

La complexité du réseau et l'électricité verte

D'après la conférence de Yves Bréchet

Professeur à l'Institut Polytechnique de Grenoble, spécialiste des matériaux, Yves Bréchet est Haut-commissaire à l'Énergie Atomique, membre de l'Académie des Sciences et membre du comité de l'Énergie Atomique. Il a reçu la médaille d'argent du CNRS en 2009, le Prix Aymé Poirson de l'Académie des sciences en 2010 et la légion d'honneur la même année.

1 La décarbonation de l'énergie pour lutter contre le réchauffement climatique

Ces réflexions résultent d'échanges avec le docteur André Aurengo pour des aspects médicaux, avec Olivier Vidal, Directeur de recherche au CNRS à l'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU), pour les aspects ressources minérales, et avec Nouredine Hadjsaid, directeur du Groupement d'intérêt Économique « Inventer la Distribution Électrique de l'Avenir » (GIE IDEA), pour les aspects réseaux.

1.1. L'énergie et l'histoire de la civilisation

L'histoire de la civilisation commence il y a très longtemps. L'homme commence par utiliser l'énergie solaire stockée dans le bois qui est

transformée en énergie animale, puis il utilise l'énergie mécanique des moulins à vent et à eau, ensuite l'énergie chimique issue du charbon, du pétrole et du gaz, pour enfin terminer avec l'énergie nucléaire de fission et de fusion (**Figure 1**).

Pourquoi dans cette marche continue vers un style de vie qui consomme de plus en plus d'énergie, avec une production de plus en plus dense, avons-nous envie de revenir à la source initiale, l'énergie solaire, au lieu de partir de l'énergie de fusion et de l'énergie nucléaire ?

1.2. Vers la décarbonation de l'énergie ?

La décarbonation de l'énergie semble être l'un des aspects essentiels de la lutte contre le réchauffement climatique et en tous cas de la transition énergétique. Mais bien



Figure 1

Histoire de la civilisation : une marche continue vers un style de vie consommant de plus en plus d'énergie avec une production de plus en plus dense.

qu'on en parle beaucoup, peu de choses sont réalisées ; on n'observe pas d'évolution pour les pays européens et le Japon, et la Chine se développe en carbonant de plus en plus son économie, en développant de plus en plus la production d'énergie par le charbon (Figure 2). La décarbonation de la planète semble actuellement mal partie !

Quand on examine les émissions en CO₂ des différentes filières énergétiques

(Figure 3), il y a les bons et les mauvais élèves, et parmi les bons élèves, le nucléaire, l'hydraulique, l'éolien et le photovoltaïque représentent un potentiel de décarbonation de notre économie, et en tout cas de notre électricité.

1.3. En France, la transition énergétique a déjà eu lieu...

La transition énergétique a de fait eu lieu en France en 1973 (Figure 4) quand nous avons

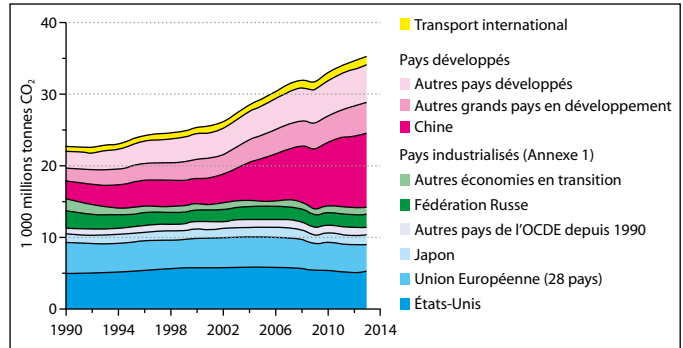


Figure 2

La production de l'énergie et les gaz à effet de serre : émissions de CO₂ selon les différents pays, de 1990 à 2014.

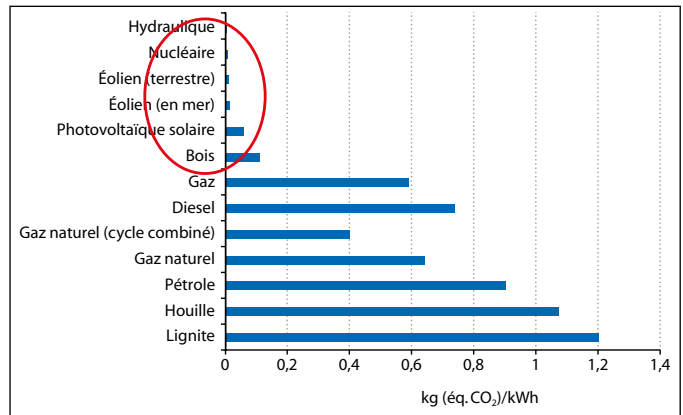


Figure 3

Émissions de gaz à effet de serre selon les filières énergétiques.

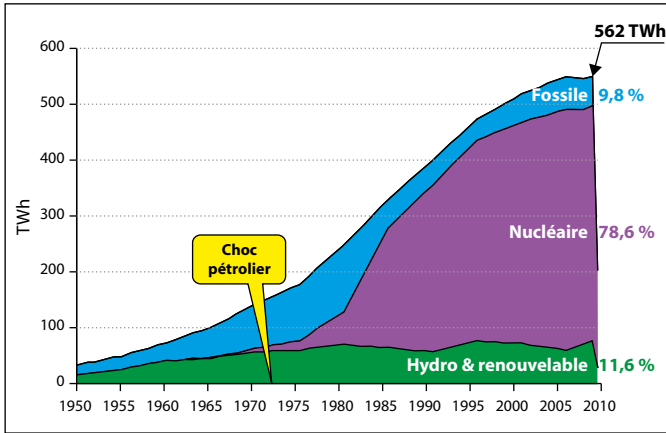


Figure 4

Évolution des filières énergétiques françaises et quelques dates clés : 1970 : appel d'offres pour 6 x 900 MWe (Mégawatt électrique) réacteurs à eau pressurisée (REP) Westinghouse ; 1973 : programme de plus de 28 REP-900 ; 1980 : renonciation à la licence Westinghouse ; années 1980 : déploiement de 20 REP-1300 ; années 1990 : déploiement de 4 REP-N4 ; 1992 : Lancement de l'EPR par NP-Int^{al}.

Source : IEA.

décidé d'utiliser autre chose que du pétrole et du charbon pour produire notre électricité : ce fut le plan Messmer qui développa le panorama dans lequel nous sommes actuellement, et dans lequel 75 % de notre électricité est d'origine nucléaire.

Pour proposer une évolution rationnelle des choses, il faut connaître le point de départ à partir duquel on doit évoluer.

Le **Tableau 1** résume les sources d'énergie qui peuvent être utilisées selon les besoins de consommation, raccordées au réseau ou hors réseau. Il est intéressant de voir que les besoins énergétiques à mobiliser pour une maison sont de l'ordre de 10 kW, ce qui peut être fourni par de gros panneaux solaires, mais ces derniers ne suffiront pas pour faire fonctionner une usine à électrolyse !

Ainsi, quand on parle des besoins énergétiques d'un pays, il faut prendre conscience que ce n'est pas le profil énergétique ni d'une population de retraités, ni d'une population d'individus qui se demandent comment ils vont occuper leurs loisirs ; c'est aussi le profil énergétique d'un pays qui a une industrie, et cette industrie peut être très fortement énergivore. Il faut prévoir une évolution de notre production de l'énergie qui prenne en compte des moyens et des conditions de vie qui sont différents, sans perdre de vue le fait qu'un pays n'est riche que quand il produit quelque chose. Certaines personnes rêvent d'avoir une industrie sans usine, mais c'est impossible ; il faut garder « les pieds sur Terre » et savoir qu'on a besoin d'énergie pour avoir des usines, et

Tableau 1

Sources d'énergie possibles en fonction des besoins énergétiques à mobiliser (du watt au gigawatt) et du profil des consommateurs raccordés ou non au réseau.

	Producteur	Consommateur (raccordé au réseau)	Consommateur (hors réseau)
1 W		Appareil en veille	Téléphone portable
10 W		HiFi, lampe basse consommation	Radio, PC portable
100 W		Ampoule, PC	Tournevis électrique
1 kW	Panneaux solaires	Radiateur, électroménager	
10 kW	Gros panneaux solaires	Maison	Traction V.E.
100 kW	Éolienne, micro-turbine, centrale photovoltaïque	Groupe froid usine Patinoire Grenoble (300 kW)	Tram (350 kW) Avion (150 kW A330 – hors propulsion)
1 MW	Éolienne	Éclairage Stade de France Hopital St Joseph	1 moteur de TGV
10 MW	Centrale solaire	Ville de 10 000 habitants Consommation électrique du CdG (16 MW – hors propulsion)	TGV
100 MW	Centrale thermique ou hydraulique	Ville de Grenoble : consommation 300 MW	
1 GW	1 tranche nucléaire, interconnexion France Angleterre (IFA 2000 – 2 GW)		
100 GW	Consommation de pointe en France (60 millions d'habitants)		

que c'est dans ce cas qu'on a un pays avec une activité créatrice de richesses.

1.4. Les différents plans énergétiques possibles

L'un des livres de David McKay, *Sustainable Energy – without the hot air*, présente les différents plans énergétiques possibles pour produire la même quantité d'énergie nécessaire par personne en tenant compte de la quantité d'énergie maximale que peuvent produire les différentes sources envisagées

(*Figure 5*). Le choix d'un panier énergétique ne dépend pas uniquement de considérations scientifiques, mais aussi de considérations politiques et économiques. Cependant, un point n'est pas négociable : ce que l'on produit doit être égal à ce que l'on consomme au moment où on le produit. Le stockage sur le lieu de consommation ou le transport vers le lieu de consommation permettent de relâcher cette contrainte. Ces conditions sont à prendre en compte pour faire l'analyse de n'importe quel mix énergétique proposé.

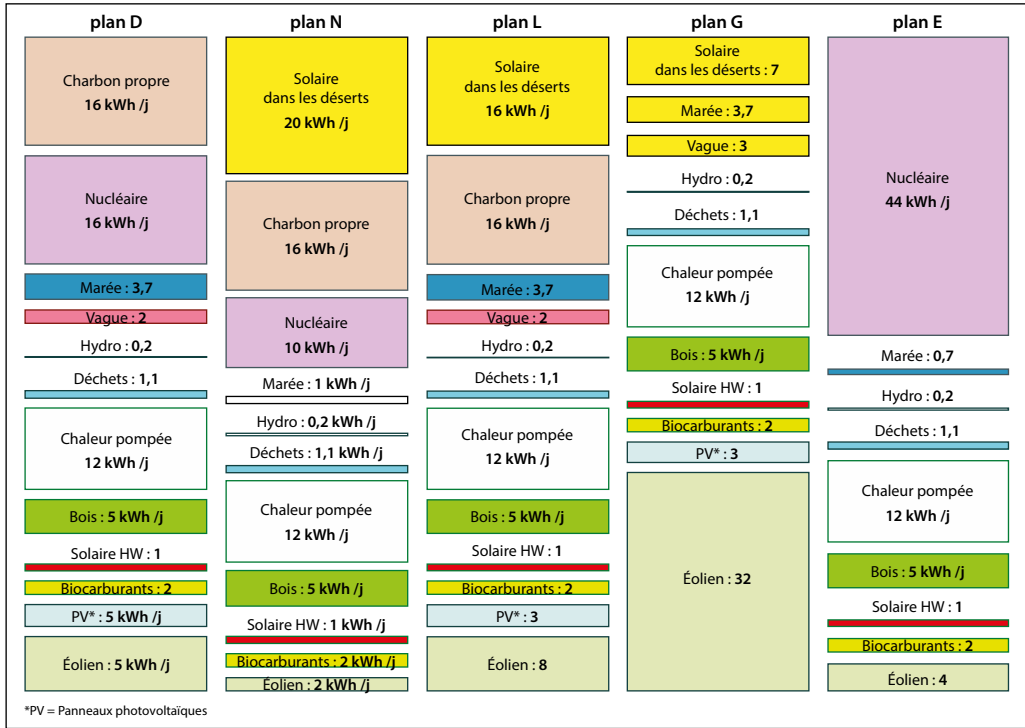


Figure 5

Les différents plans énergétiques possibles (faisabilité) d'après David McKay.

2 Les énergies renouvelables sont au cœur de l'actualité

2.1. La doxa

La doxa (ou préjugés populaires) est actuellement celle-ci :

- les sources d'énergie renouvelables sont inépuisables, sans déchets ; la source elle-même est perçue comme inépuisable et même gratuite (le vent, le Soleil) ;
- leurs coûts diminuent rapidement avec l'extension du domaine d'action et du développement ;
- on peut très rapidement faire des transitions énergétiques vers les renouvelables.

Mais ne rêvons pas et discutons scientifiquement et objectivement ces différents points pour nous aider à réfléchir :

- « *Les sources d'énergie renouvelables sont inépuisables* » : le vent est inépuisable, le Soleil est inépuisable, il est même gratuit, c'est vrai, mais le charbon est gratuit tant qu'on n'a pas essayé de le sortir, et il en est de même pour le pétrole. *La gratuité d'une ressource non exploitée est la règle, pas l'exception* ;
- « *Le coût diminue rapidement avec l'extension du domaine d'action* » : remarquons que ce n'est pas vrai pour le nucléaire

et que le prix à la source n'est pertinent que si le coût de la mise à disposition est négligeable ;

- une troisième remarque, extrêmement importante, est que l'inertie des systèmes industriels est à la propor-

tion des investissements présents, c'est-à-dire qu'on ne peut pas développer immédiatement un réseau de distribution qui puisse résoudre tous les problèmes. Il faut prévoir des investissements qui sont lourds, et donc il faut savoir qui va payer, connaître le modèle et l'échelle de temps. Quand on peut se brancher sur un réseau de distribution déjà existant, c'est un atout très fort pour un vecteur.

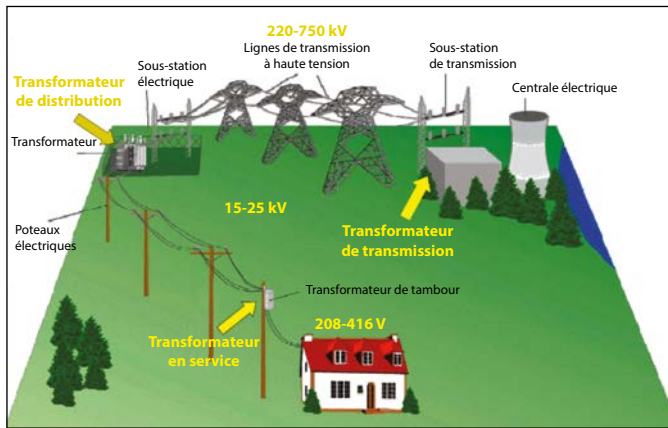


Figure 6

Distribution de l'électricité depuis la source jusqu'à son utilisation.

2.2. Le système de distribution de l'électricité

L'électricité est distribuée, depuis la source, par des lignes à hautes tensions, puis par un réseau de transport, et enfin un réseau de distribution (Figure 6).

2.2.1. Le Réseau de Transport de l'Électricité (RTE)

Le réseau de transport va des centrales aux abords des centres de consommation (en à peu près 50 000 km), l'interconnexion et la répartition connectent les différents centres et les zones d'utilisation, et une distribution permet ensuite d'assurer le transfert vers le client.

La Figure 7 représente deux cartes du réseau RTE français, selon la tension de l'électricité transportée.

2.2.2. Comment passer de la ressource existante à la ressource utilisable

Pour analyser le passage de la ressource naturelle à la ressource utilisable, il faut introduire la notion d'index d'intensité matériau d'une source d'énergie. Que l'énergie soit d'origine renouvelable ou fos-

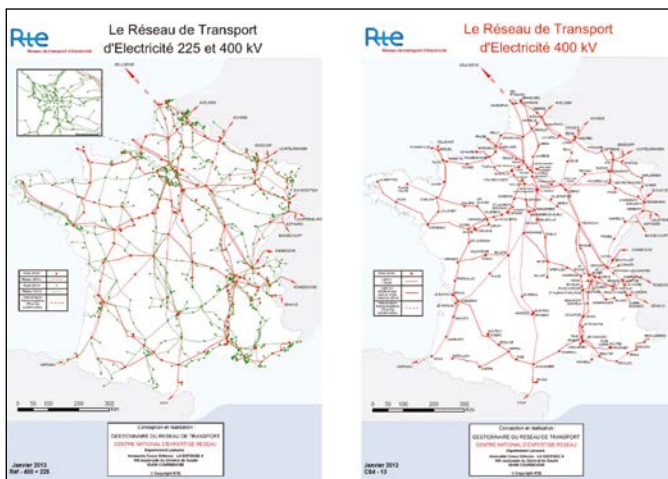


Figure 7

Le réseau de transport français d'électricité 225 kV et 400 kV (janvier 2013).

Source : RTE.

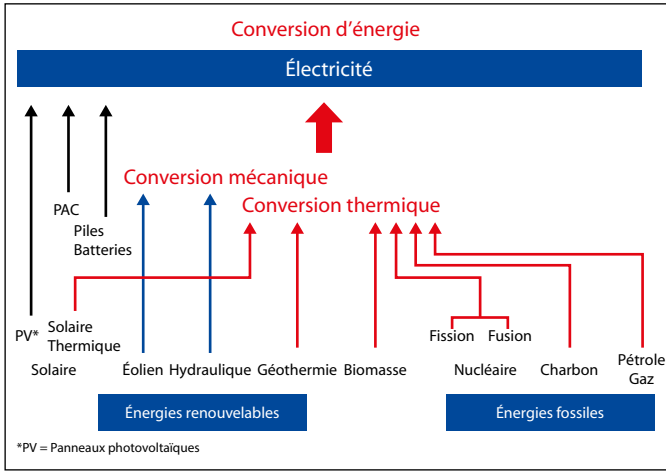


Figure 8

La production d'électricité : en partant des énergies renouvelables ou fossiles par les conversions mécaniques ou thermiques.

sile, elle est transformée par une conversion thermique ou par une conversion mécanique en électricité (Figure 8). Il faut donc connaître l'objet qui réalise cette transformation

La Figure 9 présente l'exemple d'une turbine à vent génération 6, de 6 MW, avec un rotor de plus de 150 mètres. Cet ensemble représente 1 500 tonnes d'acier et une quantité non négligeable d'aimants permanents contenant des terres rares. Depuis longtemps, on soulève le problème des quantités de terres rares contenues dans les aimants des éoliennes alors que c'est le moins grave comparé aux quantités d'aluminium, de cuivre et de béton utilisées.

La Figure 10 donne les index d'intensité pour l'acier (en tonne utilisée par quantité d'énergie produite), pour différentes sources d'énergie. Dans le cas du nucléaire, la quantité d'énergie produite



Figure 9

Turbine à vent génération 6 MW avec un rotor supérieur à 150 mètres (1 500 t d'acier), aimants permanents avec des terres rares (Nd, Dy, Sm, Gd ou Pr).

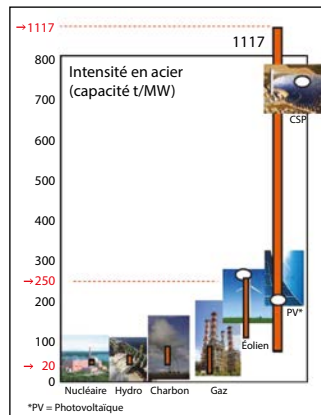


Figure 10

Index d'intensité des matériaux pour différentes sources d'énergie (nucléaire, hydraulique, gaz, éolien, photovoltaïque...).

par tonne d'acier utilisée est énorme, c'est pour cela que l'intensité nucléaire de l'acier est très faible même si les centrales nucléaires en utilisent beaucoup. Pour le solaire, au contraire, l'intensité matériau est absolument énorme parce que l'énergie produite est relativement faible pour des quantités de matière gigantesques.

Le scientifique a pour fonction de faire réfléchir avant de faire rêver. Les économistes adorent les exponentielles, alors ils extrapolent toutes les prévisions à 2050 grâce à des fonctions intéressantes qui sont les exponentielles « bondissantes », mais sans prendre en compte à combien de tonnes de matériaux consommés correspondent ces exponentielles en termes

d'acier, d'aluminium, de cuivre et de verre. La réalité apparaît sur la **Figure 11**, qui montre qu'en 2050, selon leurs prévisions, la quantité cumulée de ces matériaux qui seront séquestrés dans du photovoltaïque ou dans de l'éolien, si on croit ce qui est affiché par tous les gouvernements, y compris le nôtre, correspond à 2 à 8 fois la production totale mondiale de 2010. Ce qui veut dire pour que cela soit réalisable, pendant 2 à 8 ans il ne faudrait pas construire un seul pont, une seule voiture, un seul train ou un seul bâtiment ? Cela est peu vraisemblable !

Il reste trois possibilités : soit il faudra pratiquer un recyclage massif de matériaux (ce qui n'est pas impossible), qui n'ont pas forcément une très

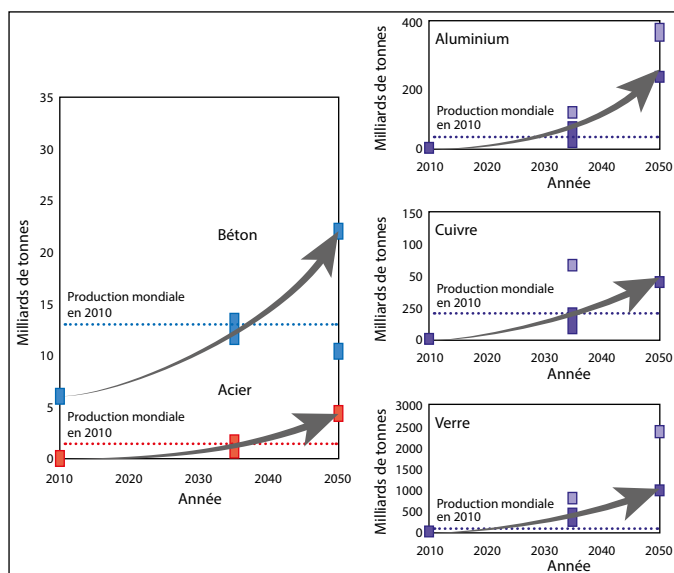


Figure 11

Besoins en matériau (aluminium, acier, cuivre, verre) pour les prévisions actuelles de développement du photovoltaïque et de l'éolien jusqu'en 2050. En 2050, la quantité cumulée des besoins serait de 2 à 8 fois la production mondiale en 2010 !

haute valeur ajoutée, soit il y aura une récession massive dans certains domaines. La troisième possibilité est que cette extrapolation n'est pas sérieuse !

Il est important de développer sérieusement les énergies renouvelables mais il ne faut pas les survendre. Ce que l'on voit et entend actuellement ressemble à la bulle qu'il y a eu autour de la télécommunication qui a éclaté le jour où quelqu'un s'est aperçu que si on prenait les business plans de toutes les entreprises de télécommunication, on s'apercevait que pour pouvoir les remplir il fallait que chaque personne suive 24/24h quatre chaînes de télévision en même temps sur trois iPhones !

2.2.3. Passage de la ressource utilisable à la ressource disponible

Le point suivant est le passage de la ressource utilisable à la ressource disponible qui pose le problème de l'inter-distance spatio-temporelle et le choix de la production centralisée versus la production décentralisée (Figure 12).

À nouveau, il faut savoir d'où on part car on peut parfaitement développer de nouveaux modes de production et de nouveaux modes de distribution de l'électricité, mais cela ne se fera pas de manière spontanée.

L'un des problèmes de l'éolien est sa fluctuation, qui peut être assez brutale, comme le montre l'exemple danois de la Figure 13. Il y a toujours la solution de combler le manque en demandant au voisin, mais ce n'est pas toujours possible,

notamment pour l'éolien, car le vent n'est rien d'autre qu'un flux entre une zone de surpression et une zone de dépression, et les grandes zones de surpression et de dépression sont distantes de 200 ou 300 km. Le maillage est donc à faire avec une zone qui va se trouver à 200 ou 300 km. Mais

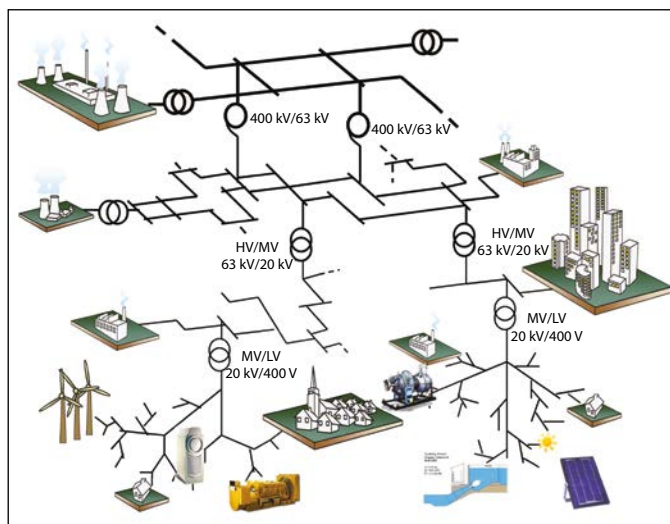


Figure 12

Production centralisée vs production décentralisée : développement de nouveaux modes de production et de nouveaux modes de distribution de l'électricité.

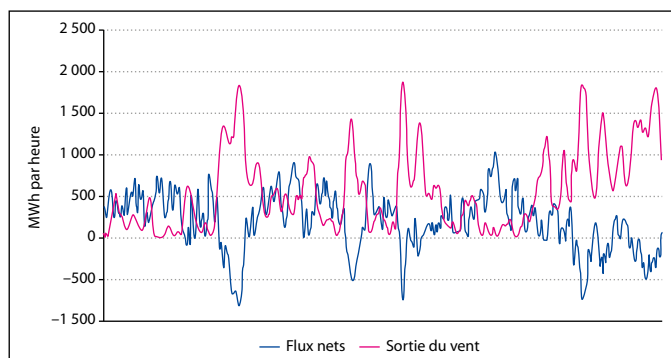


Figure 13

Flux nets (réels) d'une production éolienne d'électricité au Danemark en juillet 2007.

au moment où une quantité énorme d'électricité est produite par l'éolien, il se peut fort bien que le voisin à 200 ou 300 km ait lui aussi une quantité énorme fournie par l'éolien ou bien qu'il n'ait simplement pas le réseau adapté. Ce type de difficulté a donné lieu à des tensions extrêmement brutales entre l'Allemagne et la Pologne en 2014. L'intermittence n'est en outre qu'une partie du problème car si l'éolien est intermittent, il ne l'est pas de la même manière en Europe du Nord et sous les tropiques, ou bien à Singapour, ce qui nécessite à chaque fois d'analyser la configuration à mettre en place en termes de géographie et en termes de sciences de la Terre.

On peut rêver que d'autres sources permettront de compenser ces fluctuations et d'adapter la production

aux besoins (Figure 14), par exemple en faisant fonctionner les centrales nucléaires sans arrêt, ce qui est en fait impossible car il faut tenir compte de la fatigue du matériel comme du personnel.

3 Les caractéristiques des énergies renouvelables (EnR) intermittentes

Trois principales caractéristiques sont à prendre en compte pour développer les EnR :

- ce sont des « énergies fatales », c'est-à-dire qu'elles ne sont pas forcément disponibles lorsqu'on en a besoin, qu'elles dépendent des conditions météorologiques et qu'il faut prévoir d'autres moyens de production disponibles, pour produire quand cette puissance fatale n'est pas disponible ;

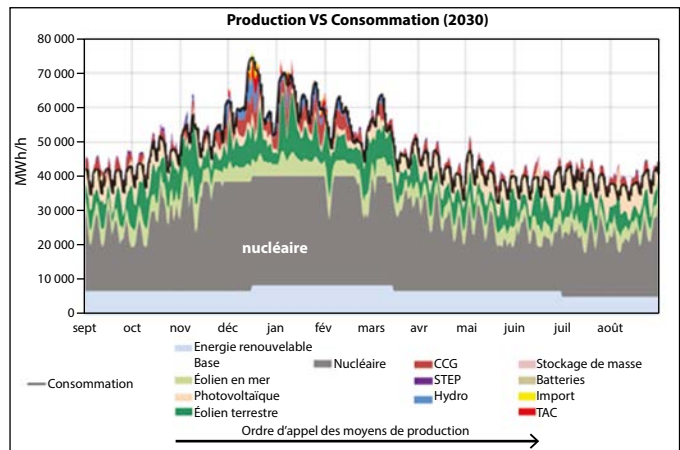


Figure 14

Adaptation de la production annuelle aux besoins : une vision à l'horizon 2030 de la compensation des fluctuations des énergies intermittentes par d'autres sources notamment le nucléaire.

CCG : capture et stockage du CO_2 ; STEP : station de transfert d'énergie par pompage.

– ce sont des énergies intermittentes, il faut donc pouvoir compenser les fluctuations. La variabilité est extrême : elle peut être d'une heure, d'une minute et même d'une seconde à l'autre ;

– ce sont des énergies qui sont diffuses, c'est-à-dire avec un faible rendement des surfaces occupées.

Ces caractéristiques font que les EnR ne fonctionnent pas seules et ne se substituent pas à des moyens dispatchables : il ne suffit pas de le souhaiter pour que cela soit réel.

3.1. Les EnR sont diffuses

Le **Tableau 2** montre, à partir de quelques exemples de densités énergétiques (en W/m^2) pour différentes sources, combien les EnR sont diffuses. Même dans le cas du solaire photovoltaïque à concentration, dans le désert, la densité énergétique n'est que de 2,5 à 15-20 watt par m^2 , soit environ cinquante fois plus faible que celle du nucléaire. Il est important de savoir qu'aussi longtemps qu'on aura besoin d'une énergie concentrée pour des industries électro-intensives ou pour des habitats urbains denses, la solution tout EnR ne sera pas une solution viable.

3.2. Intermittence et stockage

Comme les EnR ne se produisent pas forcément à l'endroit où l'on en a besoin et qu'elles ne suffisent pas toujours à l'endroit et au moment où l'on en a besoin, pour les inscrire dans le panel énergétique, il faut apprendre à gérer

l'intermittence, c'est-à-dire apprendre gérer le transport et le stockage.

Une solution peu réaliste consisterait à gérer les fluctuations de la consommation de manière autoritaire en planifiant la consommation et en prévoyant un pic de consommation le matin et le soir : « le pic des grille-pains et le pic des spaghettis ». Mais ce n'est pas très facile à mettre en application : on pourrait le faire en donnant des tarifs qui feraient qu'effectivement les nouilles coûteraient moins cher si on les mange à neuf heures du soir !

Les paramètres clés pour choisir les technologies de stockage sont de deux ordres :

- techniques : énergie, puissance et temps de réponse ;
- économiques : car le coût est encore élevé.

Un certain nombre de solutions de stockage énergétique ont été envisagées (**Figure 15**).

Pour les stockages de masse localisés, les plus simples et les plus efficaces sont les STEP (Station de Transfert d'Énergie par Pompage), décrits dans

Tableau 2

Densités énergétiques des énergies renouvelables.

Source	Densité énergétique W/m^2
Éolien	2,5
Plantes	0,5
Solaire photovoltaïque	5-20
Hydraulique piscine	3
Hydraulique au fil de l'eau	8
Solaire à concentration dans le désert	15-20

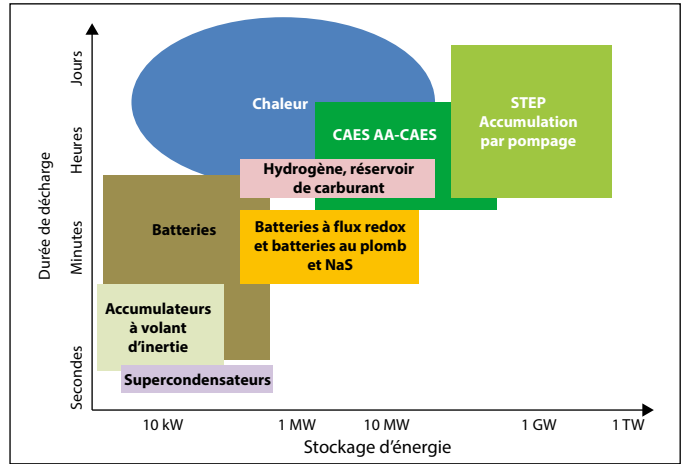


Figure 15

Comparaison des technologies de stockage : durée de stockage et puissance stockée.

le **Chapitre de S. Candel** dans cet ouvrage *Chimie et changement climatique* (EDP Sciences, 2016). Les STEP marins sont en pleine évolution. On peut néanmoins imaginer que l'acceptabilité de creuser des trous pour y stocker du gaz sous pression ne soit pas encore tout à fait triviale. La **Figure 16A** présente le schéma d'une STEP et la **Figure 16B** le schéma de fonctionnement de la turbine durant les phases de stockage et de restitution de l'énergie.

Il existe aussi des technologies de stockage non centralisé pour les cas où il n'est pas nécessaire de prévoir le stockage d'une grosse quantité d'électricité. C'est le cas du stockage électrochimique avec les batteries (**Figure 17**) ou du stockage à l'hydrogène. Se pose néanmoins la question du coût et des déperditions quand il faudra les transporter ou les rassembler à l'endroit où l'on aura besoin de l'énergie stockée.

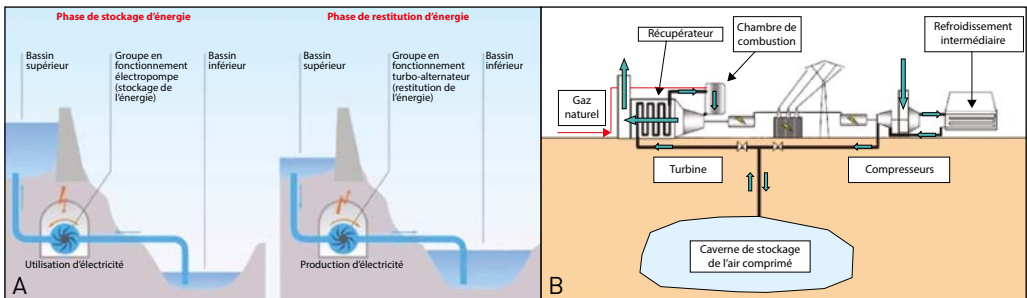


Figure 16

Les Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP), des solutions de stockage de masse localisées : A) schéma d'une centrale STEP ; B) schéma de fonctionnement d'une turbine.

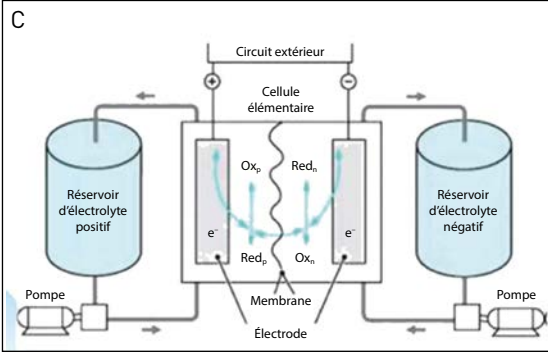
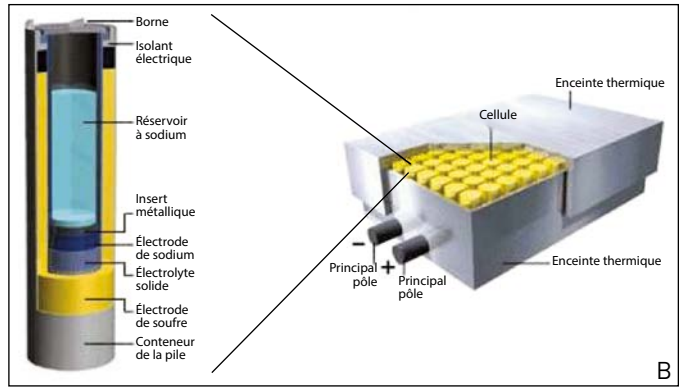


Figure 17
Exemples de stockage électrochimique pour le réseau. A) Stockage lithium-ion à l'échelle du réseau ; B) accumulateur au NaS (durée de vie jusqu'à quinze ans, > 4 000 cycles en conditions non critique (décharges inférieures à 80 %), rendement 85 %, puissances type : 1-4 MW ; C) accumulateur à circulation (flux redox) : utilisation possible pour stockage nuit/jour, puissance allant de quelques MW à une centaine de MW, rendement 65-75 %.
 Sources : A) www.grist.org ; B) NGK Insulator ; C) Techniques de l'ingénieur.

4 De la ressource utilisable à la ressource défaillante : les risques du blackout

Il est important d'attirer l'attention sur ce problème parce que cela pourrait bien devenir un problème de santé publique.

4.1. Défaillance généralisée du réseau électrique

La défaillance généralisée du réseau électrique est d'une extrême complexité parce que les réseaux sont à dimension européenne et qu'il faut un équilibre production/consommation. Un surplus d'électricité ou un manque d'électricité peuvent déstabiliser un réseau qui est soumis à de fortes contraintes : en rapport tension/intensité, en fréquence et en phase. Ces contraintes sont aggravées

avec l'arrivée des nouvelles sources, intermittentes, peu prévisibles.

4.2. Des conséquences potentielles dramatiques

Les conséquences potentielles de blackout peuvent être dramatiques. Elles ont un certain nombre de caractéristiques qui sont l'étendue géographique, la profondeur, la durée. L'électricité est partout et est utilisée à peu près par toutes les activités. Il y a un nombre impressionnant de systèmes dans lesquels elle intervient : la flexibilité, la distribution, les non stockables. Sans vouloir faire peur, un blackout sur l'électricité a des conséquences à craindre dans les domaines économique, industriel, sanitaires, de défense nationale, dans la cyber sécurité.

4.3. La désorganisation économique

Elle concerne l'absence d'éclairage, la signalisation, le transport... Durant la dernière grosse panne de New York en 2003, une quantité incroyable de personnes s'étaient trouvée coincée dans les ascenseurs. Cela entraîne l'arrêt de la distribution d'eau, l'arrêt des installations sanitaires, la rupture de la chaîne du froid (aliments, médicaments), la rupture du commerce (banques, magasins), la perte des outils de travail (PC, téléphones mobiles...), le stress psychologique, la défaillance des systèmes de communication, un ensemble de situations très désagréables.

4.4. Historique des blackouts

Le **Tableau 3** reporte quelques blackouts qui ont eu lieu en Italie, aux États-Unis et en Indonésie (qui concernait 100 millions d'habitants). Le plus important était en Inde : 670 millions d'habitants.

Quelques-uns ont eu lieu en France :

- décembre 1978, l'excès de la demande à une heure de pointe a entraîné la défaillance de la ligne THT (très haute tension) Nancy-Troyes avec

pour conséquence la chute en cascade de l'ensemble du réseau alimentant Paris ;

- décembre 1999, deux tempêtes sans précédent ont privé 3,6 millions de foyers d'électricité. Les équipes d'EDF ont mis plusieurs jours à rétablir le courant pour l'ensemble des foyers ;

- mars 2005, un hiver rigoureux et la vétusté des centrales thermiques ont privé 200 000 personnes d'électricité en Corse.

4.5. Les conséquences sanitaires

Le blackout corse n'a pas conduit à des dangers majeurs, parce qu'ils étaient relativement limités. La Corse n'est pas très grande, et EDF a l'obligation en cas de panne d'électricité d'amener les personnes qui ont un besoin impératif d'électricité dans des hôpitaux pour être soignés. Les hôpitaux eux-mêmes sont parfaitement équipés en groupes électrogènes. Le problème sanitaire n'est donc pas dans les hôpitaux mais pour les personnes qui sont chez elles avec des aides respiratoires, avec des dialyses, et, compte tenu de la pyramide des âges dans

Tableau 3

Historique des blackouts importants.

	Profondeur	Date
Italie	50 millions d'habitants	29 septembre 2003
États-Unis (New York)	55 millions d'habitants	14 août 2003
Indonésie	100 millions d'habitants	18 août 2005
Bésil et Paraguay	87 millions d'habitants	10 novembre 2009
Inde	670 millions d'habitants	31 juillet 2012

la population, ces risques ne vont pas décroître.

En conséquence, EDF peut raisonnablement gérer le problème s'il se limite à une ville, un canton, à la limite à un département, mais si cela se passe sur toute une région, EDF ne sera pas capable de le gérer.

Dans un tel cas, il faut être capable, au moins en ce qui concerne les personnes électro-dépendantes pour des raisons médicales, de pouvoir très rapidement avoir une manière pour leur faire tenir deux, trois, quatre, cinq jours,

le temps qu'on remette le réseau en marche. Car quand on analyse les grandes pannes de réseau, il n'est pas du tout exclu de mettre plusieurs jours, voire une semaine pour remettre un réseau en marche. Laisser un patient une semaine sans faire de dialyse est dangereux !

Donc un vrai défi industriel est de pouvoir disposer d'aides qui ne soient pas chères et qu'on puisse placer au bon endroit. C'est un problème de santé publique qui devrait être traité avant qu'on ne soit obligé d'y faire face dans l'urgence.

Le futur du mix énergétique français

Pour faire les bons choix pour l'avenir, il faut rappeler règles élémentaires :

- la première est que *décarboner l'énergie* est sûrement essentiel dans la transition énergétique et qu'il serait légitime d'y voir l'objectif majeur ;
- le transport, le logement et l'industrie sont trois aspects qu'il va falloir prendre en compte, et il n'est pas raisonnable d'imaginer le problème résolu simplement en parlant aux gens de ce qui les touche le plus directement dans leurs loisirs ;
- le vecteur électrique joue un rôle essentiel et il peut y avoir un rôle essentiel du vecteur hydrogène (voir le *Chapitre de P. Mauberger dans Chimie et changement climatique*) ;
- il y a clairement besoin d'un effort sur l'efficacité énergétique, aussi bien dans les transports que dans l'habitat : l'allégement des structures, l'isolation des bâtiments, les procédés économes en énergie ;

– l'électricité est difficile à stocker : elle doit être consommée où on la produit et quand on la produit, d'où l'importance des réseaux de transport et des stockages.

Enfin, n'oublions pas le « bon sens » dans toutes les démarches. On n'a jamais vu se résoudre un problème d'ingénieur en oubliant les conditions initiales, en ne respectant pas les conditions aux limites et en ne spécifiant pas les objectifs recherchés... :

– la situation actuelle en termes de mix est le point de départ et on ne peut évoluer qu'à partir de ce point de départ ;

– quels sont les critères d'optimisation ? Doit-on viser une optimisation qui minimise les émissions de CO₂ ou doit-on viser une optimisation qui minimise le coût énergétique ou qui minimise l'indépendance énergétique ? Ce n'est pas aux scientifiques de décider du poids respectif de ces différents critères ; en revanche, ils doivent rappeler aux gouvernements que tant qu'on n'a pas explicité ces différents critères et leurs facteurs d'échange, on ne saura pas dans quelle direction aller et progresser ;

– on ne peut rien faire sans tenir compte des lois de la physique qui sont non négociables.

Un mix énergétique n'a de sens qu'accompagné d'une trajectoire crédible de réalisation : quels sont les investissements nécessaires et qui paie ? Quels sont les changements d'habitude nécessaires et qui les impose ?

Beaucoup de choses relativement déraisonnables ont été dites ces derniers temps, notamment cette idée d'avoir une solution 100 % renouvelable en France. Citons, pour y répondre, le philosophe Alain : *« il y a des 'gloutons d'idées' dont la caractéristique est qu'aussitôt qu'on leur fait briller quelque opinion d'apparence raisonnable, ils se précipitent la bouche ouverte et avalent l'appât, l'hameçon et*

la ligne, en invoquant ensuite le droit à l'erreur commise de bonne foi... ».

Les énergies renouvelables jouent et joueront dans l'avenir un rôle important dans la transition énergétique. L'ampleur de ce rôle dépendra de son réalisme économique, et son développement se fera à mesure du développement du réseau et des dispositifs de stockage. Il ne faut pas sauter d'un avion en se disant « *j'aurai bien tricoté le parachute avant de m'écraser au sol* », il faut faire le travail en ingénieur, y aller progressivement et construire des trajectoires crédibles qui permettent effectivement de sortir d'une situation qui était probablement beaucoup trop dépendante d'une source et qui mérite de se diversifier rationnellement.