

L'énergie en 2050

Marc FONTECAVE

LES CARNETS DE L'INSTITUT DIDEROT

L'énergie en 2050

Marc FONTECAVE

Professeur au Collège de France

DÉCEMBRE 2023

Sommaire

Avant-propos

André Comte-Sponville

p. 7

L'énergie en 2050

Marc Fontecave

p. 13

Questions de la salle

p. 41

Les publications de l'Institut Diderot

p. 67

Avant-propos

Poursuivant nos travaux de prospective à moyen terme, autour de l'année-cible 2050, nous ne pouvions éviter la question énergétique, si évidemment décisive. Aussi avons-nous demandé à Marc Fontecave, professeur au Collège de France et membre de l'Académie des sciences (où il préside le Comité de prospective en énergie), de nous dire ce qu'on pouvait raisonnablement espérer ou redouter dans ce domaine, et surtout ce qu'il était à la fois possible et nécessaire de faire. Merci à lui d'avoir répondu à nos interrogations, dans son exposé comme dans le débat qui suivit, avec autant de compétence, de clarté, d'honnêteté, et j'oserai dire de courage. Il est facile de se payer de mots et de bons sentiments, que ce soit pour rassurer ou pour faire peur. Plus difficile (mais aussi plus utile) d'être lucide et pragmatique. Comment transformer le réel, si on ne se donne pas d'abord les moyens de le voir tel qu'il est ?

Notre orateur commença par doucher quelques espoirs trop confortables : non, nous n'aurons pas atteint le

« zéro carbone » en 2050, pas plus que nous n'aurons limité le réchauffement climatique à 1,5 °C en 2100 ! Ces objectifs irréalistes, pour souhaitables qu'ils fussent dans leur inspiration, sont en vérité contre-productifs : d'abord parce qu'ils poussent à différer les efforts si urgents d'adaptation au réchauffement climatique (concernant par exemple l'habitat, l'aménagement du territoire ou la gestion de l'eau et des forêts), ensuite parce qu'ils décrédibilisent la parole, déjà si souvent suspectée, des politiques ou des experts. Quand on promet l'impossible, comment n'être pas, tôt ou tard, accusé d'échec ou de mensonge ? Par quoi l'irréalisme, même bien intentionné, fait le jeu du populisme, voire de l'obscurantisme.

Que faire ? Renoncer à la croissance ? Ce serait aggraver le problème au lieu de le résoudre. La transition énergétique va coûter extrêmement cher (« une centaine de milliards par an », rien que pour la France) : impossible de la financer sans croissance. Au demeurant, et contrairement à une idée trop répandue, « plus le PIB par tête est élevé, mieux l'on traite l'environnement ». Les pays pauvres, même s'ils produisent moins de gaz à effet de serre, dégradent d'autant plus l'environnement, bien sûr à leur corps défendant, qu'ils n'ont pas les moyens de le traiter efficacement. C'est où l'écologie et l'économie vont ensemble. Non, certes, que l'écologie soit un luxe, dont on pourrait se passer. Mais c'est un investissement, qui ne se fera pas sans création de richesse.

« Il faut donc de la croissance », résume Marc Fontecave, et l'enjeu crucial est dès lors de « découpler croissance et

émissions de CO₂ ». Est-ce possible ? Oui, puisque ce processus de transition énergétique est déjà engagé. Reste à le poursuivre et à l'intensifier. Nous aurons besoin pour cela d'économiser l'énergie (que ce soit par plus de sobriété ou plus d'efficacité), mais aussi et surtout d'augmenter, au sein du « mix énergétique », la part de l'électricité, à condition que celle-ci soit de plus en plus décarbonée ou, pour mieux dire (puisque « tout est carbone »), « défossilisée », c'est-à-dire issue du nucléaire ou des énergies renouvelables. Cette transformation, qui sera lente et difficile, le serait encore plus sans le nucléaire (preuve en est que l'Allemagne, qui a si fortement développé le solaire et l'éolien, est l'un des pays européens les plus émetteurs de gaz à effet de serre). Notre intervenant appelle donc à une stratégie énergétique tous azimuts, incluant bien sûr des énergies renouvelables (éolien, solaire, hydroélectrique...) mais aussi du nucléaire et du gaz (ce dernier si possible issu de la biomasse), sans oublier l'utilisation souhaitable du « carbone capturé ».

Cela ne suffira pas à assurer notre indépendance énergétique : nous risquons de passer d'une dépendance aux fossiles à une dépendance (notamment vis-à-vis de la Chine) aux métaux, terres rares et autres composants nécessaires à la transition énergétique. C'est dire à quel point cette dernière sera complexe, progressive et difficile. Raison de plus pour nous y consacrer sans attendre, et résolument. Cela exigera beaucoup de travail, de la part des scientifiques, beaucoup de recherches, d'innovations et d'investissements, notamment de la part des entreprises, mais aussi une ferme et constante volonté

politique, dont la France, ces dernières années, n'a pas toujours donné l'exemple (souvenons-nous des valse-hésitations de nos gouvernants, concernant le nucléaire). Il est urgent de faire de la transition énergétique, de plus en plus, la priorité qu'elle est déjà. Nous n'y parviendrons pas en nous abandonnant aux sirènes catastrophistes et démobilisatrices des « collapsologues », ni même des décroissants, mais en cherchant un consensus politique, au moins partiel, entre partis de gouvernement, « non à coups d'affichages irréalistes », avertit Marc Fontecave, « mais d'engagements crédibles ». Ce sera, pour nos démocraties, l'un des enjeux décisifs des prochaines années.

Le débat confirma la complexité du problème, incluant notamment le rôle de l'agriculture, celui de l'hydrogène, des financements publics ou privés, de la fusion et des déchets nucléaires, des entreprises grosses ou petites, de la réglementation européenne ou de l'aménagement du territoire. Vaste et décisif chantier, qui suppose, conclut notre orateur, qu'on revienne « à un discours courageux dans l'explicitation des problématiques et l'élaboration des solutions ». Nous avons besoin d'une « révolution technologique majeure », déjà commencée et qu'il importe de poursuivre. Bien loin qu'il faille renoncer au progrès pour « sauver la planète », comme le voudraient certains technophobes, il faut au contraire le poursuivre et l'accélérer – non pour sauver la planète, qui nous survivra, mais pour préserver l'avenir et le bien-être de l'humanité (donc aussi, puisque les deux sont indissociables, de la biosphère). Pas question de nier la gravité du dérèglement climatique, ni l'urgence de trouver des

solutions. Mais elles sont devant nous, point derrière.
Encore faut-il s'en donner les moyens.

André Comte-Sponville
Directeur général de l'Institut Diderot

L'énergie en 2050

en 2050

Contrairement à ce que l'on dit souvent, la transition énergétique est déjà engagée, que ce soit par les États, les entreprises ou les individus. Et je crois, comme d'autres, qu'avant de remonter dans les arbres, nous devons d'abord tenter la solution de la recherche, de l'innovation et de la technologie, en nous appuyant sur la capacité de l'homme à affronter les problèmes et à les résoudre – au moins en partie. Cela ouvre le débat entre ceux qui pensent qu'il faut de la croissance, dont je suis, et ceux qui pensent, au contraire, qu'il faut de la décroissance. Ne croyez pas, en tous les cas, ceux qui prétendent que la transition énergétique se fera en quelques années. Aucune révolution énergétique ne s'est faite ainsi, ni même en quelques décennies. Si l'on y réfléchit, la révolution industrielle est d'ailleurs encore absente de toute une partie du monde. La transition énergétique prendra du temps. Remplacer les fossiles est difficile en raison de nombreuses contraintes, physiques, économiques, sociales. La manie d'annoncer des objectifs inatteignables est catastrophique, car, comme ils sont inatteignables, ils ne seront pas atteints, et comme ils ne seront pas atteints, le citoyen aura raison de nous prendre

soit pour des incompetents, soit pour des menteurs. Ce qui est très mauvais dans une situation où la défiance vis-à-vis des politiques, des entreprises, des experts, voire des scientifiques, est grande. Enfin, comme j'aurai l'occasion de le souligner, sans malheureusement pouvoir y revenir, la transition implique aussi l'adaptation au réchauffement climatique.

I. DES OBJECTIFS IRRÉALISTES : LE ZÉRO CARBONE ET LA LIMITE DES 1,5 °C

Examinons, pour commencer, les objectifs régulièrement affichés à horizon 2050. Le premier d'entre eux, c'est zéro carbone. Il faut être clair : il n'y aura pas zéro carbone en 2050. D'abord, parce que c'est un problème global : la France ne représente qu'1 % environ des émissions de CO₂, comme l'Angleterre ou l'Italie, tandis que l'Allemagne se situe plutôt aux alentours de 3 %, la Russie de 5 %, l'Inde de 7 %, les États-Unis de 15 % et la Chine au-delà des 25 %. Certains pays produisent beaucoup plus, émettent beaucoup plus. Il y aura encore des fossiles pour un certain temps, parce qu'il est difficile de s'en séparer. De nombreux pays continueront à les utiliser ; la population mondiale va augmenter ; nous aurons des besoins massifs en carbone, qu'il soit fossile ou pas, car tout ne sera pas électrique, notamment pour les véhicules. Par ailleurs, notre électricité ne sera pas à 100 % renouvelable. La construction massive de nouvelles centrales nucléaires et de parcs éoliens et solaires va demander des quantités considérables d'énergie et de matériaux,

en particulier de matériaux émetteurs de CO₂ (ciment, acier, etc.). Enfin, ceux qui veulent maintenir le fossile très longtemps proposent de capter le CO₂ partout où on l'émet, mais il est certain que nous ne pourrions pas le capturer et le séquestrer dans son intégralité.

Il ne s'agit pas, ici, de pointer simplement du doigt la Chine ou les États-Unis, parce qu'en Europe, nous ne sommes guère plus brillants. La France n'a pas été capable de fermer les quelques centrales à charbon qui lui restaient, malgré la volonté politique. Quand vous examinez les agendas des différents pays européens, vous constatez que l'arrêt annoncé des centrales à charbon s'étend jusqu'en 2040 pour la Bulgarie et 2038 pour l'Allemagne, tandis que d'autres pays, comme la Pologne ou la Bosnie, n'annoncent toujours pas de calendrier officiel de sortie. Cela veut dire que même l'Europe n'a pas encore décidé unanimement d'arrêter le charbon, le fossile de loin le plus émetteur de CO₂. Nous pouvons donner des leçons aux autres : il vaudrait mieux commencer par balayer devant notre propre porte. La réalité est bien celle que relevait un rapport de l'Agence Internationale de l'Énergie en 2023, qui soulignait que, cette année, « le monde n'aura jamais autant consommé de pétrole » et prévoyait même une hausse de ses prévisions à 102,2 millions de barils par jour, le niveau le plus élevé jamais enregistré. Dans le même temps, le Royaume-Uni délivrait une centaine de nouveaux permis d'exploitation gazière et pétrolière en mer du Nord et annonçait que pétrole et gaz représenteraient encore un quart de l'énergie du pays en 2050.

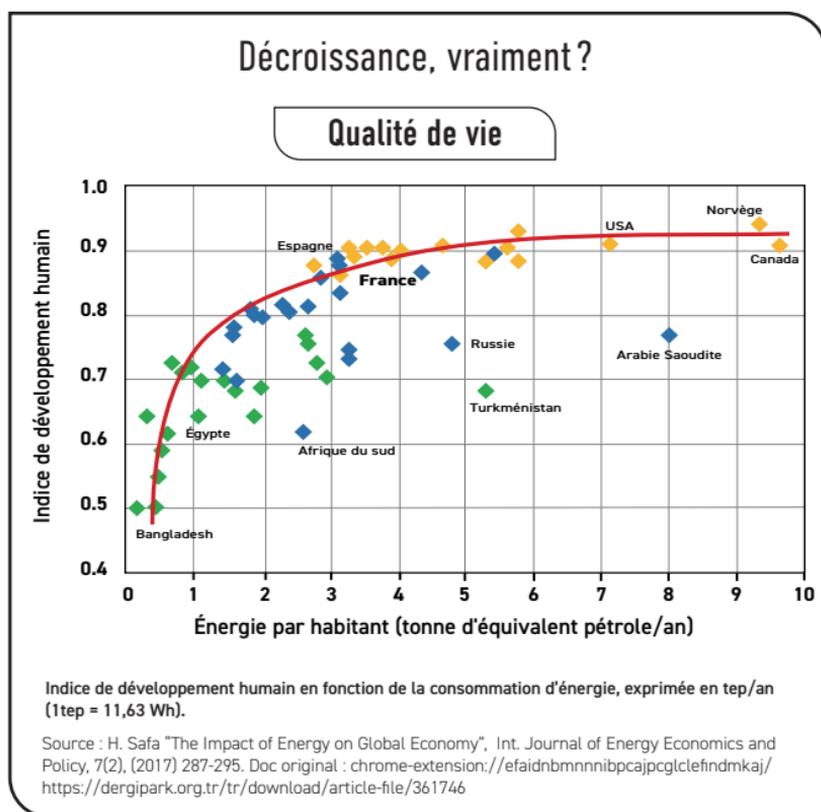
Voilà donc la réalité : zéro carbone, cela sera très compliqué. Prenons le simple cas du véhicule électrique : l'Europe a décidé d'interdire la vente de véhicules thermiques à horizon 2035. Tout le monde s'en est félicité en imaginant que cela nous projetait dans un système de transport à zéro carbone. Mais cela est faux. Aujourd'hui, il y a environ un milliard de véhicules sur Terre. Les perspectives les plus ambitieuses en matière de véhicules électriques prévoient 500 millions de véhicules électriques à horizon 2040-2050, mais il faut souligner que, sur la même période, l'ensemble des véhicules sur Terre atteindra 1,5 ou 1,6 milliard. Il y aura donc, malgré tout, autant de véhicules thermiques en 2040-2050 qu'aujourd'hui. Par ailleurs, il faut se garder d'imaginer qu'un véhicule électrique représente nécessairement une économie importante en termes d'émissions carbone. La situation varie fortement selon les mix électriques des différents pays : si l'on compare les émissions de CO₂ par kilomètre roulé entre les voitures diesel et électriques, dans le meilleur des cas, comme en France, par exemple, où la production électrique est très décarbonée, on ne réduit les émissions que des deux tiers. Mais en Pologne ou en Inde, où l'électricité mise dans les voitures est essentiellement carbonée, la différence entre véhicule thermique et électrique est quasi nulle.

Un autre objectif régulièrement affiché est de rester dans les limites de +1,5 °C en 2100, par rapport à la température préindustrielle. Nous pouvons nous demander pourquoi la température préindustrielle devrait être notre cible, mais quoi qu'il en soit la question du réchauffement

climatique est absolument clé, puisque l'on connaît les impacts terribles que celui-ci va entraîner. Nous avons donc totalement raison de vouloir la traiter. En revanche, nous n'arriverons jamais, malgré tous nos efforts, à rester dans la limite des +1,5 °C en 2100. D'ailleurs, on le constate dans un pays comme la France, qui a déjà pratiquement atteint un tel niveau. L'élévation de la température est en effet, à l'échelle globale, de +1,1 / 1,2 °C, mais il existe des régions du monde où elle est encore plus importante, et c'est le cas en France. Les scénarios les plus probables mis en avant par les climatologues tournent plutôt autour de +2,5 / 3 °C. Cette augmentation est colossale, tout comme les impacts qu'elle engendrera, de sorte que se pose de manière très urgente la question de l'adaptation au changement climatique. À force de répéter que nous allons nous efforcer de rester dans les +1,5 °C, nous risquons de ne pas suffisamment nous préoccuper de cet enjeu, qui concerne tout un ensemble de domaines que je n'ai malheureusement pas le temps de développer, comme l'habitat, la protection des usines, des services publics, l'aménagement du territoire, l'urbanisme, l'adaptation des services hospitaliers, la gestion de l'eau, des forêts, l'optimisation des forces d'intervention ou le problème des assurances. On nous avait d'ailleurs annoncé un plan national d'adaptation au changement climatique pour fin 2023 et, à ma connaissance, il n'est pas prêt.

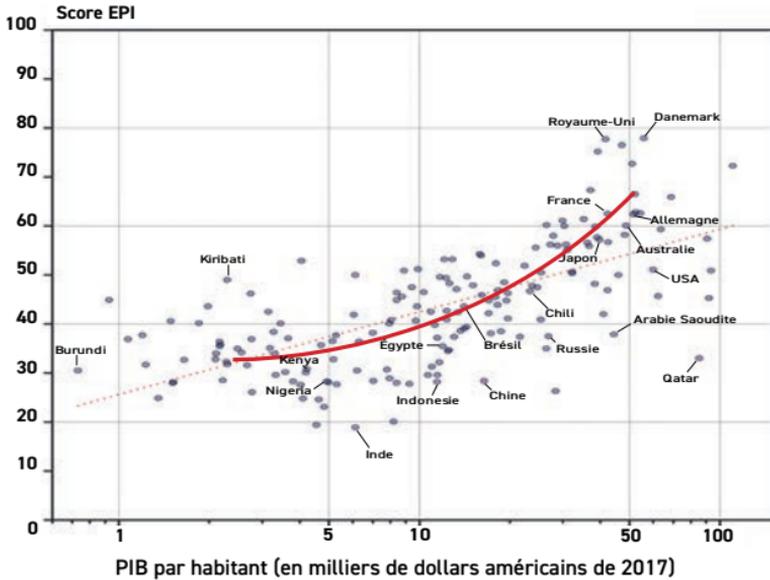
II. MARIER LA CROISSANCE ET LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT

Quels que soient les indices de qualité de vie que vous choisissiez, tout démontre que plus vous consommez de l'énergie, plus votre PIB est élevé, mieux vous traitez l'environnement et meilleure est votre qualité de vie. Le graphique ci-dessous représente un indice de l'UNESCO, l'indice de développement humain, qui prend en compte un certain nombre de paramètres : l'espérance de vie en bonne santé, la formation, le niveau de vie, etc. Comme on peut le constater, tout cela requiert de l'énergie.



Environnement

Indice de performance environnementale <https://epi.yale.edu>



Le score EPI est obtenu à l'aide de divers indicateurs : émissions de GES, qualité de l'air (pollution), propreté de l'eau, gestion de la biodiversité, gestion des forêts, gestion des ressources halieutiques, durabilité des systèmes agricoles.

Source : Wolf, M. J., Emerson, J. W., Esty, D. C., de Sherbinin, A., Wendling, Z. A., et al. (2022). 2022 Environmental Performance Index. New Haven, CT: Yale Center for Environmental Law & Policy. epi.yale.edu

Le graphique ci-dessus permet, quant à lui, de faire apparaître un autre point important : pour traiter des questions environnementales, y compris énergétiques, nous devons disposer de moyens absolument colossaux. Ainsi, en France, il faudra investir environ une centaine de milliards par an dans la transition énergétique. Si nous ne produisons pas, si nous n'avons pas les ressources financières pour le faire, nous n'y arriverons pas. L'indice du graphique ci-dessus a été mis en place par les universités de Yale et de Columbia : il prend en compte tout un

ensemble d'indicateurs, non seulement les émissions de gaz à effet de serre, mais aussi la qualité de l'air, de l'eau, la biodiversité, les forêts, les systèmes agricoles. Et, comme on peut le constater, plus le PIB par tête est élevé, mieux l'on traite l'environnement. En quelque sorte, j'ose le dire même si quand j'ai dit ça j'ai été souvent attaqué, ce sont les pays pauvres qui dégradent l'environnement. Il n'y a pas que la question des gaz à effet de serre. Il ne s'agit pas de les pointer du doigt, mais de dire simplement qu'ils n'ont pas les moyens de bien traiter leur environnement, car le faire coûte très cher.

Il faut donc de la croissance. Le grand enjeu tient, dès lors, à découpler croissance et émissions de CO₂. Est-ce possible? Si, effectivement, la croissance supposait obligatoirement beaucoup plus d'émissions, ce problème serait insoluble. Heureusement, il est possible de combiner croissance et baisse d'émissions. C'est le cas notamment aux États-Unis et en Europe, où l'on constate des baisses d'émissions en même temps que des augmentations du PIB (Voir page 21).

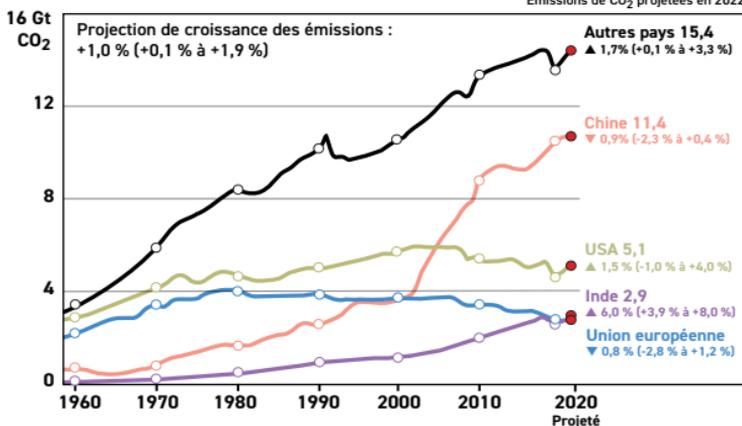
Dans le cas des États-Unis, cela s'explique essentiellement par le remplacement du charbon par le gaz de schiste, lequel est infiniment moins émetteur. Le gaz est d'ailleurs le dernier fossile qui restera, une fois que nous nous serons débarrassés du charbon puis du pétrole. Pour l'Europe, l'explication est moins claire. Elle tient en partie à la désindustrialisation de l'Europe, ce qui n'est évidemment pas une excellente chose. Mais cette désindustrialisation n'explique cependant pas tout.

Découplage croissance/émissions ?

Émissions de CO₂

Émissions annuelles de CO₂ liées aux fossiles et projections pour 2022

Emissions de CO₂ projetées en 2022

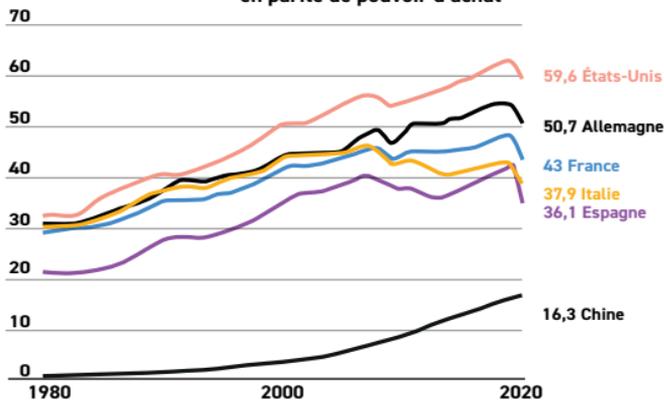


Europe : baisse des émissions de 35 % par habitant depuis 1980

Source : GCP, 2022 / Global Carbon Project

PIB

Évolution du PIB par habitant, en milliers de dollars constants, en parité de pouvoir d'achat



Europe : augmentation du PIB de 50 % par habitant depuis 1980

Sources : FMI, Eurostat, Rexocode, Iéseg, ONU, WIL, Natixis

III. QUELS SCÉNARIOS POUR 2050 ?

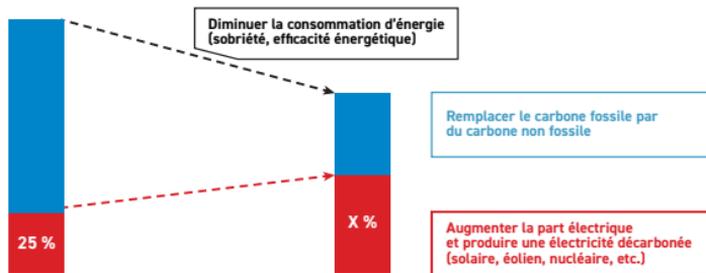
Tous les scénarios de prospective montrent qu'en 2050, nous aurons une consommation d'énergie encore plus grande qu'aujourd'hui. Elle devrait passer de 120 péta-wattheures (PWh) par an à près de 160 PWh. Par ailleurs, de nombreux scénarios estiment que la part de l'électrique va connaître, à partir de 2030, une augmentation bien plus importante. Aujourd'hui, elle est à l'échelle mondiale de l'ordre de 17 % et certains scénarios estiment qu'en 2050 elle en atteindra près de 60-65 %.

Pour la France, nous pouvons nous arrêter sur le scénario de référence proposé par le Réseau de Transport d'Électricité (RTE), illustré par les graphiques de la page 23.

La transition énergétique suppose trois choses. D'abord, elle implique de diminuer notre consommation d'énergie, avec une part de sobriété et un effort pour améliorer l'efficacité énergétique. Cela inclut aussi le remplacement de certaines formes d'énergie consacrées à un usage donné par une autre forme moins consommatrice. C'est par exemple le cas entre véhicule thermique et véhicule électrique, dans un pays comme le nôtre, où l'électricité est fortement décarbonée. Ensuite, il s'agit d'augmenter la part de l'électrique : il va falloir fortement électrifier avec de l'électricité décarbonée. Enfin, la troisième chose qu'il convient de souligner, c'est que tout ne sera pas et ne pourra pas être électrique. On l'oublie trop souvent, et c'est d'ailleurs un des angles morts de la plupart des scénarios. La France se situe à peu près, aujourd'hui, à

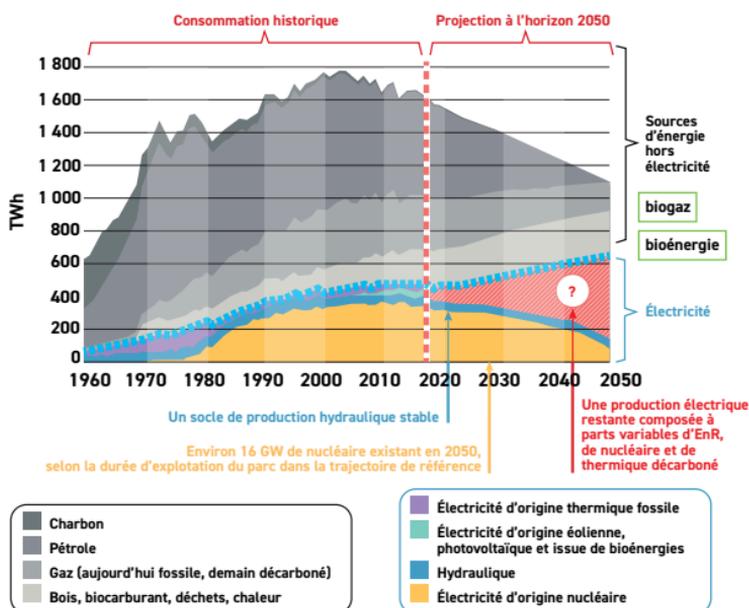
Scénarios 2050 (France)

Scénario de référence RTE



Deux enjeux majeurs de la transition :

- ✓ Augmenter la consommation électrique (470 TWh à 550-640-750-900 TWh ?)
- ✓ Trouver de nouvelles sources de carbone (au moins 400 TWh)



Sources : FMI, Eurostat, Rexocode, Ieseq, ONU, WIL, Natixis - RTE.

1 600 TWh de consommation. Le scénario RTE envisage une baisse assez drastique de la consommation (pour arriver à 1 100 TWh en 2050) ce qui, à mon avis, n'est pas

raisonnable, ainsi qu'une augmentation de la part de l'électrique, qui devrait approcher les 50 % (avec un mix électrique augmenté contenant à la fois des énergies renouvelables et du nucléaire, en rouge et jaune dans la figure), alors qu'aujourd'hui elle est plutôt à 25 %, ce qui est déjà au-dessus de la moyenne mondiale. Par ailleurs, le scénario souligne bien que toute une partie de l'énergie ne sera pas électrique, et la nature de cette énergie reste peu discutée. Tout le monde pense que cette partie serait issue de la biomasse (biogaz, bio-carburants divers, bois, etc.), ce qui soulève de nombreux problèmes. Comment va-t-on obtenir près de 450 TWh d'énergie non électrique – c'est à-dire ni nucléaire, ni éolien, ni solaire – sans fossile ? C'est une question extrêmement difficile de mon point de vue.

La dernière déclaration du gouvernement français en matière de perspective énergétique date du 21 novembre 2023. Ce sont des éléments de préparation de la Loi de Programmation Pluriannuelle de l'Énergie 2024 ¹.

1. Les principaux éléments de la Loi de Programmation de 2024 sont les suivants :

- **Diminution de la part des fossiles dans la consommation d'énergie** de 60 % (2023) à 42 % en 2030, puis à 29 % en 2035.
- **Diminution de notre consommation d'énergie** de 40-50 % (-640 à -800 TWh) entre 2021 et 2050 en passant de 1600 TWh à 800-1000 TWh (2050), et de 30 % (-500 TWh) entre 2012 et 2030, en passant de 1700 TWh à 1200 TWh.
- **Augmentation de la production d'électricité** de 22 % (+ 100 TWh) entre 2021 et 2035, en passant de 470 TWh à 570 TWh (2035), et de 55 % (+ 260 TWh) entre 2021 et 2050, en passant de 470 TWh à 730 TWh.
- **Installation massive de capacités d'ENRs** : éolien + 18 GW (éolien en mer) d'ici 2035, en passant de 17 GW à 35 GW (2035). PV + 60 GW d'ici 2035, en passant de 15 GW à 70 GW (2035).
- **Relance du nucléaire** : prolongation du parc nucléaire au-delà de 50 ans (voire 60 ans) ; 6 nouveaux EPR et décision pour 8 supplémentaires en 2026 ; lancement d'un premier SMR (2030).
- **Développement du biogaz** : multiplication par 5 des capacités d'ici 2030 en passant de 10 TWh à 50 TWh (2030).

On s'y trouve directement confronté à cette manie, que j'évoquais précédemment, d'annoncer des objectifs inatteignables. Les perspectives annoncées posent en effet énormément de problèmes, en particulier l'objectif visant à diminuer notre consommation d'énergie de près de 50 % d'ici 2050 : dans le scénario le plus extrême, on arriverait ainsi à 800 TWh, ce qui est absolument affolant. Il faut savoir que la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) et ce type de perspective s'alignent strictement sur les scénarios les plus décroissantistes, en particulier ceux de négaWatt, lesquels ont au moins l'honnêteté de nous expliquer ce que cela signifierait de vivre avec 800/900 TWh². J'espère que nous arriverons à éviter cela ! Par ailleurs, les perspectives envisagées tablent sur une augmentation massive d'électricité. Cela fait 25 ans qu'on se situe à peu près à 450/470 TWh de consommation électrique et il est proposé qu'en 2035, soit dans dix ans, nous passions à 100 TWh de plus, soit 570 TWh, pour atteindre 730 TWh en 2050. Or, pour le moment, nous n'avons pas de réacteurs nucléaires supplémentaires et nous avons un mal fou à construire des parcs éoliens en mer : c'est donc extrêmement ambitieux ! Il faudrait d'ici 2035 l'équivalent de 36 parcs éoliens offshore de type Saint-Nazaire... Nous avons mis quinze ans pour mettre Saint-Nazaire en place, par conséquent cela semble très peu probable. Cela supposerait aussi la relance du nucléaire, avec le fameux discours de Belfort du président de la République, qui propose

2. <https://www.negawatt.org/IMG/pdf/scenario-negawatt-2022-rapport-complet-partie5.pdf>.

de revenir sur la position française en la matière, de prolonger le parc au-delà de 50 ans, de construire de nouveaux EPR³ et de lancer un premier SMR⁴ en 2030. Pour atteindre cet objectif ambitieux, il est urgent de relancer l'industrie électronucléaire. Il s'agirait par ailleurs de développer le biogaz et de multiplier par cinq nos capacités d'ici 2030, pour atteindre 50 TWh, ce qui est absolument colossal et peu crédible.

IV. DÉFOSSILISER = ÉLECTRIFIER ?

Notre premier objectif doit consister à défossiliser au maximum. Je ne sais pas si le terme existe, mais je l'utilise parce que je me refuse à dire décarboner, dans la mesure où le monde ne sera jamais décarboné. Tout est carboné : nous sommes tous constitués de carbone, tout ce qui est dans cette pièce possède du carbone, et demain, il en sera de même. Il n'y aura pas de planète décarbonée. En revanche, il faut défossiliser et, pour cela, il faut électrifier. L'objectif est de se débarrasser des ressources fossiles en les remplaçant par des ressources d'énergie bas carbone : pour l'essentiel, à part la biomasse, des ressources électriques (nucléaire, éolien, solaire, hydraulique). La différence d'émissions de CO₂ entre les différents types d'énergie est, de fait, sans appel. Les énergies électriques ont les émissions suivantes : le nucléaire émet 6 g CO₂/KWh, l'hydraulique 11, l'éolien 12 et le solaire 30.

3. Les EPR, *Evolutionary Pressurized Reactor*, sont des réacteurs pressurisés européens.

4. *Small Modular Reactor*. Ces petits réacteurs modulaires sont complémentaires aux EPR.

Tandis que les énergies fossiles présentent un bilan très différent : le gaz naturel émet 418 g CO₂/KWh, le fioul 730 et le charbon 1 060. Il nous faut donc aller vers les énergies bas carbone et électrifier. Par ailleurs, en France, les secteurs les plus émetteurs de CO₂ sont le transport (26,1 %), le bâtiment/résidentiel tertiaire (24,3 %) et l'industrie (19,9 %). Donc, dans l'habitat, nous devons électrifier le chauffage, engager une rénovation thermique des bâtiments et développer de nouveaux matériaux de structure et d'isolation. Dans les transports, électrifier la mobilité, développer de nouvelles batteries et de nouveaux matériaux composites. Dans l'industrie, enfin, électrifier tout un ensemble de procédés de production. Ce sont là de gros enjeux, notamment pour la production d'acier, de ciment ou de verre. Il faut également électrifier la production d'hydrogène, qui ne l'est pas aujourd'hui : c'est le fameux hydrogène vert. Enfin, il faut électrifier la production de chaleur, qui est un énorme secteur de consommation d'énergie.

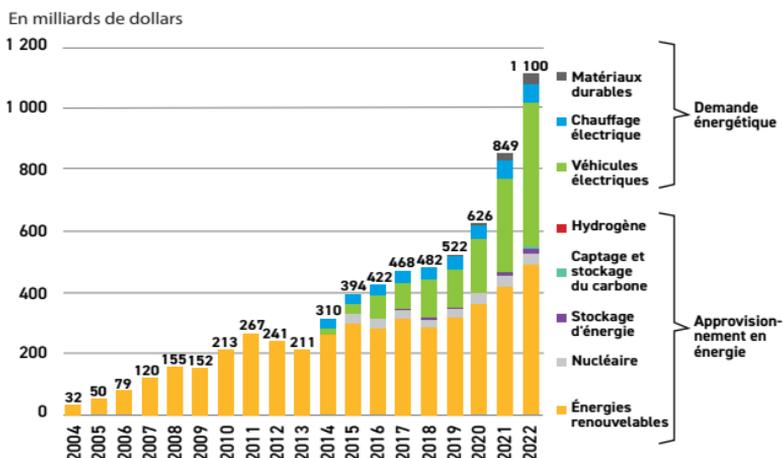
Il est possible de procéder à cette électrification en partie au travers des énergies renouvelables. Le graphique de la page suivante représente, en milliards de dollars, les investissements en la matière au cours des 20 dernières années.

On peut constater que l'essentiel des investissements a porté (en vert) sur le véhicule électrique et (en jaune) sur les renouvelables. À l'échelle mondiale, il y a un véritable effort d'investissement dans ces secteurs. Et pourtant, ils ne représentent encore que quelques pour cent du total

Développement des ENRS

Des investissements massifs

Investissements mondiaux dans la transition énergétique par secteur



Source : BloombergNEF
<https://about.bnef.com/blog/global-low-carbon-energy-technology-investment-surges-past-1-trillion-for-the-first-time/>

Des limites

Énergies intermittentes (flux)

- Besoins massifs en stockage d'énergie
- Valeur économique faible
- Problèmes de stabilisation des réseaux
- Facteur de charge faible (PV : 11 % ; éolien onshore 23 % ; éolien offshore 38 %)

Énergies de faible densité surfacique

- PV 7 ; éolien 4 ; hydro 3 ; nucléaire 0,07 (m²/MWh)
- Empreinte spatiale forte/artificialisation des sols

Besoins massifs en matériaux (béton, acier)

- Éolien 10 000 ; solaire 16 000 ; nucléaire 700 (tonnes/TWh)

Besoins en ressources minérales

- Terres rares, métaux critiques,... (éolien surtout)

de l'énergie. Cela s'explique par le fait qu'ils posent un ensemble de problèmes : ces énergies sont intermittentes; elles sont de faible densité surfacique, donc leur empreinte spatiale est très grande par rapport au nucléaire par exemple; il y a un besoin massif en matériaux et en ressources minérales. Je ne fais pas partie de ceux qui disent qu'il ne faut ni éolien ni solaire : ces ressources existent et il faut les exploiter. En revanche, ces technologies posent des problèmes objectifs, qui font qu'il n'est pas possible de produire 100 % de l'électricité avec uniquement de l'éolien et du solaire. Cela fait longtemps que j'ai pris position contre cette idée, développée notamment en 2015 par l'Agence de la Transition écologique (ADEME), qu'arriver à 100 % d'énergies renouvelables pour l'électricité était facile⁵. Ce n'est absolument pas le cas! Heureusement, RTE et l'Agence Internationale de l'Énergie ont, depuis, sorti un rapport qui explique clairement sous quelles conditions précises on pourrait avoir de très grandes proportions d'énergies renouvelables intermittentes dans notre électricité⁶. Or aucune de ces conditions n'est réunie et aucune ne le sera avant longtemps. Tout d'abord, puisqu'il y a des moments dans la journée où il fait nuit et des périodes longues où il n'y a pas de vent, il faut disposer de capacités de puissance, décarbonées certes, mais pilotables, qu'on puisse monter et descendre comme on le veut. C'est pour

5. presse.ademe.fr/2015/10/etude-ademe-un-mix-electrique-100-renouvelable-enr.html et la position du Professeur Fontecave : <https://comptes-rendus.academie-sciences.fr/chimie/articles/10.5802/crchim.115/#article-div>.

6. <https://www.rte-france.com/actualites/rte-aie-publient-etude-forte-part-energies-renouvelables-horizon-2050>

cela que les centrales thermiques sont si intéressantes. Il faut, par ailleurs, développer le stockage d'énergie et, pour le moment, nous n'en disposons pas. Le stockage de l'électricité suppose de pouvoir l'accumuler et la stocker pendant les périodes de vent ou de soleil intenses. Si vous n'utilisez pas cette électricité sur le moment, vous la perdez. Nous devons donc développer des technologies de stockage qui permettent de la conserver pendant un certain temps, de sorte de pouvoir la consommer quand il n'y a pas de vent ni de soleil. Par ailleurs, il faut de nouvelles infrastructures de réseaux électriques, parce qu'actuellement nos réseaux ne peuvent accepter plus d'une certaine part de renouvelables intermittents dans notre électricité.

Pour rendre ces enjeux concrets, prenons le cas de l'Allemagne, qui a longtemps été notre modèle. Nous sommes le 15 mars 2022 : il n'y a pas de vent, il fait presque nuit à 5h de l'après-midi, c'est très nuageux, il n'y a pas d'énergie solaire (illustration page 31).

Le graphique indique, en gris, les capacités d'éolien et de solaire installées en Allemagne. Elles sont très importantes, mais, à ce moment précis, elles ne servent à rien. On peut voir en couleur ce qui est réellement utilisé. Que fait donc l'Allemagne dans de tels moments ? Il lui faut des capacités de puissance pilotables : elle assure l'équilibre avec du charbon (en marron) et du gaz (en rouge) pour l'essentiel et avec la totalité de ce qui lui reste de nucléaire qu'elle avait encore en 2022. Les Allemands, s'ils l'avaient pu, auraient développé des

Électricité 100 % renouvelable ?

iea

Ree Le réseau de l'intelligence électrique

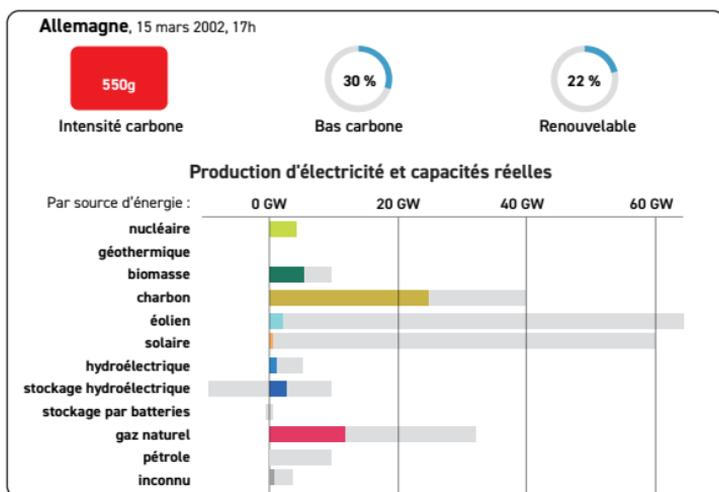
Conditions et prérequis en matière de faisabilité technique pour un système électrique avec une forte proportion d'énergies renouvelables à l'horizon 2050.

• Disposer de capacités de puissance décarbonnées pilotables.

• Développer le stockage d'énergie (batteries, hydrogène, hydro...)

• Nouvelles infrastructures de réseaux électriques.

Allemagne : illustration



Source : FollowTheScience @FollowTheScien4

Based in England. Electronics and electrical engineer. B Eng(Hons), MIET. Advocates planning for a fully fossil-free grid. Ex-member of Greenpeace.

technologies massives de stockage d'énergie, mais personne n'a réussi à le faire pour le moment, si bien qu'ils ne peuvent que s'appuyer sur les énergies fossiles existantes. C'est ce qui explique que dans ce pays, on peut constater un développement considérable de la puissance installée des énergies renouvelables, laquelle est passée, entre 2000 et 2020, de 10 GW à plus de 140 GW, et, en même temps, noter que cela n'a pas changé la quantité de

puissance installée des fossiles, laquelle est restée quasi-stable, autour de 90 GW. C'est tout simplement parce qu'ils ont besoin de fossiles. Même s'ils ne les utilisent pas tout le temps, comme ils le faisaient avant, ils ne peuvent pas fermer leurs centrales thermiques à charbon et à gaz.

Le problème du stockage pose aussi une question de puissance. En France, par exemple, lors des pics les plus élevés de demande électrique, dans une hypothèse sans vent ni soleil, nous avons actuellement besoin de 95 GW. Pour l'instant, la réponse à de tels besoins se répartit ainsi : près de 50 GW sont fournis par le nucléaire, auxquels il faut ajouter près de 20 GW d'hydroélectrique. Vous rajoutez de petites choses par-ci par-là, ainsi que les interconnexions avec nos voisins, et vous parvenez à équilibrer le réseau à 95 GW. Mais, en 2050, avec des besoins plus importants en électricité, nous devrions avoir des pics à 130 GW. Dans une hypothèse où nous serions toujours à 60 GW de nucléaire, et alors que l'hydroélectricité ne bougera pas beaucoup, je peux rajouter un peu plus d'interconnexion, mais il me manquera tout de même au moins 20 GW. Pour y répondre, soit on augmente encore le nucléaire, soit on parvient à résoudre le problème du stockage, mais, quoi qu'on fasse, cela semble difficile de parvenir à de tels niveaux en si peu de temps. La dernière solution, la plus probable, consistera alors à s'appuyer sur le gaz, que ce soit du gaz fossile ou du biogaz, si nos ressources en biomasse sont suffisantes. La transition énergétique passera donc peut-être aussi par la construction de centrales à gaz pour maintenir des ressources pilotables.

En tous les cas, nous devons mettre en œuvre un mix complexe. Il faudra des énergies renouvelables, même si se posent le problème de l'intermittence et la question du stockage d'énergie. Il faudra du nucléaire, et nous devons définir le nombre d'EPR nécessaires et le niveau de puissance souhaitée pour notre énergie nucléaire. Il faudra également de l'hydroélectrique, et par conséquent des stations de transfert d'énergie par pompage, c'est-à-dire deux lacs qui se trouvent à des hauteurs différentes : quand on veut stocker, on monte l'eau, et quand on veut produire de l'électricité, on la fait tomber. Mais, j'insiste, il faudra aussi du gaz : il sera naturel pendant longtemps, avant d'être « décarboné ». Je mets le mot entre guillemets parce que le gaz, c'est du méthane, donc s'il y a bien quelque chose de carboné, c'est ça ! On parle de gaz décarboné pour parler de gaz qui viendrait de la biomasse. Concernant le nucléaire, je préside le Comité de prospective en énergie de l'Académie des sciences et, en 2021 et 2022, nous avons produit une série de rapports sur le sujet. Notre avis était de prolonger les centrales jusqu'à 60 ans. Je pense qu'on peut aller plus loin : on est déjà à 80 ans aux États-Unis. Je suis membre du conseil scientifique d'EDF et, aujourd'hui, les analyses montrent que la plupart de nos réacteurs peuvent aller jusqu'à 80 ans. Si cela s'avérait possible, ce serait une très bonne chose, car cela mettrait moins de pression sur la question de notre production électrique. Il faut aussi qu'on continue à travailler sur les réacteurs à neutrons rapides, les réacteurs de quatrième génération, car ils ont cet avantage de pouvoir utiliser comme combustibles d'autres isotopes de l'uranium naturel, plus abondants, que celui utilisé

dans les installations actuelles, et d'utiliser aussi un grand nombre de déchets nucléaires comme combustibles. La question du nucléaire, pour un pays comme la France, est capitale : on a su, en quelques années, construire 56 réacteurs, et c'est ce qui nous permet de disposer aujourd'hui d'une soixantaine de gigawatts de capacité nucléaire. Puis, quand le gouvernement français a décidé de diminuer la part du nucléaire et de fermer quatorze réacteurs, la trajectoire a été orientée vers un objectif de zéro nucléaire en 2050. Heureusement, les choses ont désormais changé. Je vous invite à lire, à ce sujet, le rapport de la commission parlementaire sur la souveraineté énergétique ⁷. C'est vraiment passionnant ! Cela donne l'exemple d'une décision politique totalement inappropriée, absolument pas appuyée sur des considérations techniques. Arnaud Montebourg, qui était ministre de l'Économie, s'était opposé très fort à cette décision : il l'a décrite comme un accord politique de coin de table ⁸. Ségolène Royal et Manuel Valls eux-mêmes, toute honte bue, ont reconnu que cet accord politique n'était pas techniquement robuste ni fondé sur des études d'impact ⁹. La décision prise a été dramatique. Heureusement, nous sommes en train de revenir en arrière.

7. https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/16/rapports/ceindener/116b1028_rapportenquête

8. Arnaud Montebourg, ministre de l'Économie et du Redressement productif (2012-2014) : « Nous ne voulions pas de cet accord. L'accord a été présenté par Martine Aubry comme un changement de société et par Cécile Duflot comme un changement historique. Pour moi, c'est un accord de coin de table. Et on s'est retrouvé avec un programme qui indiquait qu'il fallait fermer 24 réacteurs. Et après, vogue la galère ! »

9. Ségolène Royal, ministre de l'Environnement 2014-2017 : « L'objectif de 50 % est un accord politique entre le PS et les Verts. Cet accord politique n'est pas techniquement robuste par rapport à des études d'impact. C'est un objectif politique, au sens où il faut sortir du tout nucléaire » ; Manuel Valls, premier ministre 2014-2016 : « C'est un choix d'abord politique (...). Le choix des 50 % est lié à la contrainte de l'accord passé entre le PS et les Verts. Deuxièmement, les 50 % n'étaient le résultat d'aucune étude d'impact ou d'analyse de besoin. »

V. LES ÉNERGIES NON ÉLECTRIQUES ET NON FOSSILES : BIOMASSE ET CO₂ CAPTURÉ.

Il est temps de revenir à la part non électrique de notre mix énergétique et aux fameux 450/500 TWh requis par le scénario RTE. J'insiste, nous allons encore avoir besoin de beaucoup de carbone et de carburant. On ne pourra pas faire des avions, notamment longs courriers, qui soient électriques. On aura besoin de carburant liquide et gazeux, de polymères et de plastiques, même bas carbone (au sens où ils seront bio-sourcés par exemple). Nous aurons besoin de médicaments, or ils contiennent aussi du carbone. Comment va-t-on procéder? Nous n'avons guère de choix en vérité : quand l'énergie fossile disparaîtra, il restera les déchets, et peut-être, le CO₂ qu'on aura capturé.

Commençons par la biomasse : peut-elle assurer nos besoins à travers la production de biocarburants liquides, comme le bioéthanol, le biodiesel ou le biokérosène? Il faut développer les carburants de deuxième génération à partir de la biomasse qui n'est pas consommée pour l'alimentation. Pour ce faire, nous devons commencer par dresser une estimation rigoureuse des gisements et des besoins. Nous sommes en train de finir un rapport à l'Académie des sciences sur cette question. En ce qui concerne le biogaz, la méthanisation existe déjà : tout un ensemble de déchets sont ainsi transformés dans des méthaniseurs. C'est quelque chose qu'il conviendra de développer. Le bois est aujourd'hui la biomasse la plus utilisée, mais on ne peut pas en extraire

beaucoup plus, car nous devons, en parallèle, protéger nos forêts. S'y ajoutent divers carburants alternatifs et, en particulier, le cas spécifique de la capture, du stockage et de la valorisation de CO₂, c'est-à-dire la transformation du CO₂ en molécules carbonées utiles. Il existe, en effet, un débat sur ce qu'il convient de faire avec le CO₂ une fois qu'on l'a capturé. Il est possible de le « séquestrer », c'est-à-dire de le réinjecter quelque part, dans un aquifère salin ou dans d'anciennes mines de pétrole, et de le cacher ainsi au fond de la terre. C'est la pratique du CCS, soit *Carbone, Capture and Sequestration*. Mais il est également possible de développer des pratiques dites de CCUS, pour *Carbone, Capture, Utilization and Sequestration* et, personnellement, je fais partie de ceux qui promeuvent ce principe d'une utilisation du carbone capturé. Dans mon laboratoire, nous cherchons à inventer des électrolyseurs alimentés par de l'énergie renouvelable (par exemple le solaire) dans lesquels on mettrait du CO₂ capturé et de l'eau, afin de transformer le CO₂ en un ensemble de molécules organiques qui permettraient ensuite de faire des plastiques, des composés pour l'industrie chimique, des carburants ou des médicaments. Dans un article publié dans le compte rendu de l'Académie des sciences des États-Unis en 2019, nous montrons comment, en couplant des panneaux photovoltaïques avec des électrolyseurs et un catalyseur à base de cuivre, nous avons réussi à transformer le CO₂ en éthylène¹⁰. L'éthy-

10. Fontecave, M. (et al.), « Low-cost high-efficiency system for solar-driven conversion of CO₂ to hydrocarbons », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 116, no 20, 2019, p. 9735-9740.

lène est aujourd'hui le composé chimique le plus produit par l'industrie chimique à l'échelle de la planète, car c'est un précurseur d'un ensemble de polymères, le plus direct étant le polyéthylène. Aujourd'hui, il est produit à partir de ressources carbonées fossiles, avec une très forte consommation d'énergie et une grosse émission de gaz à effet de serre. Notre rêve serait de pouvoir passer à l'échelle industrielle et de créer une machine dans laquelle vous ne mettriez que du CO₂, de l'eau et du soleil, et qui produirait de l'éthylène tout en restant très bas carbone.

VI. LE PROBLÈME DE LA SOUVERAINETÉ ÉNERGÉTIQUE

Je conclurai par un dernier point concernant la souveraineté énergétique. Se débarrasser d'une dépendance aux fossiles pour passer à une autre forme de dépendance est problématique, mais pourtant, c'est bien ce qui risque de nous arriver dans le cadre de la transition énergétique. L'exemple du véhicule électrique permet de l'illustrer : comme le montre la partie haute du graphique (illustration page 39), il faut sept fois plus de métaux (cuivre, manganèse, nickel, cobalt, lithium, etc.) pour faire un véhicule électrique que pour un véhicule thermique. La même remarque vaut pour les nouvelles technologies de production de l'énergie, comme l'éolien et le solaire, qui sont fortement dépendantes des métaux, et dans des proportions qui n'ont rien à voir avec les anciens modes de production fondés sur l'énergie fossile (voir la partie

basse du graphique). Nous allons donc avoir un besoin massif de ces ressources minérales. Or, comme on peut le constater clairement sur le graphique du bas, l'extraction de ces métaux est très concentrée (avant tout en Chine, en Indonésie, au Chili et en République Démocratique du Congo) et surtout leur raffinage est très largement contrôlé par la Chine. Nous allons donc passer à une dépendance forte vis-à-vis de la Chine sur ces métaux.

La même remarque vaut pour les panneaux solaires dont, en moyenne, 80 % des composants sont fournis par la Chine, et pour l'énergie éolienne, où la Chine produit 63 % des pales et 57 % des nacelles, alors que l'Europe n'en fabrique respectivement que 15 % et 17 %. Il y a donc, sur ce point, un vrai problème d'industrialisation et d'indépendance énergétique.

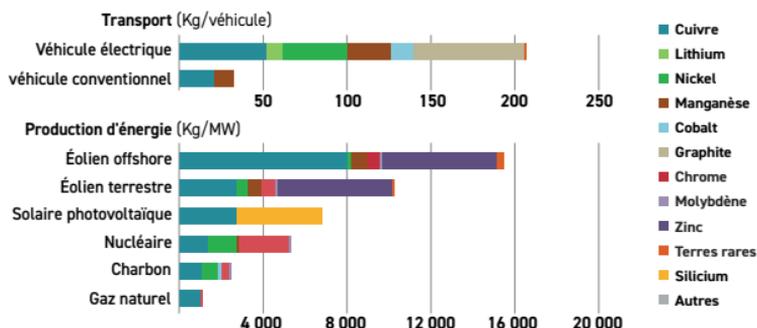
C'est sur ce point que je voudrais conclure : nous avons un ensemble de défis qu'il est urgent de relever, en matière de recherche fondamentale, de développement technologique et industriel. Nous avons besoin de l'intelligence et de la formation de tous. Les jeunes sortis des écoles d'ingénieurs, plutôt que de se lamenter et de rejeter leurs formations, devraient au contraire s'engager pleinement pour produire de l'hydrogène vert, inventer des technologies de récupération et de recyclage, améliorer les performances des cellules photovoltaïques, s'occuper de l'extraction de métaux en faisant des mines propres et décarboner l'industrie avec l'invention de nouveaux procédés. Les questions de la valorisation de la biomasse, du nouveau nucléaire, de l'amélioration des réseaux et

Souveraineté ?

Ressources minérales

Le déploiement rapide de technologies d'énergie propre dans le cadre des transitions énergétiques implique une augmentation significative de la demande de minéraux.

Minéraux utilisés dans des technologies d'énergie propre

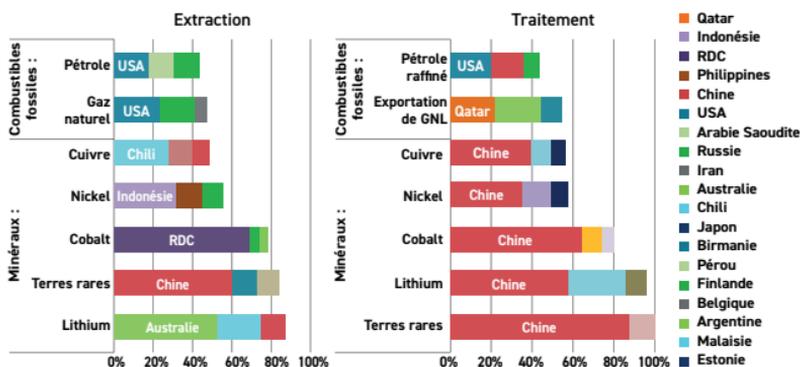


Source : IEA

Le raffinage des métaux dominé par la Chine

La production des minéraux de transition énergétique est aujourd'hui plus concentrée géographiquement que celle du pétrole ou du gaz naturel.

Part des trois principaux pays producteurs dans la production de minéraux et combustibles fossiles, 2019



Notes : GNL = gaz naturel liquéfié ; Les valeurs relatives au traitement du cuivre concernent les opérations de raffinage.

Source : IEA (2020a); USGS (2021), World Bureau of Metal Statistics (2020); Adams intelligence (2020).

des batteries électriques, du stockage de l'énergie, de la chimie organique verte sont de vrais sujets, qui méritent qu'on les affronte. Si nous ne traitons pas d'urgence ces questions, il est certain que nous aurons la décroissance et plus de misère, sans échapper pour autant à un réchauffement qui est déjà largement engagé. Par ailleurs, il est désormais nécessaire d'avoir une discussion sérieuse sur le niveau crédible d'une baisse de notre consommation d'énergie. Pour le moment, il n'y a rien de crédible dans ce qu'on nous annonce. Quelle pourrait être une proportion réaliste en matière d'électricité? Pourra-t-on réellement passer à 50 %, sachant que passer à 600 ou 700 TWh d'électricité représente déjà une augmentation massive? Quel mix électrique et quels besoins en stockage d'énergie? Comment, par ailleurs, construire le consensus nécessaire pour une trajectoire réaliste? Il est temps, désormais, d'affronter réellement ces questions, non à coup d'affichages irréalistes, mais d'engagements crédibles.

Questions de la salle

Jean-Claude Laroche¹¹ : *J'aurais une question sur un point que vous n'avez pas abordé, mais sur lequel vous avez sans doute des informations. Est-ce que vous pensez qu'il y a une perspective crédible de stockage en grande capacité, typiquement des unités de 500 ou 600 mégawatts, sur la base de sels fondus? Cette technologie existe, par exemple, à l'intérieur des centrales solaires, et j'aurais souhaité savoir si elle était explorée, au-delà, pour le réseau électrique.*

Marc Fontecave : Effectivement, les sels fondus ont la capacité d'emmagasiner de l'énergie, de la chaleur, laquelle peut ensuite être ressortie pour alimenter des alternateurs. Cependant, à ma connaissance, au-delà des centrales solaires, la solution n'est pas exploitée à l'échelle que vous indiquez, en tout cas pas en dehors de laboratoires à petite échelle.

11. Directeur de mission auprès de la présidence d'Enedis et président du Cigref, Club informatique des grandes entreprises françaises.

Anne-Françoise Berthon¹² : *Vous avez évoqué trois secteurs majeurs d'émission. Le quatrième, dont on parle souvent, c'est l'agriculture. J'ai fait une formation récemment, qui s'appelle 2tonnes¹³, proposée par une association qui forme les particuliers et les industriels à la réduction de leur empreinte carbone, de sorte que chacun passe de dix tonnes par an à deux tonnes. En gros, on ressort de cette formation en devenant végétarien, en affirmant qu'il ne faut plus d'élevage et que les terres agricoles doivent devenir des lieux où l'on met des méthaniseurs. Comme il y a un débat sociétal fort sur ces sujets, j'aimerais avoir votre avis sur la biomasse et l'alimentation dans ce cadre.*

Marc Fontecave : Vous avez constaté que je n'ai pas parlé d'agriculture. En effet, c'est un secteur dans lequel je n'ai pas de compétence particulière et, en général, j'évite de parler de choses dans lesquelles je n'ai pas de compétence. On voit bien, néanmoins, dans le camembert représentant les différents secteurs émetteurs, qu'une part significative d'émissions de CO₂ est liée à l'agriculture. Mais je suis d'autant plus prudent que je sais combien nos agriculteurs souffrent déjà d'un nombre de contraintes et d'attaques terribles et que l'agriculture française est en très grande difficulté. J'ai évoqué le rapport parlementaire sur la souveraineté énergétique, mais je pense qu'il en faudrait également un sur la chute de l'agriculture

12. Fondatrice et Présidente d'ATIHP (Access To Innovation and Health Partnerships), vétérinaire.

13. <https://www.2tonnes.org>.

française, afin de comprendre pourquoi on l'a autant laissée se dégrader et voir si on ne l'a pas fait exprès. Il y a, aujourd'hui, un vrai problème de défense de l'agriculture française. Nous importons de plus en plus de choses que nous produisions avant ! Je serai donc très prudent et préfère ne pas m'avancer sur le sujet.

En revanche, je peux revenir un peu sur la biomasse. Le 9 janvier, je présenterai devant l'Académie des sciences un rapport sur celle-ci. Comme je l'ai dit, il va falloir renforcer le travail de valorisation de la biomasse et, sur ce point, les agriculteurs sont appelés à jouer un rôle très important. Mais il faut tout de même être prudent. La Stratégie Nationale Bas Carbone raisonne de manière très simpliste en nous expliquant que la biomasse peut fournir les 500 TWh d'énergie non électrique dont nous aurons besoin. Or ce n'est pas vrai du tout ! L'ensemble des études montre qu'il y a beaucoup moins de biomasse disponible, notamment si on prête attention à un certain nombre de paramètres et, en particulier, à la concurrence avec la production agroalimentaire. On utilise en effet déjà une grande part de notre surface agricole utile pour produire du bioéthanol et des biodiesels. Je peux vous dire que les agriculteurs vont jouer un rôle très important, parce que nous devons assurer la sécurité d'approvisionnement alimentaire de notre pays et, en même temps, nous efforcer de contribuer au maximum aux besoins de 500 TWh d'énergie non électrique, à travers l'exploitation de la biomasse. Il faut développer des cultures spécifiques pour l'énergie tout en faisant bien attention à la concurrence avec l'agroalimentaire.

Par ailleurs, tout n'est pas zéro carbone dans la biomasse : il faut donc travailler aussi sur ce sujet.

Bernard Bossu¹⁴ : *Vous avez mentionné l'hydrogène au niveau de la recherche fondamentale et appliquée, mais il me semble que vous ne l'avez pas intégré dans votre présentation relative aux mix complexes, où vous évoquez cinq pistes énergétiques, mais pas l'hydrogène. Pourquoi, s'il vous plaît ? Et pourquoi ne pas l'avoir mentionné, notamment pour le fret, le transport par véhicule et éventuellement, plus tard, pour le transport de fret par avion ?*

Marc Fontecave : Si vous faites référence à la partie de ma présentation qui portait sur le mix électrique, ma réponse est claire : l'hydrogène n'est pas une source d'électricité, c'est un vecteur énergétique. Il est lui-même plutôt un consommateur d'électricité, lorsqu'on l'obtient par l'électrolyse. C'est pourquoi on ne peut intégrer l'hydrogène dans le mix électrique. C'est d'ailleurs l'un des gros problèmes de l'hydrogène produit par électrolyse (ce qui n'est fait qu'à une toute petite échelle actuellement) : sa production va demander des quantités massives d'électricité. Je prends juste un exemple. Aujourd'hui, en France, on consomme un million de tonnes d'hydrogène, dans l'industrie essentiellement, pour la production d'ammoniac qui permettra ensuite de créer

14. Président de la société Optimum Convergence.

des engrais, pour le raffinage du pétrole ou encore pour la production de quelques molécules du genre méthanol. Si nous devons produire ce million de tonnes par électrolyse, avec les rendements qui existent aujourd'hui, on consommerait 55 TWh, soit l'équivalent de 5 réacteurs EPR de type Flamanville! Cela donne un ordre de grandeur. Il faut donc faire attention à ne pas confondre ce qui est vraiment une source d'énergie et ce qui n'est, comme l'hydrogène, qu'un vecteur énergétique.

Il y a une trentaine d'années, j'ai travaillé sur l'hydrogène. Or, j'ai assisté récemment à une conférence où l'on présentait l'hydrogène comme le carburant du futur, tout en déplorant qu'aujourd'hui il soit à plus de 95 % produit à partir du méthane. C'est ce que l'on appelle le «reformage du méthane». On transforme CH_4 en hydrogène, parce qu'il a plein d'atomes d'hydrogène, mais le carbone devient, quant à lui, du CO_2 : c'est donc une technologie très émettrice de CO_2 . Il se trouve qu'il y a trente ans, on donnait exactement les mêmes chiffres, ce qui montre qu'on n'a malheureusement pas beaucoup progressé sur le sujet. D'un autre côté, l'électrolyse de l'eau pour produire de l'hydrogène continue à être un sujet difficile pour des raisons de performance et de coût. L'hydrogène vert est donc encore trop coûteux (trois à quatre fois plus cher) par rapport à l'hydrogène gris produit à partir du reformage du méthane.

Néanmoins, il faut continuer à y travailler. La France s'est donné des objectifs extrêmement élevés en termes de production d'hydrogène vert et j'espère que nous y

parviendrons. Mais, de toute façon, quoi qu'il se passe, il faudra y consacrer des quantités d'électricité considérables. Pourquoi vouloir en faire malgré tout? Je pense que nous devons en priorité produire de l'hydrogène vert pour remplacer l'hydrogène gris, utilisé aujourd'hui dans l'industrie. Il s'avère que, dans certains scénarios, on évoque aussi tout un ensemble d'autres usages nouveaux. Ce qui fait que, dans les scénarios extrêmes, on nous annonce 4 millions de tonnes d'hydrogène d'ici 2050, soit 4 fois plus d'hydrogène produit en France, nécessitant l'équivalent d'au moins 20 EPR! Cela pose des difficultés, car, pour le moment, le président ne nous propose que six réacteurs EPR, et pour couvrir aussi toute une série d'autres besoins. Ce n'est donc pas réaliste du tout. Cette question de l'électricité est extrêmement importante. Quels seraient ces nouveaux usages? C'est, en particulier, le transport. Personnellement, je pense que la voiture électrique à batterie a gagné la course et qu'il n'y aura pas de voiture à hydrogène produite massivement. Mais il reste, en effet, le transport lourd (cargo, bateau, gros bus, gros camion, aviation). Or ces engins seront difficilement alimentés par des batteries électriques, il faudra donc trouver autre chose. Est-ce que ce sera de l'hydrogène? Pourquoi pas? Mais, pour ces transports lourds, y compris l'aviation, nous risquons plutôt d'avoir encore besoin de carburant liquide de type kérosène ou diesel. Est-ce que ce seront des biodiesels et des biokérosènes? En partie, si on arrive à exploiter à un coût raisonnable la biomasse. Est-ce que l'avion à hydrogène va fonctionner un jour? Personnellement, je ne le pense pas, en tout cas pour les très gros avions. L'aviation est l'un

des secteurs les plus difficiles à traiter, parce qu'il nécessitera encore des carburants liquides pour très longtemps. Cela n'empêche pas qu'il faille continuer à travailler sur tous ces sujets : améliorer les rendements de l'électrolyse de l'eau, essayer de voir comment on peut mettre de l'hydrogène dans divers transports. Mais je pense qu'à l'échelle de 20 ans, il n'y aura que relativement peu d'hydrogène dans les transports. En revanche, si on arrivait déjà à faire un million de tonnes d'hydrogène vert, ce ne serait pas mal, parce qu'on diminuerait sérieusement nos émissions de CO₂.

Yves Chesnais¹⁵ : *Que pensez-vous des réseaux électriques de transmission à haut voltage et à courant continu pour équilibrer l'offre et la demande en électricité? Pensez-vous qu'ils puissent contribuer à les équilibrer au niveau mondial, puisqu'on peut utiliser la rotation de la Terre pour faire en sorte que, lorsqu'il y a un excès de production en Chine, on puisse l'utiliser en Europe?*

Marc Fontecave : Il existe déjà des partages des réseaux électriques à l'échelle européenne. Malheureusement, je ne peux pas vous répondre sur cette question. Est-ce qu'on va échanger de l'électricité avec la Chine par des réseaux électriques? Je ne sais pas.

15. Consultant.

Juba Ihaddaden ¹⁶ : *J'aurais une petite question sur l'innovation. C'est une des clés pour pouvoir produire de l'énergie décarbonée ou défossilisée. Qui, selon vous, doit la financer ? Quel doit être l'équilibre entre le monde de la recherche et celui de l'entreprise ? Quel est le rôle de l'État ? Et celui de la recherche fondamentale ? Peut-elle être beaucoup financée ? Y a-t-il des applications, avec la recherche appliquée, et quels sont les liens entre État, marché et recherche ?*

Marc Fontecave : Question très importante et, en même temps, complexe. Je suis professeur dans une institution publique et je fais de la recherche avec des jeunes gens, doctorants, post-doctorants, sur ces questions. Or, aujourd'hui, cette recherche, je ne peux la faire au niveau où je la fais que parce que j'ai des contrats industriels. Cela signifie que si je n'avais que ma dotation du ministère et quelques réponses à des appels d'offres de type Agence nationale de la recherche, je n'existerais pas à l'échelle internationale. Je travaille donc avec des contrats, en forte collaboration avec des industriels qui, par chance, me laissent une grande liberté, ce qui fait qu'on arrive à effectuer cette recherche fondamentale avec, en même temps, des objectifs d'innovation, d'application.

Cette expérience-là me laisse penser qu'il y a une véritable nécessité que le monde académique et le monde industriel travaillent ensemble. Or, la France n'a pas une grande pratique de cela. C'était pire quand j'ai commencé

16. Économiste à l'Association française de la gestion financière (AFG).

ma carrière, mais aujourd'hui on est encore très loin du compte.

Quel est, aujourd'hui, le budget recherche et développement de la France? Il n'est pas parmi les premiers du monde, il est même plutôt assez bas. Le président s'est exprimé la semaine dernière sur la recherche et il a défendu la nécessité d'investir plus. Il a mis en place un conseil, dans lequel il n'y a pas de chimiste d'ailleurs. Il a parlé du budget, tout en disant que ce n'était pas qu'une question de budget. Il a en partie raison, c'est aussi une question d'organisation de la recherche publique. Mais tout de même, aujourd'hui, la part de la R&D dans le budget français, c'est environ 2 %. Cela fait depuis 1990, à peu près, que nous sommes à ce niveau-là : il n'a pratiquement pas bougé, alors que d'autres pays ont été en continuelle croissance! Les pays les plus performants en matière de recherche tournent plutôt autour de 3 %. Il ne s'agit pas, par ailleurs, que d'une question de recherche publique, parce qu'en réalité, parmi ceux qui ont 3 % d'investissement, les meilleurs (Corée du Sud, Allemagne, etc.) ont un budget avec une part privée très élevée : ça se répartit à peu près 1,5 %/1,5 %. En France, la part publique a légèrement augmenté, à peine, mais la part privée n'a pratiquement pas bougé. Par conséquent, le monde de l'entreprise doit investir plus dans la recherche. Aujourd'hui, les 2 %, sont constitués d'à peu près 1 % de public et 1 % de privé : les deux sont donc responsables d'un faible niveau d'investissement dans la recherche.

Pour la transition énergétique, on parle de pratiquement 4 points de PIB qu'il faudrait mettre dans la recherche, soit entre 50 et 100 milliards d'euros par an. Qui va les mettre? Est-ce qu'un État qui a 3 000 milliards de dettes et un déficit colossal le peut? Le rapport Pisani-Ferry notait qu'il faudrait 60-65 milliards d'euros par an pendant des dizaines d'années ¹⁷. Il estimait qu'on ne pourrait y parvenir qu'en augmentant la dette et les impôts, mais le lendemain, le ministre de l'Économie, Bruno Le Maire, a écarté cette hypothèse. Dès lors, comment trouver 65 milliards? C'est une grosse difficulté. D'où le fait qu'il faut de la croissance : ce pays doit retrouver de l'industrie, de la production, du travail, sans quoi nous ne trouverons pas ces milliards. Or, aujourd'hui, qui a l'argent pour le faire? Ce sont les entreprises, et notamment les entreprises du secteur de l'énergie. C'est d'ailleurs ce qu'il se passe : les plus gros investisseurs en matière de transition énergétique sont les grandes entreprises. Par exemple, le plus gros investisseur sur le photovoltaïque, c'est TotalEnergie. Tout ceci est compliqué : cela prendra du temps, en particulier parce que les États n'auront peut-être pas les financements suffisants, peut-être aussi parce que les entreprises n'investiront pas assez en recherche et en développement. Mais il faut la combinaison d'une volonté politique, d'une politique d'État, d'un investissement des entreprises et d'une meilleure coordination en matière de recherche.

17. <https://www.strategie.gouv.fr/publications/incidences-economiques-de-l'action-climat>.

André Comte-Sponville : *Vous avez insisté sur l'importance du nucléaire. Que penser de la question des déchets, qui est l'un des obstacles et des reproches qu'on fait le plus souvent à l'énergie nucléaire? Deuxièmement, et peut-être surtout, qu'est-ce qu'on peut attendre de la fusion nucléaire, dont on commence à parler, mais sur laquelle j'aimerais avoir quelques éclaircissements?*

Marc Fontecave : Sur la question de la fusion, je n'en ai pas parlé parce que je connais moins bien le sujet. Simplement, ce que je veux dire, c'est qu'en tant que citoyen, je fais partie de ceux qui pensent qu'on a raison de maintenir ce projet, qui coûte cher, parce qu'en effet, si cela marchait, ce serait évidemment quelque chose d'absolument extraordinaire du point de vue de notre production d'énergie. Pour comprendre comment cela fonctionne, partons des différents éléments chimiques. D'un côté, vous avez des atomes comme le fer, qui sont stables : c'est la raison pour laquelle on en a beaucoup dans notre univers. Et puis vous avez des métaux très lourds, comme l'uranium. La fission nucléaire, qui existe aujourd'hui dans nos réacteurs, repose sur le fait de casser ces noyaux en des noyaux plus petits, et de profiter de l'énergie que produit la cassure. Mais il est aussi possible d'obtenir le même résultat en partant, cette fois, d'atomes très légers et en arrivant à des atomes plus lourds en les fusionnant. L'ennui, c'est que les noyaux n'aiment pas être fusionnés : c'est pour cela que l'opération est plus compliquée. Mais tel est, en tous les cas, le principe de la fusion : il s'agit de partir d'éléments comme l'hydrogène

ou le deutérium et de les fusionner pour arriver à des métaux plus lourds, afin de libérer de l'énergie. Toute l'énergie du soleil provient de ce type de mécanisme. Le projet ITER (*International thermonuclear experimental reactor*) vise donc à produire des machines qui fonctionnent comme de petits soleils, dans lesquelles on fusionnerait de petits atomes pour en faire des plus gros et qui produiraient une quantité massive d'énergie, sans émission de CO₂ ni déchets nucléaires. La fission, elle, produit des déchets nucléaires, parce qu'en cassant les noyaux, on produit un tas d'isotopes et de nouveaux noyaux, qui sont effectivement très radioactifs.

Je comprends très bien la défiance actuelle vis-à-vis du nucléaire. Elle peut en effet se fonder sur de bonnes raisons, notamment sur les déchets nucléaires et les accidents nucléaires. Néanmoins, je ne crois pas qu'il y ait un secteur sur cette planète aussi bien géré que celui des déchets nucléaires. Comme vous le savez, il n'y a pas eu en France une seule mort due à une mauvaise gestion des déchets nucléaires. Pourquoi est-il possible de traiter la question avec autant de rigueur ? Parce qu'on a, en vérité, affaire à de petites quantités de déchets, ce qui rend leur gestion possible. Je parle notamment des déchets les plus radio-actifs et ceux à la plus longue durée de vie. Il existe tout un ensemble de stratégies pour les gérer : ils sont traités et stockés et, pour les plus dangereux, la politique française consiste à envisager de les entreposer à 500 mètres sous la terre. Je crois que nous sommes en effet partis pour valider le projet Cigéo (Centre Industriel de Stockage Géologique) avec un centre qui stockera à 500 mètres

sous terre, près de Bure, nos déchets radioactifs les plus dangereux. Il me semble qu'en France, nous avons mis en place tout ce qu'il faut pour gérer de façon correcte les déchets nucléaires.

Nous avons parlé de la fusion, mais il y a aussi une quatrième génération de réacteurs à neutrons rapides : ce sont des technologies sur lesquelles nous étions très en avance et qui doivent être développées. Il n'y aura pas de nucléaire durable si nous restons uniquement avec nos EPR, ne serait-ce qu'en raison des limites des ressources en uranium. La quatrième génération nous permettrait de passer d'une centaine d'années de disponibilité en uranium à plusieurs milliers d'années, dans la mesure où elle utilise non seulement l'uranium 235, qui compte pour une toute petite partie du minerai, mais d'autres isotopes et, en particulier, l'uranium 238. Elle permettrait aussi l'utilisation des déchets radioactifs comme combustible. La question de la quatrième génération de réacteurs est absolument essentielle : nous l'avons nettement souligné à l'Académie des sciences même si, pour le moment, le gouvernement français n'est pas sur cette ligne. Il a même fermé un projet de prototype, Astrid, il n'y a pas longtemps.

Henri Cukierman¹⁸ : *Je suis, entre autres, l'ancien président d'une banque qui était active sur les marchés*

18. Président de la Chambre de commerce France-Israël.

financiers, ce qui m'amène à vous poser deux questions. La première est la suivante : quand on parle de finance, on raisonne généralement ainsi : « je fais un investissement de tant d'argent, et j'économise ou je gagne tant par an ». J'ai toujours pensé que, sur tout ce qui relève des économies d'énergie, on gagnerait à se poser la question de cette manière : « je construis une éolienne, cela me coûte tant de carbone, et j'économise ensuite tant de carbone par année ». Or, je n'ai jamais vu ce raisonnement, donc je me demandais s'il existait. Ensuite, j'ai une deuxième question, qui correspond à ma casquette actuelle, concernant l'innovation. En Israël, la recherche et développement représente 5 % du PIB, mais c'est en grande partie le fait de tout un ensemble de start-up qui essaient de trouver des idées intelligentes. Beaucoup travaillent sur les économies d'énergie, et cela m'intéressait d'avoir votre opinion sur la probabilité, pour de tels professeurs Tournesol, de faire quelque chose qui change vraiment les choses...?

Marc Fontecave : Sur votre deuxième question, la France est un pays où il n'est pas tellement difficile de créer des start-up et de trouver des financements pour les démarrer. Et je peux vous dire que l'idée de créer une entreprise, à partir notamment de laboratoires académiques, est assez partagée chez les jeunes de sorte que, dans les grands laboratoires, il y a beaucoup de recherches qui se traduisent ensuite par des démarrages de start-up. C'est même le cas au Collège de France, et mon laboratoire est lui aussi un incubateur, parce que les jeunes qui y travaillent, après leur thèse ou leurs post-doc, exploitent

souvent des brevets qu'on a obtenus pour démarrer leur entreprise. La plus grande difficulté tient, en vérité, dans leur maintien sur la durée. Il y a une vraie politique de soutien aux start-up en France, par conséquent un jeune qui a de bonnes idées trouve la possibilité de démarrer des choses. Il s'avère que le 28 février, dans le cadre de mon cours au Collège de France sur la transition énergétique, que j'ai démarré l'année dernière, j'ai organisé un colloque. Le matin, j'ai invité des gens des sciences humaines et sociales essentiellement : on va parler marché de l'électricité, Europe de l'énergie, souveraineté. Mais l'après-midi, j'ai invité cinq start-up françaises, qui font de l'excellente innovation dans des secteurs qui concernent la transition énergétique. C'est une très bonne chose.

En Israël, la recherche et développement atteint 5 % du PIB. Je suis impressionné par la qualité de ses instituts : je pense à l'Institut Weizmann, au Technion, etc. C'est une recherche de très haut niveau et c'est l'un des pays qui investit le plus dans la recherche. 5 %, c'est assez unique ! Mais la France pourrait tout de même faire mieux que 2 %. Pour votre première question, qui portait sur le coût en carbone et la rentabilité en décarbonation, je pense que ces études-là sont de plus en plus réalisées. En tout cas, aujourd'hui, on ne peut pas parler d'une nouvelle technologie sans s'assurer que, sur toute la chaîne de ce que l'on appelle l'analyse de son cycle de vie, on a bien mesuré toutes les émissions de CO₂, celles qu'on a économisées et celles qui continuent à être émises.

Paul Le Bihan ¹⁹ : *Ma question porte sur une énergie renouvelable que vous avez brièvement citée dans votre propos : l'hydraulique. Dans les grands plans du gouvernement, on en parle assez peu. Or, en France, si on dispose de très grandes installations, on assez peu d'installations petites et moyennes. Est-ce qu'on a un potentiel supplémentaire pour développer cette énergie?*

Marc Fontecave : Actuellement, l'énergie hydraulique apporte une forte contribution en matière d'électricité, que ce soit au travers des barrages ou des stations de transfert d'énergie par pompage (STEP). Ce sont des outils absolument formidables, notamment pour produire de l'électricité décarbonée. La Norvège en est la parfaite illustration : c'est le pays qui a l'électricité la plus décarbonée au monde grâce à l'hydraulique, qui lui fournit presque 100 % de son énergie. L'une des difficultés, c'est qu'il faut pouvoir disposer d'espaces vides et appropriés pour y installer des lacs artificiels. En France, nous avons actuellement cinq STEP. EDF estime qu'on pourrait effectivement augmenter notre capacité, mais elle restera tout de même limitée. J'avais estimé, dans les scénarios que je vous ai présentés, que nous pourrions augmenter la capacité hydraulique de cinq ou dix gigawatts : ce sont à peu près les chiffres qu'annonce EDF. Ce n'est pas énorme, malheureusement, et, de mon point de vue, nous ne pourrions pas augmenter beaucoup plus. Nous sommes donc limités. Se pose en outre un problème

19. Président du conseil de surveillance Neoline, start-up en cargos à voile.

d'acceptabilité. Dès lors que l'on envisage une emprise sur un terrain, c'est très difficile. Prenons les ressources minérales : la France a décidé de ne plus faire de trou dans son sol, alors même que nous sommes très riches en ressources minérales. Aujourd'hui, c'est interdit. Dès que vous décidez de creuser quelque part, une ZAD se forme, et il en sera de même pour les barrages : si vous voulez installer un barrage comme celui de Grand'Maison, plusieurs ZAD se créeront. Mais, de toute façon, en termes de capacité, nous ne pourrions pas augmenter massivement la part hydraulique. Par ailleurs, les ouvrages existants commencent à se faire vieux. EDF a la responsabilité de les maintenir en état et cela va déjà coûter beaucoup d'argent.

Arnaud de Bresson ²⁰ : *Nous partageons exactement la même analyse, à la fois sur l'enjeu, le fait que le mouvement est engagé, et les financements nécessaires. À la suite du rapport remis en 2022 par Yves Perrier au ministre de l'Économie*²¹, *j'aurais deux questions. D'abord, avez-vous travaillé sur la manière dont la réglementation européenne évolue sur ces sujets? Je pense notamment à la taxonomie européenne, c'est-à-dire ce référentiel commun produit par l'Union européenne pour classer l'impact environnemental des différentes activités économiques et définir des objectifs sectoriels.*

20. Conseiller du président de l'Institut de la finance durable.

21. Yves Perrier, Faire de la place financière de Paris un cadre de référence pour la transition climatique, mars 2022 : <https://vu.fr/CoGLU>

Dans notre rapport, nous avons critiqué cette taxonomie «de première génération», qui avait pour effet d'orienter les financements vers des actifs déjà verts, vers Tesla, par exemple, qui n'a pas besoin d'argent, plutôt que vers des entreprises en transition, comme Volkswagen, qui a besoin d'engager une transition énergétique importante dans le secteur de l'automobile. Les choses semblent changer, mais cela n'a pas l'air d'être encore très clair dans tous les esprits au niveau européen. La réglementation qui est en train de se mettre en place, comment la jugez-vous?

Ma deuxième question porte sur les plans de transition des entreprises. Vous avez des contrats avec des entreprises industrielles. Comment analysez-vous la manière dont les plans de transition y sont mis en place? Les feuilles de route sont-elles les bonnes, selon vous? Et comment peut-on expliquer que tout cela nécessite un chemin clair, avec des étapes qui vont prendre du temps certes, mais qui doivent être fixées nettement en termes d'objectifs?

Marc Fontecave : Sur la première question, je ne pourrai pas aller très loin dans la réponse. La seule chose que j'ai suivie de près concernant la taxonomie européenne, c'était le débat sur l'introduction ou non du nucléaire et du gaz, et la discussion très tendue entre l'Allemagne et la France, dans un contexte qui continue à être celui d'une bataille sévère menée par l'Allemagne contre le nucléaire, tout simplement parce que le nucléaire a conféré pendant longtemps une compétitivité à l'industrie française, qui était alors importante. Sur les réglementations

européennes, malheureusement, je ne pourrai pas vous en dire plus. J'ai déjà beaucoup à faire avec les aspects technologiques, et nous avons besoin de gens comme vous pour ces autres enjeux.

Pour votre deuxième question, j'ai en effet beaucoup de contacts avec des entreprises, pas uniquement celles avec qui je contracte et qui me permettent de faire de la recherche, mais aussi d'autres, car je participe à divers conseils scientifiques. Ce qui apparaît clairement, contrairement à l'idée que s'en font certaines personnes, c'est que toutes ces entreprises sont non seulement mobilisées, mais véritablement convaincues qu'il faut faire quelque chose. Il est facile de dire que les entreprises ne font pas leur boulot, mais ce n'est pas vrai. Je n'ai rencontré que des chefs d'entreprise motivés, convaincus, qui essayaient de réfléchir à ces problèmes et qui, d'ailleurs, me sollicitaient pour comprendre ce que pourraient être ces feuilles de route. Ce que je leur reprocherais, cependant, c'est d'indiquer des objectifs irréalistes, et ce, alors même qu'ils savent qu'ils le sont. C'est une question de courage, que les politiques devraient aussi avoir. Les feuilles de route sont biaisées par le fait qu'elles sont le plus souvent construites sur des objectifs qui ne sont pas atteignables. En effet, il existe une telle pression aujourd'hui, au moins en termes d'affichage, que si vous dites que vous serez « zéro carbone en 2050 », vous êtes à peu près sûr que votre concurrent, lui, affichera un plan affirmant qu'il le sera en 2040 : c'est systématique. Si l'on pouvait afficher des objectifs sérieux, ce serait très différent. Bien sûr, je ne dis pas qu'il ne faut pas avoir d'ambition,

mais afficher des objectifs irréalistes, c'est mentir au personnel, aux cadres, aux gens à qui on s'adresse, aux citoyens et aux politiques, et cela n'apporte rien.

Philippe Lagayette²² : *Vous nous avez bien expliqué les différences qu'il peut y avoir entre des vues réalistes et tout un fatras d'objectifs qui sont affichés, espérés ou rêvés. On serait tenté d'essayer d'aller un peu plus loin. Compte tenu de tout ce que vous savez, quels sont les scénarios un peu réalistes? Première hypothèse, on continue à faire tout mal, si je puis dire, ou en tout cas avec une volonté insuffisante. Deuxième hypothèse, l'ambition commence à se réaliser, etc. Et tout cela débouchant sur des scénarios concernant le climat, qui est la question qui intéresse nos petits-enfants. Est ce qu'il y a des exercices comme cela qui sont faits? Est-ce que vous pouvez les inspirer? Est-ce que l'on peut espérer avoir des évaluations qui sortent de la situation actuelle, où ce qui est affiché est irréaliste et ce qui est brandi comme épouvantail l'est aussi?*

Marc Fontecave : Concrètement, si je prends le secteur industriel, les entreprises mettent en place des conseils scientifiques qui intègrent des gens, y compris du monde académique, sollicités justement pour débattre de ces questions. Personnellement, je suis sollicité par tout un ensemble de grosses entreprises, comme TotalEnergie, Veolia, EDF, Faurecia, pour discuter de leurs politiques,

22. Ancien haut fonctionnaire et banquier.

de ce qui est possible et ne l'est pas. Le contact existe sur ces questions avec le monde industriel, mais beaucoup moins avec le monde politique. Il existe néanmoins l'Office parlementaire de l'évaluation des choix scientifiques et techniques. Constitué de sénateurs et de députés, il travaille essentiellement sur les questions technologiques, techniques, scientifiques et, régulièrement, y associe des chercheurs et des professeurs. Quelques mécanismes de ce genre existent, mais il y a quand même assez peu de relations entre le monde politique, les cabinets ministériels et la science. Je prends deux exemples. Je vous invite à écouter l'audition d'Yves Bréchet, ancien haut-commissaire à l'Énergie atomique, auditionné par la commission parlementaire sur la souveraineté énergétique, qui raconte toutes ses difficultés à interagir avec les cabinets du président et des ministres sur des questions techniques autour du nucléaire, pendant ses six années d'activités. On est dans une situation où nous n'avons aucun scientifique, dans aucun cabinet politique, aujourd'hui en France! Il y a quelques années était parue une enquête comparative des principaux pays du monde calculant le nombre de docteurs, toutes disciplines confondues, présents dans les gouvernements. Le pays qui en avait le plus était la Chine et le pays où il n'y en avait aucun, c'était la France! Je ne dis pas qu'il faut être impérativement docteur pour faire de la politique, mais cela donne tout de même une idée du problème... Un deuxième exemple, plus anecdotique : en 2012, je suis allé, avec le président de l'Académie des sciences, rencontrer François Hollande et ses conseillers, pour proposer nos services : nous n'avons jamais été sollicités pendant

les cinq ans de son mandat. Il y a un véritable déficit d'échanges entre le monde politique et le monde scientifique.

Yves Riou²³ : *Ne pensez-vous pas que la « mère » des batailles pour la mise en œuvre de tout ce que vous avez présenté de façon très macro, ce serait de commencer par une véritable politique d'aménagement du territoire? L'aménagement du territoire va conditionner, par exemple, les méthaniseurs locaux. On a beaucoup d'agriculteurs qui y travaillent et cela participe de la transition énergétique. L'aménagement du territoire est également décisif pour les transports, puisque vous pouvez ainsi changer le type de véhicule qui va être utilisé, etc. Je ne veux pas développer davantage, mais n'est-ce pas absolument central?*

Marc Fontecave : Je suis d'accord avec l'importance de cet aspect. Dire que c'est la mère de toutes les batailles, je ne sais pas. Mais c'est en effet particulièrement important.

Jacques Troch²⁴ : *RTE vient d'avouer qu'il faudra 100 milliards d'euros en matière d'infrastructures de transport. Pour la distribution, 100 milliards également. Nous allons dépenser, d'ici 2040, entre 120 et 150 milliards de*

23. Consultant mobilité.

24. Consultant.

subventions pour les énergies renouvelables. Vous nous avez dit que nous dépendions largement de la Chine. Nous voyons s'effondrer les prix du fait de la concurrence chinoise en matière de photovoltaïque et d'éoliennes. Est-ce qu'il ne serait pas plutôt raisonnable de faire une transition énergétique, dans l'attente du nucléaire et de sources nationales de renouvelables comme la biomasse ou l'hydrogène blanc, à la manière des Allemands, lesquels ont obtenu l'autorisation de la Commission européenne de financer sur le plan de relance européen des centrales à gaz qui seraient alimentées, à l'horizon 2035-2040, par de l'hydrogène?

Marc Fontecave : Il faut faire très attention : il n'y a aucune solution miracle. Nous n'avons à choisir qu'entre de mauvaises solutions. Il faut donc trouver le mix le plus raisonnable et rien ne sera parfait. Premier point : il n'y a pas de raison de refuser le solaire et l'éolien. Nous avons du soleil et des périodes de vent. Aussi devons-nous travailler à l'exploitation de ces ressources, accompagnée d'un dispositif de stockage d'énergie et de la modification des réseaux électriques. Le mix doit en contenir. C'est mon point de vue et, pourtant, je suis aussi pour le développement du nucléaire. Mais on ne pourra pas faire 600 TWh qu'avec du nucléaire. Par ailleurs, avant que les nouveaux réacteurs n'arrivent, cela prendra du temps. Ensuite, concernant l'hydrogène, je vous rappelle ce que j'ai dit tout à l'heure : c'est un vecteur d'énergie, mais il vous faut beaucoup d'électricité pour en obtenir, donc on retombe sur le nucléaire, l'éolien, le solaire, etc. C'est cela qu'il faut régler avant d'avoir de l'hydrogène.

La conclusion est donc celle que j'ai déjà dite : il faut essayer de revenir à un discours courageux dans l'explicitation des problématiques et l'élaboration des solutions. Nous sommes à l'orée d'une révolution technologique majeure : on a là un sujet extrêmement stimulant d'un point de vue scientifique et technique, parce qu'il faut traiter cette question de l'énergie et du climat pour arriver à plus de connaissances et plus d'innovation. Tentons le coup ! Si nous n'arrivons pas à résoudre tous les problèmes, nous en aurons au moins résolu une partie et ce sera déjà pas mal. Tentons cela avant de baisser les bras et de dire qu'il faut tout laisser tomber !

Retrouvez l'intégralité du débat en vidéo sur
www.institutdiderot.fr

Les publications de l'Institut Diderot

Dans la même collection

- L'avenir de l'automobile - Louis Schweitzer
- Les nanotechnologies & l'avenir de l'homme - Etienne Klein
- L'avenir de la croissance - Bernard Stiegler
- L'avenir de la régénération cérébrale - Alain Prochiantz
- L'avenir de l'Europe - Franck Debié
- L'avenir de la cybersécurité - Nicolas Arpagian
- L'avenir de la population française - François Héran
- L'avenir de la cancérologie - François Goldwasser
- L'avenir de la prédiction - Henri Atlan
- L'avenir de l'aménagement des territoires - Jérôme Monod
- L'avenir de la démocratie - Dominique Schnapper
- L'avenir du capitalisme - Bernard Maris
- L'avenir de la dépendance - Florence Lustman
- L'avenir de l'alimentation - Marion Guillou
- L'avenir des humanités - Jean-François Pradeau
- L'avenir des villes - Thierry Paquot
- L'avenir du droit international - Monique Chemillier-Gendreau
- L'avenir de la famille - Boris Cyrulnik
- L'avenir du populisme - Dominique Reynié
- L'avenir de la puissance chinoise - Jean-Luc Domenach
- L'avenir de l'économie sociale - Jean-Claude Seys
- L'avenir de la vie privée dans la société numérique - Alex Türk
- L'avenir de l'hôpital public - Bernard Granger
- L'avenir de la guerre - Henri Bentegeat & Rony Brauman
- L'avenir de la politique industrielle française - Louis Gallois
- L'avenir de la politique énergétique française - Pierre Papon
- L'avenir du pétrole - Claude Mandil
- L'avenir de l'euro et de la BCE - Henri Guaino & Denis Kessler
- L'avenir de la propriété intellectuelle - Denis Olivennes
- L'avenir du travail - Dominique Méda
- L'avenir de l'anti-science - Alexandre Moatti
- L'avenir du logement - Olivier Mitterrand
- L'avenir de la mondialisation - Jean-Pierre Chevènement
- L'avenir de la lutte contre la pauvreté - François Chérèque
- L'avenir du climat - Jean Jouzel
- L'avenir de la nouvelle Russie - Alexandre Adler
- L'avenir de la politique - Alain Juppé
- L'avenir des Big-Data - Kenneth Cukier & Dominique Leglu
- L'avenir de l'organisation des Entreprises - Guillaume Poittrinal

-
- L'avenir de l'enseignement du fait religieux dans l'École laïque - Régis Debray
 - L'avenir des inégalités - Hervé Le Bras
 - L'avenir de la diplomatie - Pierre Grosser
 - L'avenir des relations franco-russes - S.E Alexandre Orlov
 - L'avenir du Parlement - François Cornut-Gentille
 - L'avenir du terrorisme - Alain Bauer
 - L'avenir du politiquement correct - André Comte-Sponville & Dominique Lecourt
 - L'avenir de la zone euro - Michel Aglietta & Jacques Sapir
 - L'avenir du conflit entre chiïtes et sunnites - Anne-Clémentine Larroque
 - L'Iran et son avenir - S.E Ali Ahani
 - L'avenir de l'enseignement - François-Xavier Bellamy
 - L'avenir du travail à l'âge du numérique - Bruno Mettling
 - L'avenir de la géopolitique - Hubert Védrine
 - L'avenir des armées françaises - Vincent Desportes
 - L'avenir de la paix - Dominique de Villepin
 - L'avenir des relations franco-chinoises - S.E. Zhai Jun
 - Le défi de l'islam de France - Jean-Pierre Chevènement
 - L'avenir de l'humanitaire - Olivier Berthe - Rony Brauman - Xavier Emmanuelli
 - L'avenir de la crise du Golfe entre le Qatar et ses voisins - Georges Malbrunot
 - L'avenir du Grand Paris - Philippe Yvin
 - Entre autonomie et Interdit : comment lutter contre l'obésité ?
Nicolas Bouzou & Alain Coulomb
 - L'avenir de la Corée du Nord - Juliette Morillot & Antoine Bondaz
 - L'avenir de la justice sociale - Laurent Berger
 - Quelles menaces numériques dans un monde hyperconnecté ? - Nicolas Arpagian
 - L'avenir de la Bioéthique - Jean Leonetti
 - Données personnelles : pour un droit de propriété ?
Pierre Bellanger et Gaspard Koenig
 - Quels défis pour l'Algérie d'aujourd'hui ? - Pierre Vermeren
 - Turquie : perspectives européennes et régionales - S.E. Ismail Hakki Musa
 - Burn out - le mal du siècle ? - Philippe Fossati & François Marchand
 - L'avenir de la loi de 1905 sur la séparation des Églises et de l'État.
Jean-Philippe Hubsch
 - L'avenir du bitcoin et du blockchain - Georges Gonthier & Ivan Odonnat
 - Le Royaume-Uni après le Brexit
Annabelle Mourougane - Frédéric de Brouwer & Pierre Beynet
 - L'avenir de la communication politique - Gaspard Gantzer
 - L'avenir du transhumanisme - Olivier Rey
 - L'économie de demain : sociale, solidaire et circulaire ?
Géraldine Lacroix & Romain Slitine
 - La transformation numérique de la défense française - Vice-amiral Arnaud Coustillière
 - L'avenir de l'indépendance scientifique et technologique française
Gérard Longuet
 - L'avenir du Pakistan - Ardavan Amir-Aslani
 - Le corps humain et sa propriété face aux marchés - Sylviane Agacinski
 - L'avenir de la guerre économique américaine - Ali Laïdi
 - Construire l'économie de demain - Jean Tirole
 - L'avenir de l'écologie... et le nôtre - Luc Ferry
 - La vulgarisation scientifique est-elle un échec ? - Étienne Klein
 - Les trois utopies européennes - Francis Wolff
 - L'avenir des Juifs français - Haïm Korsia
 - Comment faire face à la pénurie et à la hausse des prix des matières premières ?
Philippe Chalmin

- Changement climatique : comprendre et agir - Christian de Perthuis
- L'avenir du féminisme - Caroline Fourest
- Le ressentiment contemporain menace-t-il la Démocratie ? - Cynthia Fleury
- Les nouvelles lignes d'affrontement dans un monde numérisé : l'ère des frontières.com - Nicolas Arpagian
- Comment manager la génération Z ? - Pascal Broquard
- Les dangers du « wokisme » - Jean-François Braunstein
- La dépression, mal du siècle ? - Hugo Bottemanne
- L'avenir du posthumanisme ou les limites de l'humain - Jean-Michel Besnier
- Transgenres et conséquences : Les transitions juvéniles et la responsabilité des adultes - Claude Habib
- Devenir transclasse : comment échapper aux destins déjà écrits ? - Chantal Jaquet
- Re-considérons le travail - Sophie Thiéry
- La droite en France - David Lisnard
- Le Moyen-Orient en 2050 - Jean-Pierre Filiu
- L'économie du bonheur - La croissance rend-elle les individus heureux ? - Claudia Senik

Les Déjeuners / Dîners de l'Institut Diderot

- La Prospective, de demain à aujourd'hui - Nathalie Kosciusko-Morizet
- Politique de santé : répondre aux défis de demain - Claude Evin
- La réforme de la santé aux États-Unis : quels enseignements pour l'assurance maladie française ? - Victor Rodwin
- La question du médicament - Philippe Even
- La décision en droit de santé - Didier Truchet
- Le corps ce grand oublié de la parité - Claudine Junien
- Des guerres à venir ? - Philippe Fabry
- Les traitements de la maladie de Parkinson - Alim-Louis Benabib
- La souveraineté numérique - Pierre Bellanger
- Le Brexit et maintenant - Pierre Sellal
- Les Jeux paralympiques de Paris 2024 : une opportunité de santé publique ?
Pr François Genet & Jean Minier - Texte écrit en collaboration avec Philippe Fourny
- L'intelligence artificielle n'existe pas - Luc Julia
- Cyber : quelle(s) stratégie(s) face à l'explosion des menaces ?
Jean-Louis Gergorin & Léo Issac-Dognin
- La puissance publique face aux risques - François Vilnet & Patrick Thourot
- La guerre des métaux rares - La face cachée de la transition énergétique
et numérique - Guillaume Pitron
- Comment réinventer les relations franco-russes ? - Alexandre Orlov
- La république est-elle menacée par le séparatisme ? - Bernard Rougier
- La révolution numérique met-elle en péril notre civilisation ? - Gérald Bronner
- Comment gouverner un peuple-roi ? - Pierre-Henri Tavoillot
- L'eau enjeu stratégique et sécuritaire - Franck Galland
- Autorité un «enjeu pluriel» pour la présidentielle 2022 ? - Thibault de Montbrial
- Manifeste contre le terrorisme islamiste - Chems-eddine Hafiz
- Reconquérir la souveraineté numérique
Matthieu Bourgeois & Bernard de Courrèges d'Ustou
- Le sondage d'opinion : outil de la démocratie ou manipulation de l'opinion ? Alexandre Dézé
- Le capitalisme contre les inégalités - Yann Coatanlem
- Franchir les limites : transitions, transgressions, hybridations - Claudine Cohen
- Migrations, un équilibre mondial à inventer - Catherine Withol de Wenden

-
- Insécurité alimentaire et changement climatique : les solutions apportées par les biotechnologies végétales - Georges Freyssinet
 - L'avenir de la gauche française - Renaud Dely

Les Notes de l'Institut Diderot

- L'euthanasie, à travers le cas de Vincent Humbert - Emmanuel Halais
- Le futur de la procréation - Pascal Nouvel
- La République à l'épreuve du communautarisme - Eric Keslassy
- Proposition pour la Chine - Pierre-Louis Ménard
- L'habitat en utopie - Thierry Paquot
- Une Assemblée nationale plus représentative - Eric Keslassy
- Où va l'Égypte ? - Ismaïl Serageldin
- Sur le service civique - Jean-Pierre Gualazzi
- La recherche en France et en Allemagne - Michèle Vallentini
- Le fanatisme - Texte d'Alexandre Deleyre présenté par Dominique Lecourt
- De l'antisémitisme en France - Eric Keslassy
- Je suis Charlie. Un an après... - Patrick Autréaux
- Attachement, trauma et résilience - Boris Cyrulnik
- La droite est-elle prête pour 2017 ? - Alexis Feertchak
- Réinventer le travail sans l'emploi - Ariel Kyrou
- Crise de l'École française - Jean-Hugues Barthélémy
- À propos du revenu universel - Alexis Feertchak & Gaspard Koenig
- Une Assemblée nationale plus représentative - *Mandature 2017-2022* - Eric Keslassy
- L'avenir de notre modèle social français - Jacky Bontems & Aude de Castet
- Handicap et République - Pierre Gallix
- Réflexions sur la recherche française... - Raymond Piccoli
- Le système de santé privé en Espagne : quels enseignements pour la France ?
Didier Bazzocchi & Arnaud Chneiweiss
- Le maquis des aides sociales - Jean-Pierre Gualazzi
- Réformer les retraites, c'est transformer la société - Jacky Bontems & Aude de Castet
- Vers un droit du travail 3.0 - Nicolas Dulac
- L'assurance santé privée en Allemagne : quels enseignements pour la France ?
Arnaud Chneiweiss & Nadia Desmaris
- Repenser l'habitat. Quelles solidarités pour relever le défi du logement dans une société de la longévité ? - Jacky Bontems & Aude de Castet
- De la nation universelle au territoire-monde - L'avenir de la République dans une crise globale et totale - Marc Soléry
- L'intelligence économique - Dominique Fonvielle
- Pour un Code de l'enfance - Arnaud de Belenet
- Les écoles de production - Agnès Pannier-Runacher
- L'intelligence artificielle au travail - Nicolas Dulac Gérardot
- Une Assemblée nationale plus représentative ? - *Mandature 2022-2027* - Eric Keslassy
- L'homme politique face aux diktats de la com - François Belley
- Santé - Évolutions mondiales, problèmes français - Jean de Kervasdoué

Les Colloques de l'Institut Diderot

- L'avenir du progrès
- Les 18-24 ans et l'avenir de la politique
- L'avenir de l'Afrique
- Les nouvelles stratégies de prévention pour vivre et vieillir en bonne santé

Les enjeux climatiques et environnementaux imposent une transition énergétique vers un monde nouveau, plus économe en énergie, plus électrique et moins émetteur de gaz à effet de serre.

Cette transition passe par un développement de la recherche fondamentale, technologique et industrielle, ainsi que par une forte innovation dans les domaines de la production énergétique, du transport, de l'industrie et du bâtiment.

La France dispose d'un mix énergétique relativement diversifié, même si notre dépendance aux énergies fossiles reste encore élevée, notamment pour le secteur des transports.

Quelle est la situation énergétique française aujourd'hui, quels sont les défis scientifiques et technologiques que nous devons affronter pour diminuer notre empreinte carbone ? Quels sont les scénarios 2050 de mix énergétique possibles et réalistes, dans les limites de la physique et des contraintes sociales et politiques ?

Marc FONTECAVE



Marc Fontecave est professeur au Collège de France, titulaire de la chaire Chimie des processus biologiques, membre de l'Académie des sciences, auteur notamment de « Halte au catastrophisme ! : Les vérités de la transition énergétique » (Flammarion, 2020).

