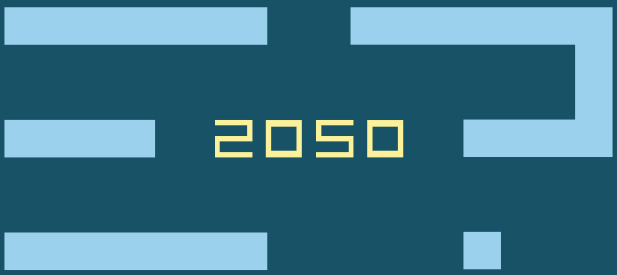
Perspectives Énergies 2050



Visions du paysage énergétique mondial en 2050

CONNAISSANCE des ÉNERGIES

PERSPECTIVES ÉNERGIES 2050

en collaboration avec Frédéric Encel

Les contributions de ce projet ont été publiées de janvier 2017 à février 2018 sur le site www.connaissancedesenergies.org.

Direction de la publication
Maël Dancette, Connaissance des Énergies

Maquette et mise en page
Alexandre Lassaigne, Connaissance des Énergies

© Connaissance des Énergies, avril 2018

Sommaire

Préface, par Patrice Geoffron . . . . . p. 7
Synthèse . . . . . p. 11

La vision de…

Marie-Claire Aoun . . . . . p. 15
Olivier Appert . . . . . p. 19
Christophe Bonnery . . . . . p. 23
François Chabannes . . . . . p. 27
Jean-Marie Chevalier . . . . . p. 31
Bertrand Collomb . . . . . p. 35
Henri Conze . . . . . p. 39
Michel Derdevet . . . . . p. 43
Benjamin Dessus . . . . . p. 47
Marie-Claude Dupuis . . . . . p. 53
ENEA Consulting . . . . . p. 57
Jean-Louis Étienne . . . . . p. 61
Alain Fuchs . . . . . p. 65
Samuele Furfari . . . . . p. 71
Thierry Gaudin . . . . . p. 77
Kirsty Gogan . . . . . p. 83
Christine Goubet-Milhaud . . . . . p. 89
François Heisbourg . . . . . p. 93
Max Bankole Jarrett . . . . . p. 95
Jean Jouzel . . . . . p. 99
Étienne Klein . . . . . p. 103
Philippe Knoche . . . . . p. 107
Hervé Le Treut . . . . . p. 111
Sébastien Léger . . . . . p. 115
Jean-Claude Lehmann . . . . . p. 119
Jean-Bernard Lévy . . . . . p. 125

La vision de… (suite)

Colette Lewiner . . . . . p. 129
Myriam Maestroni . . . . . p. 135
Nadia Maïzi . . . . . p. 141
Claude Mandil . . . . . p. 145
Tatsuo Masuda . . . . . p. 149
Gérard Mestrallet . . . . . p. 151
Dominique Mockly . . . . . p. 155
Marie-José Nadeau . . . . . p. 161
Association négaWatt . . . . . p. 167
Christian Ngô . . . . . p. 171
Pierre Papon . . . . . p. 175
Jacques Percebois . . . . . p. 181
Christian de Perthuis . . . . . p. 185
Andris Piebalgs . . . . . p. 191
Pierre Prieux . . . . . p. 195
Bruno Rebelle . . . . . p. 199
Alexandre Rojey . . . . . p. 205
Jean-Louis Schilansky . . . . . p. 209
Stephan Silvestre . . . . . p. 213
Bernard Tardieu . . . . . p. 215
Daniel Verwaerde . . . . . p. 221
Marie-Christine Zélem . . . . . p. 225

Préface

par Patrice Geoffron
Professeur d'économie à l'Université Paris-Dauphine
Directeur du Centre de géopolitique de
l'énergie et des matières premières

Perspectives Énergies 2050 : comment penser le « monde d'après » ?

La lutte contre le changement climatique constitue une urgence imposant la mise en œuvre de politiques énergétiques, généralement qualifiées de transitions « bas carbone », qui conduisent à engager des transformations systémiques sous fortes contraintes de temps et en présence d'incertitudes multiples : sur la maturation des différentes filières technologiques, sur leurs coûts et les prix de l'énergie délivrée, sur la demande finale et ses mutations, sur la coordination des efforts nationaux ou locaux… La complexité de cette transition (et l'ombre portée des menaces de dérèglements climatiques sur les écosystèmes naturels et les collectivités humaines) invite à scruter loin dans le passé, mais aussi loin dans l'avenir, pour faire émerger les nouveaux modèles de société sobres en carbone.

Loin dans le passé car, singulièrement, l'air que respirent les humains à New Dehli ou Pékin au début du XXI^e^ siècle est saturé des mêmes pollutions charbonnières que dans le Londres de Dickens, au XIX^e^ siècle. Sortir de l'ère du carbone reviendra à s'extraire en 2100 d'une parenthèse dans l'histoire de l'humanité, ouverte aux alentours de 1800, et qui aura vu s'empiler depuis lors les usages du charbon, du pétrole et du gaz, et même s'éloigner l'horizon temporel de l'épuisement de

ces ressources fossiles (dont les réserves prouvées sont plus abondantes aujourd'hui que dans les années 1970). Engager la transition implique une connaissance des ressorts intimes de l'ère du carbone, et d'admettre que, contrairement aux visions provoquées par les chocs pétroliers et autres perspectives d'un « peak oil », sa fin ne procèdera pas d'une raréfaction des réserves en hydrocarbures, et devra donc être accélérée par d'autres mécanismes.

Aussi, importe-t-il tout autant de se projeter dans l'avenir, pour anticiper, dans toute la mesure du possible et armé de solides réserves d'humilité, les conséquences lointaines des décisions présentes et leur efficacité pour promouvoir la décarbonation. Ainsi, le pilotage de la transition est-il particulièrement dense en scénarios énergétiques, à l'horizon 2030 pour les plus proches et 2100 pour les plus lointains. À ce terme ultime, selon les principes esquissés à Copenhague en 2009 et entérinés par l'accord de Paris de 2015, l'humanité devra vivre dans un monde neutre en carbone et dont la température devra ne pas avoir varié de plus de 2°C (et si possible moins encore) par rapport aux débuts de l'ère industrielle. Dans l'histoire des transformations sociotechniques, aucune n'aura été aussi complexe et incertaine (et portant de tels enjeux) et, par conséquent, aussi riche et dense en explorations de l'avenir via ces scénarisations destinées à guider les politiques publiques ou éclairer les décisions d'investissements d'acteurs privés.

Penser le « monde d'après » constitue donc une nécessité impérieuse, pour coordonner les actions, les adapter, partager le retour d'expérience, gagner du temps dans la course contre la montre qu'est la lutte contre le changement climatique. C'est à cet exercice que se sont livrés les près de cinquante expertes et experts conviés à esquisser ici leur vision du monde

énergétique « d'après », en 2050. La richesse de ces visions – certes pas délivrées par des oracles – procède évidemment de la diversité des parcours et des positions : de spécialistes de sciences physiques à des animateurs d'ONG, en passant par des responsables de premier rang d'entreprises énergétiques… Il importe de saluer ce beau projet porté par Connaissance des Énergies pour « mettre en bouquet » ces expertises et donner ainsi au citoyen des matériaux pour tisser sa propre vision du « monde d'après ».

Synthèse

Près d'une cinquantaine de contributeurs, industriels, chercheurs, professeurs, responsables de grandes administrations… nous ont fait l'honneur de nous présenter en une forme dense (retenue pour cette synthèse) leurs « Perspectives Énergies 2050 ». Nonobstant la diversité des rédacteurs, un grand nombre de points de convergence apparaissent sans toutefois gommer d'autres points de divergence.

Convergences d'abord sur la difficulté du travail prospectif et l'impossibilité structurelle à prévoir les ruptures. L'augmentation de la population mondiale, son urbanisation dans des villes fréquemment situées à côté des mers et océans forgent le contexte humain et géographique commun.

La nécessité de lutter contre les émissions de CO_2 est incontestée.

La demande mondiale d'énergie en 2050 est prévue stable ou en hausse par la quasi-totalité des contributeurs, face à une offre où, globalement, l'énergie ne manquera pas.

Pour tous, l'électricité s'imposera en tant qu'énergie finale, en forte croissance si ce n'est dominante. Sa distribution sera moins centralisée et organisée dans des réseaux intelligents.

Dans des proportions variées, les énergies solaire, éolienne et gazière devraient se développer. L'importance du stockage d'électricité est soulignée tout comme ses insuffisances technologiques actuelles et l'attente de progrès majeurs.

Pour finir, la nécessité d'efforts de sobriété et d'amélioration d'efficacité énergétiques est unanimement affirmée.

Au-delà de ces convergences, apparaissent des vues prospectives diverses, voire opposées. Certains rédacteurs prévoient, face à la nécessité de lutter contre le réchauffement climatique, des transitions énergétiques rapides alors que d'autres soulignent le long horizon de temps des investissements énergétiques imposant des évolutions lentes. De la même manière, une taxation du CO_2 plus ou moins universelle est à portée de main pour les uns et quasi inaccessible pour les autres.

La structure de la fourniture d'énergie ne fait aucun consensus. Pour les uns, en 2050, les énergies fossiles resteront largement majoritaires avec un pétrole maintenant plus ou moins son usage au niveau de production actuel et un charbon, certes « propre », continuant à être largement exploité. Pour d'autres, en 2050, les énergies renouvelables seront devenues dominantes. L'hydrogène sera pour les uns un vecteur structurant, surtout pour les transports, alors qu'il est souvent par ailleurs totalement ignoré.

Un fort développement de l'énergie nucléaire n'est pas un scénario réellement envisagé, sauf exceptions. En revanche, son maintien, voire une croissance modérée, est retenu fréquemment. La dispersion d'opinions porte en grande partie sur sa mise en œuvre : 3^{e} génération, 4^{e} génération, petits réacteurs ?

Si l'importance de la recherche et développement dans les domaines de l'énergie est fréquemment soulignée, certains attendent et considèrent comme acquis l'apport d'avancées substantielles, voire de ruptures, d'autres soulignent le caractère imprévisible des fruits de la recherche et la faiblesse des niveaux d'investissement.

Outre ces convergences et divergences, des approches spécifiques ont été présentées. Pour n'en citer que trois, retenons

la criticité de la forte consommation de ressources minérales (par exemple le lithium) pouvant déboucher sur des impasses de disponibilité, la problématique de la consommation croissante d'énergie électrique dans un monde toujours plus numérisé et l'importance de la prise de conscience individuelle d'une responsabilité énergétique.

Pour finir, comment ne pas souligner le pessimisme général quant à l'atteinte des objectifs de la COP21.

La vision de…

Marie-Claire Aoun

Responsable du département des relations
institutionnelles de Teréga (anciennement TIGF)
Ancienne directrice du Centre Énergie de l'Ifri (2014–2017)

La mise en œuvre de l'accord de Paris, signé en décembre 2015 par 195 pays représentant plus de 90 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre pour contenir le réchauffement climatique en dessous des deux degrés, devrait se traduire par une transformation radicale et rapide du système énergétique mondial d'ici 2050. Selon l'Agence internationale de l'énergie, un tel scénario supposerait un bouquet énergétique global en 2040 composé de 57 % d'énergies fossiles (13 % charbon, 22 % pour le pétrole et 22 % pour le gaz) contre 81 % aujourd'hui, de 11 % de nucléaire et de 32 % d'énergies renouvelables (hydroélectricité et biomasse compris).

Loin d'atteindre aujourd'hui ces objectifs de décarbonation, le cheminement vers une économie mondiale plus sobre en carbone en 2050 se heurte à la forte rigidité de nos systèmes énergétiques fondés sur des investissements lourds et coûteux, avec une durée de vie des infrastructures qui s'étale sur de longues décennies. Rappelons que, si à l'échelle nationale, les évolutions des bouquets énergétiques connaissent parfois des bouleversements rapides, le système énergétique mondial dans son ensemble frappe quant à lui par sa grande inertie : la part des énergies fossiles dans le mix énergétique mondial n'a guère évolué depuis les années 1980.

Des signaux contraires confirment néanmoins le tournant actuel du secteur énergétique, en particulier pour le secteur

électrique. Les baisses de coûts significatives observées ces dernières années dans les énergies renouvelables ainsi que les investissements considérables réalisés par la Chine, l'Europe et les États-Unis, en particulier dans le solaire et l'éolien, laissent entrevoir des perspectives prometteuses pour la décarbonation des systèmes électriques mondiaux.

Les progrès réalisés dans les technologies de stockage de l'électricité pour soutenir le déploiement des énergies renouvelables sont significatifs mais leur développement à grande échelle reste aujourd'hui soumis à de nombreuses incertitudes, tout comme d'autres solutions technologiques ayant des degrés de maturité différents, comme la capture et la séquestration du CO_2 ou l'hydrogène. De plus, de nouvelles possibilités de réduction des coûts sont permises par la digitalisation du secteur énergétique, qui révolutionne cette industrie et crée de nouvelles opportunités, mais fait émerger aussi de nouveaux risques, comme celui de la cybersécurité.

La dynamique de transition dans le secteur électrique semble donc bien réelle. Elle n'est pas encore enclenchée dans les autres secteurs comme le transport et l'incertitude porte sur la vitesse et le rythme de cette transformation globale. Le secteur énergétique dans son ensemble semble tout de même s'orienter en 2050 vers un système plus décentralisé, plus interconnecté, plus efficace et moins carboné. Il conjuguera sans doute efficacité énergétique, digitalisation, stockage d'énergie et déploiement d'énergies sobres en carbone. Sera-t-il pour autant moins dominé par les facteurs géopolitiques ?

La mutation de nos systèmes énergétiques bouleversera selon toute vraisemblance les rapports de force établis sur la scène mondiale, face à la course entre les grandes puissances pour détenir les technologies bas carbone de demain. La transition énergétique s'accompagnera peut être aussi de nouvelles interdépendances, envers par exemple le lithium et autres

terres rares. La géopolitique de l'énergie de demain sera aussi déterminée d'une part par une bien moindre dépendance des États-Unis envers le pétrole du Moyen-Orient, grâce à la révolution des hydrocarbures non conventionnels, et d'autre part par les liens accrus avec cette région de la Chine et de l'Inde, qui importeront 50 % du pétrole échangé sur le marché international en 2040 (contre 25 % aujourd'hui).

Les rapports de force géopolitiques qui dominent le secteur énergétique depuis les chocs pétroliers des années 1970, avec un pouvoir de marché de l'OPEP pesant sur les prix du pétrole, seront ainsi bien bouleversés en 2050. Dans ce paysage en recomposition, des interrogations fortes pèsent sur l'avenir des économies rentières des pays producteurs de pétrole, en l'absence de chocs de diversification économique vers d'autres secteurs pour pallier le déclin des recettes d'hydrocarbures et engranger de nouvelles sources de revenus. Le défi de plusieurs puissances pétrolières, l'Arabie saoudite en chef de file, est aussi exacerbé par une demande énergétique explosive sur le plan domestique qui risque d'assécher progressivement les volumes disponibles à l'exportation de l'or noir.

Un écrivain célèbre rappelait souvent *« la seule chose dont on soit sûr, en ce qui concerne l'avenir, c'est qu'il n'est jamais conforme à nos prévisions »*. Prédictions d'un pic pétrolier, d'une production américaine de pétrole de schiste peu résiliente ou d'un baril du pétrole à 200 $, les analyses dans le secteur énergétique n'ont eu de cesse de se tromper ces dernières années… Face à l'environnement actuel d'incertitudes technologiques, économiques et géopolitiques, l'exercice d'élaborer des prévisions à 2050 sur notre avenir énergétique n'aura jamais été aussi périlleux.

La vision de…

Olivier Appert

Délégué général de l'Académie des technologies
Ancien président d'IFP Énergies nouvelles (2003–2015)

Le terme de transition est dans l'air du temps. On connaît depuis longtemps la transition démographique, la transition numérique bouleverse nos économies. Maintenant, on parle de la transition énergétique. En effet, le secteur énergétique sera confronté à une évolution majeure dans les prochaines décennies. Rappelons-nous cependant que le secteur énergétique n'a cessé d'évoluer depuis deux siècles : nous sommes passés de l'ère de la biomasse à celle du charbon, puis du pétrole, du gaz, demain des renouvelables…

Deux leçons peuvent être tirées de ce rappel historique. Le secteur énergétique présente une très grande inertie : le taux de renouvellement moyen du parc immobilier est de 1 % à 2 % par an, les installations de production d'électricité ont une durée de vie d'au moins 50 ans. La transition à venir prendra du temps. Par ailleurs, les défis de l'énergie sont tels qu'on a eu besoin de mobiliser toutes les sources d'énergie : il n'existe pas de panacée qui permettrait de régler seule tous les problèmes.

Les divers scénarios à long terme mettent en évidence un certain nombre de fondamentaux de la transition en cours :

- la consommation d'énergie par habitant devrait atteindre un pic durant la décennie 2030. Ceci est dû aux bénéfices des progrès technologiques, mais aussi à une croissance économique plus faible des pays émergents. Le nombre d'habitants sur Terre va croître et le système énergétique

sera confronté à une course-poursuite entre le progrès technologique et la population mondiale ;

- la part de l'électricité dans la consommation finale d'énergie va croître. Le Conseil mondial de l'énergie prévoit que la consommation d'électricité double d'ici 2060 ;
- la production d'électricité solaire et éolienne devrait croître de façon importante dans tous les pays du monde. Ceci représente un défi majeur pour le secteur électrique compte tenu du caractère intermittent de ces sources d'énergie ;
- la consommation de charbon devrait atteindre un pic dans les prochaines décennies. Le pic de la consommation de pétrole devrait suivre ;
- l'avenir de la consommation d'énergie du secteur du transport constitue un défi majeur. Ce secteur dépend aujourd'hui à 95 % du pétrole pour son approvisionnement énergétique. La solution passera par la poursuite des progrès technologiques pour réduire les consommations mais aussi par le développement de sources d'énergies alternatives : biocarburants, gaz, électricité, etc. ;
- la limitation de l'augmentation de température en dessous de 2°C reste un défi majeur ;
- la transition énergétique qui se dessine impliquera le développement d'innovations dans tous les secteurs de la consommation et de la production d'énergie. Par ailleurs une coopération entre tous les acteurs est impérative : gouvernements, entreprises, collectivités territoriales, ONG, consommateurs, etc.

La transition énergétique qui s'engage nécessitera des avancées majeures sur l'efficacité énergétique qui est à l'évidence la première priorité. Cela pourra passer par certaines évolutions

des modes de consommation. Mais il faut se rappeler que l'énergie est un facteur majeur de la croissance économique des pays les plus pauvres : rappelons-nous que plus d'un milliard d'habitants n'ont pas accès à une énergie moderne. Le progrès technique jouera à l'évidence un rôle important. Mais encore faut-il que les gouvernements et les entreprises investissent en R&D.

Par ailleurs, il est indispensable de favoriser les technologies les plus efficaces au plan économique, c'est-à-dire au regard du coût de la tonne de CO_2 évitée. Il est indispensable de se préoccuper des *business models* qui permettront aux acteurs d'investir sur ces technologies.

Baser le développement d'une filière sur des subventions récurrentes n'est pas durable à terme à l'évidence. Il est indispensable aussi d'évaluer les diverses filières en fonction de leur impact « du puits à la roue ». Par exemple, investir dans le développement du véhicule électrique dans certains pays dont le mix électrique est très carboné n'est à l'évidence pas optimal. La transition énergétique impose par ailleurs la mise en place d'une gouvernance forte : on ne peut pas se fier au marché pour répondre seul à tous les défis. Enfin, on ne doit pas oublier la géopolitique qui joue un rôle majeur, tant sur le plan de la consommation que de la production d'énergie.

La vision de…

Christophe Bonnery

Président de l'Association des économistes de l'énergie
Directeur de l'économie et de la prospective d'Enedis

Le propre des travaux de prospective économique est d'être faux dès qu'ils sont publiés. À tout le moins, c'est ce que disent nombre d'économistes de leurs propres travaux. La fausse modestie qui nous anime conduit à superposer les trajectoires des prévisions successives en pointant les erreurs d'anticipation.

Tous les domaines de la prospective de l'énergie sont concernés : prévisions erratiques des cours du pétrole, incapacité à prédire l'émergence des gaz de schiste, défaillance des évaluations des quotas sur le marché européen du carbone, défaillance de tenue des objectifs de développement des énergies renouvelables (EnR), camouflet de la renaissance du nucléaire, etc.

Les exercices de prospective sont périlleux mais l'expérience nous apprend comment devrait se profiler une plus grande maîtrise de cet exercice. Que sait-on sur les erreurs de la prévision ? D'abord que les modèles économiques ne valent que par la connaissance de leurs limites ? L'approche académique pose toujours les limites de certitudes. Le problème vient du fait qu'on lit plus les grosses lignes des résultats que les petites lignes des conditions de pertinence. Apprenons la communication modeste qui veut que les résultats n'ont de sens qu'assortis de l'expression de leur incertitude (comme l'indice de confiance de la météo).

Ensuite, les économistes savent que la qualité des résultats de la modélisation tient à la qualité des données qu'on introduit dans le modèle. Avec le même modèle économique, on pourrait faire s'entendre les pires extrêmes, simplement en utilisant les données qui leur conviennent. Sans étude de sensibilité, point de certitude.

Enfin, l'art de la modélisation s'est fortement amélioré. La théorie économique s'est enrichie, les données se sont étoffées, la puissance de calcul a explosé et s'est répandue. La diffusion de l'information, y compris grâce aux sociétés savantes comme l'International Association for Energy Economics (IAEE), a offert de vastes gisements de recherche dans tous les laboratoires, offrant ainsi des lectures plus vastes de la science économique. Vulgarisons, expliquons, recoupons. Ces transformations n'en sont qu'à leurs balbutiements.

Plus encore, nous devrons bientôt remercier d'autres acteurs de libérer le champ de la prospective : ce sont les politiques qui, élargissant les débats et généralisant les transitions énergétiques dans les différents pays, rendent les futurs plus « ouverts ». Ces incertitudes ou légitimes remises en question par la sphère politique valorisent des technologies, comme les EnR ou le nucléaire, que le marché n'aurait pas spontanément fait émerger.

Enfin, la contribution des économistes de l'énergie aux exercices de prospective s'attache à évaluer l'efficacité des différentes régulations du marché, des technologies, les jeux des acteurs. Pour ces derniers, l'exercice de prospective ne va pas assez loin. Prévoir l'évolution ou les ruptures dans les *business models* est déjà complexe. Il faut d'abord segmenter la chaîne de valeur de la meilleure façon. Ainsi, on a distingué des acteurs pour lesquels les économistes ont fait traditionnellement des études de comportement assez

poussées selon qu'on se focalise sur le métier de producteur, de transporteur, de fournisseur ou plus récemment sur les consommateurs. Or, il se trouve que les consommateurs passent de la position de bout de chaîne à celle du haut de la chaîne de décision.

En effet, sur le plan direct, ils deviennent des *« prosumers »*, des consommateurs actifs qui produisent et optimisent eux-mêmes leur énergie. La conséquence de cet activisme est l'innovation apportée par les acteurs traditionnels qui se préparent à offrir désormais des services au moindre coût plutôt que de l'énergie. Plaçant le consommateur en haut de la chaîne, l'exercice de prospective devra désormais déduire en premier lieu le réseau de distribution des besoins effectifs du consom'acteur.

L'outil de prospective doit être *bottom-up*… si on met le consommateur en bas. On entend encore trop de voix prétendant apporter un regard économique sur la politique énergétique nourri d'une vision jacobine.

Faire de la prospective en opposant énergies centralisées et décentralisées est dépassé. Il faut peut-être retourner la table et mettre le consommateur et ses besoins en haut. Pour construire une vision prospective adaptée aux temps modernes, l'observation des travaux des économistes de l'énergie conduit à considérer un nouveau cahier des charges de la modélisation prospective :

- partir des données de masse impactant la consommation, la temporalité et l'environnement ;
- s'appuyer sur la nouvelle puissance de calcul informatique pour traiter ces données ;
- intégrer les différents échelons territoriaux de gouvernance, sans préconçu sur la subsidiarité ;

- optimiser l'ensemble coût/équité/transparence et en déduire les régulations pertinentes.

À terme, l'équilibre entre l'économie d'échelle poussant les solutions centralisées et l'adéquation fine de la demande poussant le solutions technologiques et régulatoires décentralisées doit permettre une meilleure optimisation.

Ce cahier des charges est certes très global. Il s'agit de mettre en chantier les premières modélisations *bottom-up*. Dans un deuxième temps, l'approche académique des économistes questionnera la pertinence de l'approche et la comparera à la prospective traditionnelle.

Ainsi, le débat académique créera l'équilibre des méthodes. Ouvrons le chantier de l'auto-correction des prospectives.

La vision de…

François Chabannes

Coprésident de la Fondation d'entreprise Alcen
pour la Connaissance des Énergies

De l'énergie en 2050 ? Mais pour quelle humanité ?

De 7,5 milliards d'humains aujourd'hui, l'ONU en prévoit environ 10 milliards en 2050, l'accroissement de 2,5 milliards se produisant quasi exclusivement en Afrique subsaharienne (+ 1,6 milliard) et en Asie du Sud (+ 800 millions). Ces régions chaudes, les plus pauvres et les plus fécondes, souvent sans accès à l'électricité, ont cependant un fort potentiel de développement, sous réserve de disposer des énergies adaptées à leur environnement.

Simultanément, le taux mondial d'urbanisation, de 54 % aujourd'hui, devrait dépasser 65 % en 2050, soit un accroissement de 2,5 milliards de citadins, portant à 6 milliards la population totale vivant dans des agglomérations. Les densités y dépasseront couramment 15 000 habitants par km². Près de 70 % d'entre elles seront situées à moins de 100 kilomètres d'un littoral. Plus des deux tiers de l'énergie mondiale y sera consommée.

Aujourd'hui, près de 80 % de cette énergie est tirée de la combustion dans l'air de ressources carbonées fossiles (charbon, pétrole, gaz) rejetant dans l'atmosphère du CO_2 qui menace l'équilibre climatique, mais aussi des polluants (NOx, SO_2, etc.) qui rendent irrespirable l'air des mégapoles. D'ici à 2050, la bataille pour l'environnement va donc se jouer principalement dans les agglomérations humaines

hyperdenses, d'autant plus que leur littoralité les expose au premier rang des extrêmes climatiques.

L'électrification massive à partir de sources décarbonées apparaît comme la parade principale à la pollution et à l'échauffement qui menace les mégapoles existantes ou émergentes, en particulier dans les pays chauds en développement. Le tout électrique pourrait rendre les villes hyperdenses de 2050 à la fois plus respirables, saines, climatisées, mais aussi circulantes, communicantes et résilientes.

Le solaire photovoltaïque (PV) émerge alors comme la technologie la mieux adaptée à l'électrification des espaces urbanisés futurs, en couvrant les toitures de panneaux solaires. Mais les rendements surfaciques du PV, encore loin des maximums théoriques, ne permettent pas d'espérer qu'il puisse faire face seul d'ici 2050 aux besoins des cités hyperdenses. Un premier appoint sera à rechercher dans la géothermie de leurs sous-sols pour les climatiser et même les électrifier à partir de forages adaptés en profondeur.

Aux pourtours des cités, en relais du solaire, les TWh décarbonés nécessaires à leurs industries seront produits par l'hydroélectricité et l'éolien dans les reliefs, par le nucléaire le long des fleuves et des rivages, par l'éolien offshore au large. Plus loin, l'habitat rural aura largement recours au solaire ou à l'éolien pour s'électrifier localement mais le recul du thermique fossile y sera plus lent que dans les villes.

Dans les cités émergentes, la révolution digitale accompagnera partout l'électrification. Production et consommation électriques seront harmonisées par des logiciels puissants, mis en œuvre dès la conception des infrastructures et des bâtiments, capables de piloter ensuite globalement l'efficacité énergétique de grandes agglomérations.

Deux obstacles majeurs vont s'opposer à l'électrification urbaine décarbonée :

- le foncier d'abord : hors nucléaire et géothermie, l'éolien, l'hydroélectrique et dans une moindre mesure le solaire nécessitent des surfaces énormes pour produire les TWh que les concentrations urbaines vont exiger. Ces espaces périurbains leur seront âprement contestés par les populations migrant vers les mégapoles ;
- l'économique ensuite. Malgré des années de subventions, le solaire et l'éolien n'ont pas encore décollé à l'échelle mondiale (2 % de la production énergétique totale en 2015), la géothermie n'a pas démontré sa rentabilité, l'hydroélectricité et le nucléaire, quand on réussit à les faire accepter par les populations, exigent des investissements lourds à rentabilités lointaines. L'effort financier nécessaire d'ici 2050 pour électrifier l'urbanisation mondiale annoncée paraît, sauf catastrophe climatique planétaire, hors de portée des capitaux mobilisables.

Des solutions énergétiques dans la continuité des investissements dans les énergies fossiles, mais mettant fin à leurs émissions nocives dans l'atmosphère, vont donc être ardemment recherchées. On sait déjà capturer le CO_2 dès l'émission et restaurer le potentiel énergétique de son carbone en le recombinant avec de l'hydrogène en méthane, injectable dans les infrastructures gazières existantes (méthanation). D'autres solutions sont possibles. Presque toutes impliquent l'hydrogène. Des centaines de laboratoires cherchent à le produire industriellement par des procédés décarbonés allant de la biochimie enzymatique exploitant des bactéries à l'ADN reprogrammé jusqu'aux réacteurs nucléaires dissociant l'eau à très haute température.

La puissance économique du complexe politico-industriel « fossilier » mondial, leur responsabilité climatique, leur maîtrise des processus et des infrastructures industrielles, de l'extraction à la distribution, les privilégient pour accéder en tête au recyclage du CO_2 en hydrocarbures. Mais il leur faudra d'abord maîtriser la production de l'hydrogène décarboné compétitif. Ils s'ouvriraient ainsi un accès direct au stockage de l'électricité, c'est-à-dire au graal de l'énergie, celui que convoitent aussi les renouvelables et le nucléaire.

En 2050, le mix énergétique mondial devrait ainsi rassembler encore ceux qui y figurent aujourd'hui, mais dans des proportions très amplifiées en faveur de l'électricité décarbonée (de 20 à 50 % ?), en particulier solaire. Si le recyclage du CO_2 est maîtrisé, gaz et pétrole devraient conserver des positions majoritaires dans l'industrie et les transports.

Au-delà de 2050, le couple hydrogène-électricité devrait envahir progressivement l'énergétique humaine.

La vision de…

Jean-Marie Chevalier

Professeur émérite à l'Université Paris-Dauphine
Senior associé au Cambridge Energy
Research Associates (IHS-CERA)

La première caractéristique du système énergétique mondial, c'est sa rigidité. Il est organisé autour de lourdes infrastructures qui acheminent l'énergie depuis le gisement jusqu'au consommateur final. Il est à plus de 80 % alimenté par les trois grandes énergies polluantes et non renouvelables : le pétrole (31 %), le charbon (29 %) et le gaz naturel (22 %). Tout ceci ne se change pas rapidement.

Et pourtant, nos systèmes énergétiques se heurtent violemment au réchauffement climatique puisque leur fonctionnement est responsable de deux tiers des émissions de gaz à effet de serre. La gravité du réchauffement climatique et la prise de conscience qui l'accompagne poussent et pousseront les systèmes énergétiques à se transformer pour être moins intenses en carbone et davantage fondés sur les énergies renouvelables.

Une interrogation majeure concerne la vitesse de ce changement. Cette vitesse dépend d'un rapport de forces complexe et mouvant entre de multiples facteurs qui relèvent de la géopolitique, de l'économie, de la technologie. Ce que nous pouvons dire, c'est que le système énergétique mondial en 2050 sera plus décentralisé, plus intelligent, plus diversifié mais probablement encore trop intense en carbone.

Plus décentralisé. Un peu partout dans le monde, on assiste à une certaine décentralisation des problématiques

énergétiques. Les collectivités locales, les villes accordent une priorité nouvelle au couple énergie-climat. Cette préoccupation est large car elle englobe la production et l'utilisation de l'énergie, mais aussi la qualité de l'air et de l'eau, les transports, le recyclage des déchets, l'aménagement du territoire, l'urbanisme et aussi les modes d'organisation économique où une priorité est donnée aux productions locales et à l'économie circulaire. En filigrane se trouvent des systèmes énergétiques plus décentralisés. C'est une démarche assez nouvelle. Elle s'est clairement exprimée au moment des dernières COP où les organisations non gouvernementales ont affirmé leur volonté d'agir pour limiter le réchauffement climatique.

Plus intelligent. Lorsque l'ex-président américain Barack Obama a parlé de *smart grids* (les réseaux intelligents), une réaction assez générale de la part des opérateurs a été de dire « mais on est déjà intelligents ». La formule a toutefois entraîné une formidable intensification de la liaison entre l'énergie et les nouvelles technologies de l'information et de la communication. Cette intégration est en mesure d'accroître considérablement l'intelligence des systèmes en place. Le mot *« smart »* a ainsi été decliné : *smart home*, *smart building*, *smart community*, *smart city*, *smart regulation*. Tout au long des filières énergétiques, une efficacité plus grande peut être atteinte par la surveillance, la mesure, l'optimisation des flux d'informations, de chaleur, d'électricité. Par ailleurs, la libéralisation des marchés, la déconstruction des chaînes de valeur traditionnelles multiplient les opportunités d'innovation et de transformation pour une énergie de plus en plus digitalisée.

Plus diversifié. Les systèmes énergétiques se construisent et se modifient en fonction de la dynamique des coûts qui leur est sous-jacente. Or, il est admis de façon plus ou moins implicite que les coûts des énergies renouvelables vont

diminuer de façon inéluctable et irréversible. Selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), le prix des panneaux solaires a baissé de 70 % entre 2010 et 2015 et encore de 15 % en 2016. Les plus récents contrats font état d'un prix de moins de 30 centimes d'euro par kWh. Nous savons toutefois que le défaut majeur de l'éolien et du solaire, c'est leur intermittence. On peut pallier cette lacune par le stockage. Il paraît très probable que le coût des différentes technologies de stockage soit lui aussi soumis à une réduction continue et irréversible. Le système actuel devrait donc se diversifier progressivement : moins de charbon et de pétrole, plus de renouvelables, y compris de biomasse (notamment le biogaz), de géothermie et de petite hydraulique. Il devrait se diversifier également par les technologies et les modes d'organisation mis en place.

Peut-être moins intense en carbone. Les engagements pris par plus de 150 pays pour réduire leurs émissions de gaz à effet de serre dans le cadre de l'accord de Paris apparaissent comme une bonne nouvelle pour la santé de la planète mais il convient de relativiser cet événement. La somme des engagements, à supposer qu'ils soient tenus, ne brise pas la tendance actuelle à l'augmentation des émissions et au réchauffement climatique. Ceci est d'autant plus vrai que les ressources fossiles restent très abondantes. On peut donc penser que, malgré les transformations évoquées plus haut, le système énergétique de 2050 sera encore très dévastateur et les hausses de températures très inquiétantes. Ceci aurait sans doute pour effet d'accélérer la prise de conscience de la gravité du réchauffement climatique mais il faudrait que cette prise de conscience soit relayée par l'action très volontariste des organisations non gouvernementales, des entreprises et des citoyens du monde entier.

Les transformations du système énergétique selon les tendances que nous venons de décrire sont en cours ; elles sont

par ailleurs inscrites dans l'Histoire. Elles s'opèrent toutefois d'une façon très différenciée : plus rapides en Europe, plus lentes dans les autres territoires, y compris aux États-Unis. Les forces de résistance sont fortes, les forces de changement insuffisantes. On peut penser que le bilan énergétique mondial de 2050 sera encore très intense en carbone avec une part des énergies fossiles supérieure à 50 %.

La vision de…

Bertrand Collomb

Président d'honneur de Lafarge
Membre de l'Académie des sciences morales et politiques

L'expérience montre que, lorsque nous essayons de prévoir les changements à venir, nous surestimons souvent ce qu'une action volontariste peut obtenir à court terme (2 à 5 ans) mais nous sous-estimons les changements que des évolutions structurelles peuvent entraîner à long terme (au-delà de 15 ans). C'est probablement vrai dans le domaine de l'énergie comme dans les autres domaines.

Dans le scénario principal de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) pour 2040[1], les consommations énergétiques croîtraient d'environ 1 % par an. Malgré une forte croissance des énergies renouvelables, qui couvriraient 60 % de la croissance des besoins d'électricité, la part des combustibles fossiles ne serait que faiblement réduite.

Que peut-il se passer qui conduise à une évolution très différente ?

Une chose est à peu près certaine : il y aura, en 2050, 2 milliards de personnes supplémentaires, de plus en plus localisées dans des agglomérations urbaines, essentiellement en Afrique et en Asie.

La révolution digitale est en marche mais a encore peu d'impact sur les consommations énergétiques. On peut imaginer qu'elle conduira – par un pilotage « intelligent » des

1. *World Energy Outlook 2016*, AIE.

consommations – à une réduction plus rapide de l'intensité énergétique. Il ne serait pas absurde, par analogie avec les effets des politiques industrielles, de gagner 30 à 40 % par une pleine utilisation de ces techniques (donc au bout d'un temps assez long au niveau mondial).

L'apparition du gaz de schiste renvoie à plus tard l'épuisement des ressources pétrolières et gazières et le charbon n'a guère de limite prévisible. Cependant, certaines réserves ne redeviendront exploitables qu'à un prix plus élevé du pétrole, et le retour du baril à un prix de 80 $ ou davantage se profile à un horizon plus ou moins proche. Une taxe CO_2 plus ou moins généralisée ajouterait au renchérissement de l'énergie et pourrait provoquer une baisse plus forte de la consommation.

On pourrait alors imaginer, tout en assurant un meilleur accès à l'énergie aux populations mondiales défavorisées, une consommation d'énergie primaire inférieure de 25 % aux chiffres de l'AIE pour 2040, soit, en 2050, 1,5 tep par habitant par an (à comparer avec le niveau mondial actuel de 1,9 tep par habitant par an et au niveau français de 3,7 tep par habitant par an).

L'électricité, qui représente actuellement moins de 20 % de cette consommation mondiale, verrait sa part augmenter avec une forte contribution des énergies renouvelables. Leur coût baissera par l'effet d'expérience mais on les utilisera surtout là où elles ont une efficacité réelle plutôt que là où les politiques de subvention les favorisent. Il est plus prometteur de développer le solaire comme une alternative locale en Afrique, où il y a du soleil et où les réseaux sont déficients, qu'en Allemagne. Et les surfaces mobilisées par l'éolien ainsi que la forte irrégularité des vents rendent sa généralisation problématique en France, même si les modèles économiques optimaux sont actuellement obscurcis par les

fortes subventions européennes (qu'une étude australienne considérait il y a quelques années comme correspondant à un prix du CO_2 de 400 $ par tonne évitée !).

Il n'est pas absurde par contre d'imaginer que les besoins nouveaux des populations africaines ou asiatiques – dont l'accès actuel à l'énergie est inexistant ou limité (dans les villes indiennes, l'électricité n'est souvent disponible que 40 % à 60 % du temps) – soient beaucoup plus couverts par du renouvelable local.

La grande inconnue des énergies renouvelables intermittentes est le coût du stockage. L'évolution des batteries enregistre à la fois des baisses de coût (par kWh et par kg de batterie) significatives (baisse de 30 % annoncée pour la Gigafactory de Tesla), et des risques de combustion non maîtrisés. C'est peut-être suffisant pour qu'un modèle « renouvelable intermittent + stockage sans raccordement au réseau » devienne viable dans certaines régions pour les utilisations domestiques. Au-delà, une véritable percée technologique est possible mais sans qu'aucune piste ne la dessine clairement.

Le développement de la voiture électrique semble probable, compte tenu de l'engagement des constructeurs. Il aurait un impact important sur l'économie du pétrole mais peu d'effet sur les émissions de CO_2, là où l'électricité ne sera pas produite à partir d'énergies renouvelables

Le nucléaire continue à se développer, surtout dans les pays où le gouvernement peut contrôler l'opinion publique (selon un processus démocratique en Finlande ou autrement ailleurs). Mais la probabilité d'autres accidents – même si ceux-ci ont jusqu'à présent été plus spectaculaires que destructeurs – est suffisante pour qu'une relance massive et durable des procédés actuels soit improbable. Les surgénérateurs et autres procédés à sécurité passive, où la réaction nucléaire s'arrête

au lieu de s'accroître en cas de problème, ne semblent pas pouvoir être une véritable alternative à l'horizon 2050. La part du nucléaire (actuellement autour de 2,5 % de l'énergie primaire totale et environ 11 % de l'électricité au niveau mondial) peut donc augmenter ou diminuer un peu, mais sans véritable changement d'échelle.

Au terme de ce tour d'horizon très sommaire, appuyé davantage sur des conjectures que sur une véritable expertise, il paraît bien difficile d'atteindre les objectifs de réduction d'émission de CO_2 correspondant à la limitation du réchauffement climatique à 2°C. Même si l'on parvenait, par le stockage ou le recyclage du CO_2 (par exemple dans la fabrication de béton, selon le procédé Solidia), à éliminer, temporairement ou définitivement, 10 à 20 % des émissions (ce qui serait considérable).

Mais on connaîtrait tout de même une assez forte déformation du modèle énergétique actuel pour que, au-delà de 2050, le monde puisse trouver un chemin plus favorable.

La vision de…

Henri Conze

Ancien délégué général pour l'armement (1993–1996)

L'humanité est confrontée à des défis suffisamment graves pour que les orientations à prendre pour leur faire face le soient avec le plus grand sérieux. Dans le domaine de l'énergie, combien de décisions prises sous l'emprise de l'émotion, de mesures insuffisamment étayées annoncées dans l'urgence, d'idées et d'initiatives découlant, croyait-on, du simple bon sens, s'avérant de purs gaspillages ou contraires aux objectifs recherchés ? Il faut désormais mettre de l'ordre et faire des choix entre des objectifs souvent contradictoires : lutter contre le réchauffement climatique, faire face à l'épuisement des ressources, contrôler les coûts et leur volatilité, réduire les déficits du commerce extérieur, assurer la sécurité des approvisionnements, etc.

Toute réflexion doit partir de quelques constats. La politique énergétique de l'Europe s'est appuyée sur des considérations plus politiques qu'économiques au nom de la défense de l'environnement et de la diabolisation du nucléaire, passant sous silence la notion de coût.

Deux objectifs étaient recherchés : lutter d'urgence contre le réchauffement climatique et faire face à l'épuisement des ressources. L'Europe les a confondus, pensant que le développement hâtif des énergies renouvelables allait répondre aux deux préoccupations. Ce choix, accompagné d'un niveau de subventions scandaleux, a conduit à négliger toute autre voie, comme la capture du CO_2, le nucléaire du futur, l'efficacité énergétique, etc. Il s'est traduit par l'effondrement des prix

du marché de gros européen de l'électricité, la hausse de prix pour le particulier et l'absence de signaux sur le long terme !

Nous n'avons pas conscience du prix du passage d'une économie fondée sur les combustibles fossiles à une autre économie, celle de l'électricité ou de l'hydrogène : on ne peut changer d'un coup de baguette les contraintes de consommation ; un logement « vit » cent ans, un réseau (électricité, gaz, etc.) cinquante et les moyens de transport vingt ou trente.

Les pays émergents, Chine hier, Inde aujourd'hui, Afrique demain, ont soif d'énergie bon marché et n'ont pas, comme l'Occident, la hantise du réchauffement climatique ; seule la pollution galopante et ses conséquences sur les individus peuvent les conduire à la sagesse.

Les besoins en énergie, en croissance molle depuis le premier choc pétrolier et aujourd'hui grâce au développement des outils numériques (*smart grid*) et aux efforts d'économie d'énergie, vont tôt ou tard reprendre leur croissance en raison des pays émergents et de l'économie numérique forte consommatrice d'électricité.

Depuis Fukushima et la décision unilatérale allemande d'arrêt des centrales nucléaires, les énergies solaires et éoliennes, fortement subventionnées, se développent considérablement. Leur coût se rapprochant de celui des énergies plus classiques, d'aucuns les considèrent comme le Saint Graal, solution à toutes nos difficultés. Pourtant des questions se posent en l'absence de données sur le cycle de vie des installations : la population acceptera-t-elle les forêts d'éoliennes et les centaines de milliers d'hectares de panneaux solaires ? Quel serait le coût des investissements à réaliser pour permettre, dans des conditions de fiabilité convenables, l'introduction de dizaines de milliers de « microcentrales » dans les réseaux, défi gigantesque dont on ne parle pas ? Qu'en sera-t-il des

approvisionnements en terres rares indispensables comme le néodyme ?

L'incertitude la plus critique est celle du stockage. Tout se passe comme si on investissait en raison de la gratuité du soleil et du vent, convaincu que, bientôt, la technologie résoudra la question du stockage de l'électricité produite. Or, le stockage de très grandes quantités d'énergie électrique est encore du domaine du rêve, même si des progrès ont été réalisés, portant d'ailleurs plus sur le conditionnement que sur les concepts. Sans rupture technologique, la voiture électrique sera condamnée à transporter des batteries, accessoirement des passagers, et sera tôt ou tard en compétition avec d'autres solutions comme la voiture à hydrogène.

Que peut-on prévoir à l'horizon 2050 ? Le règne de l'utopie et du désordre que connaît particulièrement l'Europe ne peut plus durer. Tôt ou tard, la logique économique et les considérations de coût l'emporteront, entraînant la révision des plans de transition énergétique.

Dans les pays émergents et en Occident, les solutions éprouvées existant aujourd'hui, fondées d'abord sur l'utilisation des combustibles fossiles et, dans une moindre mesure, sur les centrales nucléaires classiques, continueront à jouer le rôle essentiel, d'autant que les réserves de pétrole et de gaz seront loin d'être épuisées. Le *peak oil* imminent, annoncé par les experts depuis des décennies, sera-t-il même alors atteint ? Seuls les moyens trop polluants ou trop émetteurs de gaz à effet de serre seront abandonnés.

Nous avons assisté, avec la prise de conscience du réchauffement climatique, au lancement d'un concours Lépine consacré à la recherche de voies nouvelles de production d'énergie : éolien offshore, hydroélectricité sous-marine, un très large éventail de pistes dans les domaines de la biomasse,

des biocarburants, etc. Il n'en restera rien, hormis des investissements justifiés par des conditions particulières (alimentation électrique d'îles, d'une grande partie de l'Afrique, etc.) ou quelques réalisations rejoignant au fil des ans le patrimoine historique, culturel ou touristique, à l'image de l'usine marémotrice de la Rance inaugurée il y a un demi-siècle.

L'énergie nucléaire, rejetée aujourd'hui en Occident mais pas en Asie, retrouvera son aura étant donné son intérêt dans la lutte contre le réchauffement climatique. Cela passe par une opération vérité sur les aspects émotionnels liés à cette énergie (effets des rayonnements sur l'homme, stockage des déchets, démantèlement) et, surtout, par un effort de recherche et de développement sur les filières de réacteurs intrinsèquement sûrs (réacteurs à sels fondus ?), de taille moyenne, pouvant éventuellement utiliser le thorium comme combustible et d'un coût d'investissement et de production équivalent à celui des réacteurs de la génération 1970.

La raison veut que les trois prochaines décennies soient consacrées à la recherche et au développement des futurs outils de production d'énergie, tout en gérant au mieux, en fonction des contraintes économiques et environnementales, les filières et moyens actuels. L'an 2050 sera le moment des choix. En l'absence de percée sur le stockage de l'électricité, il faudra alors lancer les futurs moyens de production d'électricité, très probablement des réacteurs nucléaires issus des efforts de recherche, et, pour le transport, choisir les piles à combustible (hydrogène produit dans des réacteurs à haute température). Dans le cas improbable d'une percée sur le stockage, le choix sera à faire entre le nucléaire et les énergies renouvelables, choix fondé sur les critères économiques prévalant alors.

La vision de…

Michel Derdevet

Secrétaire général d'Enedis
Maître de conférences à l'Institut
d'études politiques de Paris

La transition énergétique, en marche partout dans le monde, se fera à l'évidence en « 3D » : Décarbonation, Décentralisation de la production et des prises de décision, Digitalisation des échanges.

Partant de ce constat, certains se hâtent d'annoncer la fin des réseaux de transport et de distribution d'énergie. Le très médiatique essayiste américain Jeremy Rifkin dépeint ainsi un avenir où l'alliance du digital et des nouvelles sources d'énergie permettrait de produire localement l'électricité *« à coût marginal zéro »*. Il rêve d'une planète où *« des centaines de millions de personnes produiront leur propre énergie renouvelable à la maison, au bureau, à l'usine, et partageront l'électricité verte sur un internet de l'énergie*[1]*. »* Le monde sans réseau imaginé par Rifkin ressemble en tout point au *« domaine romain »* qu'évoque l'historien Paul Veyne, censé être autonome car produisant de manière autarcique ses propres olives, son pain et son vin.

Mais n'est-ce pas un mythe ? Est-on sûr que la juxtaposition d'isolats énergétiques autonomes fasse sens au plan global ? Relier là où c'est possible les différents territoires de notre planète, de nos pays et de nos régions par des réseaux électriques, serait-ce là un modèle du passé ?

---

1. *La nouvelle société du coût marginal zéro*, Jeremy Rifkin.

Un projet industriel grandiose porté par la Chine, diamétralement opposé à celui de Jeremy Rifkin, invite à se poser la question. SGCC[2], la firme d'État en charge du réseau électrique chinois, aujourd'hui le plus important réseau mondial, propose de bâtir rien de moins que « l'interconnexion globale de l'énergie mondiale ». En clair, ce projet vise à supprimer les transports classiques d'énergie, par bateaux, trains ou oléoducs, pour faire de l'électricité décarbonée le moteur essentiel de l'économie mondiale d'ici à 2050. Comment ? À travers un vaste réseau mondial à très haute tension associé à des réseaux intelligents locaux, les fameux *smart grids*, chargés de gérer le délicat équilibre entre consommation et sources intermittentes de production (le vent et le soleil). Le potentiel d'énergie solaire serait massivement capté tout autour de la ceinture tropicale, tandis que des myriades d'éoliennes géantes seraient implantées aux confins du cercle polaire arctique.

L'investissement envisagé pour connecter la production électrique de l'ensemble de la planète, et en particulier l'Asie et l'Europe, serait de 13 000 milliards de dollars d'ici 2050. Il inclurait la mise en place de très larges capacités de stockage, afin de pallier l'absence de vent ou de soleil. SGCC investit déjà dans différents opérateurs de réseaux à travers le monde (Italie, Portugal, Australie, etc.), avec cette perspective vertigineuse à l'esprit.

Existe-t-il une voie médiane entre l'utopie micro-locale rifkinienne et le rêve global chinois ? Oui, à l'évidence. En Europe notamment, la nécessité d'une vraie politique industrielle commune des réseaux électriques s'impose, pour mieux aborder ensemble l'arrivée des énergies renouvelables, le rôle nouveau des citoyens/consommateurs et la montée

2. State Grid Corporation of China.

de multiples centres de décision digitalisés. Il nous faut rapidement travailler sur la recherche, le développement et la normalisation, pour faire de l'Europe un leader des réseaux intelligents, et relier entre eux les différents territoires européens engagés dans la transition énergétique[3].

Les réseaux sont le lien indéfectible entre nos différents territoires, qui permet à la fois d'accueillir les initiatives et les projets locaux, tout en les articulant entre eux. Capitalisons sur cet atout d'avoir su construire, au cours du dernier demi-siècle, des infrastructures énergétiques modernes, porteuses de solidarité et de développement économique réussi !

3. *Énergie, l'Europe en réseaux*, rapport remis en 2015 au président de la République.

La vision de…

Benjamin Dessus

Président de l'association Global Chance

Le dérèglement climatique avance à grands pas, plus vite que ne le pensait la communauté scientifique. Comment alors répondre aux besoins de « services énergétiques » de l'humanité sans abandonner à leur sort les milliards d'humains des pays en développement déjà existants, et les plus de 2,5 milliards de plus que l'on attend à l'horizon 2050 et qui vont très majoritairement y naître ?

La question posée n'est pas réellement nouvelle et la nature des réponses possibles non plus. En 1990 par exemple, un scénario énergétique mondial, NOE[1], sans connaître encore les très nombreux développements des sciences du climat, se posait néanmoins une double question : comment parvenir en 2060, avec une population mondiale alors estimée à 10,2 milliards[2] à cet horizon, à un système énergétique dont les émissions de CO_2 ne dépassent plus la capacité d'absorption de la biosphère[3] et dont les déchets nucléaires à haute activité et très longue durée de vie, dont on ne savait déjà que faire à l'époque, cessent d'augmenter ?

Un exercice normatif donc dont l'actualité est évidente, à la fois pour le climat puisque les préconisations du GIEC en termes d'émissions de CO_2 en 2050 sont du même ordre,

1. *Jérémie et Noe, deux scénarios énergétiques mondiaux*, Benjamin Dessus et François Pharabod, Revue de l'énergie n° 421 Juin 1990.

2. Les prévisions les plus récentes de l'ONU sont de 9,7 milliards en 2050 et de 11 milliards en 2100.

3. Telle qu'on la connaissait à l'époque (environ 12 Gt CO_2/an).

et pour le nucléaire qui se trouve dans une situation bien pire qu'en 1990, puisque qu'à la question des déchets s'est ajoutée celle de la réalité d'accidents majeurs qui étaient jusque-là considérés comme totalement improbables.

Le scénario NOE s'appuyait sur deux points principaux :

- une division par un facteur 2 de la consommation d'énergie par rapport à 1985 des pays industrialisés dont la croissance économique resterait inférieure à 0,7 % par an tandis que les pays hors OCDE connaîtraient une croissance moyenne de 2,5 % par an sur toute la période ;
- le remplacement progressif des énergies fossiles par les renouvelables pour que ces dernières couvrent 50 % des besoins d'énergie en 2060.

Le tout en refusant le pari d'apparition d'une technologie miracle (par exemple le stockage à très grande échelle du CO_2). Dans l'ambiance de l'époque, alors que les débats portaient sur les parts de marché futures du charbon, du pétrole et du gaz (pour satisfaire une demande estimée à plus de 20 Gtep en 2050) et sur l'intensité de la relance du nucléaire mondial après Tchernobyl, le message restait inaudible.

Vingt-sept ans plus tard, le GIEC et les diverses lois de transition énergétique des pays européens disent pourtant peu ou prou la même chose. À ceci près qu'on a pris 27 ans de retard, avec des émissions de CO_2 des pays de l'OCDE qui ont encore augmenté entre-temps de 9 % et hors OCDE de 100 %.

Sauf miracle technologique immédiat, il va donc falloir diviser la consommation finale d'énergie des pays riches par un facteur deux au moins d'ici 2050, restreindre celle de pays comme la Chine ou le Brésil, limiter sérieusement la croissance de celle des pays en développement et sortir à

grands pas des combustibles fossiles. Avec une exigence en plus, largement ignorée à la fin des années 1980, celle de diminuer drastiquement les émissions du deuxième gaz à effet de serre, le méthane, dont plus de 30 % sont directement associées au système énergétique[4].

La question n'est pas tant technologique : on dispose en effet déjà de techniques efficaces pour rendre les services énergétiques courants (s'éclairer, se chauffer, se transporter, etc.) et des progrès rapides sont encore très probables sur certaines des technologies d'usage de l'énergie. Quant aux énergies renouvelables pour la production d'électricité et de chaleur, elles ont connu ces derniers temps, pour certaines d'entre elles (éolien, photovoltaïque), des progrès spectaculaires.

La question n'est pas non plus de nature économique : on sait depuis 1995[5] que les scénarios bas carbone n'exigent pas d'investissements supérieurs aux scénarios *« business as usual »*, ce que confirme aujourd'hui la Commission mondiale sur l'économie et le climat[6].

La question est donc avant tout sociétale et politique. Sommes-nous individuellement et collectivement capables non seulement d'adopter les technologies les plus efficaces sur le plan énergétique mais aussi et peut-être surtout d'adopter des comportements qui ne poussent plus à la gabegie énergétique ? Sommes-nous capables de transférer au plus vite nos technologies les plus modernes et les plus efficaces à nos voisins émergents ou en développement pour leur éviter un apprentissage énergétique aussi désastreux que le

4. Selon le GIEC, le méthane est en effet responsable de 32 % du surcroît de forçage radiatif enregistré entre 1750 et 2010 derrière le CO_2.

5. *Systèmes énergétiques pour un développement durable*, thèse d'économie de Benjamin Dessus à l'Université de Grenoble, 9 février 1995.

6. 93 000 G$ à investir à l'horizon 2030 pour un scénario de transition contre 89 000 G$ pour le scénario *« Business as usual »*.

nôtre ? Et tout cela sans attendre : en 2050, la plupart des infrastructures de logement et de transport, les centrales électriques et les capacités de l'industrie de base que l'on construit aujourd'hui seront encore en service.

D'où quelques interrogations : la compétitivité élevée au rang de dogme qui magnifie la réussite individuelle alors qu'il faudrait faire émerger les valeurs collectives de solidarité et de coopération est-elle compatible avec une telle exigence ? Et la croissance économique, mesurée par la consommation, considérée comme le remède à tous nos maux ? Et l'accroissement des inégalités sociales qui accompagne cette croissance dans l'ensemble de nos sociétés avec leurs conséquences sur la consommation[7] ? Et le désengagement des États dans l'investissement des infrastructures ? On sait pourtant que le secteur privé ne prendra jamais en charge les infrastructures de base nécessaires à la transition ni au Nord, ni *a fortiori* au Sud.

C'est au contraire d'une économie de la responsabilité individuelle et collective, du partage, de la coopération et de la sobriété conviviale dont nous avons besoin sans attendre autour de quatre axes forts :

- la sobriété et la modération énergétique individuelle ;
- la coopération entre citoyens consommateurs qui permet des gains majeurs et immédiats d'efficacité énergétique[8] ;

7. On sait en effet depuis les travaux de Veblen que l'imitation des plus riches joue un rôle de premier plan dans le comportement de consommation d'une société. Il ne sert par exemple pas à grand-chose de mettre au point une technologie de télévision plus économe d'un facteur deux si tout un chacun se sent forcé, pour imiter son voisin plus aisé, de remplacer son vieil écran de 60 cm par un écran de home cinéma dernier cri de 125 cm finalement deux fois plus consommateur vu sa taille.

8. Par exemple, le covoiturage qui améliore l'efficacité énergétique de nos voitures immédiatement d'un facteur deux ou la cohabitation des anciens avec des étudiants qui divise par deux les dépenses de chauffage, les AMAP qui divisent

- les investissements d'infrastructure[9] (urbanisme, transports en commun, logement) ;
- le recentrement de la recherche, de la production d'énergie centralisée (et en particulier du nucléaire) vers les usages de l'énergie, les réseaux intelligents et les énergies décentralisées.

À nous, pays riches, de nous engager très vite dans ces quatre domaines, quitte à bousculer les dogmes dominants et les corps constitués qui les propagent et en tirent leur pouvoir.

par 20 la longueur des trajets effectués par les légumes et les fruits qui arrivent dans nos assiettes, etc.

9. L'installation d'un métro ou d'un tramway divise par 5 à 10 les consommations d'énergie par passager-kilomètre par rapport à la voiture, les logements actuels consomment 5 à 10 fois moins que les logements des années 1970, etc.

La vision de…

Marie-Claude Dupuis

Directrice de la stratégie, de l'innovation et du développement du groupe RATP

En 2050, notre planète devrait compter presque 10 milliards d'habitants, soit une augmentation de 30 % par rapport à aujourd'hui selon les chiffres avancés par les Nations unies. Cette population continuera de vivre majoritairement dans les villes, à 66 % contre 54 % aujourd'hui. Les villes sont responsables de près de deux tiers des consommations d'énergie et de 70 % des émissions de gaz à effet de serre. La question des énergies dans le monde en 2050 est donc indissociable de celle des villes en 2050.

En novembre dernier, à l'occasion de la COP23 et deux ans après la signature de l'accord de Paris, 25 villes ont pris l'engagement de devenir « neutres en carbone » dès 2050. Parmi elles : Paris, Barcelone, Londres, Copenhague, Stockholm, Vancouver, Boston, Los Angeles, Rio de Janeiro et Caracas. Ces villes montrent la voie à suivre mais, compte tenu des enjeux, cet élan doit être plus largement partagé. Elles ne représentent que 150 millions d'habitants.

Il est essentiel que chacun, États, collectivités territoriales, entreprises, citoyens s'interrogent sur les transformations à engager et la trajectoire désirée pour atteindre l'objectif de neutralité carbone. C'est dans la perspective de tenir cet engagement de neutralité carbone que je place ma vision des énergies dans le monde en 2050.

La neutralité carbone nous impose de questionner nos politiques, nos organisations et nos modes de vie. Je la perçois

comme une véritable opportunité de repenser, réinventer et construire un monde viable, équitable et vivable. Les termes, ici empruntés à la définition du développement durable, rappellent que les questionnements ont commencé dans les années 1980 mais le temps est maintenant à l'action et à la transformation des villes, vers des villes intelligentes et durables.

Certaines propositions de *smart city* me font penser au célèbre film de science-fiction *Matrix*. Presque 20 ans déjà. Un univers très technique où les hommes et les femmes disparaissent derrière les machines, les robots et les *data*. Ce n'est pas ma vision.

La révolution technologique est là, certes, mais il faut la considérer comme une opportunité pour répondre aux besoins premiers des habitants des villes : le bien-être, le « bien vivre ensemble ». Je pense que nous sommes nombreux à aspirer à une transformation qui ne soit pas uniquement technologique.

Si j'essaie de décrire cette ville intelligente de 2050, évidemment, elle est connectée, mais elle est surtout plus saine. Elle est sobre, elle est fluide, elle s'organise autour de modèles centrés sur l'usage et c'est également une ville solidaire.

Une ville intelligente, c'est notamment une ville économe en énergie. Autrement dit, pas de *smart city* sans *smart grid*. Le digital ouvre des perspectives nouvelles pour la production d'énergie décentralisée et le développement des énergies renouvelables.

Prenons l'exemple de la mobilité. Le secteur des transports est à la fois très consommateur d'énergie et très émetteur de gaz à effet de serre. En France, il compte à lui seul pour 35 % des émissions de CO_2 et 32 % de la consommation d'énergie finale (dont deux tiers uniquement pour les voitures

particulières). Les transports routiers sont également responsables d'une part importante des émissions de polluants atmosphériques dont la réduction est un enjeu majeur de santé publique.

À l'échelle mondiale, la demande de mobilité des voyageurs devrait tripler d'ici à 2050. Il nous faut donc imaginer et mettre en œuvre dès aujourd'hui les solutions de mobilité compatibles avec la transition énergétique et un objectif de neutralité carbone d'ici 30 ans.

Le scénario que j'imagine pour 2050 est celui de la désindividualisation des transports et de la mutualisation des infrastructures. Il nous faut passer pour cela d'un modèle de la consommation et de la propriété du véhicule (avec le symbole de la voiture individuelle comme liberté et accès à l'ascension sociale) à un modèle centré sur l'usage dans lequel les individus combinent différentes formes de mobilité en fonction de leur déplacement (covoiturage, véhicules autonomes, transports collectifs, vélos, trottinettes, etc.).

Concernant les choix technologiques, les réponses seront nécessairement multiples et variables en fonction des territoires. Le véhicule électrique fait évidemment partie des solutions. Au sein du groupe RATP, nous imaginons aujourd'hui la multimodalité électrique, du métro au bus électrique et au vélo électrique. Nous portons une vision intégrée de la mobilité électrique dans les villes (et des infrastructures associées) qui facilite l'accès aux transports partagés, par exemple en localisant les points de recharge électrique près des stations de métro, en implantant des points de location de vélos électriques conjointement à la mise en place d'infrastructures pour les autobus électriques.

Il faut s'orienter vers une nouvelle approche de l'énergie avec, au cœur des systèmes, les batteries qui permettront de

stocker l'énergie, véritables traits d'union entre les véhicules et les bâtiments de plus en plus sobres et intelligents.

Le développement des énergies renouvelables et des énergies de récupération doit s'accompagner de nouveaux modèles de décentralisation de la production d'énergie. Le système énergétique de 2050 sera davantage un écosystème dans lequel il sera recherché une optimisation de la production et de la consommation entre moyens de transport (véhicules, bus, navettes, etc.), infrastructures de transport, logements, commerces ou encore immeubles de bureau.

Par exemple, sur le prolongement d'une ligne de métro actuellement en cours de construction sur Paris, nous profitons de la construction du métro pour mettre en place un dispositif de géothermie dans les parois de la future station. Ces parois descendent jusqu'à 45 mètres de profondeur (par comparaison, les espaces voyageurs seront eux à 20 mètres). L'énergie récupérée permettra d'alimenter la station mais également de couvrir 40 % des besoins en chauffage d'un immeuble de 80 logements situé en surface. Ce type d'action participe à la frugalité énergétique des villes mais il démontre aussi que notre métier de transporteur change.

La trajectoire pour 2050 doit être celle de l'économie du partage, qui se construit autour d'un véritable changement de paradigme : vers une logique d'usage et de fonctionnalité, donnant la priorité à l'économie des ressources et au bien-être des habitants.

La vision de…

ENEA Consulting

Société de conseil spécialisée dans
la transition énergétique

En 2050, les économies émergentes et en développement, BRICS[1] en tête, seront les pays moteurs de la transition énergétique. Ils inspireront leurs homologues qu'on appelait « développés », leur dameront le pion peut-être. Une relation de catalyse réciproque – l'énergie moteur du développement, le développement moteur de l'innovation dans le secteur de l'énergie – aura en effet transformé les pays émergents comme le monde de l'énergie. Nous en voyons déjà les signes annonciateurs.

D'après l'Agence internationale de l'énergie, la croissance de la demande mondiale en énergie sera, dans les prochaines décennies, portée aux deux tiers par les pays hors OCDE, aux dynamiques économique et démographique nécessairement demandeuses d'énergie. L'Afrique subsaharienne, à elle seule, devrait voir sa demande en énergie croître de 80 % d'ici 2040, tirée par un doublement de la population[2]. Les besoins sont déjà immenses : 1,3 milliard d'êtres humains sans accès à l'électricité et 2,6 milliards sans accès à des technologies modernes de cuisson et de chauffage en 2015. Et ils ne feront qu'augmenter, mettant l'accès à l'énergie au cœur des défis du XXI[e] siècle. Tandis que les pays développés déjà fortement consommateurs d'énergie engagent à des rythmes différents une réflexion ou une action de réorientation de leurs systèmes

1. BRICS : Brésil, Russie, Inde, Chine et Afrique du Sud.

2. *World Energy Outlook 2014*, AIE.

énergétiques, cherchant à en réduire l'empreinte carbone, les économies émergentes et en développement sont lancées dans un mouvement accéléré de développement de leurs capacités de production, aiguillonnées par ces besoins croissants.

Pour faire face à ce défi, elles ont la chance de devoir prendre en compte des contraintes et des opportunités qui leur sont spécifiques et qui obligent à repenser les paradigmes en matière d'énergie – en un mot à innover. Le déficit d'infrastructures et de capacités d'investissement force à repenser le « tout centralisé » pour le transport et la distribution d'électricité. Les potentiels exceptionnels de production d'énergies renouvelables ouvrent la perspective de mix électriques qu'on aura moins – ou pas – besoin de « décarboner » un jour. Un modèle de développement qui reproduirait l'histoire industrielle de l'Europe et des États-Unis serait par ailleurs incompatible avec les objectifs environnementaux déterminés par le concert des nations lors des dernières COP et nécessaires à la préservation de notre planète. Les pays émergents et en développement sont d'ailleurs les premiers à subir les conséquences des dérèglements environnementaux dus à l'activité humaine : ici vagues de pollution, là sécheresses inédites, partout hausse du niveau des océans. Bien heureusement, ils donnent déjà à voir les signes de trajectoires de développement plus sobres en énergie que celles des pays développés. En témoignent les niveaux d'intensité énergétique[3] des grands émergents comme la Chine qui montent moins haut que ne l'avaient fait ceux des pays industrialisés, du fait du progrès technique à échelle globale comme de politiques d'efficacité énergétique précoces.

Les économies émergentes et en développement ont la possibilité et le potentiel de mettre la transition énergétique au

3. Concept qui exprime le lien entre croissance économique et croissance énergétique : consommation d'énergie primaire sur produit intérieur brut.

cœur de leur dynamique de développement, sans avoir à payer, comme les pays industriels, le coût d'une refonte radicale d'infrastructures déjà développées. Elles deviendront ainsi les leaders mondiaux de nouveaux systèmes énergétiques fondés sur les énergies renouvelables et sur des modèles de production et de consommation beaucoup plus décentralisés. Elles jouent d'ailleurs déjà le rôle d'incubateur mondial de l'innovation dans divers domaines de l'énergie. Tandis que la Chine est déjà le pays champion du solaire et parmi ceux de l'éolien, les pays d'Afrique subsaharienne offrent un terrain privilégié pour l'innovation autour de technologies de production qui doivent répondre à des besoins plus aigus qu'ailleurs d'autonomie, de forte robustesse, de facilité d'entretien, avec des sources d'énergie complètement renouvelables ou encore hybridées avec du fossile. Les unités de production d'électricité solaire intégrées à des conteneurs sont un exemple de réponse à l'ensemble de ces défis. Par ailleurs, alors que les infrastructures traditionnelles de transport et de distribution de l'énergie se développent trop lentement, des solutions alternatives et complémentaires sont recherchées : mini-réseaux locaux, systèmes d'autoproduction et d'autoconsommation : production de biogaz, lampes solaire, etc.

Avec ces ruptures technologiques et ces changements d'usage émergent des modèles d'affaires inédits : nouveaux acteurs, par exemple des communautés locales impliquées dans la gestion de mini-réseaux en Afrique australe ; nouvelles activités, comme le modèle mixte des entreprises qui proposent des services énergétiques tout en soutenant l'entrepreneuriat à échelle locale ; nouveaux modes de monétisation, tels que le paiement échelonné (*pay as you go*) via téléphone mobile en Afrique de l'Est. Le numérique, adopté progressivement par les *utilities* énergétiques occidentales, s'inscrit déjà au cœur de nombre de ces innovations.

Le potentiel est évident, la dynamique est lancée mais le défi est encore immense. Il reste à créer ou renforcer dans les pays émergents, selon les cas, des conditions favorables à l'entrepreneuriat et à l'investissement ainsi que des modèles d'affaires pérennes qui soient de plus en plus portés par des acteurs privés. Cela ne peut se faire sans volonté politique forte et représente un défi certain dans des systèmes énergétiques encore fortement étatisés, chez les BRICS comme dans les pays les moins avancés (PMA), et des environnements des affaires parfois encore trop peu transparents. Cette vision ne se réalisera pas non plus sans que les acteurs clefs des trois mondes de l'énergie, du développement et de la finance, ne misent résolument sur l'accès à l'énergie. Orientation massive de financements publics et privés vers ce secteur, accompagnement des dynamiques locales, transferts de technologies, transmission des compétences et des expertises là où elles manquent sont les enjeux de demain.

L'accès à l'énergie est une des clefs du développement, du progrès économique, social et humain, ce qui justifie déjà les efforts qui y sont consacrés. C'est aussi et surtout une opportunité unique d'innover et de créer les technologies et les modèles d'affaires du futur monde de l'énergie. Un monde qui aura certainement changé de champions économiques et devra faire rimer performance avec durabilité.

La vision de…

Jean-Louis Étienne

Médecin et explorateur
Premier homme à avoir atteint
le pôle Nord en solitaire en 1986

Plusieurs préoccupations environnementales et économiques majeures s'imposent aujourd'hui : la pollution urbaine, les fluctuation imprévisibles du cours des combustibles fossiles et bien sûr la lutte contre le réchauffement climatique. Actuellement, les énergies « vertes » ont beau se développer très rapidement, 82 % de l'énergie mondiale est encore produite par les énergies fossiles. Pour rester sous les 2°C en 2100, il faudrait atteindre « zéro émission nette de CO_2 » en 2050, c'est-à-dire un équilibre entre ce qui est émis et ce qui peut être absorbé notamment par les océans et les forêts.

Faisons un peu de fiction, projetons-nous en 2050 en imaginant que tous les investissements dans les pays développés et les transferts de technologie dans les pays en développement aient été mis en œuvre pour y parvenir.

En 2050, la capture et séquestration du CO_2 (CSC) à la sortie des foyers s'est avérée trop complexe et coûteuse à mettre en œuvre à grande échelle. Les énergies fossiles sont quasi abandonnées. Les hydrocarbures ne sont plus exploités que pour la pétrochimie. La COP56 célèbre le succès de la transition énergétique. Nous sommes passés des énergies de stock (gaz, pétrole et charbon) à des énergies de flux.

Transports urbains et individuels

Des voies cyclables sécurisées traversent les villes empruntées

par toutes sortes d'engins : vélos, trottinettes, gyropodes et autres semelles roulantes…

Les mégalopoles occidentales sont équipées de transports en commun efficaces, indépendants du trafic individuel et commercial : trams, couloirs de bus, téléphériques, réseaux souterrains, transport fluvial, etc. Ces flottes captives sont propulsées à l'électricité. Aux arrivées des gares, des transports en commun et des entrées de ville, sont installés des parkings de véhicules électriques en location : vélo, scooters, tricycles, automobiles et taxis autonomes. La vitesse urbaine est limitée à 40 km/h.

En dehors des villes, les véhicules de transports et de particuliers roulent aussi à l'électricité. Le réservoir d'énergie est une batterie électrochimique ou un conteneur à hydrogène qui alimente une pile à combustible avec un bien meilleur rendement que les moteurs thermiques. Dans les stations-service, les camions et les voitures font le plein d'hydrogène ou effectuent une recharge rapide de leurs batteries.

Énergies renouvelables (EnR)

Le mix énergétique est produit et géré à l'échelle régionale : solaire photovoltaïque et thermique, éolien, énergie hydroélectrique des barrages, au fil de l'eau ou marémotrice, géothermie, biomasse et ses multiples potentiels – biogaz, bioéthanol 2G produit à partir de la cellulose, la matière organique la plus abondante sur la Terre (50 % de la biomasse), ou biodiesel 3G à partir de microalgues, qui contribuent en plus à la réduction de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère. Ces biocarburants sont exploités en cogénération.

En y regardant de plus près, à l'exception de la géothermie, toutes les EnR sont alimentées par l'énergie du soleil. Le photovoltaïque et l'éolien pèchent toujours par leur intermittence et leur faible densité qui imposent de multiplier les capteurs,

ce qui soulève toujours des problèmes d'acceptabilité, surtout pour les éoliennes à terre. Un accord prévoit qu'à l'échelle régionale, chaque pylône à haute tension doit au minimum être remplacé par une éolienne. Les génératrices ont une puissance comprise entre 5 et 10 GW et les parcs éoliens sont équipés d'électrolyseurs, l'énergie en excès étant ainsi stockée dans des réservoirs d'hydrogène collecté périodiquement.

L'ensemble des EnR couvrent la mobilité et les besoins domestiques des citoyens qui ont fait les travaux d'isolation qui s'imposent, fait le choix d'équipements électroménagers à faible consommation, le tout géré de façon parcimonieuse et « intelligente » dans le sens de l'optimisation et du séquençage des consommations. De nombreux habitats pavillonnaires bioclimatiques équipés de ressources énergétiques renouvelables sont en autoconsommation.

Appels de forte puissance électrique

Malgré les progrès considérables du stockage de l'électricité, les EnR ne peuvent garantir la couverture simultanée de tous les appels de forte puissance électrique sur de longues périodes : besoins importants des mégalopoles, transports lourds (métros, tramways, TGV, navires, trains de marchandises), industrie, etc. Pour le transport aérien, les vols en altitude stratosphérique des avions long courrier s'effectuent grâce à l'hydrogène qui alimente leurs moteurs électriques via des piles à combustible.

En périphérie des agglomérations, les dépôts de carburants sont aujourd'hui des réservoirs d'hydrogène qui alimentent les stations-service et des piles à combustible de grande taille qui relaient instantanément la production d'électricité quand les EnR n'étalent pas.

Quelle énergie en amont pour la production massive d'électricité et d'hydrogène ? Les centrales nucléaires de deuxième

génération sont obsolètes depuis 2030, la construction des EPR (Génération 3) est remplacée progressivement par la Génération 4 qui résout les limites d'approvisionnement en uranium et la production de déchets radioactifs. Mais soyons patients ; les résultats du réacteur à fusion contrôlée ITER sont encourageants, ce qui devrait ouvrir la voie à une production industrielle vers 2080. Ce sera l'ultime défi énergétique : la maîtrise d'un soleil sur Terre, une ressource énergétique abondante et inépuisable dont l'impact sur l'environnement sera très limité.

Ainsi en deux siècles, l'intelligence humaine aura réussi le pari insensé de court-circuiter le temps, les millions d'années nécessaires pour transformer en énergies fossiles la matière végétale issue de la photosynthèse des plantes sous l'action du soleil. On en revient toujours à la recherche du soleil, le maître de la vie sur Terre.

La vision de…

Alain Fuchs

Président de l'Université Paris Sciences & Lettres
Ancien président du CNRS (2010–2017)

La crainte d'une pénurie de ressources fossiles s'est considérablement éloignée aujourd'hui avec la découverte récente de nouveaux gisements de pétrole et de gaz. Avec des énergies fossiles très bon marché, une volonté politique forte et coordonnée des États est indispensable pour accélérer la transformation de notre bouquet énergétique et de nos modes de consommation et ainsi limiter les émissions anthropiques de gaz à effet de serre (GES) qui contribuent au réchauffement climatique.

De nombreux pays industrialisés ont adhéré à l'objectif de réduction de leurs émissions d'un facteur 4 à l'horizon 2050 par rapport au niveau des émissions de 1990, ce qui permettrait, en tenant compte d'une hypothèse d'augmentation des émissions des pays en voie de développement, d'aboutir à une réduction d'un facteur 2 des émissions de GES au plan mondial par rapport à 1990. Selon les experts du climat, ce jalon ambitieux permettrait de contenir la hausse moyenne des températures à 2°C à la fin du siècle.

La Conférence de Paris sur le Climat (COP21) s'est même assignée fin 2015 un objectif plus difficilement atteignable de limitation du réchauffement à 1,5°C. L'un des points remarquables est que cet engagement, théoriquement contraignant, est aussi différencié, avec un effort plus important à réaliser par les pays industrialisés et un soutien apporté

aux pays en développement pour développer une économie « bas carbone ».

Aujourd'hui, avec le concours d'économistes s'appuyant sur des modèles, de nombreuses organisations nationales et internationales se livrent à des exercices de prospective énergétique. Elles élaborent des scénarios à plus ou moins long terme qui visent notamment à évaluer le niveau des émissions de gaz à effet de serre résultant de différentes « trajectoires possibles ». Ainsi, l'Agence internationale de l'énergie (AIE) présente par exemple 3 scénarios qui conduiraient respectivement à des émissions de GES induisant des augmentations de 2°C, 4°C ou 6°C de la température moyenne de la planète à l'horizon 2050, en fonction des efforts consentis pour développer et améliorer les technologies énergétiques, mais aussi pour faire évoluer les modes de consommation, la réglementation, l'aménagement du territoire, etc.

Tenter ne serait-ce que d'esquisser l'évolution du mix énergétique mondial jusqu'à l'horizon 2050 est un exercice particulièrement périlleux pour un scientifique tant le nombre de facteurs peu ou pas maîtrisables est important. Les incertitudes sont d'autant plus grandes que l'objectif en termes de réduction d'émissions est ambitieux et lointain. Au cours des 25 dernières années, en dépit de l'accroissement de la consommation d'énergie primaire (de 9 à 14 Gtep environ) le mix énergétique mondial a très peu évolué avec une part des énergies fossiles qui est restée voisine de 80 %, dans la consommation primaire, contre seulement 14 % pour les énergies renouvelables et 5 à 6 % pour le nucléaire.

Pour changer la donne à l'horizon 2050 et parvenir à réduire suffisamment nos émissions de GES en dépit de l'augmentation de la demande mondiale en énergie, il faudra tout d'abord consentir un effort de recherche et développement très important. C'est ainsi que la Mission Innovation lancée

à l'issue de la COP21, prévoit le doublement des moyens alloués à la R&D sur les « énergies propres » pendant les 5 prochaines années. L'un des objectifs affichés est de permettre un transfert plus rapide des innovations vers l'industrie, par exemple au sujet de la valorisation du CO_2. Cet objectif est louable mais ne doit pas obérer le soutien indispensable aux recherches amont sur l'énergie car de véritables inventions/innovations de rupture (scientifiques, technologiques, mais aussi sociétales) seront nécessaires pour transformer en profondeur notre mix énergétique à une échéance de 35 années. Il est en effet important de souligner que l'exercice auquel on se prête ici relève d'une façon ou d'une autre de l'extrapolation de l'état actuel, en tentant de prendre en compte une évolution « raisonnable » des paramètres et des facteurs influençant la composition du mix énergétique dans les années qui viennent. À l'horizon 2050, ces ruptures scientifiques, par essence imprévisibles, viendront comme d'habitude de domaines scientifiques où on ne les attendait pas.

Plusieurs technologies renouvelables, comme le photovoltaïque et l'éolien, ont d'ores et déjà atteint un niveau de maturité qui permet d'envisager leur déploiement à grande échelle, même si des progrès restent à accomplir. Mais les défis majeurs auxquels seront confrontées les énergies renouvelables intermittentes à moyen/long terme seront plutôt de nature transverse.

Un premier défi sera leur intégration dans les réseaux. Il faudra disposer de nouvelles technologies de stockage plus performantes et plus durables, mais aussi de réseaux plus intelligents, capables d'adapter en temps réel l'offre à la demande (et parfois même la demande à l'offre). Cela est particulièrement vrai pour les réseaux électriques : le développement de l'intelligence de ces réseaux nécessite encore des efforts de recherche considérables en matière d'électronique

de puissance, de capteurs, de cybersécurité… L'électricité d'origine renouvelable devrait également occuper une part croissante dans le domaine de la mobilité, grâce à la mise au point de véhicules dotés d'une plus grande autonomie et au déploiement de stations de recharge rapide, à partir d'énergie solaire par exemple.

Un autre défi majeur pour le déploiement massif des renouvelables tiendra à la disponibilité des ressources minérales. Certaines technologies d'éoliennes, de cellules solaires ou de batteries utilisent des éléments peu abondants (terres rares, lithium, indium, etc.) et parfois en grandes quantités. Il faudra mettre au point des technologies alternatives utilisant des éléments de substitution (par exemple le sodium pour remplacer le lithium dans les batteries), développer des filières de récupération et de recyclage, et plus généralement réduire l'empreinte environnementale des renouvelables qui contrairement à ce que pensent certains, est loin d'être négligeable.

Toutes ces transformations de notre système énergétique devront s'accompagner d'une profonde évolution de nos usages, qu'il s'agisse de la gestion de notre propre consommation (collecte et partage de données, pilotage intelligent des appareillages, etc.) ou de notre mobilité (avec des pratiques telles que le covoiturage ou l'autopartage qui sont amenées à se généraliser). Les technologies de l'information et de la communication vont alors jouer un rôle considérable et bouleverser notre rapport à l'énergie. C'est pourquoi, de manière générale, les citoyens devront être étroitement associés, en amont, aux choix en matière d'énergie afin de devenir les acteurs de ces transformations ; l'évolution des usages pourrait ainsi contribuer tout autant à la réduction de notre consommation d'énergie que le progrès technologique. La recherche dans le domaine de l'énergie doit donc dès à

présent faire une place importante aux sciences humaines et sociales aux côtés des autres disciplines.

Au-delà des nécessaires évolutions des réglementations et des usages, fixer à court terme un prix raisonnable au CO_2 (supérieur à 30, voire 50 € la tonne) apparaît alors comme un levier indispensable à un développement plus rapide des énergies bas carbone. Mais s'il ne fait guère de doute que notre mix énergétique sera fortement renouvelable à l'horizon 2050, ne tombons pas dans l'utopie d'un scénario 100 % renouvelable qui n'est pas réaliste à court ou moyen terme. On a parfois tendance à parler de transition énergétique en pensant seulement à l'objectif à atteindre et en oubliant le mot « transition ». Les réserves mondiales de gaz sont abondantes et offrent une alternative intéressante à court terme. En effet, la combustion du gaz émet 2 fois moins de CO_2 que celle du charbon, les turbines à gaz peuvent offrir une production d'électricité stable indispensable à l'intégration d'une fraction d'énergies intermittentes dans le réseau ; enfin, les réseaux de gaz peuvent également accepter une quantité non négligeable d'hydrogène produit par électrolyse de l'eau et ainsi contribuer au stockage de l'électricité renouvelable. Le gaz pourrait ainsi apporter un précieux concours au développement des énergies renouvelables. Comme le titrait un dossier du journal du CNRS en 2014[1], le gaz serait-il l'énergie de la transition ?

1. Dossier n° 277, 2014, téléchargeable sur www.cnrs.fr.

La vision de…

Samuele Furfari

Maître de conférences à l'Université libre de Bruxelles
Expert européen auprès de la DG Énergie
de la Commission européenne

2050, c'est dans 32 ans. Il y a 32 ans, nous étions en 1986, en plein contre-choc pétrolier. Après le tremblement du monde suite aux deux chocs pétroliers consécutifs provoqués par l'OPEP, le prix du pétrole était tombé si bas qu'aujourd'hui encore, tout nouveau contre-choc pétrolier constitue un épouvantail pour l'Arabie saoudite. Qu'est-ce qui avait permis cette contre-révolution et mis en échec la stratégie de l'OPEP ? Tout d'abord, l'abandon de la consommation de produits pétroliers dans les centrales électriques (à l'époque, le prix du brut était si bas que l'on pouvait se permettre le luxe de l'utiliser pour produire de l'électricité). La maturation de la technologie nucléaire et le développement de technologies modernes de combustion de charbon ont changé la donne. Ensuite, la mise en œuvre de technologies plus efficientes, notamment dans le secteur de l'automobile, avait donné lieu à des économies d'énergie qui ont permis de réduire la consommation de pétrole. Cela se résumait à l'époque par un slogan lancé par la Commission européenne : COCONUC pour *« COal, COnservation and NUClear »*. Les résultats ont été au rendez-vous et ont suscité un retour à la sérénité énergétique.

Ce bref flash-back a pour but de souligner que ce sont avant tout les solutions technologiques qui nous ont permis de sortir des crises énergétiques. Il en sera de même à l'avenir : ce seront les technologies qui continueront à formater la

scène énergétique. L'énergie est souvent abordée à travers une approche politique, économique ou géopolitique. Bien que pertinente, elle se révèle toutefois insuffisante, voire secondaire. L'énergie est avant tout une question de technologie, de physique et de chimie. Dans le domaine de l'énergie, l'entrée en scène de la diplomatie (ou de la politique) est toujours précédée d'une évolution ou révolution technologique. Ce sont ces percées technologiques qui nous ont conduits dans l'ère de l'abondance énergétique, tant et si bien que notre nouveau souci n'est plus de disposer de l'énergie mais de ne pas trop en consommer pour éviter la pollution. Ces innovations successives expliquent le nouveau paradigme de l'abondance en matière de pétrole et de gaz, abondance qui a abouti à la rupture géopolitique que nous connaissons aujourd'hui.

Le secteur énergétique doit investir davantage dans la R&D et améliorer sans cesse les technologies de production des énergies primaires, tout en limitant leur consommation. Il doit aussi viser à accroître l'efficacité de la consommation des énergies finales, tout en réduisant leur impact environnemental, tout particulièrement en matière de pollution atmosphérique dans les villes.

La première observation qui vient à l'esprit pour 2050 est que la demande mondiale en énergie est destinée à croître. L'Union européenne fera sans doute montre de modération dans sa demande tandis que le reste du monde fera l'inverse, d'une part parce que la population mondiale augmente et d'autre part, parce que 1,3 milliard de personnes dans le monde n'ont pas encore accès à l'électricité et 2,7 milliards utilisent du bois et des excréments[1] pour la cuisson de leurs aliments. La soif de ces populations pour l'énergie ne saurait

1. *La vie sans énergie moderne : pauvre, misérable et brève*, Samuele Furfari, Paris, L'Harmattan, décembre 2016.

être réprimée et ce ne sont pas nos économies d'énergie qui vont l'étancher. Le monde est donc appelé à consommer de plus en plus chacune des énergies primaires…

Les entreprises gazières et pétrolières continueront à perfectionner leurs technologies de prospection, de forage et d'exploration afin de produire du gaz naturel et du pétrole bon marché. Les scénarios de l'Agence internationale de l'énergie[2] indiquent qu'il n'y aura pas encore de pic pétrolier à l'horizon 2040 et d'autres études prédisent qu'il n'y en aura pas, même en 2050. D'une part, le parc automobile passera d'un milliard aujourd'hui à deux milliards en 2040 – fort heureusement les véhicules seront de moins en moins gourmands en énergie, ce qui compensera le plus grand nombre de kilomètres parcourus. D'autre part, la demande pour la pétrochimie et la chimie sera plus forte, ce qui amènera une stagnation de la consommation de pétrole brut. La géopolitique du pétrole étant à présent « pacifiée[3] », il n'y aura plus lieu de redouter des crises pétrolières malgré cette croissance.

Les besoins en électricité dans le monde seront tels qu'on ne pourra pas se passer du charbon, ce qui nécessitera des meilleures technologies de combustion et d'abattement des émissions. Le gaz pénétrera sans doute encore plus le secteur de la production électrique. Dans les deux cas, grâce aux nouveaux aciers, le rendement des centrales sera de plus en plus performant.

Le nucléaire s'offrira une nouvelle jeunesse grâce au développement de petites centrales modulaires (SMR – *Small*

2. *World Energy Outlook 2016*, AIE.

3. *« Après quarante années vécues dans la peur de la fin du pétrole et l'urgence de trouver des énergies alternatives, sous la menace d'embargos pétroliers et plus récemment gaziers, il est temps de communiquer au grand public la bonne nouvelle que la quarantaine a pris fin »*, principalement en raison de la révolution du gaz de roche-mère, indique Samuele Furfari. *Vive les énergies fossiles*, Samuele Furfari, Texquis, 2014.

Modular Reactors), dont la toute première installation devrait être opérationnelle dans l'État de l'Utah en 2025[4]. Les recherches financées par le Department of Energy américain ont permis le développement de ces concepts de réacteurs plus petits et modulaires, ce qui réduit drastiquement le coût d'investissement, problème majeur de la filière nucléaire aujourd'hui. En Belgique, le nouveau réacteur de recherche Myrrha piloté par un accélérateur de particules linéaire semble très prometteur. Le machine, refroidie par un alliage de plomb et de bismuth et sous-critique, est sûre et peut être arrêtée instantanément. Elle devrait servir de prototype aux futurs réacteurs nucléaires de 4e génération.

Quid des énergies renouvelables ? Ce sera l'électrochimie qui sera à l'avant-scène. Grâce à la catalyse, on parviendra à produire de la photosynthèse artificielle. Comme les plantes, des molécules organiques se créeront à partir d'eau, de CO_2 et de rayonnement solaire. Il conviendra de multiplier considérablement la vitesse de réaction pour y parvenir ; c'est le but visé par exemple par l'équipe de recherche du Professeur Fontecave du Collège de France.

Dans le monde pétrolier et gazier, les techniques traditionnelles de prospection ont connu un véritable chamboulement depuis l'introduction de la technologie de l'information et notamment celle du *big data*, appelée à connaître un développement massif dans le domaine de la demande d'énergie. Le futur ne sera pas axé sur la chasse au gaspillage, ni sur la culpabilisation des consommateurs, ni sur la restriction du nombre de véhicules. La technologie de l'information envahira le monde de l'énergie en profondeur. La *Smart Energy* nous fournira des réseaux électriques intelligents, des villes intelligentes, des véhicules intelligents et surtout

4. *NuScale Power, experience, vision and SMR concept*, Thomas Mundy, Séminaire Agoria, Bruxelles, 8 novembre 2016.

des maisons intelligentes, les bâtiments étant les lieux où l'énergie est la plus utilisée et la plus inefficacement.

Sans énergie, il n'y a tout simplement pas de vie. Puisque très rares sont ceux qui veulent vivre dans le genre de confort qu'a connu le Roi-Soleil, les chercheurs poursuivront leurs travaux afin de répondre à l'appel des pères fondateurs de l'Union européenne lors de la Conférence de Messine en 1955, qui affirmait alors qu'il n'y aurait « pas d'avenir (pour la Communauté) sans énergie abondante et bon marché. » En 2050, il n'y aura ainsi pas d'avenir pour le monde sans une énergie abondante, bon marché mais aussi « propre ». L'avenir de l'énergie est radieux.

La vision de…

Thierry Gaudin

Président de la Fondation 2100

Compte tenu des ruptures qui se sont produites dans le système énergétique pendant la seconde moitié du XX^{e} siècle (chocs pétroliers, démarrage du nucléaire et développement des énergies dites « nouvelles »), il semble difficile d'anticiper l'évolution d'ici 2050. L'exercice est, pour cette raison, stimulant. Je crois aussi que l'enjeu en vaut la peine car bien des indices laissent penser que la trajectoire de la première moitié du XXI^{e} siècle a de grandes chances de s'écarter du prolongement des tendances actuelles. Ce qui suit n'est pas le fruit d'une enquête approfondie ; c'est un récit qui fait suite aux travaux de prospective que j'ai menés ou dirigés depuis une trentaine d'années.

Depuis la parution de *2100, récit du prochain siècle* en 1990[1], l'espèce humaine a pris conscience d'être entrée dans l'anthropocène avec l'inversion du rapport de domination entre l'homme et la nature. Pallier les conséquences néfastes des modifications que nous avons apportées à la composition de l'atmosphère, aux cycles de l'eau et du carbone apparaît comme un impératif. Cela concerne au premier chef le système énergétique. Il faut passer en moins d'un siècle de 80 % de sources d'énergie fossiles à 80 % de sources sans émission de gaz à effet de serre (GES). Les instances internationales seront-elles suffisamment efficaces pour que cette transition nécessaire ait des effets visibles avant 2050 ?

1. Ouvrage de Thierry Gaudin paru en 1990 (2^{e} édition en 1993).

Le développement de l'humanité a reposé sur des sources d'énergie abondantes et bon marché. Au cours actuel du brut (la référence) sur les marchés de gros, un litre de pétrole est moins cher qu'un litre d'eau minérale au supermarché. L'humanité saura-t-elle procéder en douceur à la transition vers un système plus écologique mais à énergie chère ?

Par ailleurs, la menace d'une crise planétaire majeure d'ici 2050 n'est pas à exclure, entraînant une transformation radicale du système énergétique. Pour commencer, essayons d'anticiper, comme le recommande Benjamin Dessus, les futurs usages de l'énergie. Dans les pays développés, trois grands types d'usages constituent schématiquement la consommation actuelle d'énergie : un tiers pour la production, l'industrie et l'agriculture, un tiers pour les transports et un tiers pour le chauffage des bâtiments, habitations et lieux de travail.

L'agriculture contribue de façon marginale à la consommation d'énergie (2 %), mais pour près de 30 % aux émissions de GES, la moitié étant due au changement d'utilisation des sols (déforestation). Une agriculture plus écologique devrait viser à réduire ces émissions.

Une part importante des fabrications industrielles est partie sous d'autres cieux, ce qui déplace la consommation mais ne l'abolit pas. On peut cependant estimer que les nouvelles installations étant plus performantes, il y a diminution de la consommation, en supposant que la demande finale ne change pas. Mais cette demande s'accroît à mesure que les pays s'industrialisent et s'urbanisent. Quant à l'agriculture, son mouvement vers l'écologie, de plus en plus nécessaire à cause de la pollution des sols et des nappes par les engrais et les pesticides, devrait diminuer sa consommation d'énergie.

La question du transport amène à anticiper des changements bien plus importants : d'abord, les performances du système

de communication rendent bien des déplacements inutiles ou superflus. Ensuite, le pilotage automatique des transports (aujourd'hui le métro, demain les livraisons par véhicules autonomes de type *Google Car*) et la robotisation des stockages et des fabrications diminuent encore les déplacements obligatoires des personnes, remplacés par de la téléprésence, de la gestion et de la documentation à distance.

Les circuits économiques sont bouleversés par les formes nouvelles de communication, ce qui diminue le besoin d'énergie à niveau de vie égal. 2050 pourrait marquer le début d'un âge d'or de l'électricité, la part de ce vecteur dans la consommation d'énergie finale passant de 20 % actuellement à plus de 50 %. Il me semble que l'on s'oriente vers la coexistence de deux systèmes : d'une part, un système centralisé associé aux métropoles et aux grandes infrastructures de transport et, d'autre part, un système décentralisé avec des unités partiellement autonomes pour les régions rurales.

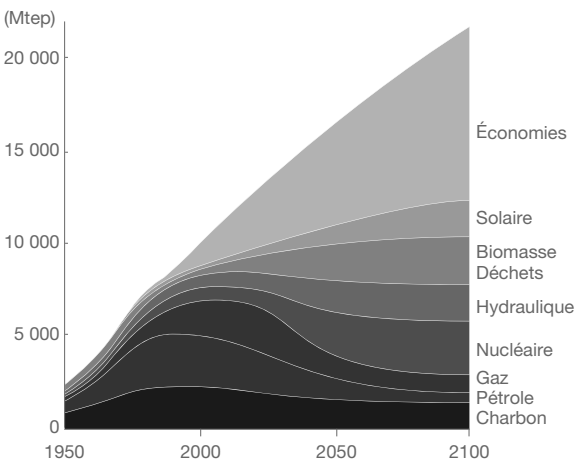
Quant au chauffage des locaux, les nouvelles constructions sont mieux isolées et les anciennes s'équipent en doubles fenêtres mais l'évolution des bâtiments est lente de telle sorte que l'effet en 2050 risque d'être de second ordre.

Néanmoins, je ne peux me limiter à cette vision, trop centrée sur la civilisation urbaine d'un pays riche et dépensier. Il faut tenir compte aussi des pays en développement, dont la consommation d'énergie va croître en raison du rattrapage de leur niveau de consommation. D'autre part, le flux de migrants, qu'il soit dû ou non au changement climatique, pose des problèmes nouveaux et aura des conséquences importantes sur l'énergie.

On dit parfois que le XX^{e} siècle a été le siècle du pétrole et que le XXI^{e} sera celui de l'eau. En effet, d'une part les zones de sécheresse se multiplient (pourtour de la Méditerranée,

Moyen-Orient, Australie, sud-est de la Chine, Mexique, Californie, etc.). D'autre part, en accélérant la fonte des glaciers, le réchauffement rend le cours des fleuves issus de l'Himalaya ou des Andes plus irrégulier, justifiant la construction de barrages en aval comme c'est déjà le cas en Chine, en Inde et au Brésil. La montée du niveau des océans obligera sans doute à d'importants travaux portuaires, d'autant plus nécessaires qu'une migration vers les côtes a déjà commencé au XX^{e} siècle.

Il faut donc s'attendre à une multiplication des usines de dessalement, lesquelles consomment beaucoup d'énergie. Les estimations du flux de migrants, effectuées après le travail de l'OCDE en 2015 sont de plusieurs centaines de millions pendant le XXI^{e} siècle, une bonne partie causée par les sécheresses car même des migrations dues aux conflits ethniques et religieux sont en fait des conséquences d'un appauvrissement, notamment des populations de cultivateurs éleveurs.



Le scénario ci-dessus (publié en 1990 dans le livre *«2100, récit du prochain siècle»*) montre l'ampleur des évolutions attendues du côté de la production d'énergie dans le monde. Il a été retravaillé depuis, notamment par Jean Louis Bobin, mais sa ligne générale subsiste.

Si les changements à attendre sont importants du côté de la production et des économies d'énergie, on peut s'attendre à des changements encore plus importants du côté du transport d'énergie et des usages.

En ce qui concerne le transport, l'interconnexion des réseaux électriques est en marche. Elle peut se faire d'ici 2050. L'exemple du projet Medgrid (interconnexion du pourtour de la Méditerranée), suspendu pour des motifs politiques, montre que les dossiers techniques sont prêts et qu'il suffit d'attendre qu'une génération de politiciens un peu plus raisonnable prenne la relève. Il est actuellement difficile d'estimer si le transport d'électricité se fera en 2050 par des lignes à très haute tension ou par supraconductivité.

Le stockage de l'énergie promet aussi d'évoluer assez vite (comme le montre l'exemple des batteries lithium-ion). L'électrification du transport et celle des communications seront demandeuses de grandes capacités nouvelles. Il est probable, l'exemple de l'automobile électrique le montre, que le stockage de l'électricité se substituera partiellement à l'usage des carburants liquides. Mais l'électrochimie a ses limites. À production d'énergie égale, une batterie sera toujours plus lourde qu'un plein d'essence : dans ce dernier cas, l'oxygène est fourni par l'air et sa masse n'est pas comptabilisée.

En ce qui concerne la production d'énergie, le gaz et le pétrole de schiste ont déjà changé le panorama des énergies fossiles. Néanmoins, on peut se demander si la population, saisie d'une prise de conscience des problèmes posés par l'effet de serre, ne préférera pas s'orienter vers des sources plus écologiques et plus autonomes telles que le solaire, l'éolien ou le biogaz. Ce dernier est d'ailleurs répandu dans les villages de Chine et d'Inde où des millions de fermenteurs fonctionnent depuis des décennies.

Il est vraisemblable que la population continuera à migrer vers les côtes, d'où le développement de différentes formes d'énergies marines, issues des marées, de la houle ou du potentiel thermique (énergie thermique des mers ou « ETM »).

Quant au nucléaire, il est vraisemblable qu'il subsistera, sans avoir toutefois le rôle dominant que ses promoteurs souhaitaient lui voir jouer au XX^{e} siècle. Il est peu probable que la fusion contrôlée, qu'on tente de stabiliser depuis trente ans, soit opérationnelle d'ici 2050.

En conclusion, le paysage énergétique du XXI^{e} siècle semble beaucoup plus diversifié que celui du XX^{e}. Les risques de pénurie, qu'avaient fait craindre les crises pétrolières de la fin du siècle dernier, s'éloignent. Il est clair que cela ne sera pas sans conséquences géopolitiques.

La vision de…

Kirsty Gogan

Cofondatrice et directrice de l'ONG Energy for Humanity

Ma fille aura 42 ans en 2050, l'âge que j'ai aujourd'hui. Comment le monde aura-t-il évolué d'ici là ? Quel regard portera-t-elle sur les efforts et les erreurs qu'ont pu faire les générations de ses parents et grands-parents ? Quels seront les défis auxquels elle devra faire face et de quelles ruptures scientifiques et technologiques sera-t-elle témoin ? Le progrès est possible mais il n'est pas certain.

Faisons tout d'abord l'inventaire de l'héritage que nous ont légué nos parents et grands-parents. De stupéfiants progrès ont été réalisés à tous les niveaux. Aujourd'hui, nous vivons plus en sécurité, avec plus de confort, plus longtemps et en meilleure santé qu'auparavant. Depuis 1990, le nombre de personnes dans le monde vivant dans la pauvreté a diminué de moitié. Il y a 6 millions de morts infantiles en moins chaque année, le taux d'alphabétisation a grimpé et la condition des femmes et des enfants s'améliore. D'ici 2050, la population mondiale pourrait passer de 7 milliards à 10 milliards de personnes (bien que la taille des familles diminue) et l'économie mondiale pourrait tripler de volume.

Mais le progrès a un prix. Les températures moyennes mondiales ont déjà augmenté d'un degré depuis la révolution industrielle. D'ici 2050, le monde devra réduire de moitié ses émissions de CO_2 par rapport à aujourd'hui pour que la température mondiale ne s'élève pas de plus de 2°C. Au-delà de cette limite, les scientifiques prédisent que des changements irréversibles se produiront probablement. À cause des

combustibles fossiles, la Terre se prépare à traverser une série d'extinctions de masse catastrophiques d'ici la fin de ce siècle.

La vie moderne repose sur des consommations massives d'électricité. Aujourd'hui, la moitié de la population mondiale n'a pourtant toujours pas accès à l'électricité ou utilise des combustibles produisant de la fumée pour cuisiner et s'éclairer, ce qui provoque chaque année des millions de morts, en particulier de femmes et d'enfants. En dehors des foyers, certaines villes ne disposent pas des infrastructures alimentées à l'électricité nécessaires pour vivre longtemps, en sécurité et en bonne santé, autant de choses que les personnes qui vivent dans les pays développés prennent pour acquises.

Répondre aux besoins de développement humain tout en protégeant l'environnement est l'un des grands défis de notre siècle. Permettre à la population mondiale grandissante d'atteindre un niveau de vie plus élevé pourrait doubler, voire tripler la demande en électricité d'ici 2050. De grandes quantités de nouvelles sources d'énergie hautement efficaces sont nécessaires pour remplacer les combustibles fossiles et répondre à cette demande.

Selon moi, il est matériellement possible d'atteindre nos objectifs climatiques et d'assurer un bon niveau de vie aux 10 milliards de personnes qui peupleront la Terre en 2050. Pour cela, nous devons transformer les technologies et les combustibles que nous utilisons avec une rapidité difficilement imaginable. Les émissions de CO_2 par kWh doivent par exemple baisser d'au moins 90 % d'ici 2050. Nous devons également faire un usage plus intelligent de nos terres limitées, en particulier en protégeant et en étendant nos forêts.

Face à cette réalité, les gens commencent à parler des compromis qu'ils sont prêts à faire. L'énergie nucléaire – en complément des énergies éolienne et solaire – peut constituer

une source d'électricité fiable et à grande échelle sans émissions. Selon James Hansen, un des plus grands spécialistes mondiaux du climat, il faudrait, en complément des énergies renouvelables, construire 115 nouveaux réacteurs nucléaires par an d'ici 2050 pour remplacer la production actuelle d'électricité basée sur les combustibles fossiles, tout en répondant à une demande mondiale accrue en électricité.

Cela revient à multiplier par dix le nombre de réacteurs nucléaires dans le monde, pour passer d'environ 460 aujourd'hui à 4 000. Cela peut sembler beaucoup mais nous savons que ce rythme de construction est envisageable. La Suède l'a fait par exemple. En fait, aucune autre source d'électricité neutre en carbone ne s'est développée aussi rapidement que le nucléaire, et de loin.

C'est donc possible, mais est-ce pour autant acceptable ? Afin que tout le monde se sente en sécurité dans un monde avec 4 000 réacteurs nucléaires, cette énergie devra regagner le soutien du public, des politiques et la confiance des investisseurs en démontrant ses avantages. Ma fille verra-t-elle ainsi la peur et l'aversion souvent associées à l'énergie nucléaire au XX^{e} siècle comme une illusion propre à l'ère des combustibles fossiles ?

Toutes les sources d'énergie propre sont indispensables pour parvenir à une vraie « décarbonation » : pas seulement dans le domaine de l'électricité mais dans tous les secteurs de la société, notamment le chauffage et les transports. Les avantages socio-économiques de la lutte contre la pollution liée au trafic routier auront d'énormes impacts sur la santé publique comme pour la régénération des petites et grandes villes du monde entier. Pour ma fille, le bruit et la pollution provoqués par les moteurs à combustion seront une antiquité en 2050, un lointain souvenir d'enfance. Elle me demandera

à quoi nous pouvions bien penser pour respirer ces fumées de pots d'échappement.

En 2050, même si nous parvenons à endiguer les pires effets climatiques, ma fille fera partie d'une population mondiale plus nombreuse, plus exposée aux catastrophes naturelles de plus en plus fréquentes. Nous aurons besoin d'infrastructures solides et résistantes. Même les centrales nucléaires de la génération de mes parents résistent mieux aux catastrophes naturelles que la plupart des autres infrastructures. Les technologies de la génération de ma fille seront bien plus polyvalentes, évolutives, flexibles et compétitives.

Pour ma fille, le charbon sera du passé. Comme lors des précédentes transitions énergétiques – du bois au charbon puis au gaz – la tendance est d'aller vers une densité énergétique plus élevée. L'uranium est un million de fois plus dense que le charbon, ce qui signifie moins d'extraction minière, moins de déchets, une empreinte écologique réduite, un air pur, plus d'énergie et plus de place pour la nature. En 2050, les nouveaux réacteurs seront plus efficaces et recycleront les combustibles usagés. Aujourd'hui, nous disposons déjà d'anciennes ogives nucléaires, conçues pour détruire nos villes, que nous pouvons transformer en électricité pour éclairer ces mêmes villes.

J'imagine que le monde de ma fille en 2050 sera plus propre, tranquille, prospère et connecté. Cependant, même si le progrès est possible, il n'est pas certain. Nous sommes à un tournant décisif pour protéger le climat de notre planète. Les réponses que nous apportons aujourd'hui au changement climatique auront des conséquences à long terme sur nos enfants et nous devons choisir la voie à suivre avec sagesse. Nous devons arrêter de nous bercer d'illusions et faire soigneusement nos calculs si nous voulons réussir une

transition mondiale rapide et constructive pour nous libérer des combustibles fossiles. Il est tout aussi important de se fier aux chiffres et à de solides analyses que de suivre son cœur.

La vision de…

Christine Goubet-Milhaud

Présidente de l'Union française de l'électricité

En 2050, près de dix milliards d'êtres humains peupleront notre planète. Tous ces êtres humains devront être nourris, chauffés ou climatisés, et avoir la possibilité de s'éclairer, de se déplacer et d'accéder à l'information. À l'échelle de l'Humanité, la satisfaction progressive de ces besoins a été permise par l'accès croissant à l'énergie : le feu de bois d'abord, pour le chauffage, la cuisson et éloigner les bêtes sauvages, puis la force animale pour l'agriculture, le vent pour la navigation, et l'énergie hydraulique pour les moulins.

S'il est indéniable que la consommation d'énergie est un trait inhérent à l'activité de l'homme moderne, elle est aussi devenue une source majeure de préoccupation : depuis le XIX^{e} siècle, l'activité humaine est sous-tendue par la combustion d'énergies d'origine fossile (charbon, pétrole, gaz), abondantes et bon marché, qui entraîne dans son sillage le déséquilibre de l'écosystème dans lequel nous évoluons. Les émissions de CO_2, et les changements climatiques qu'elles induisent, génèrent d'importantes catastrophes naturelles et transforment des zones géographiques densément peuplées en milieux hostiles. Les flux migratoires qui découlent de ces mutations climatiques provoquent tensions et conflits.

Un faisceau d'éléments concordants suggère nettement que l'objectif international affiché et assumé depuis la création de la Société des Nations, à savoir la paix entre les peuples, est incompatible avec le réchauffement climatique. En 2050, la paix entre les peuples ne sera permise que si un accès universel

à des sources d'énergies décarbonées est assuré. Dès lors, la question porte sur ce qui doit avoir changé en 2050 pour dépasser l'opposition entre développement de l'Humanité et paix dans le monde. En 2050, plusieurs transformations devront avoir eu lieu.

Tout d'abord, consommation d'énergie ne rimera plus avec émissions de CO_2. Les énergies fossiles auront été remplacées par l'électricité décarbonée (hydraulique, éolien, solaire, nucléaire, etc.), la chaleur et le froid renouvelables, les biocarburants et le biogaz. Les voitures seront propulsées avec de l'électricité décarbonée, la chaleur des *data centers* sera récupérée pour alimenter les bâtiments adjacents et les maisons seront chauffées grâce des appareils à bois ou des pompes à chaleur. L'usage de ces énergies, beaucoup mieux réparties sur le globe que les énergies fossiles, limitera les conflits géopolitiques liés à la maîtrise des ressources énergétiques.

Les consommations d'énergies seront également efficaces, sans gaspillage, en s'appuyant au contraire sur l'économie circulaire. En 2050 toujours, tous les systèmes énergétiques seront couplés pour tirer le meilleur parti de la variabilité de certaines des énergies renouvelables. Le système électrique sera adossé à la production de chaleur et de biogaz. De fait, le système énergétique global sera optimisé en temps réel afin de tirer le meilleur parti de chacune des spécificités territoriales et de limiter le coût de l'énergie. Cette optimisation numérique sera rendue possible par l'interopérabilité des réseaux de transport et de distribution des différentes énergies décarbonées.

En clair, le système énergétique fonctionnera comme fonctionne Internet aujourd'hui. Néanmoins, au vu des investissements à réaliser pour parvenir à de tels systèmes,

l'émergence de ce paysage énergétique mondial en 2050 devra nécessairement avoir suscité l'adhésion de la société sous toutes ses composantes. Cela implique que dans tous les pays, en 2050, le climat sera depuis longtemps devenu un sujet « banal ».

La décarbonation est un objectif politique stratégique, au même titre, par exemple, que la Déclaration des droits de l'Homme. Néanmoins, la plupart des solutions climatiques auront été mis en œuvre grâce à des gestes et des solutions naturelles de la vie de tous les jours : les énergies décarbonées seront moins chères, les voitures électriques et à hydrogène seront silencieuses et ne pollueront pas et le pilotage des consommations sera la règle car il sera rémunéré. C'est la somme des actions individuelles qui mènera à la décarbonation.

La vision de…

François Heisbourg

Conseiller spécial de la
Fondation pour la recherche stratégique
Président de l'International Institute for Strategic Studies

Dans un entretien au journal britannique *The Telegraph*, le Cheikh Yamani[1] déclarait en juin 2000 que l'Âge de Pierre ne s'était pas terminé parce nous avions manqué de pierres et que l'Âge du Pétrole ne se terminerait pas parce que nous manquerions de pétrole.

L'artisan du choc pétrolier de 1973 considérait que les progrès de la technique allaient conduire à un fort accroissement de la production de pétrole brut : c'est ce qui s'est passé moins de dix ans plus tard avec l'exploitation du pétrole non conventionnel aux États-Unis qui a mis sur le marché l'équivalent d'une demi-Arabie saoudite. Du côté de la demande, il prévoyait que les avancées en matière de batteries allaient réduire à près de zéro la consommation d'essence. Il estimait à 30 ans l'horizon de la fin de l'Âge du Pétrole.

Nous sommes à un petit peu plus qu'à mi-chemin de sa prévision. Dans l'intervalle, la lutte contre le changement climatique est devenue une priorité opérationnelle des politiques publiques, y compris en Chine, pesant donc elle aussi sur la demande d'énergie fossile.

En parallèle, la technique progresse rapidement, notamment du côté des énergies renouvelables, cependant que les avancées

1. Le Cheikh Yamani fut le ministre saoudien du pétrole et des ressources minérales de 1962 à 1986.

sur les batteries pour véhicules électriques devraient finir par répondre aux espoirs après plus de 120 ans de recherches… Donc, tout va bien, et en 2030, le parc automobile (sans conducteurs de surcroît) ne sentira plus l'essence, propulsé par une Fée électricité redevenue aussi vierge que la « houille blanche » promise à nos grands-parents ? Cerise sur le gâteau, les géostratéges dont je suis n'auront plus à analyser, pour les déplorer, les effets belligènes et corrupteurs d'hydrocarbures qui riment trop facilement avec dictature.

Pourtant, l'histoire, y compris celle de l'Âge de Pierre, nous rappelle que les transitions concernant les matières premières nécessaires n'ont pas le caractère définitif des courbes élégantes des regrettés Jean Fourastié ou Alvin Toffler. L'Âge du charbon s'est censément éteint avec le triomphe de pétrole il y a plus de soixante ans. Pourtant, jamais nous n'avons autant extrait de houille, et pas seulement parce que les « émergents » passent eux aussi par la case charbon : l'Allemagne, si « verte », brûle plus qu'hier houille et même lignite (le summum de la pollution et du mauvais rendement énergétique). Et si les pierres ne servent plus à tuer les fauves, cette pierre moderne qu'est le ciment est elle aussi en plein essor – avec au passage un impact majeur sur la demande d'énergie fossile.

Il n'y a pas vraiment d'« Âge » en histoire, sauf pour les amateurs des jardins à la française conceptuels : la linéarité facilite le récit mais elle n'est pas un modèle de compréhension des complexités du temps passé, présent ou à venir.

Notre transition énergétique sera donc aussi complexe et aussi multiforme que l'histoire de l'énergie depuis les débuts de la Révolution industrielle il y a près de trois siècles. Cela doit être pris en compte dans la réflexion sur les politiques publiques.

La vision de…

Max Bankole Jarrett

Directeur de l'Africa Progress Panel

Le monde peut-il éviter une catastrophe climatique tout en mettant en place les systèmes énergétiques dont il a besoin pour assurer la croissance, créer des emplois et permettre à des millions de personnes de sortir de la pauvreté ? Ainsi s'interrogeait le président de l'Africa Progress Panel Kofi Annan dans l'avant-propos du rapport 2015 *Énergie, population, planète : saisir les opportunités énergétiques et climatiques de l'Afrique*[1]. Cette question est, à mon sens, l'un des principaux enjeux du développement du XXIe siècle.

Le changement climatique oblige tous les pays à repenser la relation entre énergie et développement. Toutefois, les différences dans les niveaux d'accès à l'énergie et les habitudes de consommation entre les pays développés et ceux en voie de développement appellent des stratégies différentes.

D'un côté se trouvent les pays africains pour lesquels l'enjeu est de satisfaire leurs besoins énergétiques pressants tout en assurant une transition rapide vers une croissance sobre en carbone. De l'autre côté, les pays industrialisés pour lesquels il est impérieux de dompter leurs consommations d'énergie et de réduire à zéro leurs émissions nettes de gaz à effet de serre d'ici 2050.

1. *Énergie, population et planète*, rapport 2015 sur les progrès en Afrique, Africa Progress Panel.

Renforcer les engagements des principaux pays émetteurs

Nos économies dépendent de systèmes énergétiques à fortes émissions de carbone qui ne peuvent que heurter de plein fouet les limites de notre planète. Nous pouvons cependant éviter cette collision. À cet effet, les pays industrialisés devront prendre des mesures plus ambitieuses que celles actuellement proposées par les États-Unis et l'Union européenne et œuvrer à réduire à zéro leurs émissions nettes de gaz à effet de serre d'ici 2050. Ils devront définir des étapes intermédiaires claires à l'horizon 2030.

L'Union européenne doit s'engager à réduire ses émissions de moitié d'ici 2030 et à atteindre l'objectif de zéro émission nette d'ici 2050. Elle doit également s'engager à éliminer la production d'électricité à base de charbon d'ici 2030. Les États-Unis doivent s'engager à réduire de 40 % leurs émissions, à éliminer la production d'électricité à base de charbon d'ici 2030 et à atteindre l'objectif de zéro émission nette d'ici 2050.

La Chine doit chercher à atteindre dès 2025 son pic d'émissions, soit 11 milliards de tonnes d'équivalent CO_2 (700 millions de tonnes de moins que le niveau prévu pour 2030), en s'appuyant sur la promotion active des énergies renouvelables, la réduction du recours au charbon et l'adoption de mesures d'efficacité énergétique.

L'Australie, le Canada, la Russie et le Japon doivent également se fixer une feuille de route précise pour réduire drastiquement leurs émissions d'ici 2030 et atteindre l'objectif de zéro émission nette d'ici 2050. Ils peuvent pour cela s'inspirer des grandes ambitions de certains pays africains tels que l'Éthiopie, le Kenya et le Rwanda qui, malgré leurs défis énergétiques actuels, s'engagent à éviter la voie dangereuse des émissions polluantes suivie par beaucoup de pays développés.

Développer l'immense potentiel énergétique du continent africain

Le déficit énergétique du continent africain est considérable mais il représente également une énorme opportunité à plusieurs égards. En Afrique, la demande d'énergie devrait monter en flèche d'ici 2050, sous l'impulsion de la croissance économique, des changements démographiques et de l'urbanisation.

D'ici 2050, près de la moitié des citoyens africains vivront dans des villes, contre à peine plus d'un tiers aujourd'hui. La population urbaine augmentera de 800 millions de personnes. Les conséquences en termes d'approvisionnement en énergie sont considérables. Aujourd'hui, les citadins consomment en moyenne trois fois plus d'électricité que les populations rurales. L'urbanisation réduit par ailleurs le coût des raccordements.

Les villes pourraient s'imposer comme des plateformes d'innovation. Les inquiétudes liées au changement climatique stimulent l'innovation qui permet de réduire le coût des énergies à faibles émissions de carbone. L'Afrique pourrait saisir cette occasion pour entrer de plain-pied dans une nouvelle ère de production électrique.

Aucune région ne dispose d'autant de sources d'énergie renouvelable qui soient aussi peu exploitées. La décentralisation des systèmes de production et de distribution d'électricité offre de nouvelles possibilités d'atteindre les populations actuellement négligées par les réseaux nationaux. Pourtant, une telle issue favorable n'est pas garantie.

L'Africa Progress Panel a évoqué pour la première fois le besoin d'une mobilisation plus active en vue d'accélérer l'électrification du continent africain dans notre rapport de 2015. Deux ans plus tard, la situation est toujours aussi

pressante comme nous le montrons dans notre rapport *Lumière, puissance, action : électrifier l'Afrique*[2]. Près des deux tiers de la population africaine, soit 620 millions de personnes, n'ont toujours pas accès « à des services énergétiques fiables, durables et modernes à un coût abordable », l'objectif énergétique au cœur du Programme de développement durable à l'horizon 2030.

Le déficit énergétique de l'Afrique continue d'asphyxier la croissance économique, la création d'emplois, la transformation du secteur agricole et les progrès en matière de santé et d'éducation. La réussite de l'objectif de développement durable numéro 7 des Nations unies, consacré à l'énergie, est indispensable à celle de nombreux autres objectifs.

Il est temps d'agir

Les gouvernements africains, les investisseurs et les institutions financières internationales doivent augmenter de manière significative leurs investissements dans le secteur énergétique de l'Afrique afin de libérer son potentiel de « superpuissance » en matière de faibles émissions de carbone. Responsable d'à peine 2,3 % des émissions mondiales de CO_2, l'Afrique pourrait devenir le chef de file d'un développement sobre en carbone et montrer ainsi la voie à suivre à d'autres régions du monde.

En tant que communauté mondiale, nous disposons des technologies, des moyens financiers et du savoir-faire qui nous permettraient d'opérer une transition vers un avenir sobre en carbone à l'horizon 2050. Il n'y a plus d'excuse possible. Il est temps de mettre en œuvre le leadership politique et les mesures concrètes nécessaires pour dissocier l'énergie des émissions de carbone.

---

2. Rapport *Lumière, puissance, action : électrifier l'Afrique*, APP, mars 2017.

La vision de…

Jean Jouzel

Directeur émérite de recherche au CEA
Ancien vice-président du groupe
scientifique du GIEC (2002–2015)

Chercheur dans le domaine de l'évolution du climat, ce sont en premier lieu les conclusions des rapports successifs du GIEC – le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat – qui nourrissent ma réflexion sur le paysage énergétique mondial en 2050. Si rien n'était fait pour maîtriser l'augmentation de l'effet de serre liée aux activités humaines, nous irions à la fin de ce siècle vers un réchauffement moyen proche de 5°C par rapport à la période préindustrielle avec des conséquences auxquelles il sera difficile de faire face. Tous les voyants sont au rouge quelles que soient les conséquences concernées : acidification de l'océan, élévation du niveau de la mer, événements extrêmes, accès à l'eau, biodiversité, sécurité alimentaire, phénomènes irréversibles liés à la fonte du permafrost, etc. J'adhère donc pleinement à l'objectif de l'accord de Paris avec l'espoir que la limitation du réchauffement nettement en-dessous de 2°C par rapport à ce niveau préindustriel – soit environ 1°C par rapport aux conditions que nous connaissons aujourd'hui – préserverait notre capacité d'adaptation, au moins pour l'essentiel. En effet, même dans cette hypothèse, une élévation du niveau de la mer proche d'un mètre est inéluctable d'ici la fin du siècle prochain. Et certains pays – souvent parmi les plus pauvres – ont déjà dépassé leur seuil de vulnérabilité, ce qui apporte des arguments vis-à-vis de la poursuite d'un objectif « 1,5°C » encore plus ambitieux.

Or, il y a un lien très étroit entre l'augmentation de l'effet de serre et l'évolution du mix énergétique au cours des prochaines décennies. Environ les trois quarts de cette augmentation résultent des émissions de CO_2 dont environ 85 % sont dues à l'utilisation de combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz), le reste étant lié à la déforestation et à la production de ciment. Le dernier rapport du GIEC met ce lien en évidence en établissant que le niveau de stabilisation du réchauffement est fonction du cumul des émissions de CO_2. À un objectif donné peut donc être associée une quantité de CO_2 restant à émettre. En supposant que les émissions des autres gaz à effet de serre – en particulier le méthane et le protoxyde d'azote dont une part importante est liée à l'agriculture – n'augmentent pas, il faut limiter les futures émissions de CO_2 liées aux activités humaines à 700 milliards de tonnes (Gt CO_2). En 2016, celles liées aux combustibles fossiles et à l'industrie se sont établies à 36 Gt CO_2 si bien qu'à ce rythme, il ne nous reste plus qu'une vingtaine d'années d'émissions. Or, s'appuyant également sur les chiffres publiés par le GIEC, les « réserves » qui peuvent être exploitées aux conditions techniques et économiques d'aujourd'hui sont évaluées à 2 600 Gt CO_2 en tenant compte du pétrole, du gaz et du charbon. Mais elles ont plus que doublé avec l'exploitation du gaz de schiste et de pétrole non conventionnel et l'objectif 2°C requiert donc des émissions de CO_2 correspondant à moins de 15 % de l'ensemble – conventionnelles et non conventionnelles – de ces réserves.

Ce double constat illustre le changement rapide et extrêmement important qui devrait caractériser le système énergétique mondial d'ici 2050. Tous les scénarios compatibles avec l'objectif 2°C se traduisent par une diminution importante des émissions de CO_2, de l'ordre d'un facteur 3 à cet horizon par rapport à 2020. Le défi est immense et nécessite l'adoption de nouveaux modes d'investissement. D'après

le GIEC, les modifications les plus importantes des flux d'investissement associés, d'ici 2030, à ces scénarios « sobres en carbone » concernent par ordre décroissant l'efficacité énergétique, le développement des énergies renouvelables, le piégeage et stockage du CO_2, et le nucléaire avec en parallèle des désinvestissements importants dans les domaines de l'extraction des combustibles fossiles et de leur utilisation, hors piégeage et stockage du CO_2.

Je suis bien conscient de la très grande difficulté de mise en œuvre de cette transition énergétique, y compris dans un pays comme le nôtre, qui dès 2005, s'est doté d'un objectif ambitieux de division par 4 de ses émissions de gaz à effet de serre entre 1990 et 2050, confirmé dans le cadre du Grenelle de l'Environnement, et repris en 2015 dans la loi sur « la transition énergétique pour la croissance verte ». D'autant plus qu'il s'agit d'un objectif relatif à l'ensemble des gaz à effet de serre qui devrait donc être encore plus contraignant pour la partie énergie dans la mesure où une telle diminution n'est pas envisageable sur le volet agricole. Cette ambition est compatible avec l'objectif affiché dans l'accord de Paris qui, s'il n'était pas respecté, rendrait difficile – voire impossible dans certaines régions du globe – l'adaptation au réchauffement climatique dans la seconde partie du XXI^{e} siècle et au-delà.

La vision de…

Étienne Klein

Physicien et philosophe
Directeur de recherche au CEA

Quand on nous parle d'un hypothétique retour de la croissance, on ne précise que rarement de quelle croissance il est question. Je sais bien qu'il s'agit toujours de la croissance du PIB mais celui-ci peut croître de multiples façons. Alors que veut-on faire croître exactement, et que voudrait-on faire décroître ? Il faudrait le dire clairement au lieu d'invoquer le mot « croissance » de façon systématiquement dévote.

On connaît l'argument des « objecteurs de croissance » : l'économie a besoin pour croître de ressources énergétiques ; or, celles-ci étant limitées, la croissance est une impossibilité à long terme. Tout esprit peut en effet comprendre qu'une croissance continue est matériellement impossible dans un monde fini. Kenneth Boulding disait que, pour nier cette loi élémentaire, *« il faut soit être un fou, soit être un économiste »*. Dès lors, comment pouvons-nous être assez inconscients, disent les objecteurs de croissance, pour vouloir à tout prix l'augmentation de la production, qui implique une augmentation de la pollution, une diminution des emplois et du plaisir à travailler ? Il faudrait plutôt opter pour la décroissance économique, seule voie pour sauver la planète des excès de l'humanité, en commençant par décoloniser nos imaginaires galvanisés par les publicitaires.

En vertu de cette loi, le mode de développement du monde moderne apparaît comme la victime d'une contradiction douloureuse : il se pense comme universel, et pourtant il

sait désormais que son extension à l'ensemble de l'humanité, tant dans l'espace que dans le temps, se heurte à des obstacles impitoyables, ne serait-ce que parce que l'atmosphère de notre globe ne supporterait ni sa généralisation ni son maintien. Il y a donc une contradiction entre notre exigence éthique d'égalité et notre mode de développement. D'où le dilemme : nous, les riches, ou bien nous nous coupons du reste du monde au moyen de boucliers divers, ou bien nous inventons un autre mode de développement qui aurait la propriété de pouvoir être étendu à l'échelle de l'humanité tout entière. Vaste programme…

Quant aux partisans de la croissance, ils défendent au contraire l'idée que nous n'avons pas d'autre choix que de continuer à désirer la croissance, car la décroissance nous exposerait à trois immenses problèmes. D'abord, elle laisserait à son sort le milliard d'êtres humains qui vivent avec moins d'un dollar par jour. Ensuite, elle rendrait difficile toute protection de l'environnement (car celle-ci coûte cher : nous devons donc devenir plus riches pour avoir les moyens de ces dépenses). Enfin, le remède au chômage, ce sont de nouveaux postes de travail, mais s'ils ne se financent pas sous la forme d'une augmentation de la production, ils ne se rentabilisent pas. Bref, une croissance économique continue semble une condition de la résolution des problèmes qu'une production industrielle intensive crée elle-même.

Le développement de la société se retrouve ainsi dans un cercle vicieux : le mouvement continu de ce cercle n'est possible qu'à la condition que la croissance ne s'arrête pas ; or le combustible de cette croissance, lui, risque de s'épuiser un jour…

La question est donc : que va-t-il se passer d'ici à 2050 ? La bonne réponse dépend de ce que nous faisons et de ce que nous allons faire dans les trois décennies qui viennent.

Il est remarquable que ce soit un philosophe, Edmund Husserl, qui ait saisi l'importance de ces enjeux bien avant tout le monde, même si ce fut à partir d'arguments très différents de ceux que nous entendons aujourd'hui. Dès les années 1930, le vieil homme avait compris que la crise qui secouait alors l'Europe n'avait pas seulement à voir avec des pratiques dictatoriales, mais concernait aussi et surtout notre rapport au monde qui nous entoure et à la Terre qui nous soutient. En seulement trois jours, du 7 au 9 mai 1934, il rédigea un texte très étrange, intitulé *La Terre ne se meut pas*[1]. Bien sûr, Husserl n'y contestait nullement la valeur de vérité des découvertes de Copernic et Galilée, mais affirmait simplement que la Terre n'est pas, pour nous, une planète comme une autre : elle est le sol originaire et insubstituable de notre ancrage corporel. Grâce aux travaux des astronomes et aux exoplanètes qu'ils découvrent, nous avons désormais tout lieu de croire que notre île cernée d'espace est d'une très grande banalité astrophysique. Il n'empêche : elle est la seule planète qui soit là où nous sommes…

Cette unicité irréductible qu'a pour nous la Terre devrait suffire à changer notre regard sur elle. Nous ne nous arracherons pas si facilement à elle, à son sol qui à la fois nous attire, nous nourrit et nous construit. Ou, plus précisément, nous ne pourrons la quitter que si, d'une façon ou d'une autre, nous pouvons l'emporter avec nous, ce qui ne sera pas simple. Alors, plutôt que d'imaginer que nous pourrions nous en échapper, essayons d'abord d'y sauver la possibilité de notre présence continuée. Étrange paradoxe : c'est au moment où nous découvrons que notre planète n'est peut-être qu'une parmi beaucoup d'autres que nous devons le plus penser son unicité relativement à nous.

1. *La Terre ne se meut pas. Renversement de la doctrine copernicienne dans l'interprétation habituelle du Monde*, Trad. de D. Franck, J.-F. Lavigne et D. Pradelle, Minuit, coll. Philosophie, 1989.

La vision de…

Philippe Knoche

Directeur général d'Orano (anciennement Areva)

D'ici 2050, le marché de l'énergie au niveau mondial va être confronté à un grand écart. D'une part, la demande en électricité va bondir dans les décennies à venir. Du fait de l'urbanisation, de l'augmentation du niveau de vie, des nouveaux usages (voitures électriques, digital…), les besoins en électricité vont quasiment doubler. D'autre part, pour respecter les objectifs fixés par la COP21 et lutter efficacement contre le dérèglement climatique, il faudra diviser par deux les émissions de gaz à effet de serre.

Multiplier par deux d'un côté, diviser par deux de l'autre, c'est un effet ciseaux majeur. Si on ajoute l'arrivée sur le marché de nouvelles sources d'énergie (gaz et pétrole de schiste, énergies renouvelables), mais également des contraintes économiques fortes (marché de l'électricité à des prix très bas, absence d'incitation pour les investissements à long terme sur de nouveaux moyens de production, prix de la tonne de CO_2 très bas ne favorisant pas les technologies faiblement émettrices), c'est un véritable big bang énergétique auquel nous sommes actuellement confrontés.

Dans ce nouvel environnement bouleversé, il est nécessaire de s'extraire du très court terme afin de se projeter, l'énergie étant par essence une activité de long terme.

Nucléaire et renouvelables et non pas nucléaire ou renouvelables

Quel est l'enjeu environnemental prioritaire au niveau

mondial ? Le consensus existe, c'est le dérèglement climatique. Si on veut atteindre l'objectif fixé au niveau mondial de contenir l'augmentation de la température moyenne à moins de 2°C, il ne faut pas opposer les sources d'énergies bas carbone mais au contraire les développer conjointement : développer le nucléaire et les renouvelables.

En France, c'est déjà le cas et notre pays fait partie des six pays dans le monde qui ont déjà atteint l'objectif d'au moins 80 % d'électricité décarbonée. Les émissions de CO_2 liés à la production d'électricité dans notre pays sont très faibles : 50 g de CO_2/kWh contre 415 g de CO_2/kWh en Allemagne. Il faut avoir également conscience que, grâce à son mix énergétique, la France est reconnue comme n°1 mondial pour la qualité, la disponibilité et l'accès de son électricité[1].

Le futur mix pour la production d'électricité ne peut pas être « fossiles et renouvelables ». Pour lutter efficacement contre le dérèglement climatique, la complémentarité « nucléaire et renouvelables » est indispensable. Même avec une part croissante d'énergies renouvelables intermittentes, on a et on aura besoin du nucléaire pour couvrir les besoins de production d'électricité en base. Il n'y a pas actuellement de rupture technologique qui permette le stockage de l'électricité à grande échelle et, sauf changement de paradigme, nous avons besoin d'électricité en continu.

Écologie et économie et non pas écologie ou économie

Un des maux régulièrement reproché à l'économie de notre pays ? Sa désindustrialisation puisque l'industrie ne représente plus que 12 % du PIB du pays. Dans ce contexte, pourquoi ne pas « mettre le paquet » sur l'énergie en additionnant les forces ? Les énergies renouvelables ont un fort potentiel de

1. Étude Eurostat.

développement en termes d'emplois. Fort bien, mettons en place les moyens pour localiser les usines et les emplois en France dans ces filières tout en gardant la filière nucléaire française, qui est la 3e filière industrielle après l'automobile et l'aéronautique. Une filière de 220 000 emplois directs et indirects, non délocalisables, répartis dans 2 500 entreprises. Une filière d'excellence avec des emplois deux fois plus qualifiés que la moyenne de l'industrie française, qui offre des perspectives d'embauches et qui contribue positivement à la balance commerciale (6 milliards d'euros par an). Une filière qui permet de produire une électricité compétitive, un ménage français payant son électricité 70 % moins cher qu'un ménage allemand. En développant les renouvelables tout en maintenant une filière nucléaire forte, cela sera « écologie et économie ».

France et international et non pas France ou international

Le nucléaire français est une référence dans le monde car il a su développer dans notre pays une industrie sur l'ensemble du cycle, allant de la fabrication du combustible au démantèlement en passant par le recyclage, mais également conquérir des marchés à l'international. Les PME de la filière exportent 5 à 10 fois plus que la moyenne de l'industrie française, notamment vers la Chine.

Le nouvel Areva[2] est le symbole de cette dualité : un ancrage industriel fort en France avec des plateformes industrielles importantes (La Hague, Tricastin) mais également des positions fortes à l'international (top 3 mondial pour ses principales activités : mines, chimie-enrichissement, recyclage ; plus de 60 % de son chiffre d'affaires réalisé à l'étranger) afin de répondre aux besoins de ses clients.

2. Note de l'éditeur : cette contribution a été rédigée en juin 2017.

D'ici le milieu du siècle, les capacités nucléaires dans le monde doivent augmenter de 50 %, le stock de combustible usé de 70 % et près de 150 réacteurs seront à démanteler. New Areva dispose des technologies et compétences pour fournir les combustibles, les recycler, gérer de manière sûre les déchets et participer au démantèlement des installations nucléaires aussi bien en France qu'à l'international.

La vision de…

Hervé Le Treut

Climatologue
Directeur de l'Institut Pierre-Simon Laplace

C'est en tant que climatologue que je peux donner une vision, bien sûr partielle, du futur énergétique de la planète à l'horizon 2050. Depuis plus de 30 ans, mon travail de modélisation a été largement consacré à l'impact des gaz à effet de serre sur l'évolution future du climat, j'ai régulièrement participé aux rapports du GIEC et je partage bien sûr complètement les diagnostics, prévisions et inquiétudes exprimés par Jean Jouzel dans sa contribution à ce projet. Je vais donc surtout insister sur certaines spécificités de ces enjeux.

Le premier mot qui vient à l'esprit est celui d'urgence. Cette urgence est d'autant plus grave qu'elle se présente de manière cachée. Il y a 30 ans, 6 milliards de tonnes de carbone étaient émises annuellement dans l'atmosphère sous forme de CO_2 résultant de la combustion du charbon, du pétrole et du gaz naturel. Le rythme annuel d'émissions à l'heure actuelle est désormais de 10 milliards de tonnes. Or, si une moitié de ces émissions est captée de manière rapide par la végétation et les océans (en produisant une acidité des océans qui contribue à fragiliser les massifs coralliens et la biodiversité exceptionnelle qu'ils abritent), l'autre moitié crée dans l'atmosphère une augmentation de la teneur en CO_2 qui met très longtemps à s'effacer : pour toutes les personnes qui ne sont pas encore centenaires, l'impact des émissions de leur année de naissance sur la teneur atmosphérique en CO_2 est encore présent pour plus d'une moitié.

Il se produit donc un cumul largement irréversible : les émissions d'aujourd'hui constitueront le réchauffement de demain, tout comme celles d'hier sont la cause du réchauffement d'aujourd'hui – et ce décalage est renforcé par le temps nécessaire au chauffage des couches superficielles de l'océan, allant d'une à quelques décennies.

En 1979, le rapport du professeur Jule Charney à l'Académie des sciences américaine prévoyait un réchauffement de 1,5°C à 4,5°C pour un doublement du CO_2 atmosphérique, des chiffres considérables quand on sait qu'un âge glaciaire et un âge interglaciaire sont séparés par environ 5°C. Le réchauffement prévu par Charney est devenu clairement discernable dans les années 1990, y compris dans sa distribution géographique, conforme à ce qui était anticipé. Nous atteignons aujourd'hui 1°C de réchauffement (aux incertitudes près liées à la variabilité naturelle).

Ce que disent maintenant les modèles, c'est qu'à ce rythme, et compte tenu des autres gaz à effet de serre, à peine plus de 20 ans d'émissions seront suffisantes pour qu'il devienne très peu probable de rester sous la barre des 2°C de réchauffement[1]. Pour cela, il faudrait au contraire enclencher une réduction massive des émissions de CO_2 (et autres gaz à effet de serre): de 40 à 70 % en 2050, jusqu'à les supprimer complètement avant la fin du siècle.

Les années 2050 dépendront beaucoup de ce qui aura été fait d'ici là mais la pression des problèmes environnementaux sur les modalités de production d'énergie sera très fortement augmentée. À très court terme, il faudra, il faut déjà, utiliser toutes les techniques existantes, toutes les formes de production ou d'économie d'énergie disponibles. Aucune n'est suffisante isolément pour remplacer les énergies fossiles,

1. D'ici à 2100 par rapport aux températures de l'ère préindustrielle.

même en imaginant des développements importants. Il faudra aussi favoriser sans attendre les évolutions structurelles qui prennent du temps – transports, habitat, captation du CO_2… – en ayant en tête l'échelle mondiale autant que l'échelle nationale. Mais sans le succès des travaux de recherche et développement dans le domaine énergétique, sans innovation technologique, ces efforts resteront sans doute largement insuffisants et le réchauffement en fin de siècle risque d'être bien supérieur à 2°C.

Un deuxième mot important sur lequel j'insisterai est celui de complexité. Le changement climatique entrera en résonance avec une très grande variété d'enjeux et il faudra faire face à des risques multiples, liés les uns aux autres : problèmes climatiques, nous venons de le voir, mais aussi problèmes de biodiversité, problèmes de pollutions irréversibles, auxquels s'ajoutera constamment une interrogation essentielle : comment faire vivre ensemble plus de 7 milliards d'humains sans conflits majeurs, avec la proximité très particulière que crée l'internet, et des ressources difficiles à partager ? Jamais, sans doute, nos sociétés n'auront été confrontées à des choix aussi difficiles, ni à la définition aussi soigneuse d'un chemin étroit entre des exigences aussi variées. Le rôle de l'éducation sera fondamental, comme le sera aussi la définition de lieux de débats et de réflexion qui n'existent pas aujourd'hui au niveau nécessaire.

La vision de…

Sébastien Léger

Directeur associé de McKinsey au bureau de Paris
Coresponsable européen du pôle de
compétences Électricité et gaz naturel

Incertitudes réglementaires liées au champ d'application de l'accord de Paris, écheveau des crises géopolitiques au Moyen-Orient, mutations socio-économiques, ruptures technologiques, incertitudes quant aux intentions des grands pays consommateurs : Chine, Inde et États-Unis… Au vu de la volatilité croissante de tous ces sous-jacents du marché de l'énergie, jamais l'exercice d'anticipation n'aura paru plus périlleux qu'aujourd'hui, *a fortiori* si on lui fixe un horizon aussi lointain que 2050. Jadis réputée pour être une industrie de long terme, l'énergie est maintenant soumise à des chocs fréquents. Sans se risquer donc à une prospective bien incertaine, au moins pouvons-nous tenir pour hautement probables cinq traits structurants du paysage de l'énergie d'ici 30 ans.

Une énergie plus électrique. Nos modélisations laissent présager une croissance moyenne de la demande mondiale d'énergie de 1 % par an jusqu'en 2050, contre plus de 2 % par an sur les 15 dernières années. Ce tassement devrait toutefois s'accompagner d'une hausse de la part de l'électricité dans le mix énergétique mondial qui pourrait atteindre près de 25 % (contre 18 % actuellement) et croître ainsi deux fois plus vite que les autres énergies. Trois facteurs majeurs en seraient la cause et en premier lieu la tertiarisation de l'économie globale, les services étant par nature moins consommateurs d'énergies primaires que les activités agricoles et industrielles.

Le deuxième facteur tient aux évolutions dans les modes de transport : d'ici à 2030, jusqu'à 40 % des véhicules neufs pourraient être électriques, tandis que la consommation en hydrocarbures des moteurs à explosion pourrait être réduite de 40 %. Du côté des usages, le renforcement des transports publics urbains se doublera de l'essor de l'économie de partage digitalisée, réduisant d'autant les déplacements individuels. Le troisième facteur enfin relève de la lutte contre le changement climatique : l'électricité constitue le moyen le plus efficace d'intégrer les renouvelables au mix global.

Une énergie plus « propre ». D'ici à 2050, plus de 70 % des capacités électriques installées supplémentaires pourraient provenir de l'éolien et du solaire. La production d'électricité renouvelable hors hydraulique représenterait alors près d'un tiers de la production totale d'électricité contre 6 % aujourd'hui, soit un rythme de croissance quatre à cinq fois supérieur à toutes les autres sources d'énergie. L'Asie, à elle seule, pourrait construire près de 1 600 centrales électriques consacrées aux renouvelables, soit presque autant que le reste du monde.

Une énergie plus décentralisée. Grâce aux progrès technologiques, on pourrait assister au déploiement massif d'une production décentralisée générée par des panneaux solaires à bas coût déployés à large échelle (notamment sur les toits, les infrastructures routières ou même jusqu'aux vêtements). D'autres technologies pourraient émerger : par exemple, un nucléaire « léger » de nouvelle génération, avec de petites centrales modulaires. Ces phénomènes se combineraient à un stockage dont l'accessibilité se démocratise sous le double effet d'un coût toujours plus faible – estimé à 220 $/kWh en 2020 et à moins de 160 $/kWh en 2025 – et de capacités de stockage toujours plus grandes – supérieures à 1 000 GW dès 2035. Se posera alors la question de la

gestion post-exploitation d'un grand nombre d'actifs du parc énergétique devenus caducs et dont il conviendra d'absorber les frais de démantèlement ou de reconversion.

Des frontières sectorielles recomposées, avec une bataille de la valeur qui impliquera des protagonistes bien plus nombreux et diversifiés. Nous observons déjà l'irruption dans le paysage énergétique d'acteurs issus d'autres secteurs : des géants du BTP tels que Bouygues, dont la filiale Colas avec sa « route solaire » équipée de panneaux photovoltaïques, ou encore de groupes issus de l'automobile tels que Tesla qui investit dans le stockage à travers sa Gigafactory du Nevada ou même dans la production, via sa filiale SolarCity développant des panneaux et des tuiles photovoltaïques.

Une remise en cause du modèle de création de valeur, par l'émergence d'une ou deux ruptures technologiques. On pourrait ainsi assister à l'arrivée à maturité et à viabilité économique de techniques de production « traditionnelle » (maîtrise de la fusion nucléaire, économie de l'hydrogène, extraction propre des hydrocarbures non conventionnels), mais aussi à l'émergence d'innovation radicales, par exemple issues de la révolution de l'organique (par l'exploitation de la photosynthèse des algues ou de la bioénergie du plancton). Face à de telles ruptures, si l'on pousse le raisonnement à l'extrême, on pourrait envisager que le coût de production de l'énergie – externalités négatives comprises – devienne marginal ou négligeable. Dans cette hypothèse d'une énergie quasi gratuite, on peut imaginer des scénarios aussi disruptifs que ceux ayant affecté l'industrie du disque ou plus récemment les télécoms, avec la nécessité d'inventer de nouveaux modèles de rémunération. À l'avenir, la valeur ajoutée pourrait ne plus résider dans la capacité à produire de l'énergie, mais seulement à la distribuer en quantité et à la demande. Les modèles de *pricing* pourraient alors évoluer

d'une tarification de la consommation vers une facturation de l'accès à la puissance, soit l'achat du MW plutôt que du MWh par le consommateur final.

Qui saura alors capter la pleine valeur de ce marché recomposé ? L'ensemble de ces tendances plaide pour un retour au premier plan de la discipline stratégique chez les acteurs de l'énergie, appuyée sur des fondements profondément renouvelés. L'approche probabiliste, par scénarios, qui a longtemps prévalu pour fixer les grandes orientations et maîtriser les risques sera de moins en moins opérante et il leur faudra adopter un mode flexible de pilotage de l'activité. Mettre en place une gestion dynamique du portefeuille stratégique et disposer d'une capacité à réallouer très rapidement, et avec une très forte orientation vers le client, les ressources, les investissements, les actifs et le capital humain, pourraient s'avérer les sources majeures d'avantage compétitif. À cette aune, l'agilité deviendrait en quelque sorte le fondement du « droit d'opérer » sur le marché énergétique de demain.

La vision de…

Jean-Claude Lehmann

Physicien
Président honoraire de l'Académie des technologies

En 2050, les transformations majeures du mix de consommation énergétique pourraient bien venir du numérique.

Qui ne s'est jamais rendu compte que son ordinateur portable, posé sur les genoux, pouvait chauffer considérablement. Certains s'y sont même brûlés ! Or ceci n'est qu'une toute petite partie de l'énergie absorbée puis dissipée par l'ensemble de la civilisation numérique. Les centres de stockage (les *data centers*), au nombre d'une bonne centaine en France, consomment déjà près de 9 % de l'énergie électrique du pays.

L'ensemble du stockage et du traitement de l'information, outre la consommation directe des ordinateurs et des *data centers*, consomme aussi de l'énergie dans les réseaux, la fabrication des composants et des équipements, les périphériques, etc. Au niveau mondial, on estime que le numérique consomme au total près de 2 % de l'énergie produite dans le monde, soit environ 10 % de l'énergie électrique.

On nous annonce une croissance de la masse de données traitées de l'ordre d'un facteur deux tous les deux à quatre ans, ce qui laisse certains augures prévoir que la gestion de l'énergie pour l'ensemble production, transport, stockage et traitement de l'information ne sera plus maîtrisable d'ici une vingtaine d'années !

Bien sûr, il existe de nombreuses possibilités d'amélioration de la situation : l'énergie consommée se transformant

essentiellement en chaleur, on peut la récupérer pour chauffer des bâtiments, voir des piscines comme cela se fait déjà. La climatisation des *data centers* devient plus performante, on développe des composants pouvant travailler de façon fiable à plus haute température, donc nécessitant moins d'énergie de climatisation, des logiciels et des structures plus performants permettent de minimiser la dépense énergétique, notamment en remplaçant des architectures de calcul universelles par des architectures spécialisées, éventuellement neuromorphiques (mimant le fonctionnement du cerveau). Enfin, l'informatique elle-même apporte sa contribution à la maîtrise donc à la diminution de notre consommation d'énergie.

Et pourtant, cette débauche d'énergie se situe bien au-delà de ce que requiert théoriquement le processus fondamental de stockage et de traitement de l'information.

Depuis Claude Shannon, Léon Brillouin et surtout Rolf Landauer, on sait que l'informatique est soumise aux lois de la thermodynamique. Ainsi, le traitement réversible d'un bit informatique, comme son transfert d'un endroit à un autre, peut se faire théoriquement sans dépense d'énergie. À l'opposé, tout processus irréversible, comme l'effacement d'un bit d'information par exemple, augmente l'entropie du système donc dégrade une autre forme d'énergie élémentaire en chaleur.

Landauer a montré que cette dépense minimum est $k \times T \times \mathrm{Log}2$ où k est la constante de Boltzmann et T la température absolue. Cet ordre de grandeur peut se comprendre de la façon suivante : stocker N bits d'information *a minima*, c'est les inscrire sur N degrés de liberté d'un système élémentaire, par exemple sur N spins électroniques que l'on orienterait dans un sens ou dans l'autre. Perdre cette information en effaçant les N bits revient à remplacer l'ensemble orienté par N spins dans des directions aléatoires, ce qui

augmente le désordre, c'est-à-dire l'entropie de $N \times k \times Log2$. Les bits étant en équilibre avec un réservoir à la température T, cette augmentation d'entropie s'accompagne d'après le second principe de la thermodynamique d'un dégagement de chaleur $N \times k \times T \times Log2$. On peut aussi comprendre que, pour « inscrire » un bit d'information sur un système dont chaque degré de liberté a une énergie thermique désordonnée de $\frac{1}{2} \times k \times T$, il faille lui apporter une énergie supérieure à ce minimum.

Mais cette énergie théorique minimum est immensément inférieure à ce qui est dépensé dans les systèmes réels actuels. Notons d'ailleurs que la plupart des équipements consommant de l'énergie dont l'humanité s'est dotée (moteurs, pompes à chaleur, etc.) sont déjà proches des limites que leur assigne la thermodynamique, sauf donc le traitement de l'information ! Les pertes y sont essentiellement dues au fonctionnement même des transistors qui, à chaque cycle de fonctionnement, libèrent de l'énergie comme le ferait un condensateur (consommation « dynamique »), mais aussi aux courants de fuites qui augmentent avec la finesse de la gravure, donc le nombre de transistors au cm^2 (consommation « statique »), ainsi qu'à l'effet Joule dans les circuits de connexions.

Cette différence entre énergie réellement consommée et limite de Landauer serait plutôt une bonne nouvelle. En effet, cela laisse l'espoir de pouvoir encore considérablement augmenter nos capacités de stockage et de traitement de l'information, tout en diminuant de façon spectaculaire leur consommation énergétique. Encore faut-il savoir comment s'y prendre, et là quelques décennies seront certainement nécessaires.

D'ici 2050, on peut penser que des technologies complètement nouvelles se développeront. Plusieurs directions

peuvent être imaginées, qui vont nécessiter de nombreuses recherches, tant scientifiques que technologiques.

Des expérimentations ont été faites utilisant des composants supraconducteurs, donc ne dissipant pas d'énergie par effet Joule, mais sans résultats significatifs. En termes de stockage, si, comme on l'a vu les dimensions submicroniques des structures semi-conductrices commencent à poser de sérieux problèmes, notamment en ce qui concerne les courants de fuite, on peut penser par exemple que des technologies vont se développer qui étendront à trois dimensions ce que l'on sait faire actuellement à deux. Ce serait une source de développement potentiel importante.

Mais les véritables révolutions viendront peut-être de deux autres directions radicalement différentes : des sciences de la vie et/ou du traitement quantique de l'information.

La plus spectaculaire concentration d'informations actuellement connue est la molécule d'ADN. Un unique brin d'ADN humain stocke une information considérable sur ses 3 milliards de paires de bases, concentrée dans le volume d'une cellule humaine. On peut penser que la maîtrise de sa composition et de sa lecture permettra d'ici 2050 de développer des mémoires d'un type complétement nouveau, entrant dans des systèmes également très différents des systèmes actuels. Des chercheurs commencent à travailler sur la notion de transistors biologiques et plus généralement de stockage et de traitement de l'information par voie biologique !

La question de la consommation énergétique du traitement de l'information devra être aussi complètement repensée en cas d'avènement de l'ordinateur quantique dont on rappellera pour finir le principe : un qubit est un système quantique à deux états de base comme le spin d'un électron. Dans un état quantique dit « cohérent », il peut être dans une

superposition linéaire de ces deux états (que l'on peut noter a/0> + b/1> où a et b sont des nombres complexes). Ainsi au lieu d'être représenté par deux états possibles comme un bit classique, le qubit peut être représenté comme un vecteur dont l'extrémité peut se trouver n'importe où sur une sphère unitaire centrée sur l'origine. En outre, deux qubits peuvent être cohérents entre eux, ce qui multiplie par deux le nombre d'états de base possibles /00>, /01>, /10> et /11> dont on peut créer une superposition cohérente. Ainsi, alors que l'addition d'un bit normal ne fait qu'ajouter deux états possibles, chaque addition d'un qubit double le nombre de dimensions de l'espace dans lequel on travaille. Ceci conduit, par application d'un opérateur à cet état « cohérent », à l'équivalent de calculs massivement parallèles, dont la puissance croît exponentiellement avec le nombre de qubits, pourvu que l'on puisse les garder dans un état global cohérent… ce qui est loin d'être évident.

Le problème est double : d'une part réaliser de tels systèmes et les conserver sans que le phénomène de décohérence ne leur fasse perdre immédiatement leurs propriétés et d'autre part « programmer » ces systèmes, puis recueillir le résultat de leur évolution. De nombreuses approches sont actuellement étudiées : atomes piégés à très basse température, électrons piégés dans une structure solide, noyaux de molécules dans un champ magnétique, utilisation de circuits mésoscopiques exploitant l'effet Josephson, etc. En ce qui concerne la dépense en énergie, celle d'un calculateur quantique pourrait peut-être plus facilement s'approcher de la limite de Landauer, ce qui nous ferait sortir de l'impasse actuelle. Encore faudrait-il pouvoir maîtriser les dépenses énergétiques nécessaires à la manipulation et au contrôle des qubits (alimentation des lasers dans le cas des atomes piégés, dépenses cryogéniques, etc.). Si des ordinateurs quantiques à quelques qubits ont pu être réalisés et ont permis de démontrer leur principe de

fonctionnement, on est encore loin de voir cette technologie se substituer aux technologies actuelles. Les plus optimistes annoncent une dizaine d'années. Rien n'est impossible mais avant que notre société numérique, avec ce qu'elle va devenir entre-temps, ne bascule vers le quantique, j'estime que l'objectif 2050 est un peu moins irréaliste.

« Je tiens à remercier Serge Haroche pour d'intéressantes discussions, notamment autour de la seconde partie de ce texte. »

Jean-Claude Lehmann

La vision de…

Jean-Bernard Lévy

Président-directeur général d'EDF

L'électricité accompagne l'ère digitale. Elle est l'une des principales solutions permettant de lutter contre les émissions de gaz à effet de serre et donc contre le réchauffement climatique. L'électricité constitue l'un des leviers majeurs du développement économique et social. C'est ce qui nous permet d'affirmer que notre avenir est électrique.

On voit bien que les secteurs de l'énergie en général et de l'électricité en particulier sont, dans le monde, confrontés à des bouleversements majeurs. Il faut réussir la transition énergétique. Des attentes toujours grandissantes se manifestent. De nouveaux acteurs émergent et se positionnent sur des niches précises comme l'effacement ou les énergies renouvelables. De nouveaux entrants tentent de trouver leur place, comme les GAFA ou des start-ups. Des enjeux technologiques se présentent, à commencer par les réseaux intelligents, le stockage…

Dans un tel environnement, les grands acteurs intégrés qui, sur le modèle d'EDF, répondent à une vision d'ensemble et développent des compétences larges tout en s'ouvrant à de nouvelles formes de collaborations avec ce nouvel écosystème ont un rôle décisif à jouer. N'en doutons pas, c'est de ces acteurs-là que dépend largement la résolution des équations énergétiques de demain.

L'équation du réchauffement climatique

Pour que l'objectif climatique de la COP21 soit atteint, il

est impératif que, dès 2050, l'électricité produite dans le monde le soit sans émettre de gaz à effet de serre. Dans cette perspective, les énergies nucléaire et renouvelables sont appelées à jouer un rôle déterminant, l'une, flexible, étant complémentaire des autres, par nature intermittentes.

La stratégie « CAP 2030 » d'EDF s'inscrit dans ce cadre, avec d'un côté la modernisation du socle nucléaire et de l'autre l'accélération du développement des énergies renouvelables (EnR). Ce mix de production qui est déjà très largement le nôtre fait d'EDF le leader mondial de l'électricité bas carbone, et c'est ce mix que nous allons conforter et développer.

Notre groupe est déjà le premier producteur d'EnR en Europe et détient des positions fortes aux États-Unis et dans une dizaine d'autres pays dans le monde entier. Notre objectif est de doubler nos capacités électriques installées d'EnR dans le monde d'ici à 2030. Nous investissons autant dans les EnR que dans les nouveaux projets nucléaires et nous travaillons activement à la mise au point de technologies nouvelles permettant d'augmenter les rendements des EnR, d'améliorer les performances du stockage ou de développer des réseaux de plus en plus intelligents permettant de marier les différentes sources de production centralisées ou décentralisées.

L'équation de la transition énergétique

Sait-on assez que les secteurs du bâtiment et des transports représentent à eux deux 60 % de l'énergie consommée dans le monde, près des deux tiers provenant des énergies fossiles émettrices de CO_2 ? Or, dans de tels secteurs, l'électricité a un rôle déterminant à jouer pour le climat en permettant de substituer aux combustibles fossiles une électricité produite sans émission de CO_2. Cela signifie développer l'efficacité énergétique en délivrant des services nouveaux aux industries, aux collectivités locales et aux particuliers ; instaurer des usages efficaces de l'électricité dans les bâtiments comme le

chauffe-eau thermodynamique, qui est aussi un excellent moyen de stockage ; ou généraliser les transports électriques collectifs et individuels.

Les clients et les territoires ont besoin d'être accompagnés dans leur démarche vers la transition énergétique, qui va de plus en plus les rendre acteurs de leurs propres consommations. Mais à côté des systèmes décentralisés intermittents et locaux qui vont se développer, un système centralisé et sécurisé, tel qu'assuré par un groupe comme le nôtre, restera essentiel.

L'équation du digital et des attentes nouvelles des consommateurs

Robotique, domotique, nouveaux services des technologies de l'information, objets connectés… Il n'y a pas de digital sans électricité. Seule cette électricité est capable de répondre aux nouveaux usages et aux nouvelles attentes des consommateurs, comme la capacité de développer des systèmes décentralisés de gestion des consommations attendus par des « consommacteurs », désireux d'adapter leurs comportements aux exigences de la transition énergétique.

La stratégie « CAP 2030 » est la réponse d'EDF à ces enjeux et à ces défis. C'est d'une véritable transformation qu'il s'agit et nous la déployons à marche soutenue en France et au-delà.

La vision de…

Colette Lewiner

Conseillère énergie du président de Capgemini
Administratrice d'EDF, Bouygues,
Eurotunnel, Ingenico, Nexans

La situation énergétique des différentes régions du monde en 2050 dépendra de nombreux facteurs : les avancées technologiques, l'accroissement de la population, les modes de vie, l'éducation, les politiques énergie-climat régionales et le respect des accords mondiaux tels que l'accord de Paris signé en 2015.

Les avancées technologiques

On peut rêver de ruptures scientifiques et technologiques telles que la fusion froide, le réacteur à onde progressive[1] dont le cœur produit son propre combustible, la supraconductivité haute température ou la disponibilité sur Terre d'électricité photovoltaïque produite dans l'espace. Ce type de ruptures est souhaitable mais compte tenu du temps qui sépare l'expérience de laboratoire (pour certaines) ou le prototype (pour d'autres) de l'industrialisation, ces ruptures, si elles existent, ne produiront pas leur plein effet en 2050.

En revanche, il est très probable que les technologies actuelles de production d'énergie décarbonées seront plus efficientes.

Du côté des énergies renouvelables, le rendement des panneaux solaires photovoltaïques aura sensiblement augmenté et la baisse du coût de l'électricité produite aura été spectaculaire.

1. *Traveling Wave Reactor.*

L'éolien offshore sera aussi plus compétitif qu'aujourd'hui et les énergies marines commenceront à être matures.

Ces énergies étant par nature intermittentes, la question se pose sur la dynamique d'amélioration de la performance du stockage de l'électricité, que ce soit par batteries électriques ou grâce à l'hydrogène car les progrès dans ces deux domaines ont été lents au cours du siècle écoulé.

L'électricité d'origine nucléaire qui est, avec l'électricité d'origine hydraulique, la seule source d'électricité programmable décarbonée devrait continuer à participer, dans les pays suffisamment industrialisés, au mix électrique. Ce sont les réacteurs de 3e ou 4e génération avec les plus petits réacteurs[2], s'ils réussissent à être compétitifs, qui constitueront le parc mondial de centrales nucléaires car, compte tenu de l'état d'avancement des recherches sur la fusion nucléaire, celle-ci n'aura probablement pas atteint le stade industriel en 2050.

Les énergies fossiles seront disponibles et continueront d'être utilisées dans certains secteurs et dans certaines régions. Les procédés d'exploitation des gaz et pétroles de schiste se seront améliorés et seront plus respectueux de l'environnement.

Des procédés nouveaux de capture et de stockage du CO_2 seront nécessaires pour que le charbon et le gaz (dans une moindre mesure) puissent faire partie des énergies « propres ». Cela est fortement souhaitable car on n'interdira pas l'usage du charbon dans les zones qui manquent cruellement d'électricité.

L'accès à l'eau potable restera un enjeu majeur dans certains pays dont la consommation d'énergie pour le dessalement d'eau de mer, par exemple, est très significative. Là aussi on

2. *Small Modular Reactors*

peut espérer que la tendance actuelle vers des technologies plus sobres en énergie continuera.

La digitalisation, la connectivité et la robotisation dont on commence à mesurer l'impact sur nos sociétés, à travers les objets connectés par exemple, auront transformé l'économie, la production, les modes de travail et l'espace de vie. Ces transformations présenteront des côtés positifs comme la suppression de la pénibilité du travail, les économies d'énergie ou l'accès facile à l'information, au divertissement, à la culture, mais aussi des dangers. Les cyberattaques seront présentes dans la vie quotidienne mais viseront aussi des équipements industriels (les centrales de production d'électricité, les raffineries mais aussi les réseaux électriques) qui devront être protégés en permanence.

En théorie, ces progrès technologiques seront accessibles dans tous les pays du monde. En pratique, il n'en sera rien car il faudra avoir atteint une certaine maturité industrielle (avoir accès à une électricité fiable par exemple) pour pouvoir en bénéficier et il faudra aussi que la population ait atteint un certain niveau d'éducation, ne fût-ce que pour maintenir les équipements correspondants.

Les disparités

En 2050, la population mondiale devrait dépasser les 9,5 milliards de personnes, soit un accroissement de l'ordre de 30 % par rapport à aujourd'hui. Ce sont les régions en développement qui enregistreront la plus grande augmentation de leur nombre d'habitants, en passant de 5,9 milliards en 2013 à 8,2 milliards en 2050. L'Afrique, par exemple, devra faire face aux enjeux liés à une population de 2,5 milliards d'habitants. En revanche, le nombre de personnes vivant dans les pays développés restera largement inchangé.

Dans ce contexte, l'alimentation, les modes de vie, l'accès aux biens essentiels comme l'eau et l'énergie, l'éducation, l'implémentation des avancées technologies seront très différents entre régions développées et régions en développement. Nul doute que le paysage énergétique mondial restera très contrasté.

D'une part dans les pays développés, la population continuera à avoir accès à l'énergie dans de bonnes conditions. Les efforts des consommateurs vers la sobriété énergétique, la réduction des émissions de gaz à effet de serre encouragée par un prix significatif du carbone et les avancées technologiques conduiront à une utilisation moindre des combustibles fossiles au profit des énergies renouvelables et dans une certaine mesure de l'énergie nucléaire.

Même le secteur du transport, gros consommateur d'énergies fossiles, sera profondément transformé par la combinaison des deux technologies innovantes que sont le véhicule électrique et la transformation digitale. L'arrivée sur les marchés d'ici cinq ans des véhicules autonomes et plus tard le développement massif du véhicule électrique permettront de diminuer les émissions de gaz à effet de serre. Plus généralement, l'augmentation de la connectivité dans ces pays, avec notamment l'évolution vers la généralisation du travail à domicile, permettra de limiter les déplacements professionnels et donc la consommation d'énergie associée. L'adéquation production/consommation électrique sera réalisée de façon plus décentralisée avec un impact fort sur le modèle des *« utilities »*.

D'autre part les pays en développement, submergés par l'accroissement de leur population, auront été probablement le théâtre de tensions fortes, voire de guerres. Aujourd'hui, environ 1,3 milliard d'habitants n'ont pas accès à l'électricité

qui est pourtant une ressource considérée comme essentielle. En 2050, la généralisation de l'accès à l'électricité et de façon plus générale à l'énergie dépendra :

- de la stabilité politique de ces pays, de l'amélioration de leur gouvernance et des choix d'allocation de ressources en faveur des infrastructures énergétiques ;
- de l'éducation des populations, notamment sur l'usage de l'énergie et de l'eau ;
- de l'efficience de l'aide apportée par les pays développés sous forme d'investissements financiers et/ou de transferts technologiques. Ces transferts de technologies ne seront utilisables que s'il existe localement des compétences techniques et industrielles adéquates.

En conclusion, la limitation de l'augmentation de la température globale de notre planète à 2 degrés Celsius[3] et de ses effets sur le changement climatique dépendront moins de la situation dans les pays développés que de la maîtrise des pays en développement de leur démographie et de leurs enjeux énergétiques.

L'aide des pays développés est indispensable afin que ces pays puissent mettre en œuvre des politiques de limitation de leur consommation d'énergie et de leurs émissions de gaz à effet de serre.

3. Comme acté dans l'accord de Paris en 2015.

La vision de…

Myriam Maestroni

Fondatrice et présidente de la société Économie d'Énergie
Présidente de la Fondation e5t

Il est toujours difficile d'imaginer le monde dans lequel nous serons amenés – pour ne pas dire condamnés – à vivre dans une trentaine d'années. L'exercice est d'autant plus périlleux que bon nombre de scénarios conçus par les auteurs de science-fiction les plus imaginatifs de la fin du siècle dernier semblent être devenus réalité, ou en passe de le devenir, pour le meilleur, certes, mais aussi pour le pire… C'est cette analogie qui me vient à l'esprit en étant amenée à réfléchir sur la question de l'énergie à l'horizon 2050.

Il a fallu moins de dix ans pour passer d'une situation du changement climatique presque totalement inconnue du grand public – jusqu'à ce qu'en 2005, Al Gore ne s'attelle à en décrire consciencieusement l'ampleur, vulgarisant ainsi des données scientifiques, sous le titre d'*Une vérité qui dérange*, et contribuant de la sorte à créer une prise de conscience brutale et planétaire – à une situation d'urgence absolue.

La création de l'Univers aurait démarré il y plus de 14,5 milliards d'années. Cela a pris 10 milliards d'années pour qu'apparaisse notre planète Terre, vieille de 4,5 milliards d'années. La vie humaine est quant à elle apparue il y a environ 200 000 ans, et il nous aura fallu moins de 300 ans pour menacer les conditions qui la rendent possible. Nous disposons désormais de moins de 30 ans pour redresser la barre…

Dans ce contexte, céder à la tentation de projeter une réalité qui relèverait d'une dystopie est forte… d'autant que mon imaginaire d'enfant reste marqué par un monde terrifiant oscillant entre la violence d'un *Mad Max* – dans lequel les grandes nations luttent pour le pétrole devenu denrée rare – et un *Meilleur des mondes*, dans lequel seule une élite, la caste des Alpha Plus, saurait comment agir et imposerait ses vues au reste d'une société composée de sous-êtres inaptes. Je n'ai malheureusement pas grand mal à transposer ce paradigme fictif dans un remix de « meilleur des mondes de l'énergie. »

Pour essayer d'approcher au mieux ce que pourrait être notre futur, il me paraît important de revenir sur quelques aspects de l'histoire. L'ancien monde de l'énergie tel que nous le connaissions jusqu'à la fin du XX^{e} siècle, était construit dans une logique *« top-down »* avec un seul but : celui de veiller à la sécurité et éventuellement à la diversité des approvisionnements. Pendant des années, au début de ma carrière que je débutais dans le pétrole, on m'apprenait que le XX^{e} siècle était le siècle du pétrole et que le XXI^{e} serait celui du gaz.

Il a fallu bien peu de temps pour faire voler en éclats ce genre de certitudes qui paraissent d'ailleurs, avec le recul, bien simplistes. Une toute petite décennie, de 2000 à 2010, aura suffi pour commencer à comprendre que nous étions rentrés dans le « nouveau » monde de l'énergie. Un monde dans lequel il allait falloir évoluer plus vite que prévu, et dans lequel il appartiendrait désormais aux énergéticiens traditionnels de mener la mission en apparence la plus contre-intuitive que l'on puisse imaginer, à savoir aider leurs clients à consommer moins. Et cela, bien sûr, tout en imaginant de nouvelles approches pour continuer à rendre possible le progrès du monde toujours plus que largement dépendant de l'énergie, sans que l'humanité finisse par provoquer sa propre destruction dans un monde saturé de CO_2.

Ces nouvelles approches, qu'elles soient à peine émergentes (telles la capture du CO_2 ou le stockage de l'électricité sous de multiples formes), déjà opérationnelles et industrialisées (production d'électricité à partir de sources renouvelables maîtrisées telles que l'hydraulique, le solaire ou l'éolien), ou en phase de le devenir (tel le vecteur hydrogène), viennent nourrir mon cerveau droit, spécialiste du traitement de l'information holistique. C'est sans doute parce que je n'ai jamais vraiment cru à la solution miracle mais plutôt à la mise en œuvre de tout ce qui pouvait contribuer directement ou indirectement, massivement ou marginalement à la création du monde post-carbone.

Luc de Brabandere, spécialiste en créativité au Boston Consulting Group, explique[1] qu'une *« pensée linéaire et rationnelle marche bien dans un monde certain, dans lequel nous pouvons planifier notre avenir ; mais dans un monde incertain, complexe et en mouvement comme le nôtre, c'est fini. Ce qui fait la différence, désormais, c'est l'audace de s'ouvrir à la nouveauté, à l'imagination, à la capacité à sortir du cadre de ses compétences, avant d'y retourner et d'y appliquer raisonnablement ses nouvelles idées… »* C'est sans doute forte de ces convictions profondes[2] que je n'ai jamais vraiment pu ou voulu croire que lucidité pouvait s'accorder avec pessimisme ou défaitisme[3].

J'aime à imaginer le monde dans lequel nous vivrons dans à peine plus de trente ans comme un monde dans lequel nous nous réjouissons collectivement d'avoir su relever l'un des plus grands défis auquel l'humanité ait été confrontée dans son histoire : celui de limiter le réchauffement climatique.

---

1. *Pensée magique, pensée logique*, Éditions du Pommier, 2008.

2. Ces convictions m'ont conduite à publier en 2018 mes travaux sur l'intelligence émotionnelle, créatrice de valeur à partir des intangibles.

3. C'est sans doute également ce même parti pris qui m'a souvent incité à

Bien sûr on a entre-temps dû, tant bien que mal, s'adapter malgré tout aux conséquences de ce réchauffement. Mais nous nous employons à mettre au point et à développer des technologies (aujourd'hui encore embryonnaires) qui permettent de restaurer des conditions de vie durables sur notre Terre, toujours aussi belle malgré les sévices climatiques qu'elle a subies et qui en ont modifié certains contours.

Ce monde de l'énergie post-carbone a pris un bon coup de «*smart*» en utilisant des technologies de plus en plus sophistiquées et consolidées par l'intelligence artificielle pour gérer l'ensemble des questions liées à la production et à l'utilisation rationnelle de l'énergie. C'est une partie du scénario. Il ne pourra devenir réalité que si on s'attache à bien prendre en compte la complexité de l'ensemble des enjeux au niveau international, tant sur le plan technique que – et surtout – sur le plan de notre responsabilité individuelle et collective.

Ainsi, en 2050, on a déjà d'abord pratiquement éliminé le gaspillage énergétique. Des millions de logements qui surconsommaient ont été rénovés, car cet acte est devenu aussi naturel que celui qui nous a tous conduit un jour ou

prendre des décisions improbables comme, et pour n'en citer une seule, celle qui me conduisit, dès 2011, après 20 ans passés dans le secteur du pétrole et du gaz, à aller visiter l'autre côté du miroir en créant - à partir de zéro - la société Économie d'Énergie qui se lançait dans l'incroyable aventure de penser le monde de l'énergie à partir de l'usager, promu client et, dans la foulée, «consomm'acteur». Ce dernier allait enfin acquérir le pouvoir d'exercer son libre arbitre pour déterminer en meilleure connaissance de cause ses choix énergétiques. Étrange coïncidence : ce pouvoir est arrivé concomitamment à la responsabilité de cogérer le devenir de notre planète aux côtés de l'ensemble des autres parties prenantes (gouvernements, élus, entreprises, ONG, etc.). Cette inflexion dans ma trajectoire personnelle m'a sans doute permis de mobiliser toute la confiance et la foi dans la sagesse et dans l'intelligence humaine pour parvenir à construire des comportements et des stratégies résilientes de nature à mieux répondre aux circonstances et perspectives les plus préoccupantes. Lorsque celle-ci vient se conjuguer aux talents d'innovation, de créativité et d'entreprise, et, quand elle s'additionne, de surcroît, avec une mobilisation sans précédent, le pire n'est plus certain du tout.

l'autre, dans le monde d'avant, à changer – pour des raisons d'abord esthétiques – nos cuisines et nos salles de bain. Il en est de même de l'ensemble des bâtiments tertiaires et industriels dont bon nombre ont été entièrement reconstruits en appliquant les normes et les technologies les plus sobres en matière de consommation d'énergie.

En 2050, tous les Terriens ont appris à devenir des « éco-consomm'acteurs » et ils sont tous formés et sensibilisés à la sobriété énergétique, assistés par des technologies et des intelligences artificielles qui les aident à mieux gérer ce sujet au même titre que l'argent dont on dispose dans ce qu'autrefois on appelait nos comptes en banque.

En 2050, les énergéticiens traditionnels les plus agiles ont réussi à se réinventer et utilisent toute une panoplie de nouvelles technologies qui continuent à permettre l'évolution du monde sans que cela se fasse au détriment des conditions de la vie. Les plus réticents et négligents ont disparu, asphyxiés par le manque de financements qui se sont depuis longtemps déjà réorientés vers l'économie décarbonée (ça a d'ailleurs commencé dès 2018), d'une part, et totalement délaissés par des clients mieux informés, plus conscients et extrêmement exigeants sur l'ensemble des aspects de la proposition de valeur à garantir.

De nouveaux acteurs totalement inconnus dans l'ancien monde de l'énergie se sont durablement implantés avec des solutions complètement intégrées de la production vers le consomm'acteur-producteur et inversement. En 2050, les grands équilibres géopolitiques construits autour des enjeux liés au pétrole et au gaz se sont réétalonnés. Le pouvoir a changé de camp et s'établit autour des nations et communautés désormais devenues indépendantes sur le plan énergétique grâce à l'exploitation rationnelle des énergies

renouvelables et locales, dans une économie sans doute de plus en plus électrifiée.

Les zones encore en retard sur cette logique bénéficient de la production d'énergie renouvelable transportée et stockée sous des formes innovantes. Les fonds débloqués pour aider les pays qui ont depuis peu généralisé l'accès à l'énergie sont ciblés et suivis – installation par installation – avec un contrôle des performances devenu possible grâce à la généralisation des technologies les plus en pointe, avec un partage global des expériences locales.

En 2050, on se déplace avec des véhicules propres dont le plus ancien est sorti des lignes de fabrication en 2035, ceci en privilégiant des déplacements groupés et solidaires. Enfin, on a appris à capturer une partie du carbone de l'atmosphère et à le réutiliser sous des formes durables et plus du tout nocives pour l'atmosphère. Il a d'ailleurs, enfin, acquis une vraie valeur marchande qui permet d'accélérer la phase de récupération et de recommencer à envisager, peut-être pour le siècle d'après, notre planète encore parfois si belle réconciliée avec les principes de la vie humaine.

La vision de…

Nadia Maïzi

Professeure, directrice du Centre
de mathématiques appliquées de Mines ParisTech
Cotitulaire de la Chaire Modélisation prospective
au service du développement durable (MPDD)

2050. Dans 32 ans. À l'échelle d'une vie humaine c'est encore loin, nos enfants auront l'âge que nous avons aujourd'hui. À l'échelle des infrastructures, c'est déjà là, car ce qui conditionne le monde dans lequel nous serons est bien plus engagé que ce que l'on croit. Or, c'est bien ce que sera le monde de 2050 qui définira les énergies qui le serviront. Et 2050 se façonne aujourd'hui.

Ainsi, lorsque l'on bâtit le viaduc de Millau, on plébiscite le principe des transports automobile et routier pour les prochaines décennies. De même, si battre le record de la tour la plus haute du monde, initié avec le Flatiron Building à New York en 1902, reste un moteur en 2018 à travers les continents, c'est que l'on postule que ces formes urbaines hyperconcentrées sont un modèle à pérenniser. Or, un de leurs corollaires est une extravagante consommation d'électricité, comme le démontre par exemple la dernière championne, Burj Khalifa, inaugurée en 2010 à Dubaï : la consommation électrique estimée de ce building est équivalente à celle d'une ville de 20 000 habitants.

Si certains souhaitent tempérer cette tendance à la démesure, comme cette agence d'architecture suédoise qui imagine des gratte-ciels en bois à consommation modérée, l'emballement général semble peu préoccupé des solutions sobres en énergie,

que ce soit dans les étapes de construction, d'opération, ou encore en anticipation du démantèlement de ces immeubles. Ainsi, un peu partout sur la planète, on assiste au développement de villes nouvelles, où les grands buildings assortis de leur inefficacité énergétique prolifèrent. L'on voit également discutés des projets résidentiels, comme celui envisagé en mai 2017 par la mairie de Moscou, visant la destruction de petits immeubles d'habitat localisés en ville, pour déplacer 1,6 million de Moscovites vers de grands ensembles périphériques où qualités sociales et environnementales sont des préoccupations de second plan.

Au pronostic partagé de concentration des populations dans les villes à l'horizon 2050, s'ajoute donc l'incertitude sur les formes d'habitat et les modes de transport. Plus largement, ce qui est posé ici, c'est la question des modes de vie, et au-delà, des comportements, qui seront au cœur des futurs enjeux énergétiques, témoins que les orientations sociales et leurs conséquences environnementales sont indissociables.

Ce constat a d'ailleurs primé lors des derniers débats sur le changement climatique, où le principe fondamental de conciliation entre développement et *mitigation* des émissions de gaz à effet de serre a été adopté. Il traduit la volonté de réconcilier les aspirations de pays aux situations très disparates : d'une part, ceux qui ont atteint un niveau de développement jugé comme adéquat ou raisonnable, et pour lesquels la question environnementale est devenue prioritaire ; d'autre part, ceux dont la priorité est de permettre l'accès au développement de leurs populations, et qui, bien que conscients de l'urgence climatique, ne souhaitent pas que la lutte contre les changements climatiques puisse l'empêcher.

Cette analyse indiscutable contraste cependant avec la transposition observée de ce même principe dans l'équation énergétique 2050, qui se révèle largement contre-intuitive.

Pour s'en convaincre, interrogeons-nous sur ce que nous dit de la saturation de notre modèle de développement l'ouverture d'une station de ski artificielle au Lesotho, ou la mode, lancée en 2016 en Savoie, de la livraison de tonnes de neige par hélicoptère.

En écho, les stratégies adoptées pour soutenir le développement questionnent. Ainsi, la Chine, après avoir adopté un rythme frénétique de construction de centrales à charbon dans les années 2000, engendrant des pollutions majeures et de très fortes tensions sur la ressource en eau, affiche aujourd'hui une surcapacité de production qui la contraint à inverser la dynamique de son programme de déploiement.

De ce que nous dit 2018, infrastructures, comportements, modes de consommation, et plus largement modes de vie et d'organisation sociale semblent engagés, pour les prochaines décennies, dans le prolongement de ce que nous connaissons et dans une conscience indifférente de la question climatique.

Aussi, le mix énergétique qui devra continuer à servir des besoins dont la nature n'aura pas changé et dont l'intensité aura été amplifiée, n'a aucune raison d'évoluer significativement. Les engagements climatiques n'étant pas coercitifs, il paraît probable que le principal moteur de renouvellement de ce mix, notamment pour les énergies fossiles, viendra des tensions sur les ressources et dépendra de l'évolution des infrastructures de réseaux.

Plus décentralisés, les réseaux favoriseront la production dispersée. Dans ce cas, les renouvelables se déploieront sans doute avec de belles réussites, mais pour des besoins en énergie peu concentrés, c'est-à-dire pour des économies qui seront moins productivistes. Plus centralisés, ces mêmes réseaux permettront de servir les usages les plus intensifs. Dans cette option, le nucléaire sera certainement prolongé, car

les moyens ne sont pas mis en œuvre, ni en ce qui concerne les investissements considérables que nécessiterait son démantèlement, ni pour opérer une bifurcation radicale vers d'autres ressources qui s'y substitueraient.

Quant aux besoins en carburants liquides, tant que nous n'observerons pas ce mouvement mondial de refus de passer le permis de conduire, dont certains voyaient des prémices lors de la COP20 (loin d'être confirmées par la suite), leur demande croîtra et la polémique s'amplifiera autour de la compétition entre alimentation et agro-énergies.

De ce que nous dit 2018… Mais le futur pourrait éclairer d'autres options, si une prise de conscience nous conduisait à remettre en question radicalement, collectivement et mondialement, nos modes de vie, à définir nos aspirations pour élaborer une autre destinée car *« si, comme les individus, les sociétés sont fréquemment déçues, c'est qu'on leur offre ce qu'elles demandent et non ce qu'elles désirent véritablement, sans savoir l'exprimer de façon adéquate »* (Gaston Berger).

La vision de…

Claude Mandil

Ancien directeur exécutif de l'Agence internationale de l'énergie (2003–2007)

Un grand esprit dont j'ai oublié le nom a dit un jour : *« Si vous faites des prévisions, que ce soit à un horizon au moins égal à votre espérance de vie, augmentée de cinq ans par sécurité. »* La décennie 2050 devant voir mon cent-dixième anniversaire, je ne risque rien !

Nous avons trois grands domaines de quasi-certitude :

1. L'accroissement de la population mondial restera massif, même s'il promet d'être moins spectaculaire que celui des trente-cinq dernières années : sans doute neuf milliards d'habitants en 2050, deux de plus qu'aujourd'hui, avec en particulier une explosion en Afrique.

2. Les ressources en énergie fossile ne vont pas manquer, contrairement à ce que certains craignaient il y a quelques années. C'est la conséquence des récentes découvertes d'hydrocarbures non conventionnels mais aussi de l'inflexion de la courbe de demande, sous l'effet des politiques d'efficacité énergétique et de développement des énergies renouvelables.

3. Le climat change de façon beaucoup plus rapide et plus perturbante que prévu. La lutte contre les émissions de gaz à effet de serre est non seulement un impératif, mais aussi une urgence. Je supposerai donc ici que les politiques nécessaires seront mises en œuvre sans faiblesse et sans

délai. S'il en allait autrement, le monde se dirigerait vers un bouleversement qui rendrait vain tout exercice de prospective énergétique.

Ce postulat – les décisions prises à Paris lors de la COP 21 seront mises en œuvre et suivies rapidement par d'autres plus ambitieuses – détermine la situation énergétique mondiale en 2050. En bref, les émissions mondiales de dioxyde de carbone et d'autres gaz à effet de serre devront être très fortement réduites. Mais il nous faut maintenant citer les principales incertitudes de nature technologique.

1. Le stockage massif et bon marché de l'électricité, y compris sur une période annuelle, sera-t-il une réalité commerciale ? Si oui, on peut prévoir que l'électricité sera devenue l'énergie secondaire (c'est-à-dire après transformation) dominante, y compris dans des usages où elle est aujourd'hui peu développée, comme le transport ou le chauffage des bâtiments résidentiels (la France est une exception dans ce domaine). En effet, l'électricité peut toujours être produite sans émission de CO_2 : renouvelables, nucléaire, fossiles avec capture et piégeage du carbone (CCS), mais l'offre comme la demande d'électricité seront de plus en plus variables et le stockage permet d'éviter des investissements de surcapacité ruineux en production et transport d'électricité.

2. Si les savants et les ingénieurs échouent à livrer un produit de stockage compétitif, sûr et « nomade » (c'est-à-dire que l'on puisse embarquer dans un véhicule), les usages répartis comme le transport et le chauffage resteront majoritairement le domaine des hydrocarbures. Est-ce à dire qu'il faut faire son deuil de la protection du climat ? Je ne le pense pas mais les réponses deviennent plus compliquées et surtout plus diverses :

- généralisation de l'hybridation des véhicules pour aller vers un véhicule « 2 litres/100 km » ;
- généralisation de l'hybridation dans les bâtiments (électricité quand elle est disponible et peu chère, gaz le reste du temps) et des réseaux de chaleur avec CCS ;
- développement des biocarburants dans les transports ;
- généralisation de la CCS, qui sera de toute façon indispensable pour les émissions industrielles (ciment, acier, agroalimentaire, chimie) et qui permettra des émissions « négatives » (en capturant du CO_2 produit à partir de biomasse) ;
- peut-être l'utilisation de l'hydrogène dans des utilisations fixes, sans doute à partir de gaz avec CCS plus que par électrolyse.

Quelques invariants : tout d'abord nous ne ferons pas l'économie d'un changement profond des comportements, ce qui ne veut pas dire que nous serons moins heureux. De toute façon, la croissance démographique en Afrique rend impossible le maintien dans le monde de consommations par tête de type nord-américain. Ensuite, nous ne pourrons pas continuer à ignorer les coûts comme nous le faisons aujourd'hui. Les solutions retenues devront être les moins coûteuses pour le même objectif.

S'il faut se dépêcher de réduire les émissions de gaz à effet de serre, il ne faut pas se ruer sur les solutions sans avenir. La vraie urgence, c'est de donner un coût important aux émissions, afin de les pénaliser. On peut espérer qu'en 2050, un prix élevé du carbone sera une banalité dans le monde.

La vision de…

Tatsuo Masuda

Président de FairCourt Capital
Professeur invité de la Nagoya University of
Commerce and Business Graduate School

Bienvenue dans le monde de 2050 ! Le système énergétique a parcouru un long chemin en matière d'électrification, et ce dans tous les secteurs, sauf dans le transport aérien. L'application de l'accord de Paris (COP21) a donné naissance à un environnement totalement différent, favorisant un développement technologique orienté vers la « décarbonation ». Ce qui était inimaginable est devenu une réalité en 2050. Par exemple, une nouvelle technologie solaire a rendu les panneaux photovoltaïques en silicium obsolètes alors qu'ils dominaient le marché des nouvelles capacités de production d'électricité dans les années 2010 et 2020.

Le monde ne parlait pas forcément d'une seule voix à propos du changement climatique, les climato-sceptiques et les négationnistes conservaient alors une certaine influence. Néanmoins, à mesure que la « compatibilité environnementale » s'est immiscée dans les codes des affaires, les initiatives climatiques sont devenues une « nécessité économique » menant à un processus accéléré.

Les progrès des technologies de stockage de l'électricité, autrefois terriblement lents, ont été fulgurants au cours des années 2020, rendant ce stockage de l'électricité efficace et abordable. Les métaux précieux, comme le lithium utilisé pour les batteries haute performance, ont été remplacés par des matériaux plus abondants.

Ces progrès ont permis une combinaison flexible entre des systèmes énergétiques centralisés et décentralisés afin de s'adapter à de nombreux besoins. Un pays en développement n'a ainsi plus besoin de reposer uniquement sur un réseau de transport d'électricité haute tension coûteux et étendu. La « pauvreté énergétique » a été éradiquée, même en Afrique bien que lentement, grâce à la diffusion de systèmes énergétiques décentralisés dont le coût a considérablement baissé grâce au développement et à l'application généralisée de la technologie.

L'« inconstance » perpétuelle de la nature humaine, le principal obstacle à l'utilisation efficace et optimale de l'énergie, a progressivement été surmontée par l'application généralisée de l'intelligence artificielle à différents niveaux : à la maison, au bureau, en ville et à plus grande échelle.

L'ère des combustibles fossiles touche à sa fin en 2050 : l'utilisation de ces combustibles est de plus en plus limitée à de grandes installations de production électrique et à l'approvisionnement en chaleur dans certains endroits. Les perspectives du nucléaire continuent de s'amenuiser sous la pression sociale et politique. Reflet de cette nouvelle réalité énergétique, la chanson suivante, composée sur la mélodie du thème principal de Walt Disney *« It's a Small World »*, est devenue très populaire en 2050.

A Song for Energy Future

1. *It will be the source of joy*
   Safety will be the norm
   To make the people and earth happy
   And there's no geopolitics.
2. *Energy poverty will be history*
   La la la, La la la, La la la, La la la
   Universal access to everyone
   This is our future.

La vision de…

Gérard Mestrallet

Président du conseil d'administration d'Engie
Ancien président-directeur général de Suez
(2001–2008) et d'Engie (2008–2016)

Le monde connaît de nos jours des bouleversements, des évolutions profondes et rapides, entraînant des répercussions sur la plupart des secteurs économiques. Ces mouvements aujourd'hui à l'œuvre font partie de tendances majeures qui vont s'accélérer dans les 30 prochaines années et qui, combinées entre elles, vont transformer le monde à une vitesse sans précédent, avec :

- de fortes évolutions démographiques, associant notamment un vieillissement de la population et une urbanisation croissante ;
- des bouleversements technologiques : le développement rapide de l'internet des objets combiné au *big data* et demain à l'intelligence artificielle ouvrent des perspectives d'évolution radicale sur la manière d'offrir des services individuels au grand public : ceux-ci seront demain intégrés et imaginés dès la conception des objets et ils seront évolutifs ;
- ces évolutions technologiques rapides changeront également la façon dont se construiront les bâtiments et dont se consommera l'énergie ;
- une importance grandissante des régions, des villes vis-à-vis des États avec une décentralisation des centres de

décisions combinée à un accès aux nouvelles technologies au maillage local ;

- enfin, la prise de conscience croissante des effets du changement climatique et des impacts importants en termes de santé publique des émissions de polluants viendra renforcer l'urgente nécessité de développer massivement les énergies renouvelables, la sobriété énergétique et la décentralisation des modes de production.

Le monde dans lequel nous vivrons se devra donc d'être plus décarboné, digitalisé et décentralisé.

L'impact de ces ruptures sera particulièrement fort dans le secteur de l'énergie. Dans ce contexte d'exigence climatique renforcée, de décentralisation accrue, de diminution des coûts, d'automatisation, de développement rapide du *big data*, de l'internet des objets, comment peut évoluer la stratégie des énergéticiens à horizon 2050 et particulièrement celle d'Engie ?

Engie a su s'adapter et à l'ambition de devenir le leader de la transition énergétique dans le monde et sa stratégie de développement repose sur trois piliers fondamentaux :

- la production électrique bas carbone, centralisée et décentralisée, à partir d'hydroélectricité, de renouvelables ou de gaz. Un secteur dans lequel notre groupe excelle ;
- les infrastructures globales et le GNL, pour lesquels nous avons un savoir-faire incomparable et qui traduit notre volonté de poursuivre le développement du gaz naturel ;
- les solutions clients BtoB, BtoC, BtoT, que nous continuons de développer en Europe et à l'international en nous appuyant sur des innovations digitales et des services associés.

De manière générale, et en conclusion, je tiens à souligner deux éléments importants qui façonneront le paysage énergétique à l'horizon 2050 :

- premièrement, les prévisions du Congrès mondial de l'énergie comme celles de l'AIE qui donnent en croissance le gaz, gazeux ou liquéfié, dans les 30 à 40 prochaines années, quel que soit le scénario. Le gaz va se verdir de plus en plus et occupera une place forte dans le mix énergétique, aux côtés des renouvelables. Autrement dit, le gaz n'est pas une énergie de transition mais un allié durable de la transition énergétique mondiale ;
- deuxièmement, l'innovation et le digital constituent un moteur indispensable pour appréhender les changements de paradigmes du monde énergétique de demain. Mais ne perdons pas de vue la finalité de tout cela, la raison d'être des évolutions stratégiques et des changements qu'elles entraîneront : le client final.

Les énergéticiens comme Engie devront toujours avoir à cœur d'apporter un service fiable, responsable et continu, et ce, au plus grand nombre à travers la planète car l'autre défi de taille auquel nous devons faire face se résume en un chiffre : 2 milliards de personnes ne disposent pas aujourd'hui d'une énergie suffisante…

La vision de…

Dominique Mockly

Président-directeur général de Teréga (anciennement TIGF)

Il y a 30 ans se mettait en place la dynamique coordonnée de réponse au réchauffement climatique. Cette dynamique globale, s'appuyant sur les travaux du GIEC, a conduit aux accords de Kyoto, puis de Paris. Ces 30 années de persévérance pour une approche commune ont ancré le climat dans l'esprit de (presque) tous.

Sur le plan technologique, cette dynamique a donné naissance à de nouveaux systèmes et permis leur diffusion (centrales solaires, éoliennes, hydroliennes, centrales biomasse, piles à combustible, etc.) mais sans vraie révolution. Les comportements de consommation ont toutefois changé. Ceux-ci ont entre autres été marqués par une plus grande sensibilité aux risques liés aux systèmes énergétiques, en particulier suite aux accidents de Tchernobyl et de Fukushima et au sujet des risques sanitaires liés à la pollution de l'air. Le « principe de précaution » est devenu le moteur et le frein potentiel d'une révolution énergétique technologique.

Ces dynamiques sociétales n'ont aucune raison de s'infléchir. Elles traduisent la transition d'une société de production de masse vers une société plus équilibrée, plus protectrice et qui envisage le futur à l'aune du développement « durable ». Elles vont faire également émerger, c'est une certitude, des modes de vie plus économes en énergie, en nourriture et globalement en ressources, en responsabilisant l'individu sur son comportement à l'échelle locale.

Ce mouvement local est essentiel à l'optimisation de nos besoins énergétiques croissants. Car les défis à relever à l'échelle de la planète sont nombreux : hausse des températures, augmentation de la population, concentration urbaine, etc. L'adaptation de notre société à ces évolutions reposera en grande partie sur l'énergie et ses usages : besoins croissants pour la désalinisation d'eau de mer, pour le recyclage des déchets, pour la transformation des composés carbonés et leur recyclage ou stockage, pour la mobilité « propre » ou « plus propre », pour la gestion des connexions et des données, etc.

À titre d'illustration, le cerveau, dont la capacité de calcul est de quelques pétaoctets et dont la consommation avoisine 20 watts, absorbe 20 % de l'énergie produite par le corps humain alors qu'il compte pour seulement 2 % de son poids. Reconnaissons que la demande énergétique liée à l'intelligence collective et à ses systèmes d'information augmentera de façon significative d'ici 2050 et que, là aussi, l'efficacité énergétique reposera sur la frugalité des composants, voire leur autonomie.

En outre, la montée du niveau de vie moyen des êtres humains, tout comme la robotisation, entraînera de fait une demande d'énergie nouvelle, mais stable le jour et la nuit, et d'autant plus grande que la région sera productive et sous stress calorique et hydrique. Face à de tels défis, toutes les sources décarbonées et à faible impact carbone (voire « décarbonables ») seront nécessaires, sans idéologie et avec réalisme, dans un mix énergétique et une organisation adaptés à la géographie/démographie/économie de chaque zone.

Dans ce contexte, les trente ans à venir seront des années d'optimisation plus que de ruptures. Si ruptures il doit y avoir, elles viendront de la micro-consommation, du recyclage, du traitement du CO_2 et des usages. Les technologies seront au service de l'optimisation des infrastructures énergétiques

pour une diminution des risques systémiques et une meilleure complémentarité, mais aussi de l'intelligence entre l'offre et la demande, ainsi que de la gestion de l'autonomie sans oublier les capacités de recyclage et de stockage.

Les principales révolutions viendront comme toujours des produits à usage des masses. Si pari technologique il doit y avoir, il viendra très certainement de l'infiniment petit pour gagner en autonomie et en frugalité. Tout cela s'appuiera sur une recherche technologique et mathématique pointue en optimisation des systèmes, en efficacité énergétique, en maîtrise à l'échelle nanométrique de l'énergie moléculaire et ondulatoire, en exploitation du fonctionnement atomique et chimique des molécules.

Enfin, sous l'impulsion de politiques publiques incitatives (taxe carbone, taxe particules, etc.), la gestion et la réduction des émissions polluantes et des nuisances sociétales seront par ailleurs une stimulation de l'ingénierie innovante et créatrice.

Tout cela se traduira par une rénovation des infrastructures reposant sur :

- des réseaux locaux, car les bâtiments économes en énergie, voire les quartiers des « villes connectées » ou des « villages autonomes », disposeront de leurs propres sources d' « énergie de services », notamment pour la gestion des éclairages mais aussi pour la climatisation et pour les dispositifs intégrés de recyclage et d'arrosage. Déchargés du besoin de fournir l'énergie localement, les systèmes énergétiques produiront de l'énergie dans une organisation semi-décentralisée. Ils assureront à l'échelle régionale la production d' « énergie productive » pour les besoins des transports propres régionaux, voire multirégionaux, des divers traitements de l'eau et de la production des biens et services ;

- des infrastructures interconnectées et « positives », car la place sera comptée et les énergies devront être les premières à démontrer leur impact positif pour la planète : émissions de CO_2 limitées mais également empreinte au sol maîtrisée, réduction des déchets, réutilisation des sites anciens et remise aux normes, compensations des nuisances, etc. Le tout accompagné d'une diminution relative de la taille des infrastructures de production pour plus d'acceptabilité et une meilleure intégration dans les dispositifs multimodaux ;

- une intelligence systémique et des multi-connexions entre réseaux et types d'énergies. Intelligence qui permettra d'optimiser les consommations et d'assurer un stockage intelligent, de type *Power to Gas*, ou la concentration des émissions de CO_2. Intelligence au service de la fluidité de l'énergie grâce à ses divers modes de transport mais également maillage intelligent des grands types de réseaux, pour éviter leur multiplicité et mieux prendre en compte les diverses sources de production et de stockage ;

- des transports entre robotisation et liberté. Les transports seront l'exemple le plus flagrant de cette mutation hybride qui entraînera des révolutions industrielles et des changements importants de comportement : transports maritimes au GNL avec recyclage des émissions de CO_2, avions électriques, à réacteurs au méthanol, transports urbains mixtes (électriques/gaz/hydrogène), voitures individuelles régulées en ville et sur les grandes artères (voitures autonomes), etc.

Vision sans rupture ne veut pas dire sans évolution, vision sans rupture ne veut pas dire défaut de vision. Le mix énergétique optimisé dont il est question ici générera croissance et bien être sous la forme d'une meilleure « urbanisation de la planète »

(urbanisation énergétique, de transport, d'information et de flux humains).

C'est également ce mix énergétique qui facilitera l'apport important d'énergie dans les zones qui en ont le plus besoin tout en préservant notre planète. Fini le charbon pour l'électricité et le chauffage, fini le pétrole dans les transports et le chauffage, des gaz et de l'électricité sous toutes leurs formes avec recyclage et stockage du CO_2 avec, pour le nucléaire, une décroissance de la taille des centrales et une flotte symbiotique facilitant le traitement des déchets. Les énergies renouvelables viendront répondre aux enjeux locaux et les gaz aux besoins généraux.

La vision de…

Marie-José Nadeau

Présidente honoraire du Conseil mondial de l'énergie

Réunis au congrès triennal du Conseil mondial de l'énergie (CME) à Istanbul en octobre 2016, les leaders du secteur de l'énergie ont tous témoigné de l'importance des bouleversements auxquels l'industrie est confrontée. Pour nous aider à comprendre les phénomènes qui prévalent et leurs impacts sur le secteur, le CME a publié fin 2016 un rapport sur les scénarios énergétiques mondiaux[1]. Ce rapport explore trois scénarios possibles à l'horizon 2060 et fournit aux experts un cadre de réflexion utile.

Les analyses du CME sont projetées sur une période suffisamment longue pour comparer les changements structurels qui se profilent à l'horizon aux réponses de l'industrie aux défis des trente-cinq dernières années. Les trois scénarios reposent sur une trajectoire commune appelée « Grande Transition ». Cette « Grande Transition » est caractérisée par la convergence d'un développement technologique accéléré, d'une révolution digitale irréversible, de défis environnementaux globaux et de mouvements démographiques marqués par une forte urbanisation et une croissance de la population mondiale plus faible qu'au cours des dernières années.

Plus précisément, voici quelques-uns des sillons qui tracent la route vers 2050/2060 :

- une croissance de la population mondiale de 1 % par an, contre 1,4 % par an lors des cinquante dernières années ;

1. *World Energy Scenarios 2016*, World Energy Council.

- l'évolution technologique, malgré tous ses bienfaits, s'accompagne d'un paradoxe : alors que le taux de productivité a cru de 1,4 % par an entre 1970 et 2015, la transformation digitale, les objets connectés, l'automatisation, le *big data*, le stockage d'énergie, les véhicules autonomes, la robotisation sont autant de développements qui contribuent à la diminution du taux d'employabilité et à l'augmentation des politiques protectionnistes dans plusieurs pays ;
- les forces économiques bougent : d'ici une vingtaine d'années, la Chine deviendra la première puissance économique mondiale et d'ici 2030, l'Inde sera le pays le plus peuplé au monde. Le reste de l'Asie n'échappera pas à cette forte croissance ;
- les réponses aux défis environnementaux et enjeux de santé publique, aux changements climatiques et à l'engagement de limiter sous les 2°C l'augmentation de la température d'ici à la fin du siècle sont autant de facteurs qui conditionnent la demande énergétique globale et le mix énergétique.

Déjà cette transformation énergétique bouleverse nos façons de produire et de consommer l'énergie et elle provoque une révision en profondeur des modèles d'affaires et des fondements de nos économies. Nous serons témoins d'une accélération de ces changements dans les prochaines années.

Les scénarios du CME peuvent être résumés ainsi :

- le scénario « Jazz moderne » représente un monde marqué par une digitalisation et une innovation technologique accélérées et des choix politiques qui privilégient une économie de libre marché avec de faibles coûts d'approvisionnement ;

- le scénario « Symphonie inachevée » décrit un monde où règnent une concertation internationale et une harmonisation des engagements nationaux pour un monde bas carbone et des choix économiques et politiques énergétiques compatibles avec un développement durable ;
- par opposition, le scénario « Hard Rock » explore les conséquences d'un monde où on observe une montée des populismes, le rejet des accords internationaux et l'adoption de politiques nationales protectionnistes assorties d'exigences de « contenu local » qui donnent lieu à des choix de développement peu compatibles avec la protection de l'environnement et la lutte contre les changements climatiques.

Quelles leçons peut-on tirer de ces travaux ?

1. La croissance de la demande énergétique globale, qui a doublé depuis 1970, est appelée à se ralentir d'ici 2060 et la consommation énergétique *per capita* plafonne à 1,9 tep/an d'ici 2030, principalement en raison de l'apport sans précédent des nouvelles technologies et d'une meilleure efficacité énergétique. Ainsi la demande énergétique globale augmente de seulement 10 % dans le scénario « Symphonie inachevée », de 25 % dans « Jazz moderne » et de 34 % dans « Hard Rock ».
2. La demande globale d'électricité double d'ici 2060, provoquée par une urbanisation croissante, l'augmentation de la classe moyenne et des habitudes de consommation axées sur les nouvelles technologies. Ainsi l'électricité atteint 29 % du mix énergétique dans « Symphonie inachevée », 28 % dans « Jazz moderne » et 25 % dans « Hard Rock ».
3. La croissance phénoménale des énergies éolienne et solaire se poursuit à un rythme sans précédent, comportant à la

fois des avantages environnementaux mais aussi des défis d'intégration. D'importantes diminutions de coûts sont observées dans les trois scénarios mais elles sont beaucoup plus fortes dans « Jazz moderne » et « Symphonie inachevée », allant au-delà de 70 % à l'horizon 2060.

4. La contribution de l'énergie produite à partir du charbon plafonne d'ici 2020 dans « Jazz moderne » et « Symphonie inachevée » et d'ici 2040 dans « Hard Rock », principalement en raison des contextes énergétiques spécifiques à la Chine et à l'Inde. La production de pétrole plafonne à 103 Mb/j dans « Jazz moderne » et à 94 Mb/j dans « Symphonie inachevée » d'ici 2030 et à 104 Mb/j entre 2040 et 2050 dans « Hard Rock ».

5. La contribution du gaz naturel au mix énergétique augmente dans tous les scénarios : plus de gaz naturel liquéfié (GNL) dans « Jazz moderne », plus de gaz non conventionnel en Amérique du Nord, puis en Argentine, en Chine et en Australie dans le scénario « Hard Rock ». La part du gaz croît aussi dans « Symphonie inachevée » mais plus lentement, principalement en raison des restrictions sur les émissions de gaz à effet de serre (GES).

6. Pour limiter à 2°C l'augmentation de la température, il faudra beaucoup de détermination de la part de tous les acteurs pour aller bien au-delà des engagements nationaux déjà communiqués à Paris et appliquer une série de mesures de réduction des émissions de GES contraignantes et soutenues.

Les leaders du secteur énergétique font face à plusieurs années de transformation et à de multiples défis pour réussir à maintenir la fiabilité des systèmes tout en déployant les changements requis dans de courts laps de temps. Ils doivent réévaluer allocations de capital et stratégies d'investissements,

cibler les régions à forte croissance (en Asie, au Moyen-Orient et en Afrique subsaharienne), y redéployer le capital libéré et adapter les modèles d'affaires au nouveau contexte, miser sur les technologies bas carbone tout en répondant aux attentes des clients qui souhaitent une plus grande autonomie pour gérer leur consommation.

Les décisions prises dans les dix prochaines années seront déterminantes pour un équilibre optimal entre les trois piliers du trilemme énergétique que sont la sécurité énergétique, l'accès à l'énergie à un coût raisonnable et le respect de l'environnement. Les scénarios documentés par le CME fournissent des informations indispensables aux gouvernements pour décider des politiques énergétiques et aux chefs d'entreprises pour préciser leurs plans stratégiques et d'investissements.

La vision de…

Association négaWatt

Association française à but non lucratif

Entre émergence des nouvelles énergies renouvelables et résistance des énergies fossiles, dynamique de lutte contre le changement climatique et croissance économique et démographique, mondialisation des échanges et tensions exacerbées par les inégalités, la trajectoire de l'énergie dans le monde à l'horizon 2050 est loin d'être clairement tracée.

Cette question est pourtant cruciale : l'avenir énergétique du monde dit aussi celui de nos sociétés. Depuis la nuit des temps, l'accès à l'énergie a façonné les grandes étapes de l'humanité. Aujourd'hui comme hier, notre organisation économique, sociale, et dans une certaine mesure politique repose sur des choix techniques et industriels de mobilisation de différentes ressources énergétiques. Le système énergétique moderne, caractérisé notamment par la fourniture abondante d'électricité grâce à de grosses centrales thermiques et par l'utilisation massive du pétrole pour les déplacements automobiles, est au cœur de nos modes de vie. Mais son développement sous sa forme actuelle et sa généralisation à toute la planète nous conduisent à une impasse. Le réserver comme cela a été le cas jusqu'ici à une partie seulement de la population mondiale est tout aussi insoutenable.

Ainsi, la suite s'annonce catastrophique. Mais elle peut aussi être belle. L'espoir repose sur un point essentiel, symbolisé par le formidable essor de l'éolien et du photovoltaïque : le progrès technique acquis grâce aux énergies fossiles nous

permet désormais d'utiliser les énergies renouvelables avec la même efficacité. Il nous reste, et ce chantier est immense, à avoir la sagesse de faire fructifier cet héritage pour refermer la parenthèse des fossiles. Et à le faire au plus vite.

Il faut pour cela deux choses. La première est de développer aussi rapidement que possible les énergies renouvelables. Ce mouvement n'est pas immédiat, mais il est lancé : en 2015, pour la première fois, grâce à la progression globale des énergies renouvelables et avec un complément mineur du nucléaire, la production d'énergies « décarbonées » a davantage progressé que la production à base d'énergies fossiles. Et le potentiel de développement est énorme, sur toute la surface du globe. La seconde est de faire en sorte que ce développement vienne le plus possible en substitution des énergies dominantes, et le moins possible en addition. Ce qui implique de maîtriser les consommations d'énergie, selon des approches bien sûr différentes selon les situations du Nord au Sud, tout en faisant évoluer le système pour l'adapter à ces nouvelles formes de production et pour exploiter toute la diversité de ces ressources renouvelables.

La transition vers les 100 % d'énergies renouvelables est possible, à condition de mettre l'intelligence nécessaire dans le système pour opérer cette transformation. Il s'agit d'une part de l'intelligence collective dans la priorité du long terme sur les choix à court terme, et dans notre intérêt commun à agir plutôt que dans des replis égoïstes. Et d'autre part de l'intelligence dans nos modes de consommation, autour du bon usage de l'énergie pour rendre de véritables services énergétiques, et du recours aux solutions les plus efficientes pour fournir ces services.

Au Nord, l'application systématique, dans tous les secteurs, de cette démarche de sobriété sur les usages et d'efficacité sur les modes techniques permet, à l'horizon 2050, de réduire

fortement notre consommation d'énergie, sans renoncer à un confort moderne, mais en organisant différemment notre mode de vie. Rénovation massive des bâtiments, réorganisation du territoire, réorientation soutenable de la production industrielle figurent parmi les grands chantiers de cette transformation. Parallèlement, la mobilisation de toutes les ressources renouvelables permet de s'approcher de 100 % des besoins, tout en réduisant bien sûr les émissions de gaz à effet de serre à hauteur des impératifs climatiques.

L'effort sur la demande est particulièrement important dans le secteur du bâtiment, et plus encore dans celui des transports où une diversité de solutions doit être envisagée. Le tout-voiture doit disparaître bien avant 2050, laissant la place à un urbanisme plus apaisé et davantage créateur de liens. Côté motorisation, la solution unique et universelle n'existe pas : électricité, biométhane, agrocarburants de seconde génération devront être combinés en fonction des potentiels locaux. Une attention particulière doit être portée à la mobilisation de la biomasse pour l'énergie. Elle est indispensable mais doit bien sûr se faire dans une limite qui respecte la fonction primordiale de l'alimentation, autorise le recours nécessaire à la biomasse pour les matériaux et préserve, voire renforce le rôle de puits de carbone de la végétation.

Partout, les potentiels d'efficacité doivent être pleinement exploités, à tous les niveaux des chaînes de transformation de l'énergie, pour réduire les besoins d'énergie à niveau équivalent de services énergétiques. Mais là où l'énergie est consommée sans entrave, l'utilité de ces services doit aussi être questionnée.

La sobriété est incontournable pour ramener la consommation d'énergie à un niveau conforme aux impératifs climatiques au Nord. Mais ce signal important de rupture avec l'hyperconsumérisme est également essentiel pour que les

pays émergents aujourd'hui, et d'autres qui suivront demain, s'inscrivent dans un développement plus soutenable. Dans un monde énergétique contraint, l'élimination de consommations inutiles au Nord s'inscrit enfin dans une solidarité avec la satisfaction de besoins énergétiques vitaux dans les régions les plus défavorisées, clé de leur développement économique et culturel. Et dans ces zones où des milliards d'habitants sont encore privés d'accès à l'électricité ou à la cuisson moderne, les énergies renouvelables offrent de nouvelles solutions.

Ce programme global dessine une société mondiale où le développement s'appuie, au niveau local, sur la meilleure exploitation des potentiels d'organisation et des ressources locales pour un développement plus harmonieux de chaque territoire. Les relations internationales n'y sont plus dominées par la prédation des ressources, mais par la synergie des stratégies et par la mutualisation des solutions. L'économie n'est plus dirigée par une logique de croissance des biens toujours plus inégalitaire, mais de performance des services pour tous. L'énergie n'est plus l'affaire d'un nombre toujours plus réduit de grands groupes industriels et financiers mais celle de citoyens, de collectivités, de petites entreprises acteurs de leur consommation et de la production.

La bonne nouvelle est que cette transition vers un monde énergétiquement plus sobre, plus juste et plus solidaire est possible avec les moyens actuels. La mauvaise est que les forces qui s'opposent à ce monde d'intelligence énergétique peuvent l'emporter, avec des conséquences dramatiques. À chacun de nous de faire sa part : notre avenir énergétique se décide aujourd'hui.

La vision de…

Christian Ngô

Physicien, fondateur d'Edmonium Conseil
Ancien directeur scientifique auprès
du haut-commissaire à l'énergie atomique

Sans énergie, il n'y a ni vie, ni développement économique. Tous les pays, quel que soit leur développement, doivent pouvoir accéder à des sources d'énergie abondantes et peu chères. Compte tenu du temps nécessaire pour mettre en œuvre une innovation de rupture, il y a peu de chance que les sources d'énergie disponibles en 2050 soient différentes de celles d'aujourd'hui, si ce n'est par leur importance respective.

Au niveau énergétique, l'économie des sociétés modernes repose pour l'essentiel sur les combustibles fossiles que sont le pétrole, le charbon et le gaz naturel. Ils représentent aujourd'hui environ 80 % de l'énergie primaire[1] consommée. Ces ressources sont en quantité finie, donc épuisables, et émettent en brûlant du dioxyde de carbone (CO_2) qui augmente l'effet de serre. Pour anticiper ce que sera le paysage énergétique en 2050, remarquons qu'il était proche de celui d'aujourd'hui une quarantaine d'années plus tôt.

En 1973, les combustibles fossiles représentaient 86,7 % de l'énergie primaire consommée et cette proportion n'est tombée qu'à 81,1 % en 2014 malgré tous les efforts faits pour réduire cette dépendance. Cette dernière a augmenté, en valeur absolue, de 5,3 Gtep[2] à 11,1 Gtep durant cette

1. L'énergie est dite « primaire » si elle n'a subi aucune transformation (exemple : pétrole brut, minerai d'uranium, etc.).

2. 1 Gtep = 1 milliard de tonnes équivalent pétrole.

période. En 2050, les combustibles fossiles occuperont encore une place importante dans le mix énergétique.

La France est pour sa part confrontée à un défi énergétique qui comprend 3 volets :

1. réduire les émissions de CO_2 ;
2. réduire progressivement la dépendance vis-à-vis des combustibles fossiles (dont les combustibles fossiles non conventionnels) ;
3. réduire le déficit commercial[3] dont l'essentiel vient des importations de combustibles fossiles.

La réponse à ce défi énergétique est d'utiliser de plus en plus des énergies décarbonées (nucléaire et énergies renouvelables) pour réduire la dépendance vis-à-vis des combustibles fossiles. Le mix énergétique dépendra du contexte économique, politique et technologique. Il n'y a pas de source unique d'énergie et aucune d'entre elles n'est à éliminer *a priori*.

Les économies d'énergie et la sobriété sont indispensables tout en améliorant le niveau de vie. L'industrie fait constamment des progrès car cela concourt à une meilleure rentabilité. En revanche, les consommateurs sont encore loin d'avoir épuisé toutes les mines d'économie. Par exemple, l'utilisation massive de pompes à chaleur exploitant des sources de chaleur à basse température permettra de chauffer ou de climatiser des locaux tout en consommant beaucoup moins d'énergie.

On va avoir de plus en plus besoin d'électricité. En plus de l'augmentation normale de la demande électrique observée depuis des décennies, de nouveaux besoins apparaissent

3. En 2011, le déficit commercial de la France était de 69,6 milliards d'euros dont 61,4 milliards d'euros liés à l'importation de combustibles fossiles. Le déficit varie avec le prix du baril de pétrole mais ce prix a de fortes chances d'être élevé en 2050.

comme un développement massif de pompes à chaleur et de véhicules hybrides rechargeables ou électriques. Tous les kWh ne sont pas égaux. Certains peuvent être produits à la demande, d'autres sont intermittents. C'est le cas de l'éolien ou du photovoltaïque. Il faut compenser cette intermittence pour qu'à chaque instant la demande électrique soit égale à la production. Ceci nécessite d'utiliser conjointement et en proportion variable :

- des centrales thermiques (à gaz naturel ou au charbon) pour produire de l'électricité lorsqu'il n'y a pas de vent ou de soleil et qu'il faut satisfaire la demande. L'inconvénient majeur est l'émission de CO_2 et d'autres polluants ;
- des moyens de stockage de l'électricité qui doivent être de grande capacité dans le cas d'installations centralisées ;
- un réseau intelligent pour gérer de façon optimale l'offre et la demande.

Deux usages principaux nécessitent des efforts et des progrès : les transports et l'habitat.

Pour les transports individuels, les véhicules hybrides rechargeables et électriques vont prendre de plus en plus d'importance. Les véhicules hybrides rechargeables sont particulièrement intéressants car ils peuvent convenir, avec leur batterie et leur moteur électrique, aux déplacements quotidiens de la plupart des personnes s'ils ont une autonomie électrique de 50 à 60 km. Contrairement aux véhicules électriques, ils peuvent par ailleurs également couvrir de grandes distances grâce à leur moteur thermique. De plus, la batterie vaut moins cher que celle d'un véhicule électrique puisque l'autonomie est plus faible.

L'autre intérêt des véhicules hybrides rechargeables et électriques est qu'ils peuvent constituer un stockage distribué

de l'électricité. On peut surdimensionner la production électrique en ne produisant de l'électricité qu'avec des énergies décarbonées et utiliser les batteries des véhicules pour stocker l'électricité lorsque celle-ci est excédentaire pour les autres besoins.

L'habitat est une source d'économie d'énergie considérable. Le neuf sera peu consommateur d'énergie mais les gains les plus importants viendront de la rénovation des logements anciens. En effet, il faut environ un siècle pour renouveler le parc immobilier avec du neuf alors qu'il existe par exemple en France environ trente millions de logements anciens où l'on peut, avec quelques transformations, réduire fortement la consommation énergétique.

Les combustibles fossiles sont en quantité finie mais il en est de même des métaux nécessaires à la réalisation des systèmes énergétiques. Dans le futur, on devra gérer la raréfaction de certains d'entre eux. Pour quelques-uns, cela peut se produire d'ici 2050. On constate aussi que les nouvelles technologies de l'énergie sont peu vertueuses pour économiser des ressources minérales qui vont devenir de plus en plus rares.

L'énergie en 2050 sera donc plus une évolution qu'une révolution.

La vision de…

Pierre Papon

Spécialiste de la physique des états de la matière
Ancien directeur général du CNRS
et ancien PDG de l'Ifremer

L'énergie confronte la planète à trois défis redoutables : assurer un accès à l'énergie aux habitants des pays les plus pauvres, limiter le réchauffement climatique et diminuer l'exploitation des énergies carbonées non renouvelables. L'accès des pays pauvres à une énergie moderne (un milliard trois cent millions d'habitants de la planète n'ont pas accès à l'électricité) est un objectif du programme de l'ONU pour le développement durable. Quant à l'utilisation massive des énergies fossiles (plus de 80 % de l'énergie primaire aujourd'hui), elle est le principal facteur du réchauffement climatique.

Les réserves exploitables d'hydrocarbures, de charbon et d'uranium ne nous exposent certes pas à des risques de pénuries avant la fin du siècle, mais le problème se poserait pour des métaux « critiques » (des terres rares et le lithium) si les énergies renouvelables (le solaire et l'éolien) montaient rapidement en puissance.

Une transition énergétique s'impose pour répondre à ces défis : sortir avant la fin du siècle des énergies carbonées en leur trouvant des substituts afin de diminuer drastiquement nos émissions de gaz carbonique. C'est l'objectif fixé par l'accord de Paris, en 2015 lors de la COP21, afin de *« limiter la hausse de la température moyenne de l'atmosphère terrestre nettement en-dessous de 2 °C »*. Pour l'atteindre nous pouvons agir sur quatre « variables clés » : l'efficacité énergétique pour

économiser l'énergie, l'urbanisation, la science et la technique afin de préparer des ruptures et l'innovation sociale afin de faire évoluer nos modes de vie et le travail.

La transition énergétique ne sera pas un long fleuve tranquille car elle se heurtera à des obstacles géopolitiques, les palinodies américaines actuelles en sont un exemple, et technico-économiques. L'horizon 2030 sera sans doute une étape importante dans la mesure où les nouvelles filières renouvelables de production d'électricité auront atteint, voire dépassé, le cap de leur rentabilité économique (hors subventions) : c'est très probable pour l'éolien terrestre et offshore à l'échelle mondiale, ainsi que pour le solaire photovoltaïque et à concentration dans les pays à fort ensoleillement, la question restant ouverte pour des pays comme la France (une alternative aux cellules solaires au silicium à rendement élevé restant encore au stade du laboratoire). L'intermittence de ces filières demeurera un sérieux obstacle à leur utilisation qui requiert un stockage de l'électricité. L'augmentation des performances techniques et économiques du stockage électrochimique avec des batteries est un verrou à faire sauter qui conditionne le développement des véhicules électriques.

Une prospective à l'horizon 2050 permet de faire une hypothèse : en l'absence de crise géopolitique mondiale jamais exclue, la planète sera, vraisemblablement, engagée dans une stratégie de sortie du carbone. Le déclin du charbon serait fortement amorcé et, avec le gaz et le pétrole, les énergies fossiles ne représenteraient plus que 45 à 50 % de l'énergie primaire mondiale. L'autre moitié du mix serait constitué par les énergies renouvelables, assurant la moitié de la production électrique (l'hydroélectricité et l'éolien en tête devant le solaire), la bioénergie (bois et biocarburants) et le nucléaire. La filière nucléaire à l'uranium contribuerait à 15–20 % de la production mondiale d'électricité, celle

des surgénérateurs au plutonium en serait encore au stade des prototypes, tandis que plusieurs pays testeraient des réacteurs au thorium.

Dans le bilan des paris gagnés pourraient figurer des cellules solaires avec un rendement supérieur à celui du silicium (25 % au maximum en 2016), des batteries utilisant des alternatives au couple lithium-ion, des procédés génétiques pour la production de biocarburants se substituant partiellement à l'essence et au kérosène. Parmi les déceptions figureraient la percée trop lente du captage et du stockage souterrain du CO_2 (handicapé par ses coûts), l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique, reconnue comme une impasse technico-économique, et la fusion thermonucléaire qui, faute d'avoir fait ses preuves, resterait le « Saint Graal » de l'énergie… L'énergie marine et la géothermie seraient des filières de niche.

Dans la plupart des pays développés, la production d'électricité serait assurée par un trio : grandes entreprises nationales (sur le modèle d'EDF), entreprises locales (des coopératives) utilisant les filières éolienne et solaire, particuliers produisant une électricité partiellement autoconsommée. Des innovations dans l'organisation des villes (écoquartiers, nouveaux modes de transport publics à motorisation électrique) et du travail (utilisation des automatismes, télétravail, nouveaux métiers dans les filières énergétiques) permettraient d'économiser l'énergie.

En 2050, le centre de gravité de la géopolitique mondiale de l'énergie se sera déplacé de l'Occident vers l'Asie. En 1990, près de 60 % de la demande mondiale d'énergie primaire émanait des pays de l'OCDE, celle des pays asiatiques (hors Japon) et du Moyen-Orient n'en représentait que 20 %. La situation s'inverserait d'ici 2050 : les pays de l'OCDE consommeraient environ 30 % de l'énergie mondiale et les

pays asiatiques la moitié, les pays hors-OCDE produisant les deux-tiers de l'électricité mondiale. La Chine et l'Inde seront probablement les fers de lance de la transition vers une énergie à bas carbone et vers les véhicules électriques.

S'agissant des pays en développement, notamment ceux de l'Afrique subsaharienne, il est peu probable qu'ils parviennent à pallier leur handicap énergétique d'ici 2050, faute d'investissements, d'une maîtrise de leur urbanisation et de leur croissance démographique. La disette énergétique, conjuguée dans certaines régions (le Sahel notamment) à l'impact du réchauffement climatique, amplifierait des mouvements migratoires déstabilisants provoquant des tensions internationales.

La transition énergétique n'atteindra ses objectifs qu'au prix d'importants investissements dans la recherche et l'innovation afin de faire sauter les verrous techniques et préparer des ruptures techniques. Elle suppose une politique volontariste pour les villes du futur et, en France, une nouvelle répartition des rôles de l'État et des collectivités territoriales en matière d'énergie. Une nouvelle donne énergétique mondiale ne s'imposera qu'à travers des coopérations multilatérales, corrigeant les iniquités dans l'accès à l'énergie (l'action de l'Agence internationale de l'énergie atomique s'avérant indispensable dans le nucléaire).

Un accord international sur la taxation des émissions de CO_2 catalyserait la sortie des énergies carbonées et financerait des transferts de technologie. Faute d'une taxe unique, des accords régionaux se mettraient en place d'ici 2050. Quant à l'Europe, il reste à espérer qu'elle sera enfin parvenue à s'engager dans une politique énergétique commune afin de mutualiser des infrastructures, monter des programmes de recherche, développer des énergies nouvelles, et peser dans les négociations internationales.

« Il faut donner du temps au temps » faisait dire Cervantès à Sancho Panza dans Don Quichotte, cette affirmation s'applique à la transition énergétique dans la mesure où celle-ci sera une entreprise de longue haleine qui impose de réhabiliter le long terme ainsi qu'une bonne dose de volontarisme politique pour faire des choix.

La vision de…

Jacques Percebois

Professeur émérite à l'Université Montpellier I
Directeur scientifique de la Chaire Économie
du Climat (Paris-Dauphine)

En 2050, la « transition énergétique » est terminée et l'on pense déjà à la suivante. Les énergies fossiles représentent encore près des deux tiers du bilan énergétique primaire mondial : 26 % pour le gaz naturel, 20 % pour le charbon et 20 % pour le pétrole. Le charbon a disparu du bilan énergétique européen mais son usage subsiste pour la production d'électricité en Chine, en Inde, aux États-Unis et dans pas mal d'autres pays, en Asie en particulier.

Le recours au vecteur électrique est partout très développé et la part des renouvelables dans le bilan électrique mondial dépasse 33 % (hydraulique, solaire, éolien et biomasse), un chiffre sensiblement supérieur au poids du gaz naturel (25 %). La part du nucléaire s'est stabilisée à 20 % grâce aux SMR (*Small Modular Reactors*) ; le reste de l'électricité est produit avec du charbon, en partie du *clean coal* (22 %). Dans l'Union européenne, le nucléaire a récupéré des parts de marché (30 %), suite à la sortie provisoire de certains pays, et ce sont les renouvelables et le gaz naturel qui assurent le solde de la production d'électricité (40 % pour les renouvelables et 30 % pour le gaz). Mais les situations demeurent très contrastées selon les pays.

En France, c'est la dualité qui caractérise le monde de l'énergie en 2050 : dualité dans la façon de produire, de distribuer et de consommer l'énergie, dualité dans la façon dont cette

énergie est rémunérée, dualité dans le comportement des agents face à la gestion de l'énergie.

La place des énergies fossiles s'est considérablement réduite : on n'utilise plus de charbon, la place du pétrole importé s'est effondrée (moins d'un quart du bilan énergétique) et seul le gaz naturel résiste encore (25 % environ). Le poids de l'électricité s'est considérablement accru et cette électricité est produite pour deux tiers par des moyens centralisés (centrales nucléaires, hydrauliques, fermes solaires, éoliennes offshore et centrales à gaz) et pour un tiers de façon totalement décentralisée (biomasse, éolien et photovoltaïque). Il faut dire que le développement des moyens de stockage via des batteries performantes a favorisé cette promotion de l'auto-production, donc de l'autoconsommation (photovoltaïque pour l'essentiel). L'architecture des réseaux s'en est d'ailleurs trouvée fortement modifiée avec l'émergence de mini-réseaux à la maille locale.

L'électricité est indispensable pour faire fonctionner tous les objets « connectés », ce qui explique que sa part dans le bilan énergétique final ait augmenté (40 % contre 26 % en 2016). Mais tous les consommateurs ne sont pas connectés et il y a une fracture entre catégories sociales.

La part des véhicules électriques a bondi depuis que des progrès spectaculaires ont été faits dans les batteries. On trouve maintenant des véhicules totalement autonomes mais la réglementation en vigueur les a limités à des déplacements en ville. Certes, il existe des véhicules fonctionnant au gaz naturel mais leur place reste modeste et ce sont principalement des véhicules utilitaires. Les véhicules fonctionnant aux produits pétroliers sont de moins en moins nombreux, bien que de gros progrès aient été faits au niveau des émissions de gaz à effet de serre.

Mais c'est dans l'habitat que le rôle de l'électricité s'est affirmé : la domotique permet de gérer à distance toutes les fonctions des appareils utilisateurs (chauffage, sécurité, programmation optimale des équipements en fonction du prix observé sur le marché de l'électricité, etc.).

Le transport est devenu largement durable : interdiction des véhicules à essence en ville, développement des tramways, mobylettes et vélos électriques et bien évidemment véhicules électriques en libre-service. Pour le transport des marchandises, on utilise de plus en plus le train et les cours d'eau ainsi que les véhicules fonctionnant au gaz naturel. De gros efforts ont été faits dans le transport aérien pour réduire les émissions de CO_2.

Le prix de l'électricité varie fortement selon la source et l'usage ; la tarification se fait « en temps réel » et on trouve des contrats à la puissance (on paie pour une puissance garantie que l'on utilise comme on veut, avec toutefois des restrictions aux heures de pointe). Le consommateur paie plus cher pour un approvisionnement garanti (électricité transportée sur le réseau interconnecté et choisie en priorité par les professionnels) et moins cher pour l'électricité produite localement mais dont la garantie d'approvisionnement est moins forte (micro et mini-réseaux). Là encore, on constate une fracture entre catégories de consommateurs : ceux qui veulent une énergie garantie et qui paient pour cela, et les autres.

Le parc électrique français est assez diversifié ; la part du nucléaire est tombée à 50 % (mais cela représente 2/3 de l'électricité injectée sur le réseau interconnecté) et il s'agit de nouveaux réacteurs (EPR de faibles dimensions et surgénérateurs suite au succès du programme Astrid ; tous les réacteurs à eau pressurisée de 2^{e} génération ont maintenant

été fermés). La part de l'électricité décentralisée (autoproduction et production locale injectée sur les micro-réseaux) est forte (⅓ de la production totale d'électricité).

Les prix de l'électricité sont maintenant « dépéréqués », ce qui revient à dire que l'on paie moins cher une électricité produite localement et que le client a intérêt à se rapprocher des lieux de production. Toutes les énergies fossiles sont fortement taxées (taxe carbone de 200 euros de 2016 par tonne de CO_2). Cette dépéréquation spatiale des tarifs a accentué la fracture sociale. Les consommateurs isolés, ceux des zones rurales ou montagnardes, qui n'ont pas pu opter pour l'autoproduction du moins, paient leur électricité à un prix relativement élevé du fait des coûts de réseaux supportés par de moins en moins de clients ; il en va de même pour les ménages les plus modestes qui continuent à habiter dans des immeubles mal isolés et qui sont exclus de l'autoproduction. C'est aussi la conséquence de la priorité donnée à l'autonomie régionale car la dotation en potentiel énergétique est très variable d'une partie du territoire à l'autre et les coûts d'accès à l'énergie sont de fait fort différents.

La vision de…

Christian de Perthuis

Professeur d'économie à l'Université Paris-Dauphine
Fondateur de la Chaire Économie du Climat

Pour l'économiste du climat, 2050, c'est demain. Le climat que connaîtront les habitants de la planète dans un peu moins de 35 ans sera largement déterminé par le stock des gaz à effet de serre que nous avons déjà rejetés dans l'atmosphère. Si des inflexions majeures sont apportées d'ici 2050 en matière de transitions énergétiques, elles affecteront peu le climat de 2050, mais modifieront drastiquement les conditions climatiques que connaîtront les générations suivantes. Ce n'est plus l'image de 2050 qu'il nous faut dès lors représenter, mais disons celles de 2085 ou 2120 pour conserver un pas de temps de 35 ans.

J'ai tenté de fournir trois images du système énergétique en 2050, en combinant trois variables : la quantité d'énergie consommée par un Terrien moyen, la part de cette énergie venant de chacune des sources fossiles et les émissions totales de CO_2 en résultant. Les résultats des calculs sont consignés dans le tableau en fin de texte, affublés d'une étiquette de couleur similaire à celles qui attestent de l'efficacité énergétique de nos équipements. Pour l'économiste du climat, ce sont les images de 2085 et 2120 associées à chacune de ces couleurs qui révèlent les implications de nos choix d'aujourd'hui.

Dans le scénario bleu, le Terrien moyen consomme autant d'énergie en 2050 qu'en 2015. La réduction des gaspillages dans les pays riches a fait baisser leurs consommations

unitaires, mais l'accès à l'énergie dans les pays moins avancés a progressé, en particulier grâce à la pénétration des réseaux décentralisés fournissant l'électricité. La part des fossiles a été ramenée à 50 % des sources primaires. La place du pétrole et du charbon a été drastiquement réduite, au profit des renouvelables et du gaz d'origine fossile. Le secteur des transports terrestres s'est affranchi de son addiction au pétrole. Les émissions mondiales de CO_2 d'origine énergétique ont diminué de près de 30 %.

Le monde en bleu est celui où nous conduit le « politiquement correct » résultant de l'application de l'accord de Paris, somme d'engagements volontaires sans contraintes ou incitations suffisantes. En 2085, la température moyenne associée à l'étiquette bleue se situe dans le bas de la fourchette 2°C à 4°C. Le cumul des émissions de CO_2 entre 2015 et 2050 a provoqué un dépassement de l'ordre de 35 % du « budget carbone » mondial, le seuil à partir duquel un réchauffement supérieur à 2°C devient très probable[1]. En 2085, la débâcle des glaces du Groenland est bien avancée. La montée du niveau de la mer vient d'atteindre 0,75 mètre. Les migrations internes se multiplient depuis les zones côtières les plus vulnérables. Manhattan achève sa digue de protection d'un mètre cinquante pour sauvegarder ses actifs et sa population.

1. Il s'agit du cumul mondial des émissions anthropiques de CO_2 d'origines énergétique et industrielle que l'humanité peut émettre pour réduire à 1/3 la probabilité de dépasser un réchauffement moyen de 2°C. Calculé dans le 5e rapport d'évaluation du GIEC, ce budget carbone global est actualisé chaque année dans le cadre du Global Carbon Project. De la dernière version de ce projet, on peut retenir trois grandeurs simples : le budget carbone mondial donnant deux chances sur trois de limiter le réchauffement à 2°C s'élève à 2 900 gigatonnes de CO_2. Près de 2 100 gigatonnes ont déjà été envoyées dans l'atmosphère jusqu'en 2015. En 2015, il reste donc 22 années pour épuiser ce budget, à niveau d'émissions inchangé (les émissions totales de CO_2 prises en considération sont de l'ordre de 36 Mt, elles dépassent celles de notre tableau qui ne comprend pas les émissions liées aux process industriels : ciment à titre principal).

À l'horizon 2120, son combat semble incertain, car rien ne permet d'affirmer que les 4°C ne seront pas atteints.

L'étiquette rouge indique la catastrophe annoncée, celle que nous éviterons si nous nous persuadons qu'elle va se produire pour paraphraser la fameuse thèse de Jean-Pierre Dupuy[2]. Le scénario rouge s'inscrit dans la parfaite continuité des évolutions tendancielles. Le Terrien moyen continue d'augmenter sa consommation d'énergie, malgré la lenteur des progrès de l'accès à l'énergie des plus pauvres : 1,5 milliard de personnes restent privées d'électricité en 2050. Le recul des sources carbonées est lent, du fait de la résistance du charbon et surtout de l'envolée des usages du gaz d'origine fossile dont on a vanté le rôle d'énergie de transition, en oubliant qu'il émettait aussi du CO_2 ! Les émissions sont de fait clairement dans le rouge : elles ont augmenté d'un quart depuis 2015.

Dans le scénario rouge, le monde a épuisé son « budget carbone » en moins de vingt ans entre 2015 et 2050. En 2085, le réchauffement se situe déjà dans le haut de la fourchette 2°C à 4°C. Du fait de la fonte plus rapide qu'initialement anticipé des glaces continentales, la hausse du niveau de la mer avoisine 1,5 mètre. Les grandes zones de delta deviennent invivables, provoquant des conflits d'une grande violence, notamment en Asie du Sud. Manhattan a renoncé à protéger la partie basse de la ville, déjà désertée dans une grande panique par ses courtiers et ses banquiers d'affaires. L'image de 2120 est difficile à représenter. Les multiples désordres résultant du dérèglement climatique font chuter l'activité et avec elle, les émissions de gaz à effet de serre. Par ailleurs, les projets de géo-ingénierie sortent des laboratoires de recherche pour être lancés sans coordination, ni contrôle international.

2. *Pour un catastrophisme éclairé*, Jean-Pierre Dupuy, Seuil, 2004.

Comment anticiper, dans ce contexte, le nombre de décennies nécessaires pour endiguer le réchauffement ?

À l'opposé du rouge, l'étiquette verte, celle de l'accélération de la transition bas carbone. Le Terrien moyen ne consomme guère plus d'une tonne d'équivalent pétrole en 2050. Cette économie de la sobriété a été rendue possible par une redistribution majeure des ressources. Dans les pays riches, la consommation d'énergie a été divisée par plus de deux. L'accès à l'énergie des plus démunis a été dopé par la baisse cumulative des coûts du stockage et de la production d'électricité décarbonée, technologies dont les rythmes de diffusion ont rappelé ceux de la téléphonie mobile au début du siècle. Les utilisations énergétiques du pétrole ne sont plus qu'un sous-produit de ses usages chimiques qui n'ont pas tous trouvé de substituts. Le charbon et le gaz ont fait plus de résistance, avec des poches de compétitivité subsistant en dépit de la tarification du carbone qui a été généralisée. Les émissions de CO_2 ont été divisées par quatre relativement à 2015.

L'étiquette verte nous dirige vers un monde qui doit s'organiser en 2085 pour faire face à un réchauffement climatique de l'ordre de 2°C. Le cumul des émissions de 2015 à 2050 a en effet épuisé le budget carbone donnant deux chances sur trois de rester en dessous de 2°C. La gestion des impacts de ce réchauffement est plus complexe qu'attendu. Les réorganisations spatiales des activités se heurtent à de fortes résistances. Le coût des extrêmes climatiques a considérablement gonflé. Si le bas Manhattan n'est pas directement menacé par la montée des eaux, les bilans de ses compagnies d'assurance ont subi un véritable tsunami. Dans le monde « en vert » de 2085, on ne sait toujours pas s'il sera possible d'éviter de franchir la barrière des 2°C d'ici 2120. Il faudrait pour cela passer à des émissions nettes négatives. Or, la réduction

des émissions résiduelles de CO_2 est bien plus complexe et coûteuse que ne l'étaient celles opérées avant… 2050. Malgré l'incroyable mutation du paysage énergétique, le temps a aussi manqué dans le scénario vert pour mettre les Terriens à l'abri du risque climatique.

Bleu ? Rouge ? Vert ? Les conditions climatiques que connaîtront les Terriens à la fin du siècle dépendront de la vitesse des transitions énergétiques opérées d'ici 2050. Pour viser la bonne couleur, la transition bas carbone doit court-circuiter les cycles d'exploitation de la ressource fossile, pour s'opérer au rythme imposé par l'horloge climatique. Or, le temps n'est pas extensible. Un défi majeur de la transition bas carbone est le temps qui manque.

Trois images du système énergétique en 2050

	1973	2015	Scénarios 2050		
			Bleu	Rouge	Vert
Consommation d'énergie/habitant (en tep)					
	1,55	1,86	1,86	2,0	1,2
Part des énergies fossiles (en %)					
– Pétrole	46,2	31,7	10	20	2
– Charbon	24,5	28,1	10	25	8
– Gaz naturel	16	21,6	30	30	15
Émissions de CO_2 (en Gigatonnes)					
	14,5	32,3	23,3	40,6	7,9

(source : données de l'AIE, calculs de Christian de Perthuis)

La vision de…

Andris Piebalgs

Homme politique letton
Ancien commissaire européen en charge de l'énergie
(2004–2009), puis du développement (2010–2014)

Le 15 novembre 2004, je me tenais face au Parlement européen pour convaincre les eurodéputés de ma capacité à assumer les fonctions de commissaire européen à l'énergie. J'ai présenté mon projet avec six champs d'action permettant entre autres de renforcer la sécurité de l'approvisionnement européen en énergie et d'être moins sensible aux tensions géopolitiques mondiales nées de la demande croissante en énergie. J'étais déjà totalement convaincu que nous devions sortir de l'ère des combustibles fossiles et j'avais pour priorité absolue d'associer l'énergie à la protection de l'environnement et à la recherche. J'ai reçu le soutien des membres du Parlement européen et je crois que j'ai respecté mon projet mais cela a engendré des « évolutions ». Ce dont le monde a besoin aujourd'hui, c'est d'une réelle « révolution » énergétique.

Les engagements pris lors de l'accord de Paris afin de limiter le réchauffement global à 2°C impliquent que les émissions de gaz à effet de serre (GES) issues du secteur de l'énergie soient quasiment nulles à l'horizon 2050. Le rôle de l'électricité pour répondre à la hausse de la demande en énergie va augmenter de manière considérable, en partie grâce à la forte percée des véhicules électriques dans le secteur des transports. Nos modes de production, de distribution, de stockage et de commercialisation de l'électricité changent et les implications ne se limitent pas aux fournisseurs d'énergie. Les compagnies

faisant partie de cette industrie doivent clairement repenser leurs stratégies actuelles. Le système centralisé *top-down* évolue en un système beaucoup plus décentralisé et interactif. Cette souplesse est désormais également nécessaire au niveau de la demande. Les moteurs des secteurs de l'énergie seront la décarbonisation et la numérisation. Les systèmes énergétiques vont devenir plus intelligents et interactifs afin de répondre aux habitudes des clients qui changent rapidement.

La route vers une électricité décarbonée doit tenir compte du fait que plus d'un milliard de personnes n'ont pas accès à l'électricité aujourd'hui. Les Objectifs de développement durable adoptés par les Nations unies en septembre 2015 prévoient en particulier un accès universel à une électricité fiable et abordable. Cela représente un vrai défi en Afrique où seul un tiers de la population a actuellement accès à l'électricité. Les fournisseurs manquent d'argent et de nombreux ménages sont financièrement incapables de se connecter au réseau électrique.

Une étude de la Banque mondiale a par exemple démontré que les frais les plus bas pour avoir accès au réseau électrique en Éthiopie s'élèvent à 130 % du revenu mensuel moyen d'un ménage. Même si des améliorations au niveau de l'efficacité opérationnelle des fournisseurs, des changements au niveau des grille tarifaires et des aides aux ménages les plus défavorisés pourraient améliorer la situation actuelle, une aide importante est toujours nécessaire pour favoriser les investissements dans les énergies « propres » en Afrique. Et il ne faut pas oublier que plus de 60 % de la population est rurale. Cela signifie que l'accès universel à l'électricité est impossible par le biais de la seule expansion du réseau. Les systèmes décentralisés reposant sur l'utilisation de l'énergie solaire doivent être déployés à grande échelle. L'Afrique doit également bénéficier des avancées techniques dans le domaine

de l'efficacité énergétique. Le niveau de la consommation d'électricité nécessaire à la « subsistance » des populations est déjà en chute permanente.

Ces dernières années, les innovations dans le secteur des énergies renouvelables ont été impressionnantes. Néanmoins, des avancées technologiques sont encore nécessaires et ne peuvent être obtenues qu'à travers une recherche intense et en exploitant pleinement la capacité humaine à innover. Les avancées nécessaires dans le secteur de l'énergie sont similaires à celles qu'a supposé l'introduction de l'ordinateur personnel et d'Internet. L'objectif principal est de fournir une énergie suffisante et abordable pour tous afin de répondre à la demande actuelle et future sans émettre de gaz à effet de serre. Une production efficace et décentralisée, un stockage propre de l'énergie, des bâtiments « zéro émission », des appareils énergétiquement efficaces ainsi que le captage et le stockage du carbone, sont quelques-unes des réussites aujourd'hui prêtes à être appliquées.

Même si les investissements en chimie et en science des matériaux ont récemment augmenté, l'industrie de l'énergie n'alloue que 0,23 % environ de ses revenus à la recherche et au développement. En comparaison, l'industrie des télécommunications dépense environ 15 % de ses revenus à cette fin. En outre, le déploiement d'une nouvelle technologie énergétique a toujours été très lent, certains experts tablant sur un cycle de 20 ans. Les gouvernements nationaux pourraient faciliter les choses en augmentant les dépenses dans la recherche fondamentale sur l'énergie. Un grand nombre de ces gouvernements se sont d'ailleurs rassemblés au sein de l'initiative « Mission Innovation » à travers laquelle ils se sont engagés à doubler leur soutien à la recherche et au développement dans le secteur de l'énergie. Cependant, il est important que le secteur privé démontre aussi un engagement

actif afin de garantir la viabilité économique des nouvelles technologies. La meilleure manière d'y parvenir est de fixer un prix du carbone élevé. De même que les prix pétroliers élevés ont soutenu la « révolution des huiles de schiste », un prix du carbone élevé accélérerait fortement la décarbonisation de l'énergie et, potentiellement, d'autres secteurs. Le marché s'exécutera tant que les avantages seront au rendez-vous, avec un prix étant, dans la plupart des cas, probablement le principal moteur des nouveaux investissements.

Étant donné que le monde énergétique du futur reposera en grande partie sur l'électricité, deux autres problèmes sont à prendre en compte : la régulation et la participation active des consommateurs. La production d'électricité reposera dans la plupart des cas sur des sources d'énergie renouvelable et le recours au « gaz propre » et au stockage de l'électricité sera encore coûteux. La demande doit être flexible : la capacité d'activer et de désactiver des systèmes à la maison, dans l'industrie et dans le commerce est importante afin d'équilibrer les différences entre offre et demande d'électricité. Des matériaux et des logiciels intelligents seront nécessaires, tout comme des incitations innovantes des régulateurs des marchés de l'électricité.

Il existe toujours des doutes sur les postures de certains pays signataires de l'accord de Paris quant au changement climatique. Je peux comprendre ces inquiétudes mais l'application des politiques européennes sur l'énergie et le climat représente selon moi une grande source d'optimisme. Un profond changement doit s'opérer mais c'est une transformation qui sera synonyme d'épanouissement, qui créera de nouveaux emplois, qui accélérera le développement technologique et qui offrira des bénéfices importants aux investisseurs.

La vision de…

Pierre Prieux

Coprésident de la Fondation d'entreprise Alcen
pour la Connaissance des Énergies

Le mix énergétique mondial ne connaîtra probablement pas de révolution d'ici 2050, tant du fait de la lenteur de mise en œuvre de nouveaux moyens de production, que de la faible probabilité de ruptures technologiques bouleversantes à moyen terme. Les énergies renouvelables et nucléaires verront leur part de marché augmenter, les énergies fossiles resteront majoritaires avec une érosion relative de l'utilisation du charbon et une montée de celle du gaz.

En matière de technologies, les installations solaires photovoltaïques et thermodynamiques ainsi que les éoliennes bénéficieront de progrès graduels. Le stockage d'énergie, essentiel pour rendre possible le fort développement des énergies intermittentes, aura lui aussi bénéficié d'améliorations incrémentales. Les premières centrales nucléaires de génération IV utilisant comme combustible les déchets des générations précédentes commenceront à fonctionner à l'horizon 2050. Quelques nouvelles technologies utilisant la biologie de synthèse devraient être opérationnelles. Cette voie qui est celle de l'avenir devrait prendre le dessus à la fin du siècle sur les technologies de production d'énergie utilisant chimie, électronique, mécanique, optique et thermodynamique. D'ailleurs, le pétrole n'est-il pas lui-même un vecteur d'énergie biologique ?

La raison sous-jacente à cette prédiction est le rôle majeur des motivations économiques dans les décisions énergétiques.

Seule une catastrophe pourrait changer ce scénario. Par catastrophe, il est entendu un événement brusque causant pour des raisons énergétiques incontestables de très nombreux morts et susceptible de toucher les principales puissances économiques. Alors un consensus mondial pourrait s'imposer, valorisant la consommation de biens terrestres jusqu'alors considérés comme gratuits et débouchant par exemple sur une taxe carbone élevée et universelle.

En ce qui concerne les valeurs absolues des consommations énergétiques, trois facteurs principaux interviendront : la croissance démographique, l'augmentation moyenne du niveau de vie des populations et les progrès en efficience énergétique. Il semble probable que les deux premiers facteurs poussant à la hausse de la consommation énergétique ne seront pas compensés par les gains en efficience. Cependant, il faut noter que la croissance de la demande poussera à la hausse des prix qui motivera les efforts en efficience énergétique.

L'énergie finale consommée devrait s'orienter vers toujours plus d'électricité. C'est déjà une tendance forte qui est parfois étrange du point de vue environnemental, par exemple lorsque l'électricité utilisée est produite en brûlant du charbon. Le mouvement vers l'électricité est et sera une conséquence directe et indirecte de la digitalisation du monde, de la perception psychologique de ce qu'est la propreté mais aussi de la mise à disposition directe d'électricité par les moyens dits d'énergie renouvelable. L'hydrogène, produit de manière coûteuse, ne verra pas une utilisation massive. Il trouvera cependant des niches applicatives, étant un vecteur de stockage d'énergie efficient et portant une forte densité énergétique.

En conclusion, sans catastrophe telle que définie ci-dessus, la probabilité de respecter les objectifs de la COP21 (visant

à limiter à 2°C au maximum la hausse de la température terrestre moyenne d'ici la fin du siècle) apparaît comme malheureusement faible.

La vision de…

Bruno Rebelle

Directeur de l'agence de conseil
en développement durable Transitions
Ancien directeur exécutif de Greenpeace
France (1997–2003)

2050, si loin, si proche ! Si loin, car nous vivons dans un monde incertain, dans lequel il nous est particulièrement difficile de nous projeter au-delà de quelques mois… Si proche, car en 2050 mes petits-enfants, et les vôtres probablement, auront déjà entamé leurs vies professionnelles…

Si loin, car ce n'est qu'à cette échéance que nous pourrons commencer à mesurer les effets des transformations que nous aurons su engager aujourd'hui… et si proche, car si nous n'engageons pas maintenant ces mutations, nous pourrions subir avant cette échéance les effets dévastateurs de dérèglements irréversibles…

Dans ce contexte incertain, je veux rester optimiste. La COP21, en décembre 2015, a incontestablement marqué un tournant dans la mobilisation internationale pour le climat. Gouvernements, entreprises et acteurs de la société civile ont, à cette occasion, reconnu l'urgence du passage à l'action, après de longues années de négociations autour d'objectifs pourtant martelés depuis des décennies par la communauté scientifique. Cet accord historique impulse deux changements structurels – apparemment non connectés l'un à l'autre – qui vont orienter durablement les politiques énergétiques de la plupart des pays dans le monde : la définition de trajectoires

énergétiques et la réappropriation des enjeux énergétiques par les acteurs non étatiques.

En obligeant chaque État à produire sa « contribution nationale[1] », l'accord de Paris leur impose de formuler des plans d'action à moyen et long terme. Certes, on peut regretter que ces contributions ne soient pas, à date, à la hauteur des ambitions de l'accord. Mais leur seule existence et l'obligation de leur révision dès 2018 conduit les États à dessiner des trajectoires énergétiques qui pourraient rapidement devenir des trajectoires de transition énergétique. En effet, le seul fait de mesurer ce que sera la part des différentes énergies dans ces « contributions » met en lumière plusieurs évidences qui échappaient jusqu'à maintenant à l'attention de la plupart des gouvernants.

La première de ces évidences est que la réduction de la demande d'énergie est, à la fois, un choix sans regret, notamment pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, et un accélérateur de résilience, qualité de plus en plus appréciable dans un monde incertain.

La seconde découle de la visualisation de la dépendance de la plupart des États à l'égard des produits pétroliers. Les pays importateurs – dont la France – mesurent le poids des combustibles fossiles dans leur balance commerciale et redoutent le risque d'une nouvelle flambée du prix du pétrole du fait de l'épuisement prévisible de cette ressource. Le développement des hydrocarbures non conventionnels (gaz de schiste notamment), un moment présenté comme une compensation attractive à l'épuisement des ressources conventionnelles, s'avère en fait beaucoup plus compliqué que ce qui était prévu techniquement, beaucoup moins compétitif et surtout peu acceptable socialement en dehors

1. *Nationally Determined Contribution* en anglais.

des grands espaces du *« middle-ouest »* américain. Les exportateurs commencent eux à comprendre la fragilité de leur économie trop dépendante du pétrole. La baisse des prix les éreinte dans l'immédiat et l'épuisement de la ressource, qui ne sera que très partiellement compensé par une nouvelle flambée des prix, met en péril la pérennité de leur modèle économique.

La troisième de ces évidences est l'intérêt de développer les énergies produites à partir de ressources renouvelables locales, dans un contexte où ces technologies sont de plus en plus compétitives. Promouvoir les renouvelables c'est renforcer l'économie locale et, une fois de plus, renforcer la résilience de l'économie du local au global.

En prenant conscience de ces évidences, les gouvernants sont bien plus enclins à définir des trajectoires énergétiques soulignant l'intérêt d'une transition combinant réduction de la demande en énergie et substitution des ressources énergétiques traditionnelles, fossiles et fissiles, par des énergies renouvelables diversifiées, locales et bien moins porteuses de risques. Ce mouvement se renforce, s'accélère et s'ancre dans la durée dans plusieurs régions d'Europe – Scandinavie, Allemagne, Royaume-Uni et France – mais aussi dans de nombreux pays émergents.

Ainsi en Chine, ce ne sont pas moins de 344 milliards d'euros qui vont être consacrés aux énergies renouvelables d'ici 2020. Il s'agit de disposer de 210 gigawatts (GW) de capacités électriques éoliennes et de 110 GW de capacités solaires à cet horizon. Pour la seule année 2016, le pays a doublé ses capacités de production dans le solaire pour atteindre une puissance de 77 GW (dépassant l'Allemagne qui était le champion de cette technologie avec 39,7 GW installés en 2015). Certes, le charbon pèse encore pour 60 % du mix

énergétique de l'empire du Milieu mais nul ne peut contester que la mutation est engagée. Dans un registre différent, l'industrie des renouvelables, notamment du photovoltaïque, est en plein boom aux États-Unis et les gesticulations du Président Trump ne pourront arrêter ces tendances.

La question qui se pose aux États n'est donc plus de savoir s'il faut engager ou non la transition énergétique, mais plutôt d'en définir le rythme et l'ampleur pour ne pas être les derniers à tirer les bénéfices de cette mutation globale. La question est aussi de savoir si les décideurs politiques seront suffisamment déterminés pour laisser émerger les mesures qui accéléreront cette transition (instauration d'un prix du carbone à l'échelle internationale, arrêt des subventions aux combustibles fossiles, facilitation des transferts de technologies vers les pays en développement, etc.) ou si, à l'inverse, ils continueront à se laisser influencer par les lobbys des industries fossiles et nucléaires qui ont bien compris que la transition s'imposerait aussi à eux et qui cherchent à tout prix à retarder l'échéance de leur propre transformation.

D'autre part, l'accord de Paris, en soulignant la nécessité du passage à l'action, met en avant les acteurs non étatiques – collectivités locales, entreprises, organisations citoyennes – dont on rappelle régulièrement qu'ils sont, dans les faits, les principaux émetteurs de gaz à effet de serre. Cette reconnaissance signifie aussi que ce sont ces acteurs qui ont la capacité de réduire significativement leurs émissions en agissant sur leurs modes de déplacement, sur l'efficacité énergétique de leurs logements, sur l'optimisation de leurs procédés industriels ou de leurs pratiques agricoles ou alimentaires.

En étant pointés du doigt comme les responsables du problème du réchauffement climatiques, ils sont de fait reconnus comme étant potentiellement partie de la solution à ce problème. La bonne nouvelle est que, sur ce sujet comme

sur d'autres, cette société civile est plutôt en avance sur les gouvernants. D'ailleurs, ces acteurs non étatiques demandaient depuis plusieurs années d'avoir une place dans la négociation internationale sur le climat en soulignant qu'ils étaient, eux, déjà dans l'action et qu'ils attendaient avec impatience un cadre conventionnel pour faciliter leur implication sur le terrain.

L'ambition de l'accord de Paris offre ce cadre et l'Agenda de l'action souligne encore le rôle des acteurs non étatiques. De fait, des initiatives multiples se développent avec une diversité encourageante : le partenariat pour la mobilité durable (PPMC) ; l'alliance solaire internationale portée notamment par le gouvernement indien ; le collectif international *« Desinvest »* qui a déjà conduit au retrait de 5 000 milliards de dollars d'actifs précédemment investis dans les énergies fossiles ; l'alliance pour des bâtiments durables ; les coalitions pour des approvisionnements en produits agricoles réputés « zéro déforestation ». Ces acteurs non étatiques ont même leur sommet mondial annuel – Climate Chance – dont la 2e édition s'est tenue à Agadir au Maroc en septembre 2017. Mais c'est surtout le mouvement de fond qui, en mobilisant les territoires (grandes villes ou petites communes rurales), donne un souffle nouveau aux politiques énergétiques.

Ces deux grands leviers – l'émergence de trajectoires de transition énergétique à l'échelle des pays et la mobilisation croissante des acteurs non étatiques – restent évidemment à activer dans la durée. Et nous n'ignorons pas que le chemin de cette transformation est aussi pavé d'embûches. Mais ne boudons pas l'optimisme qu'emportent ces mobilisations. Relevons-nous les manches et contribuons chacun à notre place à cette transition pour le meilleur !

La vision de…

Alexandre Rojey

Fondateur et animateur du think tank
IDées de la Fondation Tuck

S'interroger sur l'avenir de l'énergie à l'horizon 2050 conduit tout d'abord à faire la différence entre nos souhaits et la réalité. Pour répondre à nos vœux, l'énergie devrait être abondante, non polluante et disponible pour tous. Toutefois, les incertitudes sont nombreuses et il sera sans doute difficile de réunir tous les avantages espérés.

Globalement, la demande d'énergie va encore augmenter, en raison de la démographie et de la progression du niveau de vie. Le niveau de la population mondiale a été revu à la hausse dans les dernières prévisions de l'ONU. La valeur médiane de la fourchette envisagée est de 9,7 milliards d'habitants en 2050, au lieu de 7,2 milliards en 2014[1]. La consommation annuelle d'énergie primaire est de 1,9 tonne d'équivalent pétrole (tep) par habitant en 2014, avec des écarts très importants : 6,9 tep par habitant aux États-Unis, 3,7 tep en France, mais seulement 0,6 tep en Inde.

Les pays émergents et en développement, dont le poids démographique va devenir prédominant, vont tout faire pour rapprocher leurs conditions de vie de celles qui prévalent dans les pays occidentaux. La consommation moyenne d'énergie par habitant devrait continuer à croître et pourrait se situer entre 2,5 et 3 tep par habitant en 2050. Dans ces conditions,

1. *World Population Prospects, the 2015 Revision*, Department of Economic Affairs, Population Division des Nations unies.

un doublement de la demande mondiale d'énergie primaire en 2050 par rapport au niveau de 2014 paraît vraisemblable. Le niveau de cette demande reste toutefois lié à l'évolution de la conjoncture économique mondiale et donc dépendant de multiples facteurs.

Par ailleurs, les transformations énergétiques sont relativement lentes. En 2050, la part des énergies fossiles dans le mix énergétique mondial risque d'être encore relativement élevée et la transition énergétique sera loin d'être achevée. Ainsi, dans son scénario de référence *New Policies*, l'Agence internationale de l'énergie (AIE) prévoit une part d'énergies fossiles de 74 % dans la consommation mondiale d'énergie primaire en 2040[2].

Dans de telles conditions, il sera extrêmement difficile de diviser par 2 les émissions de dioxyde de carbone, comme le nécessiterait la limitation à 2°C de l'élévation de la température moyenne d'ici la fin du siècle. La principale menace est liée à une utilisation intensive du charbon pour la production d'électricité. La substitution du gaz naturel au charbon, qui permet de réduire les émissions de CO_2 par un facteur allant de 2 à 3, tout en assurant une fourniture en *back-up* des énergies renouvelables, représente sans doute l'une des meilleures options au cours de la période de transition à venir.

Par rapport à cette évolution « tendancielle », peut-on prévoir des ruptures ? Le développement très rapide des technologies numériques conduit souvent à une perception très optimiste des progrès technologiques. Or, dans le secteur de l'énergie, si des améliorations incrémentales sont constamment apportées, aucune rupture majeure de type « fusion froide » n'est intervenue au cours des cinquante dernières années et il paraît aujourd'hui peu probable qu'une nouvelle forme

2. *World Energy Outlook 2016*, AIE.

d'énergie puisse être exploitée d'ici 2050, tout recours à la fusion étant renvoyé au moins jusqu'à la fin du siècle. Les principaux progrès actuels concernent une utilisation plus « intelligente » de l'énergie, grâce à la mise en œuvre des technologies numériques (*smart cities*, *smart grids*, etc.). Dans ces conditions, on ne peut sans doute pas exclure une rupture technologique soudaine mais il serait hasardeux aujourd'hui de tabler sur une telle possibilité.

Par ailleurs, une rupture catastrophique, telle qu'un effondrement de la biodiversité et des écosystèmes au niveau mondial, un conflit nucléaire ou une pandémie à l'échelle mondiale, dont la menace est périodiquement agitée, pourrait transformer radicalement la situation, en réduisant sensiblement le niveau de la population humaine et en plongeant des régions entières dans le chaos.

Si l'on écarte, au moins provisoirement, un tel scénario, les évolutions suivies devraient être graduelles, comme le montre le scénario de référence de l'AIE. Néanmoins, au moins vers la fin de la période, une inflexion plus marquée devrait accompagner un épuisement progressif des énergies fossiles et une aggravation probable du réchauffement climatique. En ce qui concerne les hydrocarbures de roche-mère, même si leur production aux États-Unis perturbe provisoirement l'équilibre offre/demande (conduisant à un prix relativement bas du baril), les volumes en jeu ne semblent pas de nature à empêcher un déclin progressif des réserves disponibles à l'horizon 2050. Par ailleurs, les conditions économiques et les pénalisations liées à l'environnement vont jouer également.

Deux tendances pourraient alors se faire jour. Soit, une accentuation du rôle de la technologie, une poursuite de la croissance de la consommation d'énergie et le recours à des sources concentrées d'énergie. Un tel scénario implique sans doute un large recours au nucléaire, en dépit des réticences

qu'une telle option peut susciter. Soit, au contraire, une diminution à l'échelle mondiale de la consommation d'énergie et un large déploiement des énergies renouvelables. La réduction de la quantité d'énergie disponible par habitant pourrait toutefois avoir un impact sur le niveau de vie et se traduire par une augmentation des inégalités.

Face à ces incertitudes, l'effort prioritaire dans un pays comme la France consiste dès maintenant à réduire la consommation d'énergie, par des actions portant à la fois sur la sobriété et sur l'efficacité, ce qui contribue à réduire la tension sur l'offre et également à limiter les émissions de gaz à effet de serre. Les choix à effectuer doivent également tenir compte du rôle important de l'énergie comme facteur de compétitivité économique et en matière d'emplois.

La vision de…

Jean-Louis Schilansky

Président du Centre hydrocarbures non conventionnels
Ancien président de l'Union française des
industries pétrolières (2008–2014)

Le début du XXIe siècle connaît une période inédite d'abondance et de diversité énergétique, marquée par d'importantes avancées technologiques dans la production d'énergie. Les développements les plus notables concernent l'essor des énergies renouvelables et des ressources d'hydrocarbures non conventionnels, en particulier de pétrole et de gaz de schiste en Amérique du Nord.

En outre, on enregistre des bouleversements majeurs sur la géographie et les modes de consommation énergétique, la demande mondiale en énergie étant en forte hausse depuis 15 ans, notamment sous l'impulsion des pays asiatiques. Selon les projections de l'Agence internationale de l'énergie, cette tendance devrait se poursuivre dans les 30 prochaines années et représenter une hausse de plus d'un tiers. La demande d'énergie de l'Inde pourrait avoisiner celle des États-Unis alors qu'elle est actuellement trois fois plus faible.

Dans ce nouveau paradigme, l'amélioration de l'efficacité énergétique et la transition vers des énergies moins carbonées seront des enjeux majeurs. Dès à présent, les progrès techniques, associés aux efforts d'économie d'énergie, ont permis une baisse de l'intensité énergétique : on utilise actuellement 10 % d'énergie en moins par unité de production qu'en 2000, la moitié de ce gain étant intervenue depuis 2010.

La production mondiale d'électricité est également un secteur qui possède un gros potentiel de réduction d'émissions de gaz à effet de serre, dues notamment à l'utilisation du charbon.

Pour répondre aux défis climatiques, nombre de pays devraient faire évoluer significativement leurs mix énergétiques, avec des substitutions entre sources d'énergies. Chaque pays devrait agir en fonction de ses caractéristiques propres : ressources potentielles, situation géographique, degré d'ensoleillement, exposition au vent, enjeux d'indépendance énergétique ou encore efforts sur le captage et le stockage du CO_2.

Dans ce contexte, la part du charbon dans la production d'électricité devrait baisser au profit du gaz naturel et des énergies renouvelables. En particulier, l'énergie solaire et l'énergie éolienne poursuivront leur croissance, à des coûts de plus en plus compétitifs. Leur rythme de développement dépendra en partie de la capacité à recourir à des procédés de stockage d'électricité. Entre-temps, leur intermittence devrait trouver dans le gaz naturel une complémentarité pour assurer un flux régulier de production.

Au-delà des défis propres au secteur électrique, le besoin mondial d'énergie en 2050 sera tel que le recours à l'ensemble des ressources aujourd'hui utilisées restera nécessaire pour le satisfaire. Les dernières prévisions de l'AIE montrent toutefois une évolution sensible des investissements dans les années à venir, en faveur des énergies moins carbonées, notamment le gaz naturel.

La demande de gaz naturel devrait en effet connaître une croissance soutenue du fait de sa flexibilité et de sa « performance » en termes d'émissions de CO_2. Un facteur supplémentaire de la capacité du gaz à satisfaire la demande en énergie tient au développement du commerce international de gaz naturel liquéfié (GNL). Plusieurs projets de construction

d'usines de liquéfaction, de méthaniers et de terminaux de regazéification sont actuellement en cours sur tous les continents. Ces infrastructures permettront aux ressources importantes de gaz naturel d'atteindre leurs marchés partout dans le monde.

Alors que sa production était encore faible au début des années 2000, le gaz non conventionnel, notamment le gaz de schiste, devrait représenter un tiers de la production mondiale de gaz naturel en 2040. Les États-Unis, pionniers dans l'exploration et la production des ressources de schiste, ont commencé depuis 2016 à exporter du gaz naturel et du pétrole, et pourraient, selon le scénario de référence de l'Agence américaine de l'énergie, devenir exportateur net d'énergie dans moins de dix ans.

Les ressources d'hydrocarbures non conventionnels apparaissent diversifiées sur le plan géographique, et plusieurs pays en dehors de l'Amérique du Nord envisagent d'explorer et d'exploiter leurs ressources potentielles comme l'Argentine, la Chine ou encore l'Australie. Ces productions vont prendre de l'ampleur dans les dix années à venir et contribuer à redéfinir les relations entre pays producteurs et pays consommateurs.

Le pétrole restera également une source d'énergie essentielle, notamment pour le transport et la pétrochimie. L'essentiel de la croissance de la production de pétrole devrait être assuré par des productions à haut contenu technologique, dont le pétrole offshore profond, le pétrole de schiste, les hydrocarbures liquides associés à la production du gaz naturel, etc. Ces nouvelles productions viendront compenser la baisse attendue de la production de pétrole dit conventionnel.

Au global, il apparaît qu'à l'horizon 2050, le mix énergétique aura été redéfini par les conditions économiques de production, les innovations technologiques et les politiques

publiques visant à réduire les émissions de CO_2 et favorisant les économies d'énergie et le recours aux énergies faiblement carbonées. À la suite de l'accord de Paris sur le climat (COP21), de nombreux pays ont confirmé leurs engagements dans la réduction ou la limitation de leurs émissions de CO_2.

Les progrès techniques considérables attendus durant les prochaines décennies devraient permettre de mieux concilier les objectifs énergétiques et environnementaux. Le chemin reste difficile à décrire, mais le développement des hydrocarbures non conventionnels et des énergies renouvelables est déjà en train de redéfinir la donne énergétique mondiale. L'amélioration de l'efficacité énergétique et les projets en matière de stockage devraient également y contribuer de manière significative.

La vision de…

Stephan Silvestre

Docteur en économie, enseignant-chercheur à la Paris School of Business (PSB)
Secrétaire de la Chaire de Management des risques énergétiques de PSB

Depuis 800 000 ans, l'humanité se développe grâce à la maîtrise de l'énergie. La maîtrise du feu a permis à l'homme de se chauffer, de se nourrir plus sainement, de conquérir ou de se défendre, de voir la nuit ; en résumé, il a pu s'affranchir de ses contraintes matérielles et ainsi développer ses compétences intellectuelles et son organisation sociale.

S'en est suivi, du néolithique jusqu'au XVIII^{e} siècle, l'ère énergétique de la collecte. La principale ressource était le bois, ainsi que le fourrage pour les animaux de trait. Malheureusement, à l'instar des ressources alimentaires, les ressources énergétiques étaient très dépendantes des conditions environnementales et de nombreuses pénuries ont provoqué de grands désastres.

Avec la Révolution industrielle est arrivée l'ère de l'extraction minière. L'humanité a systématisé ses méthodes d'exploitation afin d'alimenter son industrie naissante en ressources énergétiques. Le charbon a alors commencé à remplacer le bois, y compris dans les foyers, pour le chauffage et la cuisson. Avec la Révolution industrielle, l'humanité a ainsi connu sa deuxième révolution énergétique.

La troisième révolution énergétique a eu lieu au début du XX^{e} siècle, singulièrement au moment de la Seconde Guerre mondiale, pour faire émerger l'ère de la transformation.

Transformation du pétrole, dans un premier temps, pour produire carburants, kérosènes, combustibles de chauffage, plastiques ou produits pétrochimiques pour la pharmacie, l'alimentaire et tant d'autres secteurs, puis transformation d'uranium en combustible pour la production d'électricité. Avec la généralisation de l'informatique, l'électricité est devenue la clé du développement humain.

Le XXI^{e} siècle est maintenant le théâtre d'une quatrième révolution énergétique, celle de la technologie. Cette nouvelle ère est caractérisée par la multiplicité des sources. La technologie de pointe est présente non seulement au sein des ressources nouvelles, telles que les panneaux solaires, les éoliennes, les batteries de nouvelle génération ou les agrocarburants, mais aussi dans les ressources traditionnelles, au travers des techniques de forage non conventionnelles, de l'extraction en offshore ultra-profond ou en environnement extrême, ou encore des centrales nucléaires de quatrième génération.

Et, bien entendu, elle sera encore plus présente dans les ressources futures, comme les hydrates de méthane, l'hydrogène, ou encore la fusion thermonucléaire. Il en résulte que la part de la ressource dans la valeur ajoutée de l'énergie produite devient minoritaire, au profit de celle de la technologie.

Cette nouvelle configuration économique va bouleverser les enjeux énergétiques mondiaux. Les batailles géopolitiques, voire militaires, autour du contrôle des matières premières énergétiques et de leurs routes vont devenir caduques, alors que celles liées au contrôle de la propriété intellectuelle vont devenir stratégiques. En 2050, les maîtres de l'énergie seront ceux des technologies associées. L'enjeu ne sera plus la ressource, mais le savoir.

La vision de…

Bernard Tardieu

Président de la commission Énergie et changement climatique de l'Académie des technologies

---

2050. La COP55 vient de se terminer. Les engagements de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) tendent à se renforcer mais il demeure de fortes disparités entre les pays, notamment de la part de ceux qui trouvent des avantages dans le changement climatique[1]. Malgré les efforts accomplis, les modifications climatiques sont très sensibles dans certaines régions, moins dans d'autres. Les continents soumis aux effets cycliques du phénomène *el Niño* (Afrique, Amérique du Sud) sont toujours sensibles à ces grands cycles pluriannuels et les tendances longues sont difficiles à discerner, surtout en ce qui concerne les ressources en eau qui demeurent la question majeure dans beaucoup de pays. La quantité d'eau est toujours la même mais la population mondiale augmente et sa concentration dans les villes accroît la consommation d'eau par habitant de la planète[2]. Les pratiques agricoles et les techniques d'irrigation et de drainage permettent d'émettre moins de gaz à effet de serre et souvent d'en stocker tout en consommant moins d'eau. Une partie de la surface agricole planétaire est consacrée à l'énergie sans perturber la production alimentaire.

---

1. C'est le cas de la Russie et du Canada et d'autres pays proches des pôles, par exemple pour les cultures ou le trafic maritime. Le changement climatique « ne va pas vers le pire ou vers le meilleur » : cela dépend du lieu, de la saison, du type de climat. Mais il rend nécessaire l'adaptation à une évolution dont il faut tâcher de contrôler la vitesse car cette adaptation est locale et prend du temps.

2. À revenu égal, les populations rurales consomment moins d'eau que les populations urbaines (eau distribuée, eau chaude, hygiène, etc.).

La consommation d'énergie n'est plus proportionnelle au PIB depuis plusieurs décennies. L'efficacité énergétique a progressé dans tous les domaines. Cependant, l'augmentation globale de la population mondiale a conduit à une augmentation importante de la population ayant accès à l'électricité et aux transports en Asie comme en Afrique (toujours en croissance démographique). La baisse de consommation des pays de l'OCDE ne pèse pas sensiblement comparativement à cette augmentation.

En 2050, le paysage énergétique mondial a changé. Le poids du charbon, du pétrole et du gaz fossile a baissé lentement mais sûrement. Le prix du charbon est bas et celui-ci joue toujours un rôle important. Toutes les anciennes centrales à charbon à bas rendement ont été remplacées par des centrales à haut rendement, ce qui a eu un impact très significatif sur les émissions mondiales, puisque la même production électrique est obtenue avec une réduction de 30 % des émissions de GES. La séquestration du CO_2 n'a pas trouvé de modèle physique et économique crédible pour de grandes quantités. En Chine et en Inde, on n'a pas trouvé de sites permettant le stockage géologique du CO_2. Il est pourtant indispensable de trouver une solution si l'on souhaite continuer de consommer du charbon. Grâce au développement des énergies solaire et éolienne, les centrales à charbon, comme d'ailleurs les centrales à gaz, ne fonctionnent que 25 % à 50 % du temps, en fonction des régimes de vent et de soleil de la région et de la production hydroélectrique. Cette durée de fonctionnement réduite participe efficacement à la réduction des émissions de GES.

Les pays pétroliers et gaziers ont vu leur position stratégique diluée par la découverte de nombreux sites riches en pétrole et en gaz de schiste distribués sur toute la planète. Le Proche-Orient a perdu de son influence. Les grandes compagnies

pétrolières et gazières se sont progressivement orientées vers les huiles et gaz non fossiles de manière à proposer des carburants et des gaz dont la part non fossile est croissante et dont le prix s'ajuste en fonction des développements technologiques et du prix du CO_2. Ils développent ou achètent des productions agricoles dédiées à l'énergie, en priorité dans les zones tropicales, mais aussi dans les pays tempérés pour limiter leur dépendance à l'importation. Des territoires très vastes sont protégés contre le développement agricole énergétique afin de préserver la biodiversité.

Parmi les gaz à effet de serre, tous les gaz industriels fortement émissifs comme les HFC et SF_6 ont été progressivement éliminés par voie réglementaire et remplacés par des gaz moins émissifs. La question du méthane reste ouverte. Les pertes industrielles de méthane sont sévèrement taxées. Les émissions naturelles associées ou non aux usages humains sont analysées en modifiant progressivement les pratiques culturales du monde agricole. Les zones humides fortement émettrices de méthane sont protégées du fait de leurs qualités intrinsèques pour la biodiversité. On essaie de réduire les feux de forêts.

La population mondiale urbaine est en forte croissance dans tous les pays et sous tous les climats. L'organisation des villes propose des abonnements énergétiques qui incluent toutes les dépenses énergétiques : chauffage, air conditionné, applications électriques spécifiques, transport. Les moteurs à combustion interne sont interdits dans les villes de plus de 100 000 habitants, pour des raisons de pollution atmosphérique. On utilise des voitures électriques et des voitures à piles à combustible. Les populations urbaines ne possèdent souvent pas de voiture. Ils disposent d'abonnements « voiture », « deux-roues » ou « trois-roues » électriques. Tous les véhicules urbains et tous les véhicules sur autoroute et routes

inter-régions fonctionnent sans chauffeur, mais avec une personne majeure avec permis de conduire.

Les populations des zones urbaines extérieures ont augmenté, car on ne parvient nulle part à gérer l'augmentation du prix du foncier. Les gouvernements les plus courageux parviennent seulement à le modérer. Les transports périurbains se font en train dont la vitesse a peu varié mais dont la fréquence et le confort permettent de travailler ou de se distraire. Les habitants périurbains utilisent des véhicules hybrides rechargeables dont seule la partie électrique autonome est utilisée en ville. Ces véhicules n'ont pas besoin de chauffeur et sont gérés collectivement de manière à fluidifier le trafic. Il n'y a plus de feux tricolores, ni limites de vitesse. On indique l'adresse de destination et la solution de parking est décidée par un système central. Cette solution efficace s'est développée dans toutes les grandes villes du monde car le coût est relativement faible par rapport aux systèmes traditionnels.

La production électrique intermittente a plafonné il y a deux décennies sous l'effet de la fin des subventions et des pénalités en fonction des prévisions de production non tenues et des perturbations sur le réseau électrique. Le plafond en puissance correspond à peu près à la demande d'été dans les pays tempérés (soit 50 GW en France où l'air conditionné s'est développé). Les matériels du début du siècle sont obsolètes. La production solaire à concentration (dite thermodynamique) continue de se développer dans les pays à fort rayonnement solaire, avec des génératrices tournantes nécessaires à la stabilité des réseaux électriques. Les très grandes éoliennes flottantes commencent à trouver un modèle technologique et économique solide. Elles ne provoquent pas d'opposition. Elles ont joué un rôle majeur dans la mise au point des solutions en courant continu compatibles avec les réseaux sous-marins.

La production nucléaire se développe sur la base de réacteurs à eau pressurisée de 3e génération. Les Chinois ont assimilé les technologies de diverses origines et dominent le marché mondial du génie civil. Le Japon, les États-Unis et la France ont conservé un leadership en sidérurgie et dans la partie du contrôle et de la commande opérationnelle. Le développement de petits réacteurs industrialisés (*small modular reactors*) s'est développé en Europe sous l'impulsion de la France, de l'Angleterre et de la Russie.

De grands réseaux électriques se sont développés, en particulier en Afrique pour favoriser les échanges associés aux énergies renouvelables, par exemple l'hydroélectricité sur certains fleuves et l'électricité solaire dans les zones à fort ensoleillement. Quelques réseaux indépendants se maintiennent avec des prix assez bas et une qualité en fréquence et tension dont les habitants se plaignent. Ces réseaux maintiennent dans la mesure du possible une relation de type assurantielle avec le réseau électrique européen ou avec les réseaux régionaux ailleurs dans le monde pour garantir la qualité du service rendu.

L'énergie demeure un sujet majeur de la compétition internationale pour le développement et le contrôle des meilleures technologies et la garantie de l'indépendance souveraine des pays.

La vision de…

Daniel Verwaerde

Administrateur général du CEA

Trois données qui sont bien entendu aussi des hypothèses crédibles paraissent devoir être bien soulignées en préalable à toute analyse :

1. la population mondiale devrait dépasser en 2050 les 8,5 milliards d'habitants, voire même 9 milliards d'habitants ;
2. les habitants des grandes villes connectés par Internet et les télévisions du monde tendront à vouloir uniformiser leurs modes de vie et leurs consommations. On devrait avoir d'ici 2050 de l'ordre de 4 milliards de personnes qui veuillent vivre comme le font aujourd'hui les habitants des pays développés ;
3. le monde ne renoncera pas à la croissance économique ; tout milite même pour considérer qu'il s'efforcera de maintenir un rythme de croissance supérieur à 3 % par an.

Ces paramètres suffisent à eux seuls à démontrer la nécessité de mutation de nos modèles énergétiques si nous voulons éviter des catastrophes écologiques telles que des migrations massives de populations dans le siècle qui vient, voire une élévation inédite du niveau des mers dans deux ou trois siècles si les résultats des modélisations scientifiques viennent le corroborer.

La plupart des grands pays du monde en conviennent à présent : ils savent que des progrès majeurs des technologies sont nécessaires pour relever ces défis. Les pays du G20 devraient s'attacher à faire périodiquement des bilans de

ce progrès technique. Ils ne devraient pas mésestimer les évaluations que pourraient en faire soit leurs Académies des sciences soit leurs plus grandes Universités.

Ceci mériterait d'autant plus d'être soigneusement analysé que les rares études globales faites à ce jour laissent à penser que ce coût devrait être bien inférieur à 2 % du PNB mondial. Trop de gens, en particulier dans le monde financier, pensent que ce défi climatique nous dépasse ou qu'il faille toujours trouver des coupables ou des bouc-émissaires pour arguer de notre soi-disant impuissance. Ce ne serait ni éthique, ni sérieux que ces situations perdurent. Ces études devraient être développées et mises en perspective les unes avec les autres pour éviter toute erreur de jugement.

Regardons à présent ces questions de manière plus analytique. Bien des études ont amplement souligné qu'il faudrait avant tout augmenter le poids de l'électricité non carbonée dans le mix énergétique de la planète. Si de grands pays tels que l'Inde et la Chine ont demain en mains les atouts de l'hydroélectricité, du solaire, du nucléaire, de l'éolien, de la CCS, de centrales à gaz beaucoup plus propres, il n'y a aucune raison pour qu'ils ne puissent viser bien avant 2050 des mix électriques émettant au total moins de 100 g de CO_2/kWh. Ce serait un pas en avant considérable que de faire émerger cette prise de conscience et de tels objectifs.

Les transports routiers manifestent aujourd'hui une incontestable volonté et une capacité de mise en œuvre des technologies qui aurait été encore impossible à anticiper il y a encore dix ans. Motorisations électriques, hybrides électrique-essence, hybrides électrique-piles à combustible : tous les constructeurs rivalisent de propositions et d'innovations.

Quelle que soit la croissance des besoins dits de transport, nous savons d'ores et déjà que nos émissions de CO_2 devraient

décroître dans l'avenir, et ce, malgré un doublement ou même un triplement du nombre de véhicules automobiles. Si nous savons combiner ce progrès technique avec d'un côté des transports en commun, de l'autre une vraie prise de conscience des citoyens-usagers, bien des progrès sont possibles. Ces progrès s'appliqueront pareillement aux transports par camions de courte distance. Le transport de longue distance dépendra plus des situations propres à chaque pays ou à chaque zone géographique. Pour ce qu'il restera des besoins en hydrocarbures, en particulier pour le transport aérien, nous disposerons de solutions avec les biocarburants d'un côté, le recyclage du CO_2 par co-électrolyse du CO_2 et de l'eau de l'autre.

La transition de l'industrie vers l'électricité est un troisième enjeu : il supposera des règles et des environnements législatifs réellement communs. Plus de 80 % des besoins en électricité de l'industrie exigent de la chaleur à plus de 500°C. Que ce soit avec des fours électriques en cas de besoins continus ou avec des torches à plasma pour des besoins discontinus, nous savons déjà quelles seront les technologies les plus essentielles.

Au fur et à mesure de ces mutations, le poids du pétrole sur l'économie mondiale devrait décroître. Cette transition sera progressive mais devrait se concrétiser dans les vingt ans à venir. Depuis bientôt 80 ans, le pétrole pèse sur l'histoire du monde et est à l'origine de bien des tensions. Ce sera sans doute un avantage collatéral de la lutte contre les dérèglements climatiques que de faire émerger un monde moins sujet à toutes ces vicissitudes.

Face à toutes ces questions, on attend justement des gouvernants qu'ils jouent leur rôle et c'est bien légitime. On attend des entreprises et de la recherche publique qu'elles aident à réconcilier croissance économique et préservation de la planète. Tout cela ne sera pas facile, mais reste réalisable.

Le monde éducatif est par contre plus concerné qu'on ne le souligne usuellement. Comment se pourrait-il que des étudiants arguant de masters ou de PhD puissent prétendre ne rien savoir de ces enjeux ? Si tous les établissements distribuant de tels diplômes, tant pour les managers ou commerciaux que pour les ingénieurs ou scientifiques, dédiaient 1 % de leurs cours à ces sujets, nous verrions vite progresser tant la conscience des défis que les chances de réussir à les relever. Ces sujets ne sont pas du tout secondaires : bien plus que nous ne l'imaginons encore, il dépendra demain du Chinois moyen, de l'Indien moyen et de l'Américain moyen que leurs gouvernants s'engagent et coopèrent pour à la fois préserver notre accès à des énergies peu chères et relever les défis climatiques.

La vision de…

Marie-Christine Zélem

Sociologue de l'énergie
Professeur des universités

En postulant le caractère limité de la planète et sa dégradation imminente par les activités humaines, donc la menace pour la survie de l'homme sur Terre s'il continuait *as usual*, les dernières négociations mondiales autour du climat, tout comme le projet de politique Énergie Climat proposé par la Commission européenne fin novembre 2016, ont signé une étape importante dans notre rapport au développement : la nécessité de trouver rapidement des solutions alternatives vers une société post-carbone. Il s'agit notamment de réduire au niveau européen les émissions de gaz à effet de serre de 40 % d'ici à 2030.

Outre le fait qu'il n'a guère été envisagé de modifier vraiment nos modes de vie « à la baisse », une des difficultés majeures de ce projet est de concilier trois grands enjeux : sur la base d'une double performance économique et environnementale, le premier est celui de permettre aux pays occidentaux de généraliser à la planète un niveau de vie optimal qu'il s'agit de maintenir ; le second est de contribuer au rattrapage des pays « en développement » sur la base d'une justice climatique ; ces deux premiers objectifs sont assortis d'une condition, posée comme le troisième enjeu : apprendre aux citoyens du monde à consommer de façon moins énergivore.

Pensée à l'échelle planétaire, aller vers cette société post-carbone est compliqué car, selon un principe de solidarité, il s'agit de déployer les technologies occidentales pour faire

entrer l'ensemble des pays sur un seul et même marché planétaire, tout en respectant l'environnement et en engageant des pratiques qui seraient moins gourmandes en énergie. Dans la continuité du Plan Marshall qui annonçait vouloir favoriser *« l'amélioration du développement de la croissance »* de toutes les régions du monde, on parle de faire émerger une « *middle class* mondiale ». Les pays les plus avancés maintiendraient leur niveau de vie (par le jeu de ce que d'aucuns nomment la « croissance verte »), alors que les autres pays accéléreraient leur course pour participer et contribuer à l'économie mondiale… Ainsi, c'est la globalisation qui reste au cœur de la fabrique du monde. Or, elle constitue un frein considérable au changement de paradigme énergétique dominant qui, parce qu'essentiellement technocentré, est et restera très carboné. En ce sens, il est peu crédible que le tableau énergétique s'améliore.

À l'échelle locale, cette étape nommée « transition » écologique, et en particulier énergétique, s'appuie sur des politiques publiques plutôt volontaristes dans leurs énoncés. Il s'agit, si possible dans un même élan et de manière cohérente, du développement des énergies renouvelables, de stratégies industrielles dans l'efficacité énergétique (à niveau de confort égal, les technologies pour la mobilité ou pour l'habitat doivent moins consommer d'énergie) et de l'engagement des territoires. S'ils sont respectés, ces cadres assez ambitieux peuvent permettre d'amorcer un changement dans certains domaines et pour certaines catégories sociales. Les territoires à énergie positive, les technologies performantes, la domotique ou les *smart cities* font partie de ce projet.

Porté par la révolution numérique, ce projet de société repose sur des modèles économiques qui font la part belle à des représentations d'un monde dans lequel les pratiques individuelles fonctionnent comme de simples variables d'ajustement.

Alors que durant tout le XX^e siècle, les pratiques énergivores étaient flattées, dans une période de tension énergétique, ces mêmes pratiques sont qualifiées comme pathologiques. Il convient alors de les infléchir vers des formes « d'attention énergétique ».

Ainsi, au-delà des grandes batailles autour des scénarios possibles, la transition énergétique compte aussi et beaucoup sur un changement plus complexe : celui des pratiques sociales, que d'aucuns réduisent aux comportements, ou élèvent au rang de modes de vie, vers plus de sobriété. Et là, comme par miracle, mais surtout parce qu'on ne sait pas « faire changer » les comportements, on s'appuie sur les principes de *« l'empowerment »* et l'on brandit la solution de « l'accompagnement ». C'est ainsi que l'on ne touche pas (ou juste à la marge) à l'offre disponible. On place alors les consommateurs d'énergie en qualité « d'experts responsables de leurs choix », même si le choix de la grande majorité d'entre eux, mis en situation contrainte, se réduit à arbitrer entre une voiture et une voiture, une passoire énergétique et une passoire énergétique…

Quant à la solution de l'accompagnement, elle considère d'emblée les consommateurs d'énergie comme incompétents et les place dans une posture qui consiste à les prendre par la main pour qu'ils s'adaptent aux configurations urbaines, aux modes constructifs et aux équipements qui les environnent. Dans cette configuration, on ne questionne absolument pas les technologies qui fonctionnent comme des évidences. On ne se pose même pas la question de savoir comment appréhender une société où, au lieu de réfléchir au « comment aller vers une vraie culture de sobriété » (qui suppose d'accorder de la valeur aux économies d'énergie, de promouvoir une éducation en adéquation avec le projet d'une société moins énergivore, d'enseigner les principes du *low-tech*, du

slow-food, de l'économie du partage, de faire monter en compétences les professionnels, et qui suppose aussi que les « autres grands » donnent l'exemple…), on imagine une société d'assistés qui, accompagnés, viendraient compenser les dépenses énergétiques d'une société énergivore.

De fait, nos sociétés vont devoir faire face à des inerties sociétales qui sont peu prises en compte dans les modèles économiques ou dans les divers scénarios énergétiques. Non qu'il s'agisse d'un oubli ou d'une « secondarisation » de cet aspect social de l'énergie, mais bien plutôt parce qu'il est quasiment vain d'imaginer quels pourraient être les modes de vie d'ici 2050. On atteint là purement les limites de notre capacité à imaginer les futurs possibles.

Dans le meilleur des mondes, compte tenu de la priorité suprême accordée à l'approche économiste et aux addictions consuméristes qu'elle entretient, d'après le scénario le plus optimiste, tous les pays seront en passe d'atteindre un même stade de développement et tous leurs citoyens pourront prétendre à un même niveau de confort. Toutefois, dans la pensée dominante, le monde de demain sera un monde fortement technicisé et, paradoxalement, ce « toujours plus de technologies » se traduira par une hausse globale des consommations d'énergie. En ce sens, la croissance verte, comme le développement durable en son temps, fonctionne comme une utopie tant les interdépendances générées par le paradigme techno-économique actuel sont sclérosantes au regard de tous les projets de « déconsommation » énergétique.



Lors de la COP21 qui s'est tenue à Paris fin 2015, 195 pays ont conclu un accord visant à contenir le réchauffement climatique mondial « nettement en dessous » de 2°C d'ici à 2100 par rapport à l'ère préindustrielle.

Cet objectif commun implique, selon le GIEC, une évolution majeure et très rapide de nos mix énergétiques. Or, les projections énergétiques actuelles et les annonces de hauts responsables diffèrent parfois radicalement sur les énergies qui seront consommées dans le monde dans les décennies à venir.

La Fondation d'entreprise Alcen pour la Connaissance des Énergies, qui édite le média pédagogique www.connaissancedesenergies.org, a souhaité mettre en lumière cette diversité de visions en interrogeant des personnalités aux profils variés, compétentes et reconnues dans leurs domaines spécifiques, sur le paysage énergétique mondial en 2050.

CONNAISSANCE des ÉNERGIES