pays n'envisage une autarcie complète sur ce sujet. Le règlement européen a par exemple défini différents objectifs à l'horizon 2030 : répondre à 10 % de la demande intérieure pour le secteur extractif européen, à 40 % pour le secteur de la transformation et du raffinage et à au moins 15 % pour

<sup>7</sup> Site internet de la Banque mondiale : <https://www.banquemondiale.org/fr/news/press-release/2020/05/11/mineral-production-to-soar-as-demand-for-clean-energy-increases> (consulté le 4 avril 2023).

le recyclage. En outre, il envisage que l'UE ne puisse être dépendante, pour chacun des matériaux critiques, à plus de 65 % d'un seul pays extérieur à la zone. Cela implique de mettre en place rapidement une politique de diversification des fournisseurs. L'UE apparaît toutefois en retard par rapport à ses concurrents américains et chinois. En qualifiant la question des métaux critiques de priorité nationale et de menaces extraordinaires pour l'économie, Donald Trump a impulsé un nouvel élan à la politique minière et métallurgique américaine dès 2017, repris et prolongé par Joe Biden avec le développement de partenariats internationaux, soit dans un cadre bilatéral avec certains grands pays miniers (Australie, Canada), soit de manière multilatérale avec certains pays de l'OCDE ou asiatiques (voir le Tableau 1). Les États-Unis disposent également d'atouts indéniables : un sous-sol riche en minerais et un droit minier attractif, des champions internationaux dans le secteur métallurgique et un cadre économique et législatif favorable à ce secteur. L'Inflation Reduction Act voté en 2022 contient des clauses relatives à la production de batteries sur le sol américain qui pourraient permettre la localisation (ou relocalisation) d'activités métallurgiques sur le territoire américain mais qui est également annonciateur d'une possible fermeture commerciale internationale. Il constitue une réponse forte à la stratégie chinoise, dont la politique de sécurisation en minerais et métaux critiques est un invariant depuis près de 20 ans (Bonnet *et al.*, 2022 ; Hache, 2019).

Avec un sous-sol extrêmement riche et une politique dynamique d'investissements dans le secteur du raffinage et de la transformation, la Chine est devenue le

premier producteur mondial de métaux. Cependant l'importance de ses besoins l'ont également obligée à développer une diplomatie minérale dynamique depuis le début des années 2000 avec des investissements de plus de 200 milliards de dollars dans les zones riches en minerais et métaux. Cette stratégie offensive a été renforcée par le lancement du projet des nouvelles routes de la soie dès 2013 (accords de coopération avec près de 140 pays), en développant des accords économiques, militaires, culturels ou financiers pour inclure certains pays miniers dans sa sphère d'influence. Sur certains terrains à haut potentiel minier, les rivalités sino-américaines pourraient être exacerbées et, de manière plus globale, une rivalité de bloc entre une sphère d'influence occidentale et une sphère d'influence chinoise pourrait se former. Le développement par les principaux pays occidentaux de standards environnementaux approfondis dans le secteur minier pourrait également constituer une réponse à la domination chinoise dans le secteur minier international, en proposant un modèle alternatif plus durable pour les principaux pays producteurs.

**Cartellisation ou coopérations internationales**

Les pays riches en matières premières d'Amérique latine (Argentine, Brésil, Bolivie, Chili, etc.), d'Afrique (Afrique du sud, République démocratique du Congo, Zambie, etc.) ou d'Asie (Indonésie, Philippines, etc.) sont de potentiels gagnants de la transition écologique mondiale. Certains d'entre eux souhaitent profiter de la dynamique observée sur les marchés de métaux pour

Initiatives	Pays concernés	Type d'accords
Alliance européenne des batteries (2017)	UE	Créer une chaîne de valeur compétitive en Europe sur la production de cellules de batterie
Initiative de cartographie des minéraux critiques (2019)	Australie, Canada, États-Unis	Collaboration de recherche sur les ressources minérales
Energy Resource Governance Initiative (2019)	Australie, Botswana, Canada, États-Unis, Pérou	Améliorer les pratiques de développement minier
Alliances européennes des matières premières (2020)	UE	Sécuriser l'accès aux matières premières durables et au savoir-faire en matière de transformation industrielle
Initiative sur les chaînes de valeur résilientes (2021)	Australie, Inde, Japon	Promouvoir les investissements et réduire la dépendance aux exportations de ressources naturelles de la Chine
Partenariat pour la sécurité des ressources minérales (2022)	Allemagne, Australie, Canada, Corée, États-Unis, Finlande, France, Japon, Royaume-Uni, Suède et UE	Valoriser la production, le traitement et le recyclage des ressources naturelles
Cadre économique indopacifique pour la prospérité (2022)	Australie, Brunéi Darussalam, Corée du Sud, États-Unis, Inde, Indonésie, Japon, Malaisie, Nouvelle-Zélande, Philippines, Singapour, Thaïlande et Vietnam	Décarbonation et infrastructures ; fiscalité et lutte contre la corruption ; numérique ; et résilience des chaînes d'approvisionnement

Tableau 1 : Initiatives régionales ou internationales sur les métaux.



les structurer à l'image de l'OPEP. De nombreuses voix s'élèvent en Amérique latine pour la formation d'un cartel entre les pays du triangle du lithium (Argentine, Bolivie, Chili). Néanmoins, leurs politiques de production très hétérogènes et l'absence du premier producteur mondial australien (plus de 50 % de la production mondiale) ou de la Chine (plus de 60 % du raffinage mondial) ne permettent pas d'envisager véritablement cette cartellisation. La volonté indonésienne de former un cartel des métaux des batteries reste sujette aux mêmes interrogations (Hache, 2023 ; Hache *et al.*, 2022). Ces initiatives constituent un message clair du pouvoir de marché des pays producteurs miniers dans la dynamique de transition, mais également leur volonté de ne pas tomber dans une nouvelle forme de malédiction des ressources en raison de la volatilité structurelle des prix des métaux. La crainte d'une « re-primarisation » de leurs économies les incite notamment à négocier l'implantation des unités de transformation et de raffinage des métaux sur leur territoire en échange des concessions minières pour les acteurs étrangers, afin de bénéficier des retombées financières de leur sous-sol pour opérer un véritable développement industriel. Ce contexte doit inviter tous les acteurs (pays consommateurs et producteurs) à profiter de la dynamique liée aux métaux pour structurer de manière globale les marchés.

## Conclusion

Les marchés de métaux nécessaires à la transition écologique et digitale devraient devenir des éléments structurants de la dynamique de décarbonation mondiale. La hausse de la demande et les contraintes possibles sur la production laissent augurer une forte incertitude sur les marchés. Celles-ci sont renforcées par la concurrence opérée par les principaux pays consommateurs pour sécuriser leurs approvisionnements et par la volonté des pays producteurs de bénéficier des retombées financières de l'exploitation de leurs sous-sols, dans un contexte de rivalités systémiques sino-américaines et d'un possible retour à une forme de blocs de puissance. La compétition exacerbée pour l'accès aux métaux et le nouveau nationalisme des ressources plaide pour la promotion d'une action minière responsable et la mise en place d'un mécanisme de gouvernance mondiale pour les minéraux critiques, afin qu'ils deviennent des vecteurs de rapprochement dans le cadre de la décarbonation mondiale. La création d'une organisation internationale des métaux et des minerais associerait les préoccupations des pays consommateurs et des pays producteurs, en visant la sécurisation des approvisionnements, la stabilité des prix et la transparence des marchés, les transferts de technologies et l'intégration de hauts standards environnementaux pour assurer de concert la réussite de la transition écologique mondiale et un véritable décollage économique et industriel des producteurs miniers.

Malgré ces incertitudes, une chose paraît toutefois évidente : la diplomatie des métaux constituera un socle structurant des relations internationales dans les années à venir.

## Bibliographie

- BLOOMBERGNEF (2023), "Transition metals outlook 2023" [Video], <https://www.bloomberg.com/news/videos/2023-02-22/transition-metals-outlook-2023>
- BONNET T., GREKOU C., HACHE E. & MIGNON V. (2022), « Métaux stratégiques : la clairvoyance chinoise », *Lettre du CEPII*, juin.
- BONNET C., CARCANAGUE S., HACHE E., SECK G.S. & SIMOËN M. (2018), "The nexus between climate negotiations and low-carbon innovation: a geopolitics of renewable energy patents", *EconomiX Working Papers 2018-45*, University of Paris Nanterre, EconomiX.
- EGGERT R. (2011), "Minerals go critical", *Nature chemistry*, 3(9), pp. 688-691.
- EUROPEAN COMMISSION (2023), "Study on the critical raw materials for the EU", Report from the Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, 160 pages.
- GRAEDEL T., BARR R., CHANDLER C., CHASE T., CHOI J., CHRISTOFFERSEN L. & ZHU C. (2012), "Methodology of metal criticality determination", *Environmental Science & Technology*, 46(2), pp. 1063-1070.
- HACHE E. (2019), « La Chine, nouveau laboratoire écologique mondial ? », *Revue internationale et stratégique*, n°113, pp. 133-143.
- HACHE E., CARCANAGUE S., BONNET C., SECK G.S. & SIMOËN M. (2019), « Vers une géopolitique de l'énergie plus complexe ? », *Revue internationale et stratégique*, n°1, pp. 71-81.
- HACHE E., SECK G.S., SIMOËN M., BONNET C. & CARCANAGUE S. (2019), "Critical raw materials and transportation sector electrification: A detailed bottom-up analysis in world transport", *Applied Energy*, n°240, pp. 6-25.
- HACHE E. (2023), « Transition bas-carbone : vers une nouvelle géopolitique des matières premières », *L'économie politique*, n°97, pp. 59-70.
- HACHE E., BUCCIARELLI P. & MIGNON V. (2022), « Métaux stratégiques : et si les pays producteurs se regroupaient en cartel de type OPEP », *The Conversation*, revue en ligne, <https://theconversation.com/metaux-strategiques-et-si-les-pays-producteurs-se-regroupaient-en-cartel-du-type-opep-194749>
- IEA (2023), "Energy Technology Perspectives 2023", IEA report, 464 pages.
- IEA (2021), "The role of critical minerals in clean energy transitions", OECD Publishing, World energy outlook special report, 287 pages.
- SECK G.S., HACHE E., BONNET C., SIMOËN M. & CARCANAGUE S. (2020), "Copper at the crossroads: Assessment of the interactions between low-carbon energy transition and supply limitations", *Resources, Conservation and Recycling*, 163, p. 105072.
- SECK G.S., HACHE E. & BARNET C. (2022), "Potential bottleneck in the energy transition: The case of cobalt in an accelerating electro-mobility world", *Resources Policy*, 75, 102516.
- VIDAL O., GOFFÉ B. & ARNDT N. (2013), "Metals for a low-carbon society", *Nature Geoscience*, 6(11), pp. 894-896.

# EROI minimum et croissance économique

Par Victor COURT

Ingénieur et économiste, Centre Économie et Management de l'énergie, IFP Énergies nouvelles

Et Florian FIZAINÉ

Économiste, Institut de recherche en gestion et économie, Université Savoie Mont-Blanc

Les notions d'énergie nette et d'EROI ont progressivement gagné en popularité depuis leur émergence dans les années 1970. Particulièrement utiles pour caractériser, respectivement, l'état d'abondance et la difficulté à extraire l'énergie de l'environnement, leur mesure s'avère néanmoins difficile. Depuis quelques années, dans un contexte de raréfaction des hydrocarbures et de basculement vers les énergies décarbonées, plusieurs études ont essayé d'estimer l'impact d'une baisse de l'EROI sur le fonctionnement d'une société industrielle. Une autre façon d'approcher ce sujet revient à se demander s'il est possible d'estimer la valeur minimale d'EROI requise pour soutenir la croissance économique. En raison de certaines faiblesses méthodologiques, les résultats de ce champ de recherche restent hétérogènes et difficiles à interpréter, d'autant qu'ils s'inscrivent dans un contexte de requalification de l'objectif à atteindre (croissance économique ou qualité de vie), auquel la science ne pourra pas répondre seule.

**D**e prime abord, les concepts d'énergie nette et de taux de retour énergétique (TRE, ou Energy Return on Investment (EROI)) paraissent simples et utiles pour mieux comprendre ce qui se joue dans un projet de transition bas-carbone. Plusieurs questions importantes ont émergé il y a quelques années autour de ces notions : quel est le lien entre EROI et prospérité économique ? Faut-il nécessairement un système énergétique avec un EROI élevé pour observer une croissance économique élevée ? Peut-on définir une valeur d'EROI en-dessous de laquelle la croissance économique est impossible ?

Dans cet article, nous nous proposons de faire le point sur les connaissances existantes vis-à-vis de ces interrogations. Après avoir rappelé les concepts d'énergie nette et d'EROI, nous détaillerons les raisons pour lesquelles l'utilisation de ces notions, simples et intuitives en apparence, est difficile en pratique. Nous reviendrons ensuite sur les résultats les plus importants en ce qui concerne le minimum d'EROI requis pour observer une croissance de l'activité dans une économie moderne. Enfin, nous discuterons des notions de croissance, de prospérité et de leurs liens avec l'EROI et la sobriété.

## Un système énergétique est toujours cannibale

Odum (1973) a probablement été le premier à remarquer que la variable déterminante pour un système thermodynamique quelconque (un être vivant, un écosystème, une société humaine, etc.) est la quantité d'énergie qui est disponible une fois que les besoins énergétiques propres à son système d'extraction

d'énergie ont été satisfaits. Dans le cadre macroéconomique qui nous intéresse ici, l'énergie nette est donc la quantité d'énergie qui atteint l'économie une fois que les besoins propres au système énergétique ont été satisfaits. On a donc :

$$\text{énergie nette} = \text{énergie produite} - \text{énergie investie pour produire l'énergie} \quad (1)$$

L'énergie nette est donc l'énergie disponible pour faire autre chose qu'extraire de l'énergie de l'environnement, c'est-à-dire soutenir les activités économiques qui définissent un mode de vie donné. L'EROI, mis au point par Hall (1972), est un concept dérivé qui correspond non pas à la soustraction, mais au rapport entre la quantité d'énergie fournie par un processus donné et la quantité d'énergie consommée par ce même processus :

$$\text{EROI} = \frac{\text{énergie produite}}{\text{énergie investie pour produire l'énergie}} \quad (2)$$

Cet indicateur mesure donc l'accessibilité d'une ressource énergétique : plus l'EROI d'un système énergétique est élevé, et plus la quantité d'énergie nette délivrée est importante pour chaque unité d'énergie préalablement investie (Hall *et al.*, 2014). Un point important est de comprendre que l'EROI évolue au cours du temps sous l'effet de deux facteurs antagonistes : d'un côté, l'appauvrissement de la qualité des ressources (car après avoir exploité les meilleurs gisements de pétrole ou de vent, il faut se contenter des moins bons), qui tend à diminuer l'EROI ; et, de l'autre, le changement technique (par effet d'apprentissage, de rendements d'échelle et par R&D) qui lui, au contraire, tend à augmenter l'EROI (Court et Fizaine, 2017).

## Le diable est dans les détails

Depuis plusieurs années, les études se succèdent pour estimer l'EROI des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz), des renouvelables modernes (hydroélectricité, éolien, solaire) ou encore du nucléaire. Le but est de pouvoir comparer les systèmes énergétiques du point de vue de leur capacité à fournir de l'énergie nette à la société, et ainsi comprendre ce qu'une transition vers un système bas-carbone implique en termes d'EROI agrégé (ou « sociétal »). Plusieurs chercheurs, tels que Brandt *et al.* (2013) ou King (2014), ont souligné que le sigle EROI est plutôt vague et qu'il serait préférable de parler d'*energy return ratio* (ERR, ou « ratio de retour énergétique »), en faisant *a minima* la distinction entre un *gross energy return ratio* (GERR), c'est-à-dire la production d'énergie brute divisée par l'énergie consommée pour assurer ladite production, et un *net energy return ratio* (NERR), c'est-à-dire l'énergie nette (donc l'énergie brute moins l'énergie investie) qui va à la consommation finale divisée par l'énergie consommée pour assurer la production de l'énergie brute<sup>1</sup>.

Mais d'autres problèmes méthodologiques se posent lors du calcul de l'EROI de systèmes énergétiques différents, notamment la cohérence de leurs limites physiques (Brandt et Dale, 2011 ; Brandt *et al.*, 2013 ; Modahl *et al.*, 2013 ; Zhang *et al.*, 2013 ; King *et al.*, 2015 ; Murphy *et al.*, 2016, 2022). Pour des raisons de disponibilité des données, les estimations se sont longtemps focalisées sur l'EROI du pétrole et du gaz, qui sont des énergies primaires. En revanche, en ce qui concerne les énergies bas-carbone (nucléaire et renouvelables), on se place au niveau de l'électricité produite par les infrastructures correspondantes, et on parle alors d'énergie finale<sup>2</sup>. Des comparaisons ont été faites entre les EROIs de ces différents types d'énergies, mais elles sont hasardeuses. En pratique, on devrait toujours se retrancher à comparer des EROIs de systèmes énergétiques qui fournissent des vecteurs éner-

gétiques équivalents. Ainsi, il est légitime de comparer l'EROI de l'électricité produite à partir de gaz (ou d'un autre combustible fossile) avec celui de l'électricité produite à partir d'une éolienne (ou d'une autre infrastructure bas-carbone : barrage, panneaux photovoltaïques, centrale solaire à concentration ou nucléaire). Et de la même manière, cela a du sens de comparer entre eux des EROIs de différents carburants liquides provenant, par exemple, du pétrole ou de la biomasse. En revanche, cela n'a pas de sens de comparer l'EROI du charbon avec celui de l'électricité d'origine solaire, car on voit bien que, dans ce cas, on mélange des pommes et des oranges (Raugei, 2019).

Ces problèmes prennent toute leur ampleur lorsque l'on souhaite parler de l'évolution temporelle de l'EROI de l'ensemble du système énergétique. En effet, la transition bas-carbone implique un changement des vecteurs énergétiques utilisés, notamment par une électrification des usages. Dès lors, il est difficile de comparer l'EROI moyen d'un système énergétique majoritairement fossile, c'est-à-dire reposant sur des combustibles solides, gazeux et liquides, avec celui d'un système bas-carbone reposant sur bien plus d'électricité, d'hydrogène et de biomasse (solide avec le bois, liquide avec les agrocarburants ou gazeuse avec le biogaz).

## Diminution de l'EROI et falaise d'énergie nette

En conservant en tête les avertissements qui précèdent, on peut tout de même se pencher sur la question de l'interaction entre l'EROI agrégé d'une société et son niveau de prospérité économique. En particulier, on peut imaginer qu'il existe une valeur minimale d'EROI en-dessous de laquelle une société moderne ne pourrait plus croître, ni même, peut-être, assurer ses fonctions essentielles, car le système énergétique « cannibaliserait » une trop grande part de l'énergie produite, rendant ainsi l'énergie nette (celle restant disponible pour la société) plus rare et donc plus chère, ce qui gripperait la machine économique (Murphy et Hall, 2010).

Pour comprendre ce point, il est crucial de voir que la relation entre l'EROI et l'activité économique est fortement non linéaire, tout simplement parce que le lien entre l'EROI et la disponibilité de l'énergie nette est lui aussi fortement non linéaire :

$$\text{énergie nette} = 1 - \frac{1}{\text{EROI}} \quad (3)$$

Comme le montre la Figure 1 page suivante, si l'EROI d'une société passe de 50 à 35, la part de l'énergie produite que la société consacre au secteur énergétique sous forme d'investissements directs et indirects passe de 2 à 2,86 % ; en d'autres termes, l'énergie nette passe de 98 à 97,1 % de la production d'énergie brute. Ce changement est important, mais il est probablement gérable par n'importe quelle société. En revanche, si l'EROI passe de 20 à 5, alors l'énergie cannibalisée par le secteur énergétique passe de 5 à 20 % de la production d'énergie brute. Si l'EROI connaît une nouvelle

<sup>1</sup> Par ailleurs, King *et al.* (2015) ont montré qu'une autre distinction cruciale devait être faite entre l'« ERR instantané » d'un système énergétique, c'est-à-dire la production annuelle d'énergie divisée par l'énergie annuelle investie, et l'« ERR complet » portant sur l'ensemble du cycle de vie d'un système énergétique, c'est-à-dire la production cumulée d'énergie divisée par l'ensemble de l'énergie investie sur toute la durée de vie du système. Dans ce cadre, pour un système énergétique donné, l'« ERR complet » représente la moyenne sur l'ensemble du cycle de vie des « ERRs instantanés » qui peuvent varier chaque année.

<sup>2</sup> L'énergie primaire est présente naturellement dans l'environnement sous forme de stocks (charbon, pétrole, gaz, uranium) ou de flux (soleil, cours d'eau, vagues, marées, vent, géothermie). Ces ressources primaires ne sont pas utilisables en tant que telles. Elles doivent être extraites de l'environnement et converties en des formes énergétiques secondaires, aussi appelées « finales ». L'énergie secondaire ou finale correspond aux produits solides, liquides et gazeux qui proviennent du traitement du charbon, du pétrole brut et du gaz naturel, ou des flux thermiques et électriques eux-mêmes issus de la combustion d'énergies fossiles ou des énergies renouvelables (cours d'eau, vagues, marées, vent, géothermie). Ensuite, une multitude de machines et d'appareils – allant du moteur d'une voiture à l'ampoule d'une lampe, en passant par tous les appareils mécaniques, électriques et électroniques que nous utilisons – convertissent cette énergie finale en énergie utile, sous forme de mouvement, de chaleur, de lumière ou de transformations chimiques (Court, 2022, pp. 138-139).

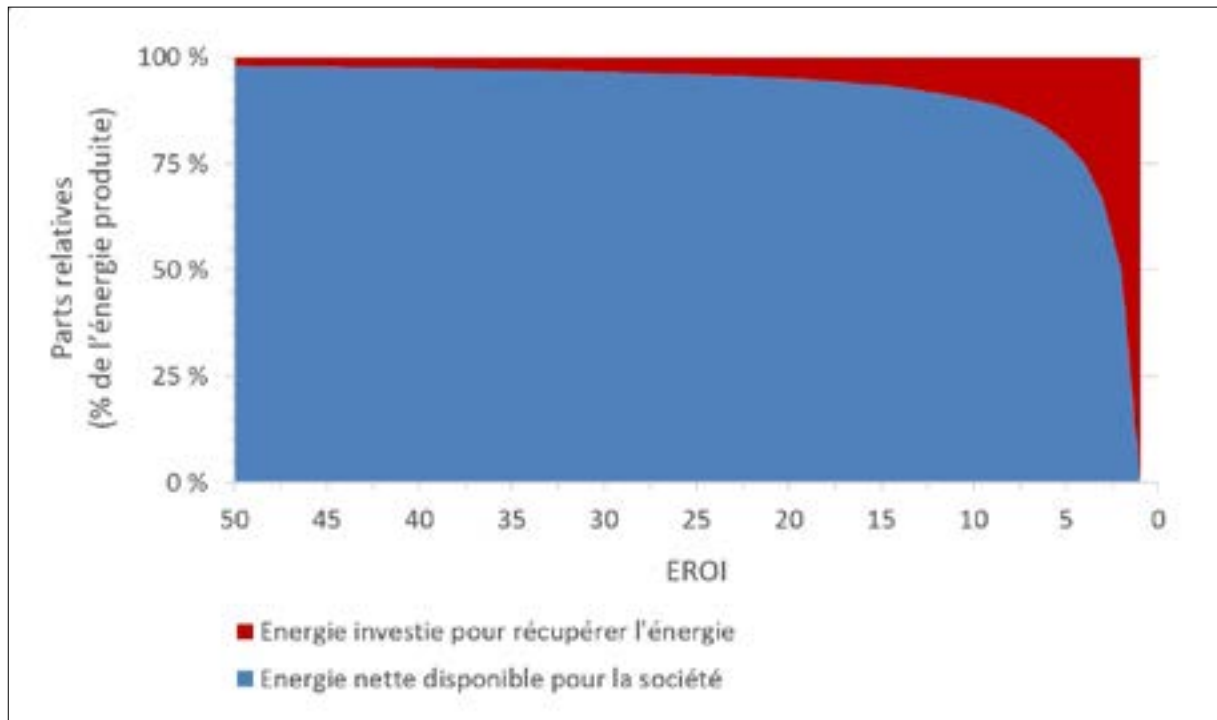


Figure 1 : EROI et falaise d'énergie nette – Source : adapté de Brockway *et al.*, 2019.

baisse en dessous de 5, la quantité d'énergie détournée vers le secteur énergétique augmente de façon exponentielle et, progressivement, il ne reste plus d'énergie nette disponible pour faire autre chose qu'extraire de l'énergie. Bien sûr, dans ce contexte, une parade pour maintenir le flux d'énergie nette consiste à augmenter la taille du système énergétique, mais cela ne constitue qu'une coûteuse fuite en avant.

### Quel est l'EROI minimal requis pour une société moderne ?

À notre connaissance, seules quatre études ont essayé d'estimer la valeur d'EROI minimale requise pour assurer la croissance d'une société. Hall *et al.* (2009) ont été les premiers à proposer un EROI technique minimal de 3 pour l'énergie primaire (plus exactement pour le pétrole à la sortie du puits). Ces mêmes auteurs ont avancé, mais sans s'appuyer sur des calculs explicites, qu'une valeur un peu plus élevée, de l'ordre de 5, devait être nécessaire pour soutenir les sociétés contemporaines. Et ils ont estimé qu'un EROI minimal d'environ 12 à 14, toujours en termes d'énergie primaire, était probablement nécessaire pour qu'une société capitaliste moderne puisse avoir un taux de croissance économique positif. Weißbach *et al.* (2013) estiment, quant à eux, qu'un EROI minimal de 7 est requis pour les pays de l'OCDE. Mais, là aussi, cette estimation est faite au doigt mouillé. La première étude quantitative réalisée dans ce domaine est celle de Lambert *et al.* (2014), mais son objectif est particulier : au lieu de chercher la valeur minimale d'EROI nécessaire pour qu'une croissance économique reste positive, son but est plutôt de réaliser des corrélations assez simples (bien que non linéaires) entre l'EROI et l'indice de développement

humain (IDH) de différents pays<sup>3</sup>. Le principal résultat de cette étude est qu'un EROI sociétal d'environ 15 semble nécessaire (au stade de l'énergie primaire) pour qu'un pays présente un IDH de 0,7 (seuil permettant de bénéficier d'une « qualité de vie convenable »). Enfin, en se basant sur diverses données (quantité et prix des différentes énergies consommées, produit intérieur brut) concernant les États-Unis, nous avons nous-mêmes estimé qu'entre 1950 et 2012, l'économie américaine avait eu besoin d'un approvisionnement en énergie primaire caractérisé par un EROI d'au moins 11 pour bénéficier d'un taux de croissance positif (Fizaine et Court, 2016).

Tous les résultats du paragraphe précédent concernent l'énergie primaire. Mais quand est-il lorsque l'on déplace la réflexion au niveau de l'approvisionnement en énergie finale ? Malheureusement, il n'existe aucune étude ayant estimé l'EROI minimal requis en termes d'énergie finale pour assurer la croissance d'une société. Cependant, plusieurs ont estimé l'évolution de cet indicateur pour quelques pays, ou au niveau global, ce qui a permis d'en déduire indirectement ce que serait la valeur d'EROI minimale requise de l'énergie finale d'une économie moderne. Par exemple, Brand-Correa

<sup>3</sup> L'IDH a été créé pour évaluer le bien-être dans un pays en ne se référant pas uniquement à un indicateur économique, comme le produit intérieur brut ou le revenu national brut. Cet indicateur est une moyenne géométrique de trois composantes normalisées se référant respectivement à l'espérance de vie, à l'éducation et au niveau de vie économique. C'est un indice de classement des pays non pas absolu mais relatif : pour chacune des trois dimensions précitées, la note 1 est attribuée au pays qui occupe la première place, et une note se situant entre 0 et moins de 1 est donnée aux autres pays (par application d'une formule simple) ; on réalise ensuite la moyenne (géométrique) des notes des trois dimensions pour obtenir une note agrégée (UNDP, 2022).



*et al.* (2017) ont constaté que l'EROI de l'énergie finale au Royaume-Uni est passé de 12,7 en 1997 à une valeur maximale de 13,8 en 2000, avant de retomber progressivement à 5,6 en 2012. De même, Feng *et al.* (2018) ont estimé que l'EROI de la production d'énergie finale en Chine a diminué de 11 à 5,3 entre 1987 et 2012. Similairement, Brockway *et al.* (2019) ont estimé que l'EROI mondial des combustibles fossiles au stade final était passé de 6 à 5,4 entre 1995 et 2011. Tous ces résultats suggèrent que l'EROI minimal nécessaire pour l'approvisionnement en énergie finale des sociétés contemporaines se situe en dessous de 5, sans que personne puisse vraiment dire à quel niveau exact <sup>4</sup>.

## EROI, dépense énergétique et (dé)croissance

Dans le cadre de l'étude que nous avons publiée il y a quelques années (Fizaine et Court, 2016), nous avons aussi montré qu'il existait une relation étroite entre l'indicateur de dépenses monétaires énergétiques exprimées en pourcentage du PIB et l'EROI. Pour ce faire, il faut d'abord estimer l'énergie investie dans le système énergétique ( $E_{in}$ ) en termes monétaires :

$$E_{in} = \frac{E_{out} \times P_e}{(1 + MROI)} \times EI \quad (4)$$

Où  $E_{out}$  est la quantité d'énergie produite et vendue,  $P_e$  est le prix moyen de l'énergie,  $MROI$  est le taux de rendement monétaire (c'est-à-dire la marge) dans le système énergétique et  $EI$  est l'intensité énergétique des dépenses monétaires. L'énergie investie est donc la somme des dépenses monétaires effectuées dans le système énergétique pour le construire et l'exploiter, multiplié par l'intensité énergétique de ces mêmes dépenses monétaires. On peut ensuite faire l'hypothèse que l'intensité énergétique des dépenses monétaires consenties dans le secteur énergétique s'apparente à l'intensité énergétique du PIB ( $GDP$ ) du pays considéré, soit  $EI = E_{out}/GDP$ . En intégrant cette expression dans l'équation (4), laquelle ainsi modifiée vient se substituer à l'équation (2), on obtient :

$$EROI = \frac{1}{\frac{P_e}{(1 + MROI)} \times \frac{E_{out}}{GDP}} \quad (5)$$

On remarque ainsi qu'une façon de lutter contre la baisse de l'EROI associée à une hausse des coûts de construction et d'exploitation peut consister à réduire l'intensité énergétique de ces dépenses. Finalement, l'expression (5) peut encore être exprimé par :

$$EROI = \frac{GDP \times (1 + MROI)}{P_e \times E_{out}} \quad (6)$$

Cette expression économique de l'EROI revient alors à une représentation de la capacité à produire de la valeur économique avec des dépenses monétaires effectuées dans le secteur énergétique. L'EROI évolue approximativement à l'inverse des dépenses énergétiques exprimées en pourcentage du PIB. Or, c'est précisément cet indicateur qui semble être corrélé négativement à la croissance économique du PIB : un niveau élevé de dépenses énergétiques (en % du PIB) apparaissant comme une condition suffisante (mais pas nécessaire) pour réduire la croissance (voir la Figure 2 de la page suivante). Nous avons montré ce lien pour les États-Unis (Fizaine et Court, 2016), lequel a aussi été mis en évidence à l'échelle de l'OCDE par des économistes de cette institution (OCDE, 2022). Les explications théoriques derrière ce phénomène relèvent de l'impact de la hausse des dépenses énergétiques à la fois sur l'offre et sur la demande globale (Barnard et Ollivaud, 2023). Du côté de l'offre, la hausse des prix de l'énergie conduit à une hausse des dépenses énergétiques qui pousse les entreprises à produire moins et à un prix plus élevé, le tout engendrant moins de croissance économique. Du côté de la demande, la hausse des dépenses énergétiques exerce un effet dépressif sur la consommation des ménages, les amenant à revoir leur arbitrage en faveur des dépenses énergétiques qui sont difficilement substituables et à réduire, en même temps, leurs dépenses correspondant aux autres types de consommation, par un effet revenu négatif. Les quelques gagnants tirant des surprofits dus à l'augmentation des prix de l'énergie ayant une propension à dépenser relativement faible (Cookson *et al.*, 2022), l'effet net sur la demande semble négatif. Les preuves empiriques (venant d'études d'économétrie) restent toutefois fragiles, compte tenu du faible nombre de récessions économiques survenues à la suite de hausses des dépenses énergétiques. Le contexte de hausse des prix de l'énergie prévalant depuis la fin 2022 permettra peut-être de préciser cette relation, même si les dispositifs mis en place par les gouvernements pour protéger les consommateurs et les entreprises (bouclier tarifaire, chèques énergie, recapitalisation) vont probablement « diluer » la relation à travers le temps (la compensation financière de ces dispositifs s'étalant sur de nombreuses années à travers le remboursement de la dette publique engendrée par ces mesures).

## Un EROI en baisse est-il vraiment un problème ?

S'il semble évident que l'EROI d'une société ne doit pas passer en dessous de l'unité, l'impact de la baisse de l'EROI au niveau des minimums estimés précédemment soulève plusieurs interrogations. Tout d'abord, dans la mesure où les sociétés évoluent technologiquement, économiquement et culturellement, il semble inopportun de vouloir chercher une valeur d'EROI minimale absolue. L'efficacité énergétique, c'est-à-dire la capacité à fournir un même service économique en consommant moins d'énergie, peut ainsi faire baisser la valeur minimale requise pour l'EROI sociétal (Court, 2019). En effet, s'il faut moins d'énergie pour fournir le même service économique grâce aux gains d'effica-

<sup>4</sup> Dans la seule étude de ce type à notre connaissance, Vittorio Ecclesia *et al.* (2022) ont poussé l'analyse jusqu'au stade de l'énergie utile. Pour le Portugal (pays sur lequel a porté leur étude), il semble qu'entre 1960 et 2014, l'énergie utile ait été délivrée avec un EROI agrégé d'environ 3.

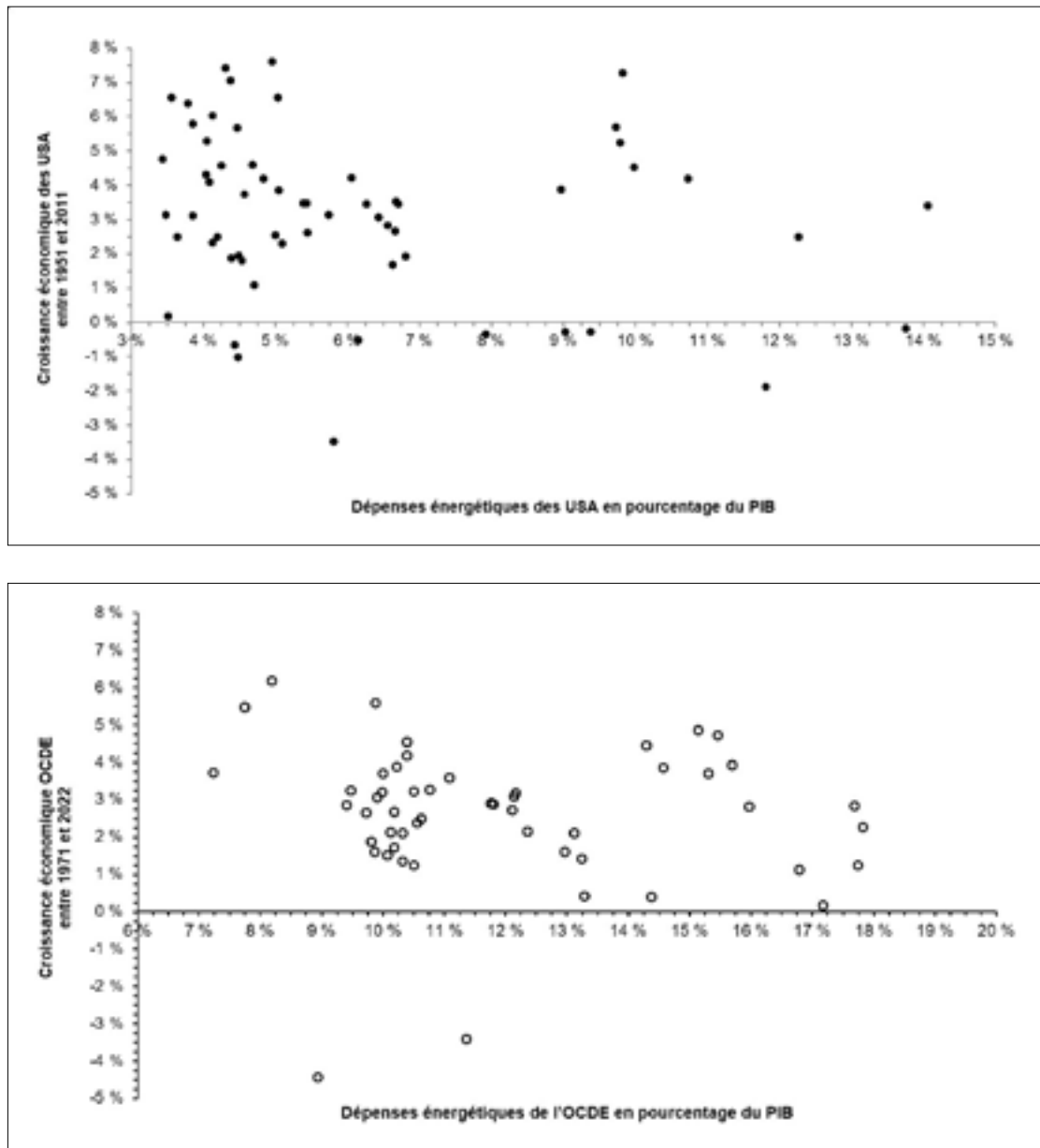


Figure 2 : Relation entre les dépenses énergétiques en pourcentage du PIB et la croissance économique pour les États-Unis (graphique du haut) et l'OCDE (graphique du bas) – Source : Fizaine et Court, 2016 ; OCDE, 2022.

cité énergétique, alors pour un système énergétique de taille équivalente, la « cannibalisation énergétique » sera moins pénalisante pour les autres secteurs économiques. Néanmoins, cette option peut s'avérer de plus en plus coûteuse au fur et à mesure que les gisements d'efficacité énergétique s'épuisent.

D'autre part, nous avons eu jusqu'à présent besoin de systèmes énergétiques avec des EROI élevés, car l'économie fossile (Malm, 2016) repose sur de nombreuses activités intenses en énergie (par exemple, passer des vacances à l'autre bout du monde ou rouler en SUV), qui ne sont peut-être pas essentielles pour maintenir une bonne qualité de vie. Car c'est bien évidemment cela qui est important, et non la croissance du PIB en tant que telle. En dernière instance, c'est bien la structure de l'économie et les modes de vie qui définissent la quantité d'énergie nette nécessaire – et donc l'EROI minimal requis – pour soutenir un certain

niveau de bien-être et d'opulence matérielle. Ainsi, une société qui jugera que son bien-être et sa qualité de vie passent par l'accès au plus grand nombre possible de biens matériels et à des loisirs à haute intensité énergétique nécessitera de disposer de davantage d'énergie nette qu'une société dans laquelle le bien-être sera défini avant tout par la qualité des relations interpersonnelles et la disponibilité de loisirs et de services de proximité. Avec un système énergétique de taille équivalente, cette seconde société pourra prospérer avec un EROI plus faible que la première. Cette limite a aussi une retranscription en termes de résilience par rapport aux prix de l'énergie : une activité économique moins intense en énergie résistera mieux à une augmentation des prix, que ce soit en tendance longue ou à cause d'un choc ponctuel.

Mais tous ces éléments sont bien évidemment normatifs. Il n'existe pas de consensus sur ce qui fait la qualité

de vie/le bonheur et sur la façon dont on le mesure. D'autre part, même si un tel consensus existait, la voie à prendre pour faire émerger cette société alternative reste elle aussi sujette à questionnement : réforme progressive de l'intérieur, révolution radicale, bifurcation au niveau des marges, ou peut-être un mélange de ces trois possibilités ?

## Bibliographie

BARNARD G. & OLLIVAUD P. (2023), "Energy expenditures have surged, posing challenges for policymakers", *Ecoscope: An economic lens on policies for growth and well-being*.

BRAND-CORREA L. I., BROCKWAY P. E., COPELAND C. L., FOXON T. J., OWEN A. & TAYLOR P. G. (2017), "Developing an input-output based method to estimate a national-level energy return on investment (EROI)", *Energies*, vol. 10, 534.

BRANDT A. & DALE M. (2011), "A general mathematical framework for calculating systems-scale efficiency of energy extraction and conversion: energy return on investment (EROI) and other energy return ratios", *Energies*, vol. 4, n°8, pp. 1211-1245.

BRANDT A., DALE M. & BARNHART C. (2013), "Calculating systems-scale energy efficiency and net energy returns: a bottom-up matrix-based approach", *Energy*, vol. 62, pp. 235-247.

BROCKWAY P. E., OWEN A., BRAND-CORREA L. I. & HARDT L. (2019), "Estimation of global final-stage energy-return-on-investment for fossil fuels with comparison to renewable energy sources", *Nature Energy*, vol. 4, pp. 612-621.

COOKSON J., GILJE E. & HEIMER R. (2022), "Shake shocked: cash windfalls and household debt repayment", *Journal of Financial Economics*, vol. 146, n°3, pp. 905-931.

COURT V. & FIZAIN F. (2017), "Long-term estimates of the energy-return-on-investment (EROI) of coal, oil, and gas global productions", *Ecological Economics*, vol. 138, pp. 145-159.

COURT V. (2019), "An estimation of different minimum exergy return ratios required for society", *Biophysical Economics and Sustainability*, vol. 4, n°3, 11.

COURT V. (2022), *L'Emballage du monde. Énergie et domination dans l'histoire des sociétés humaines*, Montréal, Écosociété.

FENG J., FENG L., WANG J. & KING C. W. (2018), "Modeling the point of use EROI and its Implications for economic growth in China", *Energy*, vol. 144, pp. 232-242.

FIZAIN F. & COURT V. (2016), "Energy expenditure, economic growth, and the minimum EROI of society", *Energy Policy*, vol. 95, pp. 172-186.

HALL C. (1972), "Migration and metabolism in a temperate stream ecosystem", *Ecology*, vol. 53, n°4, pp. 585-604.

HALL C., BALOGH S. & MURPHY J. (2009), "What is the minimum EROI that a sustainable society must have?", *Energies*, vol. 2, pp. 25-47.

HALL C., LAMBERT J. & BALOGH S. (2014), "EROI of different fuels and the implications for society", *Energy Policy*, vol. 64, pp. 141-152.

KING C. (2014), "Matrix method for comparing system and individual energy return ratios when considering an energy transition", *Energy*, vol. 72, pp. 254-265.

KING C., MAXWELL J. & DONOVAN A. (2015), "Comparing world economic and net energy metrics, part 1: single technology and commodity perspective", *Energies*, vol. 8, n°12, pp. 12949-12974.

LAMBERT J., HALL C., BALOGH S., GUPTA A. & ARNOLD M. (2014), "Energy, EROI and quality of life", *Energy Policy*, vol. 64, pp. 153-167.

MALM A. (2016), *L'Anthropocène contre l'histoire. Le réchauffement climatique à l'ère du capital*, Paris, La Fabrique.

MODAHL I., RAADAL H., GAGNON L. & BAKKEN T. (2013), "How methodological issues affect the energy indicator results for different electricity generation technologies", *Energy Policy*, vol. 63, pp. 283-299.

MURPHY D. & HALL C. (2010), "Year in review – EROI or energy return on (energy) invested", *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 1185, n°1, pp. 102-118.

MURPHY D., CARBAJALES-DALE M. & MOELLER D. (2016), "Comparing apples to apples: why the net energy analysis community needs to adopt the life-cycle analysis framework", *Energies*, vol. 9, 917.

MURPHY D., HALL C., DALE M. & CLEVELAND C. (2011), "Order from chaos: a preliminary protocol for determining the EROI of fuels", *Sustainability*, vol. 3, n°10, pp. 1888-1907.

MURPHY D., RAUGEI M., CARBAJALES-DALE M. & RUBIO ESTRADA B. (2022), "Energy return on investment of major energy carriers: review and harmonization", *Sustainability*, vol. 14, 7098.

ODUM H. (1973), *Energy, ecology, and economics*, AMBIO, vol. 2, n°6, pp. 220-227.

OECD. (2022), "OECD Economic Outlook", vol. 2022, Issue 2, Paris, OECD Publishing.

RAUGEI M. (2019), "Net energy analysis must not compare apples and oranges", *Nature Energy*, vol. 4, pp. 86-88.

UNDP (United Nations Development Programme) (2022), "Human Development Report 2021-22: Uncertain Times, Unsettled Lives: Shaping our Future in a Transforming World", Technical note 1, New York, [http://hdr.undp.org/sites/default/files/hdr2022\\_technical\\_notes.pdf](http://hdr.undp.org/sites/default/files/hdr2022_technical_notes.pdf)

VITTORIO ECCLESIA M., SANTOS J., BROCKWAY P. E. & DOMINGOS T. (2022), "A comprehensive societal energy return on investment study of Portugal reveals a low but stable value", *Energies*, vol. 15, 3549.

WEIßBACH D., RUPRECHT G., HUKE A., CZERSKI K., GOTTLIEB S. & HUSSEIN A. (2013), "Energy intensities, EROIs (energy returned on invested), and energy payback times of electricity generating power plants", *Energy*, vol. 52, pp. 210-221.

ZHANG Y. & COLOSI L. (2013), "Practical ambiguities during calculation of energy ratios and their impacts on life cycle assessment calculations", *Energy Policy*, vol. 57, pp. 630-633.

# Projets d'exploitation de lithium en France et en Allemagne... des convergences possibles ou une compétition effrénée ?

Par Alain LIGER

Ancien secrétaire général du Comité pour les métaux stratégiques

Le lithium fait l'objet d'une forte demande au niveau mondial, sous la pression du développement de l'usage des batteries rechargeables ; il est classé métal stratégique par l'Europe, qui est totalement dépendante de producteurs extérieurs au continent. L'examen de projets d'extraction de lithium en France et en Allemagne montre un fort investissement industriel sur cet enjeu minier majeur dont le sort reste cependant dépendant de la poursuite des études, de l'acceptation des projets par les populations locales et des autorisations exigées par le droit minier de chaque pays.

Le lithium, métal alcalin très léger, qui est un composant essentiel des batteries rechargeables lithium-ion, est une matière première indispensable et stratégique du défi de la transition énergétique, en particulier

celle de l'industrie automobile. La demande mondiale en lithium est passée de 40 000 t/an de Li contenu (2016) à 93 000 t/an (2021) ; la plupart des observateurs du marché s'attendent à ce que la croissance de

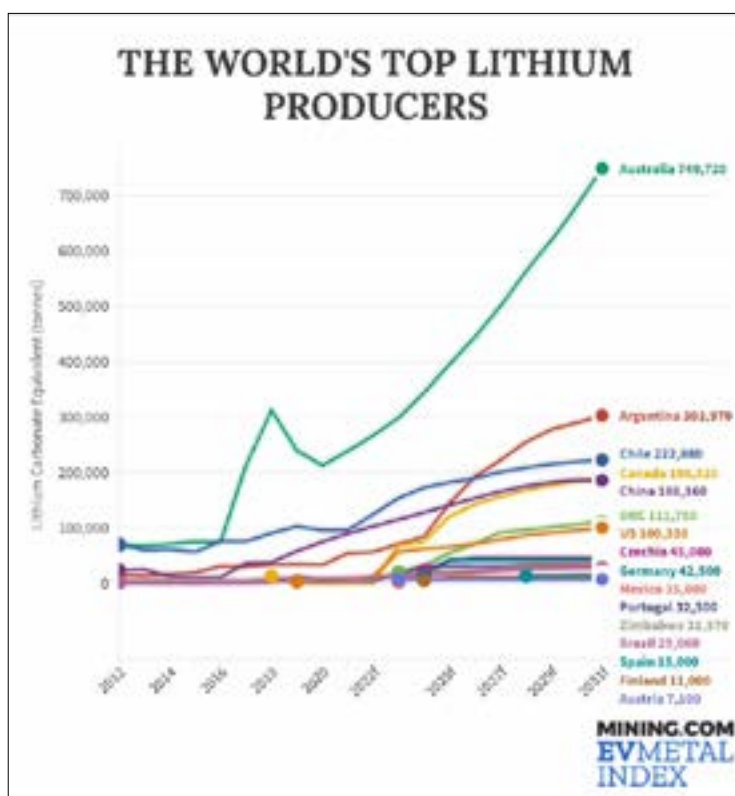


Figure 1 : Les producteurs de lithium au niveau mondial (Source : [www.mining.com](http://www.mining.com)).



la consommation se poursuive, en parallèle avec les recherches technologiques sur d'autres types de batteries rechargeables.

L'Europe est totalement dépendante de sources extérieures (Australie, Argentine, Chili) pour l'approvisionnement de son industrie automobile, voire pour celui des usines de fabrication de batteries en projet ou en cours de construction en France et en Allemagne. De nombreux opérateurs industriels s'intéressent au potentiel du sous-sol européen.



Figure 2 : Le développement de la mobilité électrique, un besoin en lithium croissant (©<https://www.autoscout24.fr>).

La France et l'Allemagne partagent des contextes géologiques similaires et ont des besoins économiques de transition énergétique analogues ; par conséquent, il n'est pas étonnant de trouver dans les deux pays des projets comparables. Le présent article fait état des données disponibles sur ces projets en avril 2023.

On trouve dans cet article et dans la documentation des projets étudiés pour son élaboration la mention de diverses formes de lithium. En général, les teneurs des gisements sont exprimées avec l'élément chimique Lithium (Li) et les références aux productions envisagées le sont en hydroxyde de lithium monohydraté ( $\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$ ) ou en « hydroxyde de lithium de qualité batterie », deux notions équivalentes. Lorsque nécessaire, le plus grand soin a été pris pour débusquer l'ambiguïté mais il peut subsister des incohérences. Enfin, le lecteur trouvera dans les projections de prix des références au carbonate de lithium mais aucune référence à ce produit n'est faite dans les projets examinés.

Dans la suite de l'article, les chiffres de production et de prix font tous référence à l'hydroxyde de lithium de qualité batterie.

## Gisements en roche

Des programmes d'exploration détaillée sont en cours depuis 2012 en Allemagne (Zinnwald, État de Saxe) et 2015 en France (PER de Beauvoir). Ces deux projets ont fait l'objet récemment de communications sur leur potentiel économique.

## En Saxe, le projet de Zinnwald

En Allemagne, la société Deutsche Lithium GmbH et sa maison mère Zinnwald Lithium Plc ont publié un rapport technique sur l'étude de faisabilité en mai 2019 puis une évaluation économique préliminaire ("Preliminary Economic Assessment"<sup>1</sup>) en septembre 2022. Ce dernier rapport de 222 pages présente des informations très détaillées sur les études du gisement, du procédé et de leur économie. Il est rédigé selon les règles du Règlement 43-101 de l'Autorité canadienne des marchés financiers sur l'« Information concernant les projets miniers ».

Le projet est situé près de la frontière tchèque à 35 km environ au sud de Dresde (Figure 3), sur le permis minier « Zinnwald », qui couvre 256,48 ha, attribué le 12 octobre 2019 et valide jusqu'au 31 décembre 2047 ; il a fait l'objet (sous des titres d'exploration précédents) de reconnaissances par sondages de 2012 à 2014 puis en 2017. Les dépenses historiques du projet au 31 décembre 2022 étaient légèrement inférieures à 19 millions d'euros, d'après le rapport annuel de Zinnwald Lithium Plc pour 2022<sup>2</sup>.



Figure 3 : Localisation de Zinnwald (©Rapport de G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft GmbH pour Deutsche Lithium GmbH, 6 septembre 2022).

Le projet est fondé sur des réserves situées dans le granite de Zinnwald, un granite fortement évolué sous l'angle géochimique, dont des parties sommitales ont fait l'objet d'exploitations de filons à étain (cassitérite) et tungstène (surtout wolframite). Le lithium fait partie

<sup>1</sup> G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft GmbH (6 septembre 2022), "Preliminary Economic Assessment for the revised Zinnwald Lithium Project", téléchargé sur <https://wp-zinnwald-lithium-2020.s3.eu-west-2.amazonaws.com/media/2022/09/PEA-for-the-revised-Zinnwald-Lithium-Project-6th-September-2022.pdf>

<sup>2</sup> ZINNWALD LITHIUM PLC (22 mars 2023), Annual report and financial statements for the year ended 31 december 2022, téléchargé sur <https://www.zinnwaldlithium.com/investors/reports-and-presentations/>

de la composition d'un mica appelé « zinnwaldite », qui contient jusqu'à 1,9 % de lithium en poids. Les niveaux les plus riches sont des greisens<sup>3</sup> pouvant atteindre, voire dépasser une puissance de 40 mètres.

Le tonnage inventorié est de 53,8 Mt de minerai à 3 100 ppm de lithium (ppm Li), la ressource démontrée (mesurée + indiquée) est calculée à 35,51 Mt de greisens avec une teneur moyenne en lithium de 3 519 ppm Li ; les réserves prouvées et probables prises en compte par le projet sont de 31,20 Mt à 3 004 ppm Li.

Le projet d'exploitation comprend une mine souterraine (en *sub-level stoping*, avec remblaiement des vides par des stériles de la mine ou des rejets du traitement) avec une production nominale de 880 000 t/an de minerai à une teneur estimée de 3 004 ppm Li, ainsi que 75 000 t/an de roches provenant du creusement des ouvrages miniers. L'extraction se ferait par environ 7 km de descenteries et de puits dont certains segments seraient récupérés de l'ancienne mine d'étain Zinnerz Altenberg fermée en 1991. Le traitement (séparation mécanique, activation lithium, et production de lithium) aurait lieu sur un site industriel près de l'entrée de la descenterie, où existe un site de dépôt de tailings qui aurait encore une capacité d'accueil résiduelle significative ; une autre option étudiée prévoit une partie du traitement à 150 km de là.

La cible de production nominale du projet est voisine de 12 000 t/an d'hydroxyde de lithium monohydraté ( $\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$ ) ; les sous-produits comprennent 56 900 t/an de sulfate de potassium, utilisable comme engrais, ainsi qu'un précipité de carbonate de calcium, pour l'industrie papetière. Le projet produirait aussi des déchets inertes à quartz qui pourraient être réutilisés en voirie, usage auquel un chiffre d'affaires symbolique est rattaché.

L'investissement nécessaire est estimé à 352 millions de dollars (dont 15 millions de subventions). Ce montant serait réparti à concurrence de 54 millions de dollars environ pour la mine et 238 millions de dollars pour les différents ateliers de traitement. La mine pourrait démarrer sa production en 2026 et aurait une durée de vie de plus de 35 ans.

L'analyse économique est fondée sur un prix de l'hydroxyde de lithium qualité batteries de 22 500 dollars par tonne à partir de 2023 (voir la Figure 9 en page 86), qui était bien supérieur aux prix de marché à la date de l'étude (de l'ordre de 12 000 \$/t), mais inférieur au cours de fin mars 2023 (un peu moins de 70 000 €/t) ; elle calcule un temps de retour de l'investissement (*pay back*) inférieur à quatre ans, une valeur actuelle nette (VAN) du projet de 1,6 milliard de dollars US à un taux de discount de 8 % et un taux de retour interne (TRI) avant impôts de 39 %. Après impôts, ces chiffres sont respectivement de 1 milliard de dollars et 29,3 %.

L'analyse économique envisage la variabilité des cours ; elle calcule les conséquences d'un écart de 22 % sur le

prix de base de 22 500 US\$/t : à 27 500 US\$/t, le TRI après impôts passe de 29,3 à 36,8 %, et à 17 500 US\$/t, il est encore de 21 %.

### Le projet de Beauvoir

En France, la société Imerys a annoncé en octobre 2022 un projet minier (nommé « Emili ») sur le site de sa carrière de kaolin de Beauvoir à l'ouest de Montluçon dans l'Allier ; sa filiale Imerys Ceramics France y détient un permis exclusif de recherches de mines du même nom depuis mai 2015, récemment prolongé jusqu'en mai 2025.

Le massif granitique local est connu pour être constitué de plusieurs granites emboîtés témoignant d'une évolution géochimique durant la mise en place.

Les informations disponibles dans les articles et communiqués de presse<sup>4</sup> et sur le site Internet du projet (<https://emili.imerys.com>) sont assez succinctes ; elles font état d'une estimation de ressource d'un million de tonnes d'oxyde de lithium à une teneur de 0,9 à 1 % – ce qui représenterait entre 100 et 110 millions de tonnes de minerai (calculs de l'auteur). L'exploration aurait coûté une trentaine de millions d'euros.

L'intention exprimée est de procéder à un *design* préliminaire de la mine et à la validation des premiers tests en laboratoire en 2023, puis, dans les années suivantes, à une caractérisation détaillée du gisement et à la construction d'un pilote industriel, afin de mettre en place une mine souterraine entre 75 et 350 m de profondeur et une usine métallurgique sur un site industriel à une centaine de km, pour un investissement d'environ un milliard d'euros. Dans la mesure où l'ensemble des étapes – essais, pilotes, études d'impacts et concertations – auront été réalisées avec succès, le projet produirait à partir de 2028 34 000 tonnes d'hydroxyde de lithium par an durant 25 ans (ce qui représente un tonnage total compris entre 85 et 95 Mt à la teneur annoncée) ; le coût direct de production serait de l'ordre de 7 à 9 €/kg d'hydroxyde de lithium, soit environ 8 000 €/tonne d'hydroxyde de lithium et l'investissement serait « intéressant ». Le projet ne donne pas d'information sur ses hypothèses économiques, mais on peut noter que le prix de vente au moment de la publication était de l'ordre de 80 000 €/tonne d'hydroxyde de lithium.

Ce projet a été sélectionné par le gouvernement français dans le cadre de son appel à projets « Métaux critiques ».

### Gisements en aquifère profond de la vallée du Rhin

Des programmes d'exploration sur le lithium de la vallée du Rhin sont en cours depuis 2019 en Allemagne (Vulcan Energy, Rhénanie-Palatinat et Bade-Wurtemberg) et commencent en France (Électricité de Strasbourg), où, cependant, des informations ont été acquises dans le cadre de projets de géothermie profonde antérieurs.

<sup>3</sup> Roche micacée présente à la bordure des massifs granitiques ou des filons granitiques.

<sup>4</sup> Par exemple *Le Figaro* du 25 octobre 2022.



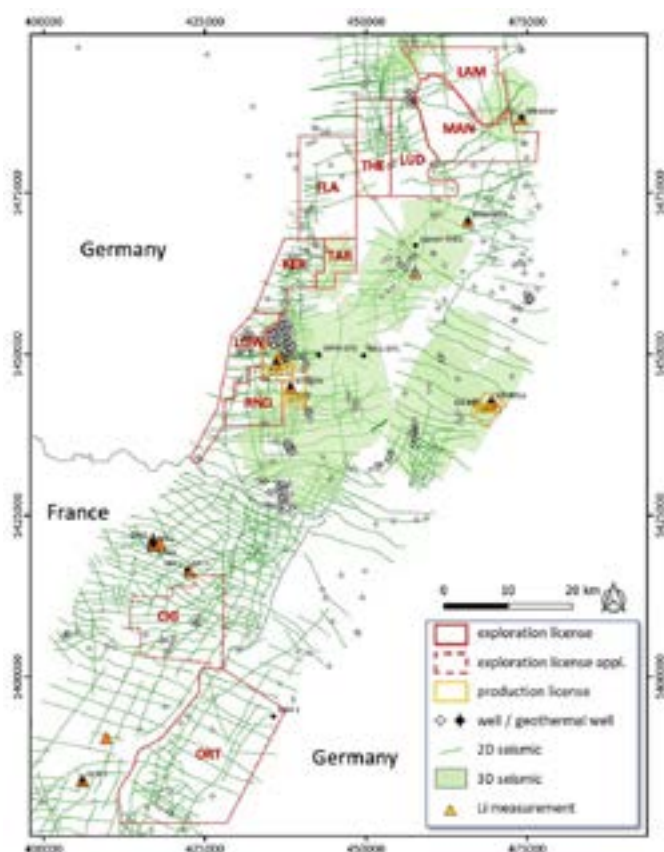


Figure 4 : Permis miniers de Vulcan (Source étude de faisabilité de la Phase 1, février 2023).

Cette première phase du projet repose sur plusieurs permis en Rhénanie-Palatinat, au nord de la frontière française, représentant un peu moins de 130 km<sup>2</sup> (calculs de l'auteur) ; un autre permis en Bade-Wurtemberg (immédiatement à l'est de la frontière française) n'est pas inclus dans cette phase. Vulcan détient par ailleurs d'autres zones, non couvertes par l'étude de faisabilité de la phase 1, pour un total, comprenant tous les permis, de 1 583 km<sup>2</sup> ; et la plaine du Rhin allemande est couverte par des permis pour lithium attribués à d'autres sociétés, en particulier en Rhénanie-Palatinat. Les dépenses historiques du projet au 31 décembre 2022 étaient d'environ 30,1 millions d'euros, y compris 10 millions de dépenses au deuxième semestre 2022 (rapport annuel de Vulcan Energy Resources au 31 décembre 2022<sup>6</sup>).

Le projet est fondé sur des réserves situées dans le fossé cénozoïque rhénan, et plus précisément dans trois aquifères profonds du Trias et du Permien. Les ressources minérales indiquées et inférées du projet sont estimées (en utilisant la norme australienne JORC<sup>7</sup>) dans le rapport de février 2023 à 868 000 tonnes de lithium contenu à une teneur de 181 mg/l de lithium, ceci pour l'ensemble des permis (dont 1,3 Mt pour le seul permis Taro). L'opérateur utilise ensuite un facteur de conversion pour annoncer un « contenu » de 3,36 millions de tonnes (Mt) de carbonate de lithium équivalent. Sur l'ensemble de cette ressource, les réserves prouvées et probables représentent 540 000 Mt de carbonate de lithium équivalent.



Figure 5 : Schéma de principe du projet de Vulcan ; à gauche centrale géothermique, au milieu atelier d'extraction de lithium, à droite usine finale (Source : étude de faisabilité de la phase 1, février 2023).

## Le projet de Vulcan

En Allemagne, la *start-up* australienne Vulcan Energy Resources Limited a publié en janvier 2021 une étude de préfaçabilité d'un projet qu'elle appelle Zero Carbon Lithium™ puis en février 2023 une étude de faisabilité pour la première phase du projet ("Definitive feasibility study for phase one")<sup>5</sup>.

<sup>5</sup> Vulcan Zero Carbon Lithium™ Project Phase One DFS results and Resources-Reserves update, téléchargé sur <https://v-er.eu/vulcan-zero-carbon-lithium-project-phase-one-dfs-results-and-resources-reserves-update/>

<sup>6</sup> Vulcan Group (28 septembre 2022), FY22 Annual Report, téléchargé sur <https://www.investi.com.au/api/announcements/vul/1380be07-13c.pdf>

<sup>7</sup> Le "JORC Code" – son nom développé est "The Australasian code for reporting of exploration results, mineral resources and ore reserves" – définit des standards minimums pour l'information du public sur les résultats d'exploration minière, les ressources minérales et les réserves minières. Il est intégré aux règles de cotation des bourses d'Australie et de Nouvelle-Zélande, ce qui en fait un outil obligatoire pour les sociétés cotées dans ces pays. Il est produit par un Comité composé des représentants des professionnels et des autorités des marchés financiers, avec un observateur représentant les entreprises.

Pour référence, la ressource totale sur l'ensemble des 1 583 km<sup>2</sup> des permis de Vulcan est calculée à 26,6 Mt de carbonate de lithium équivalent. Une étude de faisabilité d'une phase 2 du projet en traitera.

La définition du process d'extraction du lithium est fondée sur le fonctionnement, depuis avril 2021, d'une usine pilote située près de Landau.

La première phase du projet comprend deux sites géothermiques en production sur les trois permis d'Insheim, de Landau et de Rift, et un nouveau site à développer sur le permis de Taro ; 13 puits de production (dont 2 existants) et 14 puits de réinjection de la saumure (dont 2 existants) sont prévus. Les différents éléments de chaque site sont reliés par des conduites enterrées (16 km sur l'ensemble Insheim + Landau + Rift).

La puissance totale fournie par les 3 usines géothermiques sera de l'ordre de 37 MW en électricité et 30 MW en chaleur (cédée au voisinage, pas de chiffre d'affaires pris en compte à ce stade).

Il est à noter que le plan de production inclut une dilution de la teneur en lithium de l'aquifère profond due à la réinjection de la saumure à proximité du puits de prélèvement, au rythme d'environ 1,6 % par an ; le modèle ne prend pas en compte une recharge possible en lithium, ni à partir des micas des roches du socle, ni en provenance de la zone extérieure aux limites des permis.

Sur chaque site, la saumure sortant de la centrale géothermique passera dans un atelier où le chlorure de lithium sera extrait par un solvant à base d'alumine, avec une récupération moyenne de 93 %.

La solution de chlorure de lithium sera ensuite électrolysée dans une usine située sur le site de l'usine chimique existante de Höchst près de Francfort qui produira environ 24 700 t/an d'hydroxyde de lithium monohydraté de qualité batteries ; l'usine produira aussi de l'acide chlorhydrique et de l'hypochlorite de sodium. La solution d'hydroxyde de lithium sera ensuite cristallisée et purifiée pour obtenir le produit final de qualité batterie.

L'investissement nécessaire est estimé à 657 M€ pour l'ensemble des usines géothermiques, 517 M€ pour les ateliers d'extraction de lithium et 322 M€ pour l'usine centrale – soit un total de 1,5 milliard d'euros, dont 839 M€ pour le lithium.

L'évaluation économique suppose que la géothermie paie l'extraction des saumures par puits, et livre les saumures gratuitement aux ateliers et usine de lithium ; le coût de production du lithium est alors évalué à 4 359 €/t d'hydroxyde de lithium monohydraté. Le projet repose sur une hypothèse de prix de l'hydroxyde de lithium qui varie entre 15 000 et 37 000 €/t selon les années, la moyenne calculée état de 30 283 €/t. D'après l'étude, l'électricité d'origine géothermale bénéficie en Allemagne d'un tarif d'achat plancher garanti pour 20 ans de 252 €/MWh, ce prix décroissant de 0,5 % tous les ans.

Sur ces bases, l'analyse économique calcule un temps de retour de l'investissement (*pay back*) sur le lithium de

4 ans, une VAN du projet avant impôts de 3,9 milliards d'euros et un TRI avant impôts de 34 %. Après impôts, ces chiffres sont de 2,6 milliards d'euros et 26 %. Elle calcule l'effet d'une variation de 30 % en plus ou en moins de son prix de base de 30 283 €/tonne : à 33 000 €/t, la VAN du projet après impôts passe de 2,6 à 3,6 milliards d'euros, et à 27 000 €/t, elle est encore d'environ 1,7 milliard d'euros.

L'étude indique enfin que plusieurs industriels consommateurs, notamment Umicore, LG Energy Solution, Renault, Stellantis et Volkswagen, ont signé des engagements d'enlèvement fermes, qui seront un plus pour le montage financier.

### Les projets en Alsace

Du côté français du Rhin, plusieurs demandes de permis d'exploration pour lithium ont été déposées, dont certaines sont superposées à des permis d'exploration pour géothermie attribués depuis plusieurs années ; seuls deux ont été attribués, à Électricité de Strasbourg (ES), « Outre-Forêt » (30 avril 2022, pour 423 km<sup>2</sup>) et « Illkirch » (20 janvier 2023, pour 143 km<sup>2</sup>), tous deux demandés le 24 avril 2019.

Géorhin (ex-Fonroche Géothermie) a déposé le 20 décembre 2018 une demande « Plaine du Rhin » pour 572 km<sup>2</sup> – le groupe Arverne a acquis 100 % de Géorhin en février 2023 ; Lithium de France, filiale du groupe Arverne, a déposé en mai 2021 une demande « Les sources alcalines » pour 171 km<sup>2</sup> et, le 2 août 2022, « Les poteries minérales » pour 151 km<sup>2</sup> ; toutes ces demandes sont à l'instruction. Enfin Vulcan

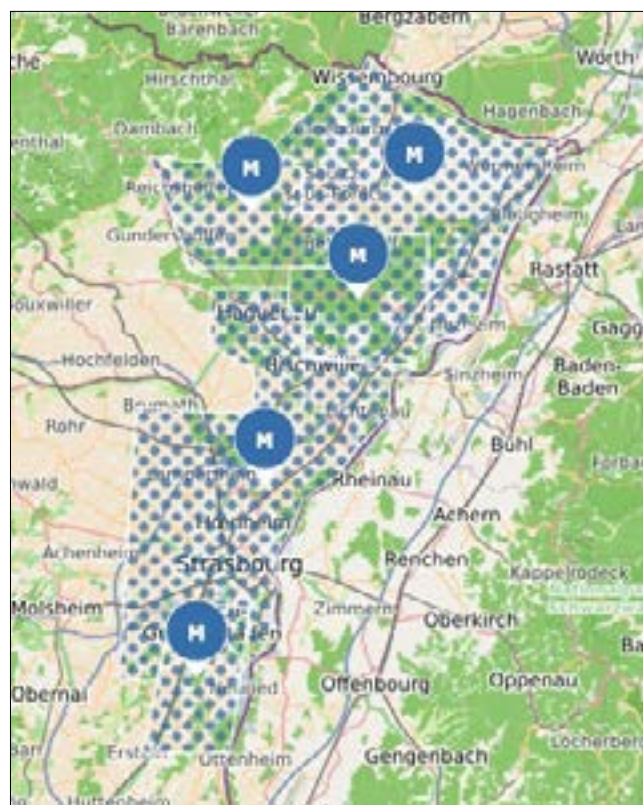


Figure 6 : Alsace, permis et demandes de permis pour lithium le 3 avril 2023 (Source : cadastre minier français CAMINO).



Energy indique avoir déposé fin octobre 2022 une demande de PER « Les Cigognes », sur 155 km<sup>2</sup> à l'est de Haguenau (source : son étude de faisabilité de la phase 1), demande inconnue du cadastre minier français CAMINO début avril 2023.

Les zones non attribuées n'ont pas encore fait l'objet de travaux d'exploration pour lithium ; aucune information publique n'est disponible pour les permis de ES.

Les données citées dans les dossiers de demande ont été recueillies dans le cadre de l'analyse des saumures profondes géothermales et sont un peu inférieures à 200 mg/l de lithium ; le dossier de Géorhin pour le périmètre « Plaine du Rhin » cite des valeurs comprises entre 162 et 210 mg/l de lithium ; le dossier de Électricité de Strasbourg pour le périmètre « Outre-Forêt » cite des valeurs entre 160 et 186 ppm de lithium acquises sur les sites des centrales géothermiques de Soultz-Sous-Forêts et Rittershofen.

Plusieurs projets de recherche scientifique ont été menés ou sont en cours en France ; parmi ceux-ci le projet nommé EuGeLi a été mené de 2019 à 2021 par un consortium regroupant Eramet, BRGM, Électricité de Strasbourg et plusieurs partenaires universitaires ; le projet, financé à 85 % par les fonds européens, a permis de produire quelques kilogrammes de carbonate de lithium de qualité batterie ; ce succès va permettre d'« optimiser le modèle économique afin d'évaluer si un schéma compétitif de production de lithium pour les batteries est possible, à l'échelle industrielle<sup>8</sup> ». Aucune donnée chiffrée ne semble publiquement disponible ; en particulier le rapport de recherche n'est pas encore disponible sur le site de l'Union européenne. En janvier 2023, Eramet et Électricité de Strasbourg ont signé « un protocole d'accord exclusif en vue d'étudier conjointement le développement d'une production de lithium en Alsace à partir de saumures géothermales, sur la commune de Rittershoffen... (avec)... un objectif annuel de 10 000 tonnes de Carbonate de lithium »<sup>9</sup>.

Enfin, Viridian Lithium SAS a annoncé le 7 juin 2022<sup>10</sup> l'intention de mettre en production en 2025 à Lauterbourg dans le nord de l'Alsace une usine de production de lithium pour batteries d'une capacité de production de 25 000 t/an d'hydroxyde de lithium ; le partenariat engagé comprend Technip Energies pour compléter l'étude de faisabilité définitive, Veolia Water Technologies pour valider l'ingénierie des procédés, et le CEA Liten pour effectuer des tests de performance du produit d'hydroxyde de lithium. Ce projet, qui représente un investissement de 10 à 15 millions d'euros d'études et 160 à 200 millions d'euros pour la construction a été sélectionné par le gouvernement français dans le cadre de son appel à projets « Métaux critiques ».

<sup>8</sup> Eramet (17 décembre 2021), Eugeli : le projet se termine par un succès avec la première production de carbonate de lithium de qualité batterie.

<sup>9</sup> Communiqué de presse du 26 janvier 2023 téléchargé sur <https://www.eramet.com/fr/activites/innover-concevoir/projet-eugeli>

<sup>10</sup> Viridian Lithium (7 juin 2022), Communiqué de presse, « Viridian va construire la première usine française de production de lithium pour batteries au cœur de l'Europe », téléchargé sur <https://www.viridianlithium.com/news/>

Le communiqué de presse de Viridian ne se réfère à aucun moment aux gisements de lithium de la plaine du Rhin, qu'ils soient situés en France ou en Allemagne ; selon les quotidiens *Les Dernières Nouvelles d'Alsace* et *Les Échos*, l'usine traiterait des sels de lithium extraits de saumures d'Amérique du Sud (Argentine et Chili).

## Quelques éléments d'analyse des projets

### Le niveau de reporting

Les informations sur les projets sont beaucoup plus détaillées en Allemagne qu'en France. Cette différence est particulièrement apparente lorsqu'on compare les deux projets en roche de Zinnwald en Allemagne et d'Imerys en France ; elle vaut également pour le projet en saumures de Vulcan en Allemagne.

Les lois minières respectives ont à cet égard des exigences similaires, qui abordent peu la diffusion de données économiques des projets ; la récente évolution de la loi minière française, qui exigera à l'avenir, pour une demande de concession, de mettre à disposition de l'administration et du public une « étude de faisabilité environnementale, économique et sociale » (article L.114-2 du Code minier, qui ne sera toutefois applicable qu'à la date d'entrée en vigueur du décret en Conseil d'État pris pour son application, et au plus tard le 1<sup>er</sup> janvier 2024) fera monter le niveau d'information formelle et d'exigence du public.

La raison la plus immédiate de cette différence de niveau d'information semble être que les deux sociétés Zinnwald et Vulcan sont cotées et financées sur des bourses de valeurs anglo-saxonnes (Londres et Sydney, respectivement) où la communication des sociétés sur les projets miniers doit satisfaire à des exigences importantes relatives à la qualité de l'information fournie au marché des actions ; les normes appliquées aux deux études référencées (NI 43-160, canadienne ; et JORC, australienne) sont équivalentes et imposent de donner tous les détails permettant de juger un projet minier, ce qui inclut la certification des ressources et les éléments techniques et économiques nécessaires à leur définition.

À un autre niveau d'analyse des réglementations boursières, il est certain que les projets allemands induisent pour les *start-up* qui les détiennent des conséquences plus importantes que n'en a le projet français pour Imerys, qui est une société minière assise sur de nombreux sites d'exploitation ; l'exigence de détails de communication n'est donc logiquement pas la même.

### Les cours du lithium

Les projets considérés utilisent des cours de l'hydroxyde de lithium bien différents ; chaque opérateur dispose en la matière d'une liberté de jugement totale, sur le fondement d'études diverses.

Pour ce qui suit, l'auteur utilise un cours de 1 \$ = 1 €, cohérent avec le niveau de précision de cet article.

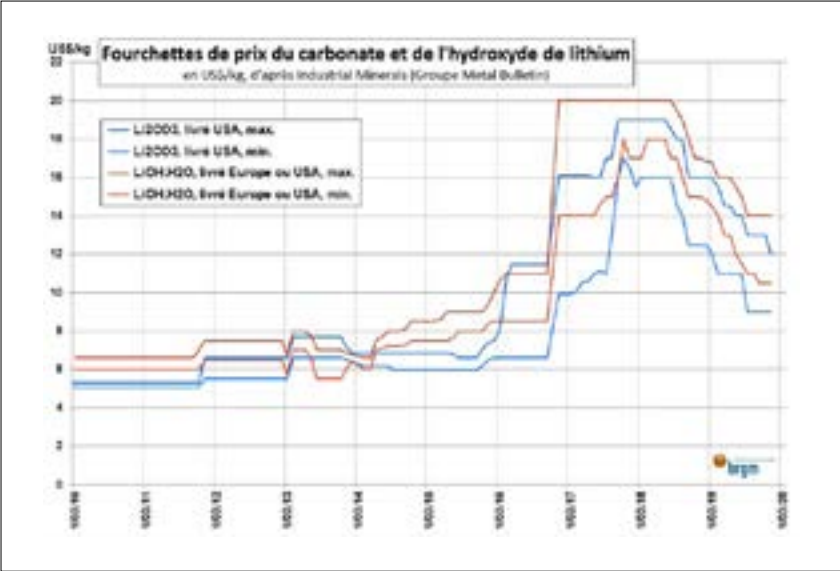


Figure 7 : Les cours du lithium entre 2010 et 2020 (Source BRGM).

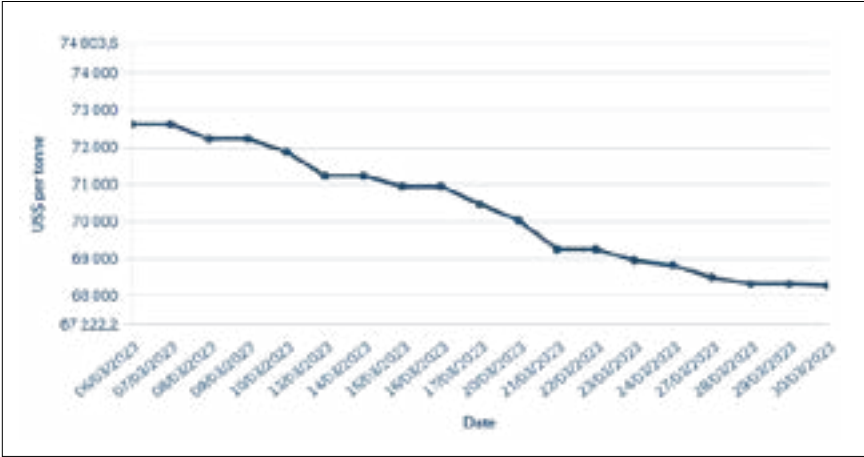


Figure 8 : Prix de l'hydroxyde de lithium en mars 2023 (Source LME).

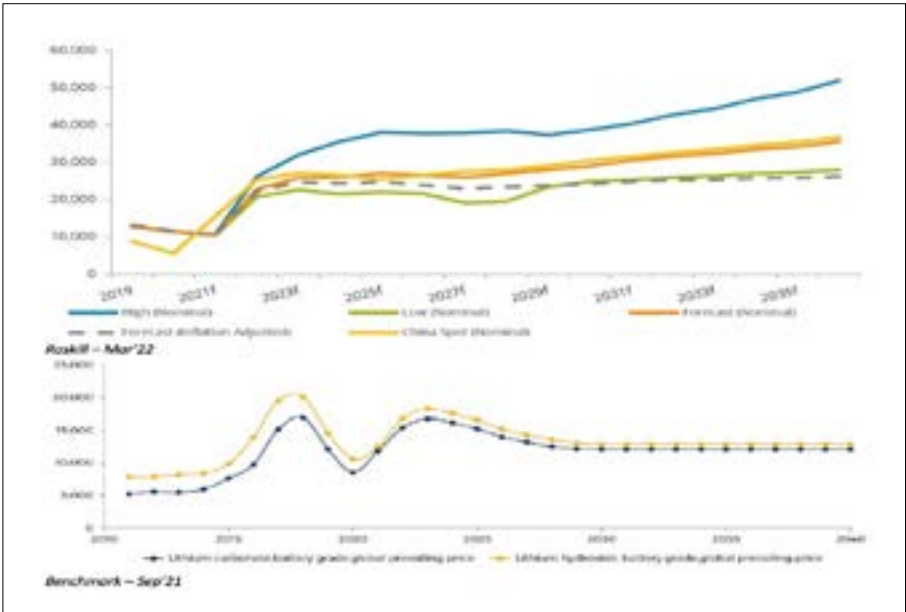


Figure 9 : Prix du lithium et prévisions (Source Zinnwald).

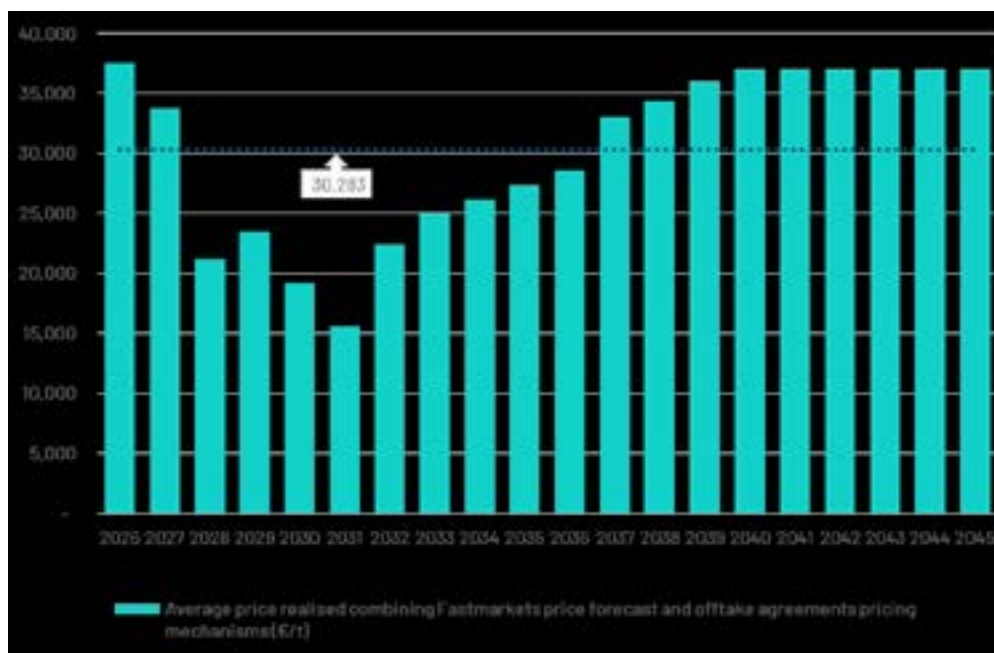


Figure 10 : Prix du lithium retenus pour l'étude de faisabilité (Source Vulcan).

Le cours de l'hydroxyde de lithium était de l'ordre de 6 à 7 USD par kg (soit environ 6 500 €/tonne d'hydroxyde de lithium) vers 2010/2015 ; il a vu un pic à environ 18 000 €/t en 2018, puis a décliné en 2019 et 2020 jusqu'à environ 12 000 €/tonne d'hydroxyde de lithium. Il a fortement augmenté depuis mi-2021 : de l'ordre de 30 000 \$/t au dernier trimestre de 2021, il passait à 50 000 \$/t en février 2022 puis à 70 000 \$/t en mai ; en mars 2023 il a amorcé une baisse et s'est établi fin mars 2023 à 68 000 \$/t.

Sur la base de plusieurs études externes, Zinnwald utilise en septembre 2021 une projection de 22 500 €/tonne d'hydroxyde de lithium.

Sur la base d'une étude de la société d'étude des marchés Fastmarkets, mais aussi des contrats déjà signés, Vulcan estime que le prix devrait augmenter et, en février 2023, l'étude économique de Vulcan est fondée sur un prix de 30 700 €/tonne.

Le projet Imerys ne divulgue pas les cours sur lesquels l'analyse économique du projet est fondée.

L'enjeu pour les opérateurs est de décider d'avancer un projet en phase de financement puis en phase de mise en place sur la base de cours réalistes pour la durée de vie du projet et non pour le trimestre en cours ou l'année qui vient.

La variabilité des cours est à cet égard analysée explicitement dans les rapports de Zinnwald et de Vulcan.

### Les deux projets en roche

Les deux projets en roche de Zinnwald en Allemagne et d'Imerys en France présentent de nombreuses similitudes : massifs granitiques, ressources de l'ordre de 50 à 100 millions de tonnes de minerais, mine souterraine, investissement de plusieurs centaines de millions d'euros, voire un milliard (et plus) et les

enjeux sont majeurs. À l'aune de l'information disponible, le projet d'Imerys semble mieux loti que celui de Zinnwald : les teneurs sont trois fois supérieures (1 % contre 3 000 ppm – soit 0,3 %), le volume de ressources totales est plus important (90 Mt contre 30 en ordre de grandeur), et le projet industriel est de plus grande dimension (production annuelle « projetée » ou étudiée de 34 000 tonnes d'hydroxyde de lithium par an contre 12 000). L'absence d'informations détaillées sur le projet d'Imerys ne permet pas de faire mieux que ce type de comparaison basique.

Compte tenu des distances et de la nature des minerais, qui ne se transportent pas très loin, il n'y a pas de synergie industrielle prévisible entre deux projets qui, s'ils sont tous deux économiquement faisables et financés, alimenteront le même marché européen.

### La vallée du Rhin

Dans la vallée du Rhin, il semble exister comme une ambiance de ruée vers l'or ; l'association de la géothermie, énergie renouvelable non intermittente et du lithium, dont les nouveaux usages énergétiques ont besoin, présente un caractère attractif.

En France et en Allemagne, l'association avec la géothermie pose la question des mouvements de sol potentiellement induits par l'exploitation géothermique – menaces auxquelles l'exploitant de Soultz-Sous-Forêts en France avait su faire face dès 2004 mais pas celui de Bâle en 2006. Les centrales géothermiques en exploitation de Soultz-Sous-Forêts et Rittershofen ne se signalent pas par une sismicité particulière, les centrales allemandes non plus ; cependant Gëorhin a été confrontée à des séismes induits en 2019 sur un forage à Vendenheim.

L'association avec la géothermie rend les projets moins dépendants du prix du lithium, elle leur donne un carac-

tère « Zéro émissions de carbone », en revanche, elle augmente le volume des investissements nécessaires.

Elle n'en fait pas pour autant des sources minérales renouvelables : le projet Vulcan prend en compte une décroissance de la teneur en lithium sur ses projets, due à sa propre réinjection ; plus largement, on peut se demander quel sera l'effet sur la teneur globale de la nappe de la multiplication des projets ; en effet, alors que la saumure est réinjectée avec une température un peu plus basse que la température de gisement, sa teneur en lithium à la réinjection est proche de zéro ; et il est probable que la lixiviation du lithium à partir des roches profondes est un phénomène beaucoup plus lent que le phénomène thermique qui réchauffe les nappes profondes. Vulcan a identifié l'enjeu industriel sur sa future exploitation, mais la perspective de nombreuses exploitations peut induire des interférences entre celles-ci, ce qui constitue un enjeu réglementaire de coordination pour les gouvernements compétents pour l'attribution de permis (en France et en Allemagne, Bade-Wurtemberg et Rhénanie-Palatinat).

La possible décroissance générale de la teneur en lithium de la nappe est, au fond, une traduction du caractère non renouvelable de l'extraction minière, comme l'est l'enlèvement des roches contenant le lithium dans les gisements minéraux.

Sur le plan industriel, il existe une complémentarité potentielle entre les projets : le gisement et les nappes profondes ne s'arrêtent pas à la frontière, les teneurs en nappe profonde sont d'ailleurs les mêmes (environ 180 mg/l de lithium), la saumure est potentiellement transportable et il existe donc un potentiel de projets transfrontaliers impliquant, par exemple, un gisement et une usine dans des pays différents – ou tout autre schéma ; la demande de PER de Vulcan en France et le projet d'usine de Viridian à Lauterbourg, extrémité la plus au nord-est du territoire français, pourraient relever de telles intentions, mais celles-ci devront être complétées en temps opportun par des négociations entre les nombreuses sociétés concernées – qui peuvent aussi décider de maintenir des projets séparés. Le choix de la technologie de séparation du lithium se posera également.

## Conclusion

Les industriels français et allemands se préparent de manière dynamique à être présents sur la production de lithium à partir de gisements européens ; de nombreuses étapes restent à franchir, en particulier l'acceptation sociétale et la gestion du risque d'exploitation – sans parler du financement des montants d'investissements importants.

Les premières informations économiques publiées, surtout par les sociétés opérant en Allemagne, sont encourageantes ; les analyses économiques sont effectuées sur des prix inférieurs aux prix actuels... qui sont peut-être une bulle de durée plus ou moins longue.

Imerys et Zinnwald ont commencé à tenir au dernier trimestre 2022 des réunions avec les habitants concernés, dans un cadre d'initiatives directes qui devra être relayé

en temps opportun par les procédures *ad hoc* respectives en France et en Allemagne ; les projets antérieurs au Portugal et en Serbie ont en effet échoué sur le contexte local et l'acceptation par les populations au vu des enjeux environnementaux anticipés ou craints.

Cet article n'a pas étudié l'ensemble des procédures d'autorisations minières, environnementales ou de planification territoriale, sujet plus large que la relation avec le public proche ou le public national. Les calendriers des projets respectifs en dépendent fortement.

Sur tous les projets, les évaluations techniques et, sans doute, les négociations pour le financement se poursuivent activement.



# Energy and Society

## Introduction

**Didier Pillet**, Member of the General Economic Council

## Reconciling economic growth and preservation of natural assets

### Peak oil and the shale oil miracle

**Michel Lepetit**, Associate researcher at LIED (University Paris Cité) and Vice-President of The Shift Project

The global peak in “conventional” crude oil production occurred in the 2000s. There was no peak in crude oil at that time, because the “miracle” of American shale oil happened. Faced with the anticipated limits of conventional resources, the history of shale oil began in the 1960s and 1970s with research on massive hydraulic fracturing, and even nuclear fracturing. The explanation of the shale “miracle” by human ingenuity is therefore partly correct. The explanation by “abnormal”, massive monetary policy is less acknowledged. In 2020, the Covid-19 led to a return to normality in the oil market. The maturity of hydrocarbon deposits, both conventional and non-conventional, and the decreasing return of oil recovery techniques in geological reservoirs, make it possible to predict that the global peak in crude oil production in November 2018 will no longer be matched. The peak of conventional oil, the shale “miracle” and the return to “normality” will have consequences for the macroeconomic (growth), financial (inflation) and environmental (green finance) future of the planet.

### Energy flows and the self-organization of societies as dissipative structures

**François Roddier**, French physicist and astronomer and **Mireille Roddier**, Associate professor and program director of architecture, University of Michigan

Complex system studies have shown that, under a sufficient flow of energy, dissipative structures appear and self-organize into periodic oscillations characteristic not only of Carnot cycles, but also of biological and economic cycles. We have also seen that the emergence of such cycles is the outcome of a common thermodynamic process known as the principle of maximum entropy production (Roddier, 2012). What happens when the flow of energy, which the system has structured itself to dissipate most efficiently, significantly decreases? Here we argue that this unsolicited shortage might be salutary to our interconnected ecosystems if we learn to couple our centrifugal phases of innovation and production with antagonistic centripetal phases of restauration and maintenance. Otherwise,

whether we continue to exponentially consume energy from unforeseen new sources, or too abruptly cease all energy consumption without a process of adaptation, our globally interconnected ecosystems may prove too fragile to recover.

### France will only be able to achieve its climate targets with ambitious, concerted planning

**Emma Stokking**, for the Shift Project

At the beginning of 2022, the think tank The Shift Project published its “Plan for transforming the French economy”, a vast programme aimed at decarbonising the economy, sector by sector during the 2022-2027 quinquennium, by promoting resilience and employment. More than a year after its publication, the diagnosis it makes and the proposals it puts forward remain adapted to the current climate and energy crisis.

### The role of energy in the growth society as a complex system

**Philippe Charlez**, energy expert at the Institut Sapiens-Paris

Based on three pillars (a context: liberal democracy; a catalyst: technology; and a food: energy), the growth society is a gigantic dissipative structure out of equilibrium. Requiring a considerable flow of incoming energy (162 PWh, in 2021), it produces \$90 T of wealth, but emits 35 Gt of CO<sub>2</sub> into the environment.

Like any dissipative structure, the growth society is an open (free trade), ordered (order, authority) and unequal (social inequalities) system. Poverty reduction requires the creation of wealth, so it is inextricably linked to openness, order and inequality. On the other hand, and contrary to what is rooted in the collective imagination, egalitarianism, disorder and closure (which corresponds to thermodynamic equilibrium) do not reduce poverty but, on the contrary, accentuate it.

## Energy Return On Investment (EROI)

### EROI and its importance in assessing the performance of energy systems

**Gérard Bonhomme**, Professor Emeritus, University of Lorraine and **Jacques Treiner**, Associate researcher at the interdisciplinary laboratory for tomorrow's energies and Chairman of the Shift Project expert committee

Meeting the energy needs of our societies, in the context of the fight against global warming and prospects for the depletion of fossil fuel and mineral resources stocks, requires the implementation of alternative low-carbon solutions. The cost per MWh is undoubtedly a useful criterion, but, as we show in this article, physical criteria are essential for assessing technological solutions and possible energy scenarios. The most important of these criteria based on physical quantities is the Energy Return On Investment (EROI), which measures the efficiency of a system in providing society with energy that is useful for sectors of activity other than the energy sector itself.

### The agro-industrial model and the decline in fossil fuels

**Félix Lallemand**, PhD in ecology

The agro-industrial model is now predominant in the food systems of industrialised countries. In this article, we present the energy sources that have led to the emergence of this model. We study the role of oil and gas in its functioning and seek to characterise its vulnerability in a world where fossil hydrocarbon production is in structural decline. We propose an evaluation of the EROI (Energy Return On Investment) of the French agro-industrial model and discuss the relevance of this indicator for the study of food systems.

### Historical and trend evolution of oil and gas EROI

**Louis Delannoy, Emmanuel Aramendia, Pierre-Yves Longaretti and Emmanuel Prados**, INRIA Grenoble

As fossil fuels are exploited, they become more difficult to access and require more energy to extract. The continuing decline in the EROI of oil and gas therefore seems worrying, given that these two energy sources still account for 52% of global energy consumption. However, these ratios are measured at the primary energy stage and should instead be estimated at the final or useful stage, where energy is closest to the reality of economic processes. Following this principle, the EROI for fossil fuels is already comparable or even lower than that for renewable energies, even when short-term energy storage technologies are included in the calculation. This result is part of the emerging consensus of the net energy analysis scientific community, but its dissemination is hampered by the frequent misunderstandings about EROI inherited from the absence of a formal methodology before the 2010s. To remedy this situation, we summarise the various steps that led to this emerging consensus, present the EROI of oil and gas at the primary, final and useful stages from 1971 to 2019, and discuss the implications for the low-carbon transition.

### Uranium as an energy source: medium to long term prospects

**J. W. Storm van Leeuwen**, Member of the Nuclear Consulting Group, and **Didier Pillet**, Member of the General Economic Council

Uranium is the only metal used as energy source. The extraction of uranium from the Earth's crust involves a complex chain of physical and chemical separation processes and the consumption of large quantities of energy, and of different chemicals.

The energy and chemicals consumed during extraction increase exponentially with decreasing ore grade, accompanied by an exponentially increasing emission of CO<sub>2</sub>. The grades of the available uranium resources decrease with time, because the mining companies mine the richest resources first, and because these offer the highest return of investment. Above phenomena cause the existence of the "energy cliff" and the "CO<sub>2</sub> trap". They thus call into question, for the century to come, the viability of a nuclear based solely on <sup>235</sup>U extracted from natural uranium whose geological occurrence couldn't suffice to make it self-evidently an energy resource.

One way to overcome this <sup>235</sup>U limitation would be to exploit <sup>238</sup>U resources. Nevertheless, this requires the industrial development and worldwide deployment of reactors operating in fast neutron mode (e.g. FNR). However, a significant share of the energy produced by such reactors is difficult to envisage at a world level before the end of this century, as we shall see in this article.

### Reflections on the concept of EROI.

#### Illustration with photovoltaics and hydrogen

**Didier Pillet**, Member of the General Economic Council

In the context of the energy transition and the decarbonisation process of the economy, low-carbon energy is expected to play a leading role. These include renewable energies such as photovoltaics and wind power, as well as nuclear power, whose carbon footprint remains relatively low to this day. However, when it comes to implementing their basic infrastructures, these energy systems are still heavily dependent on fossil fuels. Fossil fuels still have relatively favourable energy ratios (EROI), which influences the EROIs of photovoltaic and wind energy systems, leading to an overestimation of their energy performance. A closer look at the physical principles underlying the evaluation of the EROIs of these two systems, both of them are based on the exploitation of energy flows, also provides a better understanding of their real potential in terms of energy performance. Particular attention is paid to photovoltaics, in terms of the scope to be taken into account when assessing the energy consumed when implementing this energy system. Lastly, the way in which the notion of efficiency comes into play in the evaluation of EROIs, a notion that is particularly sensitive in the case of hydrogen production, highlights the importance of having an underlying energy base that is abundant, cheap and has relatively high EROIs, all elements that are essential to the smooth running of the economy, and which complicate the process of decarbonising it.

## Issues and challenges relating to raw materials and EROI

### Electric vehicle batteries: what are the alternatives to lithium ion technology?

**Victoire de Margerie**, Founder and Vice-President of the World Material Forum

The end of combustion engine vehicle production by 2035, in favour of electric vehicles, poses the challenge of the raw materials required by the latter. The current very strong growth in vehicle production will not be enough to meet demand, nor will recycling, although essential, insofar as there will not be enough vehicles to recycle in the medium term and there are foreseeable shortages of copper and nickel and geopolitical uncertainties for the rest. The acceptability of short-range cars is limited. Technological innovations will therefore have a crucial role to play: iron, sulphur or sodium batteries, reduced consumption of critical materials in other activities, etc. While technical progress has in the past made it possible to solve many other complex problems, the pace of this transition is unprecedented.

### Criticality and geopolitics of the raw materials required by low-carbon technologies

**Emmanuel Hache, Vincent D'Herbemont and Louis-Marie Malbec**, IFP Énergies Nouvelles

Since 2010 and the Rare Earths crisis, countries consuming mineral resources, concerned to secure their supplies to meet their strategic needs, have tried to establish quantitative criteria to assess their criticality. However, these indicators often lack the long-term, holistic view of the value chain, from mine to product, which is necessary in the face of emerging uncertainty in materials markets. This high level of uncertainty is the result, on the one hand, of consumer countries seeking autonomy in a context of strong growth in demand and constrained supply, and, on the other hand, of the strategies envisaged by producing countries aimed at benefiting from the financial windfall of their resources without repressing their economies. In this uncertain geopolitical context, all producers and consumers

should take advantage of the dynamics linked to metals to structure the markets in a global manner, by integrating social and environmental criteria and by setting up a global governance of materials.

### Minimum EROI and economic growth

**Victor Court**, Engineer and economist, Centre Économie et Management de l'énergie, IFP Énergies Nouvelles, and **Florian Fizaine**, Economist, Institut de recherche en gestion et économie, University Savoie Mont-Blanc

The concepts of net energy and EROI have gradually gained in popularity since their emergence in the 1970s. Although they are particularly useful for characterizing the state of abundance and the difficulty of extracting energy from the environment respectively, measuring them is proving difficult. In recent years, in a context of scarcity of hydrocarbons and a switch to low-carbon energy sources, a number of studies have attempted to estimate the impact of a fall in EROI on the functioning of an industrial society. Another way of approaching this subject is to ask whether it is possible to estimate the minimum value of EROI required to sustain economic growth. Due to some methodological weaknesses, the results of this field of research remain heterogeneous and difficult to interpret, especially as they are part of a context of re-qualification of the objective to be achieved (economic growth or quality of life), to which science will not be able to respond alone.

### Lithium mining projects in France and Germany... possible convergence or unbridled competition?

**Alain Liger**, Former Secretary General of the Strategic Metals Committee

Lithium is in high demand worldwide, driven by the growing use of rechargeable batteries. Europe has classified it as a strategic metal, but is totally dependent on producers outside the continent. An examination of lithium extraction projects in France and Germany shows strong industrial investment in this major mining issue, the fate of which nevertheless depends on the continuation of studies, the acceptance of projects by local populations and the authorizations required by the mining laws of each country.

Issue editor:  
**Didier Pillet**

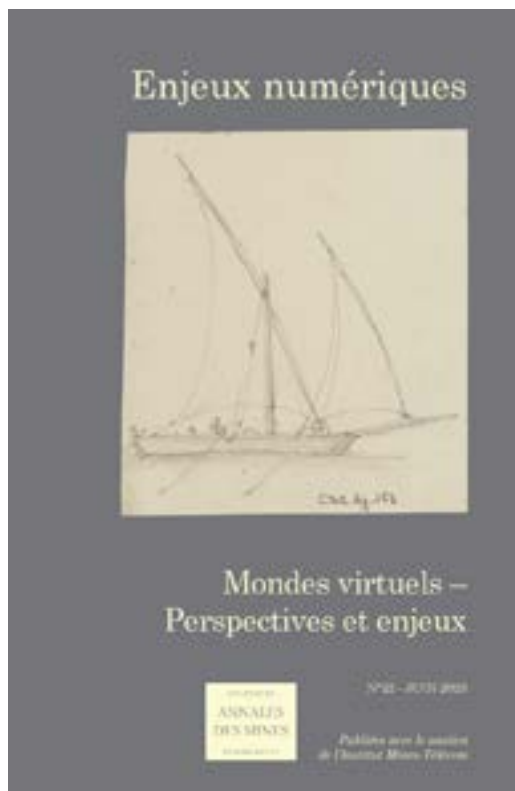
# ENJEUX NUMÉRIQUES

## Mondes virtuels – Perspectives et enjeux

### Introduction générale

« La France veut un développement des mondes virtuels conforme à ses valeurs »

Entretien avec **Jean-Noël BARROT**,  
ministre délégué chargé de la Transition numérique  
et des Télécommunications  
Propos recueillis le 11 mai 2023  
par **Mélanie BÉNARD-CROZAT**



n° 22 - Juin 2023

### Introduction : Mondes virtuels – Quels horizons ? **Éric FREYSSINET**

« La connexion réseau a été perdue »  
Essai sur la représentation et l'imaginaire des mondes virtuels  
**Thierry DUFRÈNE**

### Les jeux et les technologies de réalité virtuelle et augmentée

Les mondes virtuels dans le monde des jeux vidéo  
**Leroy ATHANASSOFF**

Les mondes virtuels, nouvelles perceptions, nouvelles représentations  
**Thomas TASSIN**

Quels outils numériques pour les formations de demain ?  
Entretien avec **François TADDÉI**  
Propos recueillis par **Grégoire POSTEL-VINAY**

Qu'attendre de la réalité virtuelle et augmentée pour les applications médicales  
**Jean-Baptiste MASSON**

La formation en réalité augmentée et mondes virtuels  
**Jean-Michel LAVALLARD**

Handicap, accessibilité et formation aux mondes virtuels  
**Sylvie SANCHEZ**

### Les Métavers

Qui sont les acteurs du métavers ?  
**Paul JOLIE** et **Emmanuel CAQUOT**

Témoignage de l'association France Meta Interview de **Pierre PAPERON**,  
président de l'association  
Propos recueillis par **le Général Éric FREYSSINET**

Quel est le réel potentiel du métavers ?  
**Frédéric CAVAZZA**

Le métavers au service de la mode et du luxe ?  
**Pascal MORAND** et **Marine PEYROL**

L'adoption du métavers : les mondes virtuels et l'industrie du luxe  
**Nelly MENSAH**

### Enjeux juridiques et éthiques

Effet des mondes virtuels sur l'enquête judiciaire  
**Noémie CARON**

Enjeux juridiques et éthiques posés par les mondes virtuels  
**Me Corinne THIERACHE**, **Me Caroline LEROY-BLANVILLAIN** et **Hanna LE DERRIEN**

L'éthique, frein aux innovations et interfaces numériques ?  
**Dr Laure TABOUY**

### Hors dossier

Le baromètre du numérique - édition 2022  
**Michel SCHMITT** et **Matthias de JOUVENEL**

---

Ce numéro a été coordonné par **le Général Éric Freyssinet**

Ce numéro peut être consulté et téléchargé gratuitement sur notre site  
<http://www.annales.org>



# Ont contribué à ce numéro

**Emmanuel ARAMENDIA** est doctorant en économie écologique à l'Université de Leeds (Royaume-Uni). Ingénieur de l'École Centrale de Nantes et titulaire d'un master en gestion de l'environnement et en développement durable de l'Université d'Aalborg (Danemark), ses recherches portent sur les contraintes énergétiques qui peuvent survenir dans un monde aux ressources limitées.



**Gérard BONHOMME** est Professeur émérite de l'Université de Lorraine, Institut Jean Lamour, UMR 7198 CNRS-Université de Lorraine.

Président de la Commission Énergie & Environnement de la Société Française de Physique.

D.R

Il est ingénieur de l'École Centrale de Nantes, Docteur en Physique

des Plasmas et Docteur ès Sciences.

Au cours de sa carrière universitaire il a effectué des recherches en physique des plasmas, essentiellement dans le domaine de l'étude des instabilités et de la turbulence, avec une centaine d'articles publiés ; il a contribué à la création et à la gestion de structures et projets de recherches et de formation au niveau national et international (Erasmus Mundus notamment), dans le domaine de la fusion magnétique, en lien avec le projet ITER.

Actuellement Professeur émérite à l'Institut Jean Lamour à l'Université de Lorraine, très engagé dans la réflexion sur les thèmes liés à l'énergie, notamment en tant que président de la Commission Énergie & Environnement de la Société Française de Physique, et membre de l'Energy Group de la European Physical Society.



**Philippe CHARLEZ** est ingénieur des Mines de l'École Polytechnique de Mons (Belgique) et Docteur en Physique de l'Institut de Physique du Globe de Paris.

Expert internationalement reconnu en énergie, il est l'auteur de nombreux ouvrages sur la transition énergétique dont « Croissance, énergie, climat. Dépasser la quadrature du cercle » (2017, Éd. De Boek supérieur),

D.R

« L'utopie de la croissance verte. Les lois de la thermodynamique sociale » (2021, Éd. J.-M. Laffont), « Les dix commandements de la transition énergétique » (2023, Éd. VA) et « Les dessous d'une catastrophe énergétique » (2023, Kiwi).

Philippe Charlez enseigne à Dauphine, Mines Paris Tech, l'ISSEP et au Centre International de Formation Européenne. Il est éditorialiste régulier pour Valeurs Actuelles, Contrepoints et Atlantico.

Il est l'expert des questions énergétiques de l'Institut Sapiens.

Pour plus d'informations sur l'auteur consultez [www.philippecharlez.com](http://www.philippecharlez.com) et <https://www.youtube.com/energychallenge>.



D.R

**Victor COURT** a rejoint le Centre Économie et Management de l'Énergie d'IFP School en tant que Professeur assistant en mars 2020. Il participe à l'enseignement et à l'organisation de trois programmes du Centre : les programmes d'ingénieur spécialisé « Énergie et marchés » et « Energy technology economics and management », ainsi que le master en « Économie de l'environnement, de l'énergie et des transports ».

Victor Court est également chercheur associé à la Chaire Énergie et Prospérité (hébergée par la Fondation du Risque), et chercheur associé au Laboratoire Interdisciplinaire des Énergies de Demain (Université Paris Cité). Ses principaux centres d'intérêt concernent les interactions entre changement technique, transition énergétique et prospérité économique dans le temps long.

Après ses études d'ingénieur en sciences de l'environnement (AgroParisTech) et son master en économie de l'énergie (IFP School), Victor Court a réalisé un doctorat d'économie (Université Paris Nanterre) dont la thèse portait sur le rôle de l'énergie dans le processus de croissance économique. Cette analyse se focalisait notamment sur le concept de retour énergétique sur énergie investie (EROI en anglais, pour « Energy Return On Investment »), qui est une mesure de l'accessibilité de l'énergie. Durant les trois années qui suivirent ce doctorat, Victor Court a mené des recherches dans différentes institutions. D'abord au sein de la Chaire Énergie et Prospérité et du Centre de formation sur l'Environnement et la Société de l'ENS Ulm. Ensuite en Angleterre, dans la *Science Policy Research Unit* de l'Université du Sussex à Brighton, où son travail s'est concentré sur l'impact énergétique des technologies numériques.

En plus de ses cours et de ses publications dans différents journaux académiques, Victor Court s'attèle désormais à la rédaction de livres dédiés à une audience plus large. Le premier d'entre eux, *L'emballement du monde*, est paru en novembre 2022 aux éditions Écosociété. Par le prisme de l'énergie, cet essai propose une histoire mondiale des sociétés humaines, du paléolithique à nos jours.

**Louis DELANNOY** est doctorant en mathématiques appliquées au sein de l'équipe de recherche STEEP (laboratoire Jean Kuntzmann, INRIA Grenoble). Ses recherches portent sur les risques systémiques découlant des interactions entre l'économie, la finance et l'énergie dans un contexte d'accélération de changements socio-écologiques globaux. Il est titulaire d'un *Master of Science* en gestion de l'énergie et durabilité de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL).



D.R

**Vincent D'HERBEMONT** est économiste prospectiviste à IFP Énergies nouvelles. Il est diplômé de l'école des Mines de Paris avec une spécialisation dans le domaine de l'énergie. Il travaille sur les questions de prospective énergie-matière et sur leur intégration dans des modèles technico-économiques. Il est également expert à l'Observatoire des ressources minérales pour les filières industrielles (OFREMI).



D.R

**Florian FIZAIN** est diplômé d'un master en économie de l'environnement, de l'énergie et des transports de l'IFP school et l'INSTN. Il a commencé à s'intéresser aux relations existantes entre les matières premières et l'énergie lors de son mémoire de fin d'étude portant sur la disponibilité de long terme de l'uranium non conventionnel pour

les réacteurs nucléaires à neutrons rapides. À l'issue de ces travaux, il engage une thèse à l'Université de Bourgogne cherchant à étudier comment les contraintes économiques, financières et énergétiques caractérisant les métaux rares pourraient affecter le développement des énergies bas-carbone. Depuis son doctorat obtenu en 2014, il poursuit ses recherches en cherchant à déterminer les conditions de réalisation de la croissance verte, du découplage PIB-matière-énergie-environnement ou de l'économie circulaire. Empiriste de formation, ses terrains d'application sont nombreux : disponibilité de l'énergie pour la croissance économique, effet des labels verts sur la valorisation des bâtiments, étude des déterminants du recyclage des métaux, effet du PIB sur l'empreinte matière. Convaincu de la force de l'interdisciplinarité, il a été coordinateur de deux volumes sur l'économie des ressources minérales intégrant une quinzaine de chercheurs de plusieurs disciplines. Il participe actuellement à deux projets ANR mêlant sciences humaines et sciences naturelles. Il enseigne en tant que Maître de conférences à l'Université de Savoie Mont-Blanc et dirige également deux thésards travaillant au sein de l'axe économie circulaire de la chaire CLEE.

**Emmanuel HACHE** est économiste prospectiviste à IFP Énergies nouvelles. Il est Docteur en Sciences économiques (Université Paris I) et habilité à diriger



D.R

des recherches (Université Paris-Nanterre). Il est également diplômé en géopolitique et prospective de l'Institut de relations internationales et stratégiques (IRIS). Il travaille sur les questions de prospective énergétique et plus précisément sur les ressources naturelles nécessaires à la réalisation de la transition écologique.

Il enseigne la prospective, l'économie et la géopolitique des ressources naturelles dans de nombreux établissements. Il est chercheur associé à Economix (EconomiX-CNRS, Université Paris Nanterre) et directeur de recherche à l'IRIS. Il est également expert à l'Observatoire des ressources minérales pour les filières industrielles (OFREMI). Il est l'auteur du livre *Géopolitique des énergies, tensions d'un monde en mutation* paru aux Éditions Eyrolles en septembre 2022 et de plus de cinquante articles dans des revues académiques françaises et internationales.



D.R

**Félix LALLEMAND** est docteur en écologie. Il travaille depuis 2018 sur la vulnérabilité des systèmes alimentaires face aux limites planétaires (dérèglement du climat et de la biosphère, épuisement des ressources énergétiques et minières, etc.). Il a cofondé l'association Les Greniers d'Abondance et contribue aux activités de recherche et de sensibilisation portées par celle-ci.

Il a coordonné le projet de recherche-action ORSAT (Organiser la Résilience des Systèmes Alimentaires Territoriaux) financé par l'ADEME et l'École Urbaine de Lyon ainsi que l'écriture des rapports « Vers la résilience alimentaire, faire face aux menaces globales à l'échelle des territoires » (2020) et « Qui veille au grain ? Sécurité alimentaire : une affaire d'État » (2022), tous deux publiés aux éditions Yves Michel.



D.R

**Jan Willem Storm van LEEUWEN** est consultant en chimie et en systèmes énergétiques. Storm van Leeuwen est titulaire d'un *Master of Science* en physique chimie de l'Université technique d'Eindhoven.

Ses deux domaines d'expertise sont l'évaluation des technologies et l'analyse du cycle de vie des systèmes énergétiques, avec un accent particulier sur les aspects liés à la durabilité. Il a publié de nombreux rapports et articles sur divers sujets liés à l'énergie et à l'environnement, y compris dans des revues scientifiques à comité de lecture. Sa première publication internationale sur les perspectives de l'énergie nucléaire s'intitule "Nuclear uncertainties: Energy loans for fission power" dans la revue *Energy Policy*.

Storm van Leeuwen a également présenté ses travaux antérieurs dans le cadre d'un autre document controversé non évalué par des pairs, intitulé "Secure energy? Civil nuclear power, security and global warming", publié par un groupe de réflexion, l'Oxford Research Group, un institut non affilié à l'université d'Oxford, dans lequel il affirme que l'énergie nucléaire ne réduit pas à long terme les émissions de gaz à effet de serre.

Ses résultats originaux ont été utilisés dans une étude intitulée "Life cycle energy and greenhouse gas emissions of nuclear energy: A review. Energy conversion and management" – avec plusieurs modifications.

Storm van Leeuwen a donné des conférences et des présentations sur l'énergie nucléaire lors d'une quinzaine de congrès internationaux.

Storm van Leeuwen est reconnu par Open Democracy comme l'un de ses auteurs notables. Il est membre du Nuclear Consulting Group.

Les résultats de ses études sont compilés sur le site web [www.stormsmith.nl](http://www.stormsmith.nl).



D.R

**Michel LEPETIT** est diplômé de l'École Polytechnique, il a fait toute sa carrière dans le secteur financier, et est un spécialiste de la régulation financière appliquée à la transition énergétique et climatique. Il a créé une banque spécialisée dans l'économie locale, et a été dirigeant de banques, de sociétés de gestion d'actif dans les groupes Paribas, Crédit local

de France, Caisse d'épargne et AXA, de 1987 à 2009. Il est vice-président co-fondateur en 2010 de The Shift Project, *think tank* leader en France de la transition bas-carbone ; créateur et porte-parole du projet RISKERGY (2012-2016) de modélisation macroéconomique ayant débouché sur la création de la société Beyond Rating d'analyse du risque énergétique et climatique souverain qu'il a co-fondée (2015) ; créateur et porte-parole du programme SFTE (2013-2014), programme de financement massif de rénovation bas-carbone des bâtiments publics en Europe.

Concepteur et porte-parole du projet de réforme macroéconomique de l'épargne IN GLOBO (2018-). Il est administrateur (2004-) d'une Cie d'assurance vie (Neuflize Vie, filiale des groupes ABN AMRO et AXA ; dont il préside le Comité risque et stratégie), d'un opérateur télécom. Il est chercheur associé au LIED (Laboratoire interdisciplinaire des énergies de demain ; Université Paris Cité) en histoire globale de l'énergie, expert de la chaire académique d'économie Énergie et prospérité, et membre d'ASPO France (association pour l'étude des pics pétrolier et gazier). Il publie des prises de position et des travaux historiques dans des revues professionnelles, et sur son site LinkedIn.

Depuis 2015, il propose occasionnellement des contributions en réponse aux sollicitations des régulateurs de la finance (BRI ; ESAs ; Trésor...), et participe au débat

sur la crise macro-prudentielle de la (ré)assurance des risques climatiques et ses conséquences.

Il est trésorier du groupe associatif Vivre & Devenir – Villepinte St Michel et Président de l'association Hôpital Saint-Michel et Saint-Vincent.



D.R

**Alain LIGER** dispose d'une expérience de haut niveau sur la mise en valeur des ressources minérales.

Ancien élève de Mines ParisTech, il a tenu des positions opérationnelles et de responsabilité stratégique d'exploration-développement dans l'industrie minière, dans le groupe minier français BRGM pendant 17 ans puis dans le groupe minier et métallurgique britannique Billiton Plc (maintenant incorporé à BHP) pendant 4 ans. Il a assuré la négociation de nouvelles zones d'exploration et l'encadrement de projets dans de nombreux pays.

De 2002 à 2013, il a représenté en tant que directeur régional le ministère de l'Industrie en Alsace puis le ministère du développement durable en Lorraine. De 2013 à 2016, il a été membre du Conseil général de l'économie, de l'industrie, de l'énergie et des technologies aux ministères économiques et financiers ; il y a entre autres été secrétaire général du COMES – Comité pour les métaux stratégiques – et président du Comité de pilotage de l'initiative « Mine responsable » lancée en 2015.

Alain Liger est actuellement membre du Conseil d'administration de La Française de l'Énergie, producteur de gaz à impact carbone négatif, et bénévole de la Société de l'industrie minière.

**Pierre-Yves LONGARETTI** est chercheur au CNRS et à l'INRIA. Depuis le milieu des années 2000, il a progressivement abandonné son activité d'astrophysicien théoricien pour s'intéresser à différentes problématiques socio-environnementales. Dans ce cadre, son activité de recherche principale porte depuis quelques années sur les risques systémiques globaux. Il a co-fondé l'équipe STEEP avec Emmanuel Prados.



D.R

**Louis-Marie MALBEC** est économiste prospectiviste à IFP Énergies nouvelles. Il est Docteur en Énergétique et Environnement (Université d'Orléans). Il travaille sur les questions de prospective énergétique, avec une spécialisation sur le déploiement d'une économie de l'hydrogène et sur les besoins en ressources minérales de la transition énergétique.

Il est également expert à l'Observatoire des ressources minérales pour les filières industrielles (OFREMI).



**Victoire de MARGERIE** est fondatrice du World Materials Forum, dont elle est la vice-présidente depuis 2014. Elle est aussi le principal actionnaire et préside la PME de micromécanique Rondol Industrie depuis 2012. Elle est administrateur d'Arkema depuis 2012 et d'Ivanhoe Electric (USA) depuis juin 2022.

Elle a auparavant occupé des fonctions industrielles opérationnelles en Allemagne, en France et aux États-Unis, chez Arkema, Carnaud MetalBox et Pêchiney.

Elle a aussi enseigné la stratégie et le management technologique à Grenoble École de management.

Victoire de Margerie occupe des fonctions d'administrateur de sociétés cotées depuis 1999, notamment chez Baccarat, Bourbon, Outokumpu, Ciments français/Italcementi, Norsk Hydro et Morgan Advanced Materials.

Victoire de Margerie est diplômée de l'École des hautes études commerciales (HEC, 1983) et de l'Institut d'études politiques (IEP) de Paris (1986). Elle est titulaire d'un DESS de droit privé de Paris I Panthéon-Sorbonne (1988) et d'un Doctorat de sciences de gestion de l'Université de Paris II Panthéon-Assas (2007).



D.R

**Didier PILLET** est ingénieur général des Mines et diplômé de Télécom Paris Tech. Après avoir exercé plusieurs fonctions opérationnelles de R&D dans le secteur industriel, il a intégré en 2009 le Conseil général de l'Économie, de l'Industrie, de l'Énergie et des Technologies (CGE). Au sein du CGE, il effectue des missions ministérielles ou interministérielles d'expertise, d'audit et d'inspection, liées notamment à l'industrie, à l'énergie et au développement durable.

**Emmanuel PRADOS** est le fondateur de l'équipe STEEP. Ses activités scientifiques portent sur l'analyse et la modélisation des risques systémiques globaux ainsi que des alternatives sociotechniques. Il s'intéresse aux différentes questions et enjeux liés à la transition écologique – en particulier à l'identification des verrouillages et des leviers d'actions – à l'échelle des territoires, ainsi qu'aux questions de gouvernance et de démocratie.

**François RODDIER** est un physicien et astronome français connu pour ses travaux sur la turbulence atmosphérique et les méthodes d'observation à haute résolution angulaire (interférométrie, optique adaptative) aux universités de Nice puis de Hawaï. Depuis sa retraite de l'université en 2000, il s'intéresse aux lois de la thermodynamique et aux systèmes complexes. Après avoir montré dans *Thermodynamique de l'évolution* (2012) combien ces lois et en particulier les processus de dissipation maximale d'entropie pouvaient s'appliquer autant en physique qu'en biologie ou en



D.R

sociologie, il s'est penché sur le rôle et le comportement erratique de l'économie qu'il a décrit dans *De la thermodynamique à l'économie* (2018).

**Mireille RODDIER** est professeure associée et directrice du programme de premier cycle en architecture à l'université du Michigan, Ann Arbor. Sa

recherche se porte sur l'équilibre urbain entre désinvestissement et gentrification ; sur la représentation et esthétisation des effondrements, notamment à Detroit ; et suite à une année en tant que pensionnaire de l'Académie Américaine à Rome en 2021, sur la dissémination des standards esthétiques comme outils coloniaux et la préservation des vernaculaires comme forme de résistance.



**Emma STOKKING** est cheffe de projet Affaires Publiques au Shift Project. Créé en 2010 par Jean-Marc Jancovici, Michel Lepetit et Geneviève Ferone-Creuzet, The Shift Project est un *think tank* qui œuvre en faveur d'une économie libérée de la contrainte carbone. Association loi 1901 d'intérêt général, guidée par l'exigence de la rigueur scientifique, sa mission consiste à éclairer et à influencer le débat sur la transition énergétique en France et en Europe. Tous les travaux publiés par The Shift Project sont accessibles sur le site <https://theshiftproject.org>.



D.R

**Jacques TREINER** est chercheur associé au Laboratoire Interdisciplinaire des Énergies de Demain et président du Comité d'experts du Shift Project.

Jacques Treiner a fait paraître une centaine d'articles et d'ouvrages de physique théorique, notamment dans le domaine des fluides quantiques. Il a été professeur à l'Université Pierre et Marie Curie à Paris et a publié des ouvrages de vulgarisation comme « Quel est l'âge de la Terre ? » aux éditions du Pommier (septembre 2011, nouvelle édition juin 2022) et « Un peu de science, ça ne peut pas faire de mal », aux éditions Cassini (juillet 2017). Il a traduit plusieurs ouvrages, dont les *Marchands de Doute*, de Naomi Oreskès et Érik Conway (Éd. Le Pommier). Il a également réalisé trois films scientifiques, et co-écrit avec Olivier Treiner une pièce de théâtre intitulée « Fission », produite par le théâtre de la Reine Blanche et jouée en 2016. Il intervient comme conférencier sur l'anthropocène et l'articulation des problématiques énergétiques, démographiques et climatiques. Il est aujourd'hui chercheur associé au Laboratoire interdisciplinaire des énergies de demain (LIED) de l'Université Paris-Diderot et préside le Conseil des experts du Shift Project.