

Prix du baril et énergies renouvelables

Jean-Claude Bernier est professeur Émérite de l'université Louis Pasteur de Strasbourg. Il a été directeur de l'École de chimie de Strasbourg, puis directeur du Département de chimie du CNRS.

Deux questions se posent en reconstituant la saga des énergies renouvelables faites de chimie et d'innovation :

1 - Pourquoi des énergies renouvelables alors que des énergies fossiles bon marché sont disponibles ?

2 - Alors que les énergies renouvelables se sont développées lorsque le prix du pétrole s'envolait, que va-t-on observer quand ce prix s'écroule ?

1 Le prix du baril

1.1. Conséquence sur les recherches scientifiques

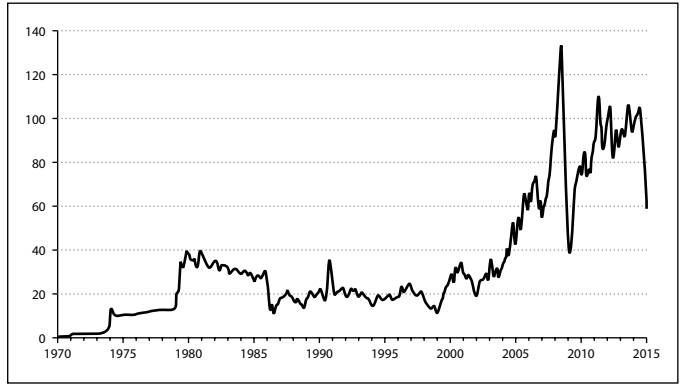
De 1970 à 2015, c'est plus de quarante ans d'histoire du prix du baril soumis aux aléas géopolitiques (**Figure 1**). Le premier choc pétrolier en 1974 fait passer le prix du baril de quelques cents à 10 dollars ; le responsable est l'OPEP (Organisation des pays

exportateurs de pétrole), qui limite la production et persiste en 1979 lors du second choc pétrolier lorsque le prix passe de 10 \$ à 40 \$. À ce moment, le monde politique et le monde scientifique se disent qu'il faut trouver une parade. La France lance son programme de centrales nucléaires. Mais brutalement après 1986, c'est la chute des prix avec quelques soubresauts de 1987 à 2002, avec une valeur moyenne de 20 \$ le baril, c'est le contre-choc pétrolier. Les débuts d'innovations sur le photovoltaïque et les énergies décarbonées sont mises en sommeil. Après 2002, le prix du baril subit une montée qui suit la demande, excédant à nouveau la production jusqu'au sommet de 2008, puis une stabilisation à quelques 100 \$, c'est le troisième choc pétrolier.

Cette histoire a des répercussions sur la recherche,

Figure 1

Chocs pétroliers et chute brutale du prix du baril en 2015.

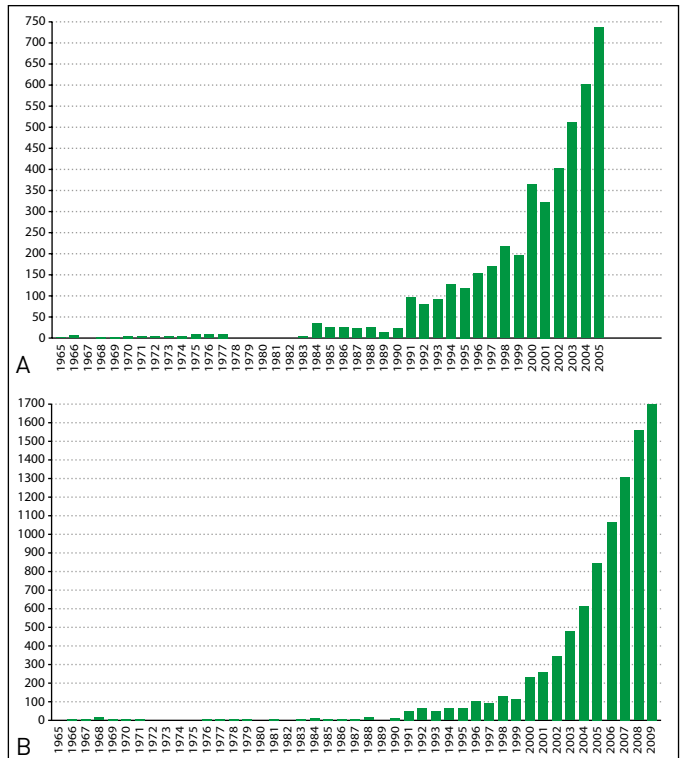


notamment en chimie, qui se décèle en regardant le nombre de publications scientifiques (Figure 2A et 2B). Le nombre de publications sur le silicium photovoltaïque, d'abord timide dans les années 1970, puis quasi nul durant le contre-choc, remonte dans les années 1990

et 2000, pas seulement poussé par le niveau de prix du baril mais aussi par une demande sociale et économique sur les énergies renouvelables, car le « global change » commence à tourner dans les esprits. Même chose pour l'hydrogène, sacré vecteur énergétique du futur

Figure 2

A) Multiplication parallèle du nombre de publications sur les propriétés photovoltaïques du silicium ; B) explosion parallèle du nombre de publications sur l'hydrogène.



dans les années 1970, mais avec un calme plat des publications qui ne redémarrent vraiment qu'après les années 1990 et 2000 pour les raisons déjà exposées.

1.2. La prise de conscience du « global change »

Après 1990, il commence à y avoir une prise de conscience d'un changement climatique non seulement chez les « climatologues » du GIEC¹ mais aussi dans le grand public et la communauté scientifique. Les relevés de concentrations de gaz à effet de serre avec les fameuses courbes en forme de « crosse de hockey » très médiatisées montrent une augmentation régulière depuis l'ère industrielle (1850) du gaz carbonique CO_2 , du méthane CH_4 et du protoxyde d'azote N_2O . Le CO_2 en particulier, directement issu de la

combustion du pétrole, atteint en 2015 un niveau de 400 ppm, très élevé (Figure 3).

Deuxième prise de conscience, les ressources fossiles de charbon, de gaz et de pétrole, accumulées en sous-sol par réactions biochimiques depuis des millions d'années, ne sont pas éternelles et risquent d'être galvaudées en quelques centaines d'années. Inévitablement dans l'histoire arrivera un moment où la demande dépassera la production et qu'un plateau, ou « peak oil », sera atteint, et il faudra bien trouver une solution palliative. Pour le pétrole traditionnel, le répit est de l'ordre de 40 ans, il recule depuis plusieurs années quand on fait appel aux ressources additionnelles comme l'huile de schiste et les sables bitumineux. Pour le gaz, c'est 100 ans, le charbon 200 ans, mais c'est inexorable un jour il n'y aura plus rien !

1. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) est un organisme intergouvernemental, ouvert à tous les pays membres de l'ONU. Il « a pour mission d'évaluer, sans parti-pris et de façon méthodique, claire et objective, les informations d'ordre scientifique, technique et socio-économique qui nous sont nécessaires pour mieux comprendre les risques liés au réchauffement climatique d'origine humaine, cerner plus précisément les conséquences possibles de ce changement et envisager d'éventuelles stratégies d'adaptation et d'atténuation. Il n'a pas pour mandat d'entreprendre des travaux de recherche ni de suivre l'évolution des variables climatologiques ou d'autres paramètres pertinents. Ses évaluations sont principalement fondées sur les publications scientifiques et techniques dont la valeur scientifique est largement reconnue ».

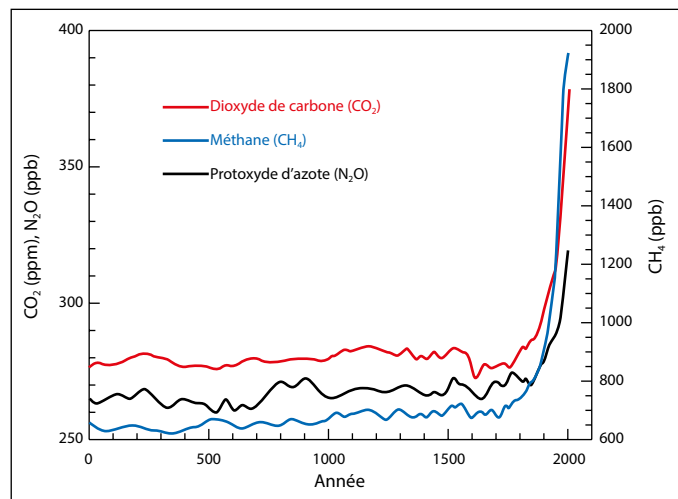
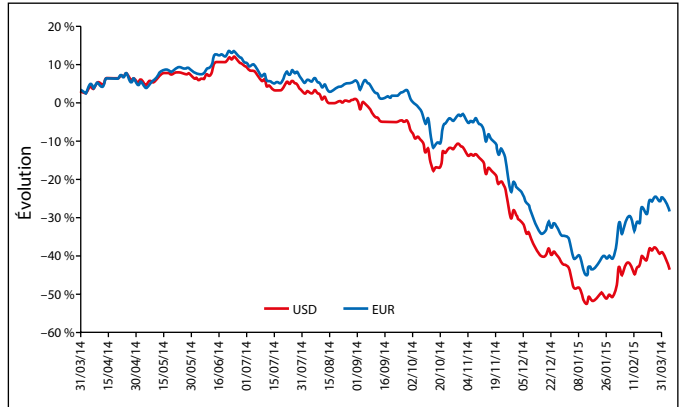


Figure 3

Variation des teneurs en CO_2 , en CH_4 et en N_2O depuis les débuts de l'ère industrielle.

Figure 4

Évolution du pétrole en dollar et en euros. On note une chute brutale : le contre-choc pétrolier.



1.3. La chute

Arrive fin 2014 et en 2015 de façon presque inattendue la chute brutale du prix du baril. Elle est expliquée après coup par les économistes, la demande de la Chine s'essouffle fortement, la production américaine en gaz et huiles de schiste gonfle l'offre. L'Arabie Saoudite ne veut pas baisser la sienne car elle veut garder ses marchés que la Russie et l'Iran lorgnent. La conséquence, une dégringolade du prix de plus de 60 %, de 100 à 40 \$, et en 2016 une valeur comprise entre 30 et 40 \$ (Figure 4).

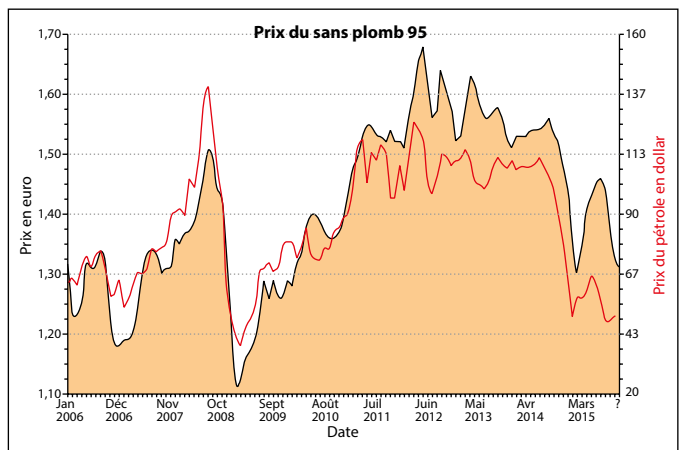
2 Les conséquences liées à la chute du prix du baril

2.1 Conséquences positives pour les particuliers et les économies européennes

Qui peut profiter de cette baisse ? D'abord nous les consommateurs. Le prix de l'essence diminue à la pompe. L'américain moyen avec son gros pick-up va économiser environ 1 000 \$ par an, le français avec son automobile plus petite et les taxes sur les carburants qui ne bougent pas, bien moins, environ 200 €. Les habitants qui

Figure 5

Évolution du prix du sans plomb 95 durant les dix dernières années.



se chauffent au fioul voient leur facture baisser d'environ 30 % par rapport à celle de 2014. Les compagnies aériennes, quoi qu'elles en disent, renouent avec les bénéfiques conséquences de la baisse des prix du kérosène. Les économies européennes en ont également profité, car les pays européens sont plutôt importateurs de pétrole. En France, en 2015, pour les entreprises, c'est de 2 à 3 milliards de bonus, à peu près autant que le CICE (Crédit d'impôt pour la compétitivité et l'emploi) (Figure 5).

En ce qui concerne la chimie et l'automobile, la compétitivité a permis une croissance continue du chiffre d'affaire et des marges. Car ce sont des industries exportatrices, et la chimie, à 90 % pour la chimie organique, c'est le naphta et donc le pétrole qui constitue la matière première : sa baisse fait aussi baisser les coûts (Figure 6).

2.2. Conséquences négatives pour la majorité des producteurs

Qui n'en profite pas ? Bien sûr, les pays producteurs de pé-

trole (Figure 7) ; le Venezuela où le PIB dépend à 80 % du pétrole, la Lybie, l'Algérie et même la Russie dont les exportations et ventes du pétrole et du gaz sont une part importante de l'économie. Pour ces pays, l'inflation et la baisse du niveau de vie sont effectives. L'Arabie Saoudite, avec ses réserves de pétrodollars, ne souffre pas trop mais a voté en 2016 un budget en déséquilibre.

Deuxième cible, les parapétroliers (Figure 8). Au-delà de 2 000 mètres, les forages profonds ne sont plus rentables, donc nombre de plateformes offshore s'arrêtent et licencient. Pour les pétroliers, on met la pédale douce sur l'exploration, et les sondeurs souffrent, Schlumberger et CGG, et même Vallourec, spécialisé dans les tubes des puits, engagé des plans d'économie.

Les pétroliers qui n'ont pas su se diversifier dans d'autres énergies, ainsi que les pétroliers non conventionnels, souffrent également. Les grands champs d'huile de schiste aux États-Unis d'Eagle-Ford ou Bakken

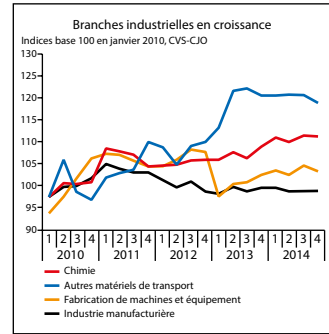


Figure 6

Le profit des économies européennes intimement lié à la baisse du prix du pétrole et à la dépréciation de l'euro.

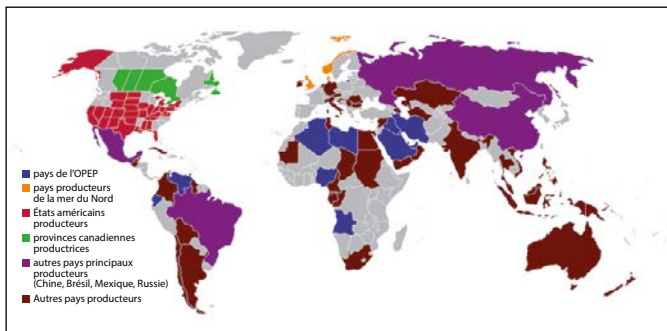


Figure 7

Les pays producteurs de pétrole.



Figure 8

Vers une récession des plateformes pétrolières.

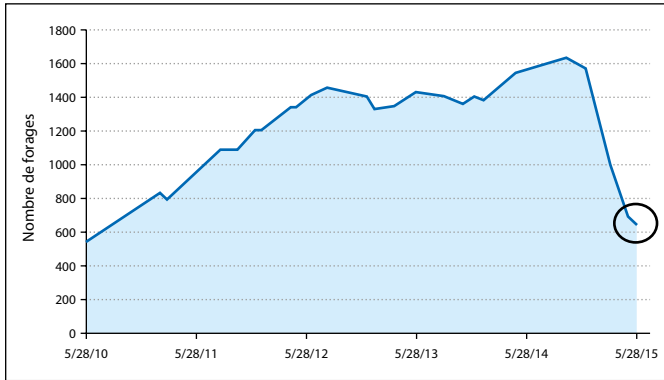


Figure 9
Recensement des forages exploités aux États-Unis. On observe une chute en 2015.

peuvent encore s'en sortir à 55 \$ le baril. Mais les petits producteurs qui ont emprunté pour installer des puits sur leurs propriétés sont obligés de produire même à perte pour rembourser leurs emprunts. Près de 60 % des puits d'huile de schiste ont fermé en 2015, et l'on peut craindre le pire pour 2016 (Figure 9).

3 Qu'en est-il pour les énergies renouvelables ?

3.1. L'essor de la production électrique

La question en 2015 est donc celle-ci : avec cette baisse

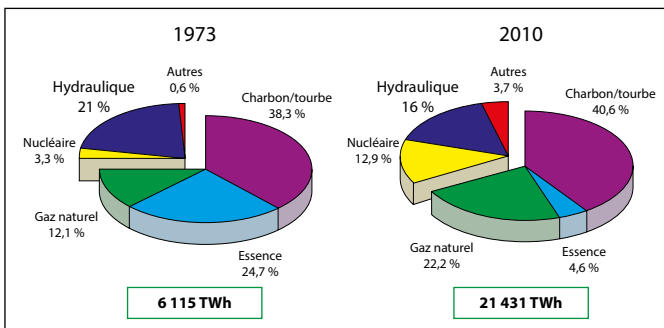


Figure 10
Évolution des sources de production électrique entre 1973 et 2010.

du prix du baril, allons-nous assister, comme après le contre-choc pétrolier des années 1980, à une baisse de l'innovation et des investissements dans les autres sources d'énergie ? Ou encore : à 30-40 \$ le baril, va-t-on tuer les énergies renouvelables ? (Figure 10)

Heureusement l'histoire ne balbutie pas toujours. La comparaison de la production électrique en 1973 et en 2015 montre de réelles différences. Nous sommes tous d'affreux consommateurs d'énergie et donc d'électricité, dont la production mondiale a été multipliée par quatre en quarante ans. Mais dans le même temps, la production par les centrales thermiques au fioul a été divisée par cinq, sa part est passée de 25 % à 5 %. Cette production est donc devenue marginale qui fait que ce nouveau « contre-choc » n'aura qu'une influence limitée. Notons cependant que c'est assez différent pour le charbon et le gaz, dont la part a bien augmenté.

3.2. Le photovoltaïque

Parallèlement, la production d'électricité photovoltaïque a bénéficié des baisses continues des prix des matières premières ; l'argent a baissé de 60 %, le cuivre également, et la production de silicium polycristallin, où la chimie intervient prioritairement, augmente régulièrement de près de 40 000 tonnes par an, avec un prix du silicium qualité photovoltaïque proche de 40 \$/kg. Les panneaux photovoltaïques ont bénéficié de ces baisses et de l'offre sur

le marché. Le watt crête (Wc) a pratiquement été divisé par trois en six ans, et il est proche de 1 \$ en 2015. Pour les particuliers, une installation de panneaux d'une moyenne de 3 kWc revient environ à 12 000 €, alors qu'en 2010 son prix avoisinait 20 à 24 000 €. Ces installations sont encore encouragées par l'État, qui oblige l'opérateur EDF à racheter les kWh produits à des tarifs avantageux qui sont modulés en fonction de la puissance et qui baisseront progressivement jusqu'en 2020 (Figure 11).

Les prix de rachat par l'opérateur sont en train de croiser les prix de vente qu'il pratique. C'est déjà fait en Allemagne où le prix pour les particuliers est soumis à la taxe EEGU qui est de 9,8 cc€/kWh, qui donne un prix moyen pour le consommateur de l'ordre de 28 cc€/kWh. En France, nous avons la taxe CSPE (Contribution au service public de l'électricité), qui est de 2,2 cc€/kWh, qui ne rapporte rien à l'opérateur mais à l'État pour encourager le photovoltaïque et l'éolien. Ces taxes qui doivent subventionner les énergies renouvelables ont rapporté 8 Mrds€ en Allemagne et de l'ordre de 6 Mrds€ en France, qui garde malgré tout un prix de 12 cc€/kWh, moins de la moitié du prix outre-Rhin.

Les moyens financiers des États et la baisse du prix des installations ont largement contribué aux investissements dans les moyens de production de l'électricité solaire ou éolienne. En Allemagne le photovoltaïque revendique une puissance installée de

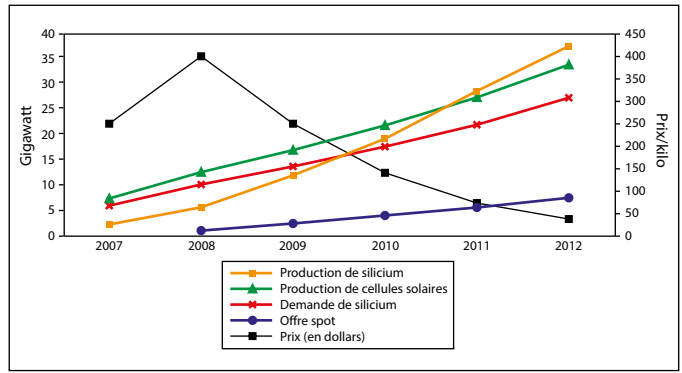


Figure 11

Évolution de la production et du prix des matières premières pour le photovoltaïque.

8 800 MW, produisant par an 157 TWh, soit l'équivalent de quatre à cinq réacteurs nucléaires. En France, 1,2 % de la production électrique métropolitaine est d'origine solaire, l'objectif pour 2020 est d'arriver à 8 000 MW installé. Ce sont évidemment les départements les plus au sud qui contribuent le plus à la production (Figure 12).

Dans le monde, les investissements programmés dès 2012 continuent (Figure 13), et de nouveaux sites démarreront

Figure 12

Parc photovoltaïque raccordé aux réseaux par région au 30 juin 2014.

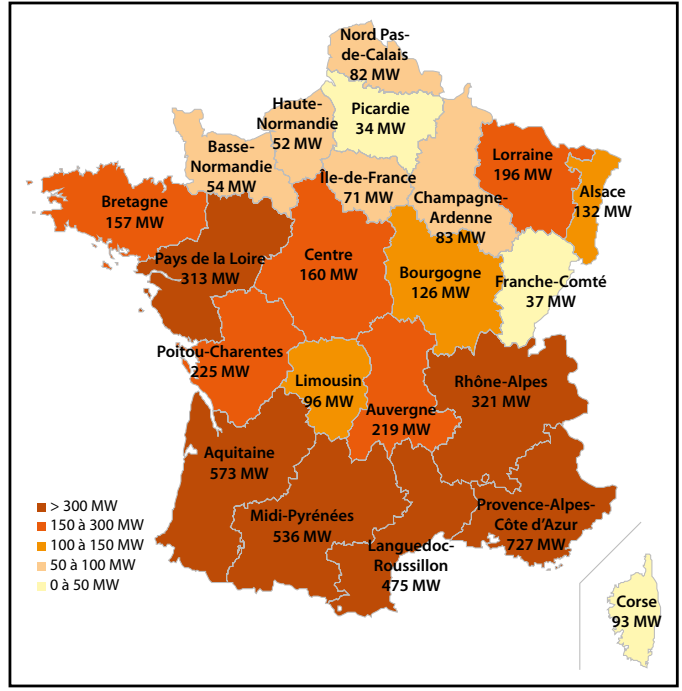




Figure 13

L'essor des champs photovoltaïques.

en 2016 et 1017, comme les grands champs en Californie et dans le désert de Gobi. En France s'est achevé en 2015 le plus grand champ photovoltaïque de 250 ha à Cestas près de Bordeaux.

3.3. L'éolien

Pour les éoliennes, les progrès de la chimie des composites permettent de mouler des pales très solides de plus de 60 mètres, pesant près de 16 tonnes. Les éoliennes de 5 MW culminant à plus de 200 mètres sont devenues courantes. De même, l'utilisation de moteurs à aimants à base de NdFeB a permis de miniaturiser les nacelles et d'améliorer le rendement des génératrices. Les parcs offshore (Figure 14) loin des côtes se multiplient devant la résistance des populations, souvent critiques quant à la modification du paysage sur Terre. Comme pour le solaire, la production en série a permis de faire baisser les prix d'installation et d'arriver à un

prix de l'ordre de 85 € le MWh terrestre et environ 150 € pour l'offshore. Le Royaume-Uni est particulièrement actif en ce domaine et atteint 10,8 % de la production.

3.4. L'intermittence

Il reste un problème à résoudre pour l'énergie électrique renouvelable : l'intermittence de production. Pour une génératrice éolienne, la puissance nominale n'est atteinte que lorsque la vitesse du vent est comprise entre 20 et 90 km/h, c'est-à-dire que le taux de charge effectif est de l'ordre de 20 % (22 % en offshore), correspondant à 1 600 h de fonctionnement par an (Figure 15).

Pour le photovoltaïque, il faut du Soleil, la production est donc interrompue la nuit et lors des passages de nuages. Le taux de charge est ici de 14 %, soit environ un fonctionnement nominal de 1 200 h par an.

Il faut donc que le réseau puisse s'adapter à ces variations parfois brutales et « lis-



Figure 14

Éoliennes offshore.

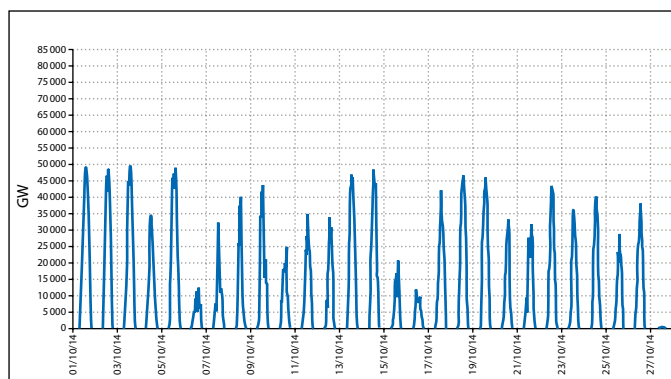


Figure 15

Intermittence de la production d'un champ d'éoliennes sur un mois.

ser » autant que possible la puissance véhiculée. Il y a donc en accompagnement des centrales thermiques au gaz ou au charbon auxquelles on peut faire appel pour pallier le déficit de production. Il est donc paradoxal de constater que les pays les plus vertueux en matière d'électricité décarbonée ne sont pas ceux qui ont le plus investi sur le photovoltaïque ou l'éolien.

En effet, si on compare les pays d'Europe (Figure 16), alors qu'en France l'électricité décarbonée atteint le taux de 92 % grâce au nucléaire et à l'hydraulique, au Royaume-Uni il atteint péniblement 30 %, et en Allemagne il est sous 40 %. Le cas de l'Allemagne est illustratif car, avec

la décision de fermer les centrales nucléaires et d'intensifier l'effort sur le solaire et l'éolien, le nombre de centrales thermiques a été multiplié, notamment pour brûler le charbon « sale », la lignite, ressource nationale bon marché qui produit 46 % de l'électricité outre-Rhin avec un bilan d'émission de CO₂ de 300 MT/an, à comparer aux 52 Mt/an pour la France.

Comment pallier les variations du réseau et l'intermittence de production ? Lorsque le prix du rachat du kWh par l'opérateur croise son prix de vente, il faut auto-consommer sa production. Pour le photovoltaïque, stocker la production du milieu de la journée et uti-

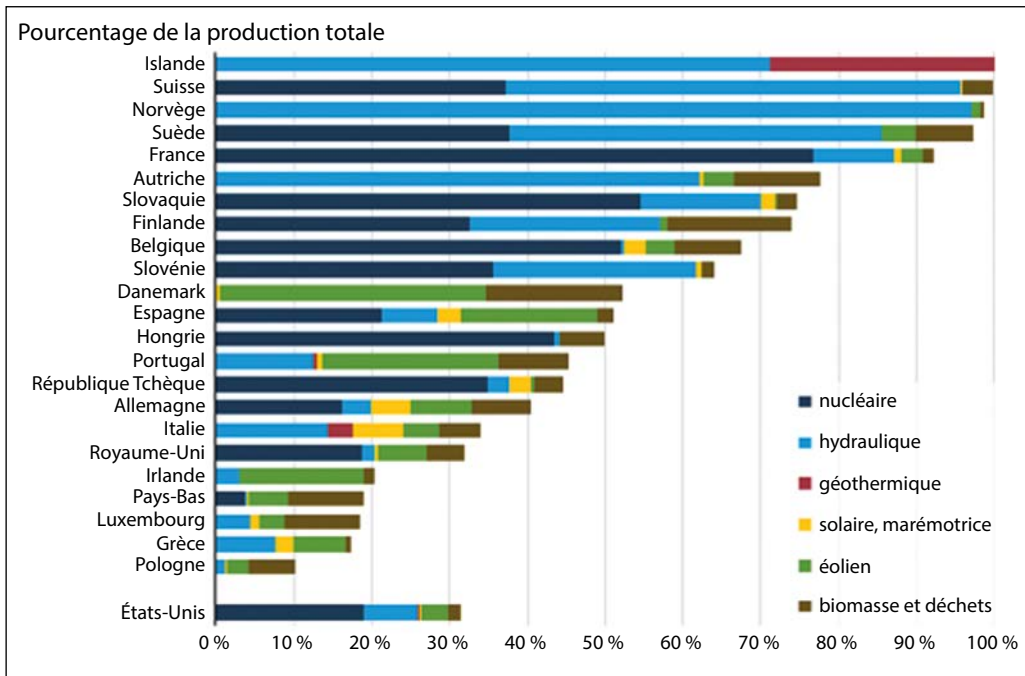


Figure 16

Les différentes sources d'accompagnement pour pallier aux intermittences.

liser l'énergie le matin et le soir (**Figure 17A**). C'est dans cette stratégie que Tesla aux États-Unis et Easyli en France proposent des systèmes de stockage et de gestion intelligente à base de batteries Lithium-ion pour les particuliers (**Figure 17B** et **C**). Ces systèmes encore coûteux vont sans doute être plus abordables dans le futur. L'autre solution pour des puissances plus importantes est celle de la centrale solaire thermique (**Figure 18**) : par concentration, on chauffe une masse importante de fluide à plusieurs centaines

de degrés qui constitue un volant thermique capable de chauffer la vapeur dans un échangeur et d'alimenter ainsi un générateur d'électricité classique qui fournit de l'énergie au réseau, y compris la nuit ou en l'absence momentanée de Soleil.

Enfin pour éviter les coupures catastrophiques du réseau interconnecté, se mettent en place les « smart grid », qui gèrent de façon quasi automatique les variations de consommation et de production sur le réseau. En France, la pose actuelle de compteurs Linsky est un début qui doit



Figure 17

A) Pour pallier les variations du réseau, on peut utiliser le moment optimal pour faire fonctionner les cellules photovoltaïques, grâce à des systèmes de stockage et de gestion intelligente (armoire Tesla (B) et armoire Easyli (C)).

Source : C) easyLi Batteries.

Figure 18

Centrale solaire Thémis.

Source : Wikipédia licence CC-BY-SA-3.0, David66.



permettre au consommateur et à l'opérateur de connaître en temps réel la consommation électrique (Figure 19).

3.5. Le transport

N'oublions pas que pour les applications de transport automobile, le pétrole est une source insolente de stockage de l'énergie. 1 kg de carburant = 10 kWh ! On peut penser que le véhicule du futur sera le véhicule électrique, mais avant d'y parvenir il y a encore du chemin à parcourir, et ceci pour au moins deux raisons :

- les batteries électrochimiques n'ont pas encore de capacités massives suffisantes ;
- suivant le mix électrique, l'économie en termes d'émission de CO₂ n'est pas toujours évidente.

Si en France le kilomètre électrique correspond à environ 11 g de CO₂, en Allemagne ce même kilomètre vaudra en moyenne 130 g de CO₂ comparable à un diesel économique. Par ailleurs, les carburants biosourcés de première génération, bioéthanol et ester méthylique d'huile végétale, à



l'efficacité énergétique parfois discutable, sont commercialisés en Europe et aux États-Unis, et abondamment subventionnés par les États pour encourager leur consommation par l'utilisateur. Les composés biosourcés pour la chimie organique ne représentent que 7 % de la production, avec un objectif de 10 % en 2020. Pour ceux-ci comme pour le bioéthanol de 2^e génération, la recherche de procédés performants susceptibles de faire baisser les prix de revient sont essentiels car s'ils étaient concurrentiels avec un baril à 80 \$, ils ne le sont plus à 40 \$!

Figure 19

La nouvelle ère : les compteurs Linky du réseau intelligent.

Source : Wikipédia licence CC-BY-SA-4.0, Ener356.

De l'avenir pour les énergies renouvelables

Il ne semble pas que les énergies renouvelables puissent subir un coup d'arrêt brutal consécutif à la forte baisse du prix du baril de pétrole, en témoignent les investissements records en 2015, et pour plusieurs raisons :

- la part d'électricité mondiale issue du pétrole est devenue marginale ;

- les prix du kWh solaire et éolien deviennent de plus en plus compétitifs ;
- l'innovation des techniques de fabrication des panneaux photovoltaïques et des pales et génératrices des éoliennes a encore de bonnes marges de progrès ;
- un large public a pris conscience que les ressources fossiles, elles, avaient irrémédiablement des limites physiques, et qu'il fallait trouver une alternative, même s'il faut accepter d'en payer le prix ;
- pour les transports, où les ressources fossiles vont rester encore indispensables pendant des années, il faut compter sur un fort effort de recherche et de développement.

Ce n'est donc pas la chute des prix du baril de pétrole qui va limiter la progression des énergies renouvelables, ce sont les verrous technologiques qui peuvent les freiner.