



High Wind Generation Essai sur l'énergie de demain

*«La vraie faute est celle que l'on ne corrige pas »
Confucius*

Laurent Kopp - Marine Champon

Préambule

L'énergie est, pour la société, comme une drogue qui provoque nuisances physiques (déchets toxiques en tout genre) et dépendance (aux conséquences considérables sur l'organisation sociale). Ivan Illich exposait déjà, dans un petit recueil paru en 1975, l'impossibilité de concilier croissance sans frein et équité, quelle que soit l'origine de l'énergie. Nous n'en parlerons pas ici. Chez les drogués la dépendance psychologique ne peut être traitée qu'après la désintoxication. Nous espérons que l'utilisation généralisée de l'énergie renouvelable provoquera la prise de conscience salutaire à cet effet.

Cet essai était réduit à l'origine à un dossier technique et financier à la recherche de partenaires pour monter une entreprise de production d'électricité par une nouvelle génération d'éoliennes utilisant des cerfs volants (Kite). Un éloge à la gloire des cerfs volants de puissance. Mais nous sous-estimions à quel point cette filière technologique était méconnue. Nous nous sommes donc préoccupés de mieux en expliquer les attraits. Mis à l'épreuve de nos interlocuteurs, cette tâche a fini par prendre une ampleur considérable. Il a fallu développer des argumentations plus complètes pour faire une comparaison des filières entre elles en définissant clairement les critères de cette comparaison. Puis nous avons réalisés qu'un grand nombre d'objections concernaient davantage l'ensemble des filières renouvelables plutôt que spécifiquement celle des éoliennes Kite. Et voilà pourquoi d'une anodine présentation technique, ce texte est devenu à la fois une analyse comparative des différentes sources d'énergie et un plaidoyer pour la défense de la filière renouvelable. La filière renouvelable est l'objet de débats houleux et trouver des critères objectifs et partagés n'est pas évident. Nous nous sommes intéressés aux raisons pour lesquelles cette filière a tant de mal à trouver sa place, surtout en France. Les défenseurs du nucléaire n'y sont sûrement pas pour rien mais il n'est pas inintéressant d'étudier leurs arguments et leurs critiques.

Notre thèse est la suivante : l'enjeu porte sur les véritables termes du débat : si l'on considère tous les paramètres – économiques, sociaux, environnementaux, sécuritaires – quelle est réellement l'énergie la moins chère, la plus rentable et la plus durable ? Les centrales Kite offrent à ce jour une option réaliste pour sortir du fossile et du fissile. C'est tout simplement la filière la plus économique. De son côté, le nucléaire devra évoluer d'une part pour « brûler »

les déchets qu'il a engendrés d'autre part pour mettre au point les filières « sans déchets ». Et de fait, le véritable coût de cette énergie devra être évalué de manière objective. Entre ces 2 sources d'énergie, d'autres existent et quelques unes sont passées en revue.

Enfin, deux autres enjeux de taille se sont imposés : la question de la recherche et des avancées technologiques encore nécessaires concernant notamment le stockage, et la question du partage de l'énergie, pour laquelle l'Europe est une chance !

Du développement durable

La croissance démographique et le « vivre mieux » dans un monde fini vont devenir inconciliables si l'on ne s'occupe pas activement de le rendre durable pour tous. Les alternatives sont fort peu sympathiques.

Débats passionnés, sombres prédictions, déclaration de foi, accusations mutuelles d'irresponsabilité, etc. : la conciliation s'est faite par la langue autour de l'expression « développement durable », mais tout reste à faire.

Insistons un instant sur « durable pour tous ». Il ne s'agit nullement d'une attitude idéologique surannée. Pour rendre le développement durable, une tentation des plus nantis est que le développement ne concerne qu'une fraction décroissante du monde, ce qui revient à dresser des frontières, exclure ou marginaliser des catégories sociales, raciales, religieuses, à l'image des anciennes sociétés moyenâgeuses. Nous ne parlerons pas de ce type de non solution. Nous discuterons seulement des options fraternelles.

Le partage est donc un enjeu important de la durabilité et parmi les multiples ressources soumises à la rareté (eau, nourriture, logement, territoire, énergie,..), il y a le travail. Celui-ci participe activement à la pérennité du tissu social. Les solutions qui peuvent être envisagées doivent prendre en compte cette dimension.

De l'énergie renouvelable

Cela a souvent été dit (et est rappelé notamment dans la préface de cet ouvrage), une énergie inépuisable résoudrait tous les problèmes. Avec une telle énergie, on peut faire tourner des processus industriels, dessaler l'eau de mer pour faire de l'eau douce et même fabriquer des carburants de synthèse à partir d'eau et de gaz carbonique, ce qui au passage permet de résoudre la question de l'effet de serre et du réchauffement climatique. Mais voilà, l'énergie est elle aussi limitée. L'énergie est au cœur du problème car elle est à la source du progrès industriel (Charbon, Pétrole, Gaz et Uranium), mais aussi des problèmes environnementaux

d'aujourd'hui. Les techniques énergétiques mentionnées sont toutes « non durables ». La question de l'énergie renouvelable est donc centrale pour assurer la continuité du service énergétique et sa relève technologique.

Mais quelles énergies renouvelables ? A quel prix ? Pour quelle efficacité réelle ?

La mise en place d'un système énergétique pérenne – c'est-à-dire qui laisse une large place au renouvelable et même toute la place à terme, si possible - est tout le contraire d'une régression et ne veut nullement dire moins de technologie, moins d'intelligence ou moins de travail. Au contraire. Plus globalement, il est anachronique aujourd'hui de militer pour des solutions "non durables", chacun étant parfaitement conscient du fait que des solutions « non durables » font payer à la société future les économies monétaires temporaires qu'elles procurent. Il suffit d'évoquer les tristes exemples de l'industrie de l'amiante, les scandales médicaux divers (sang contaminé, hormone de croissance, thalidomide, prothèse PIP) ou les pratiques agricoles abusives (farines animales, engrais, pesticides, hormones) pour comprendre que toutes ces pratiques sont finalement contreproductives.

A cet égard les protestations véhémentes suscitées par l'exploitation des gaz de schiste donnent un exemple éclairant d'une sensibilité citoyenne correctement informée.

Il existe aujourd'hui des sources d'énergies renouvelables réellement capables de fournir les mêmes services énergétiques que ceux remplis aujourd'hui par des sources fossiles et fissiles. Oui, on peut faire énergétiquement aussi bien que le nucléaire et durablement bien mieux ! Oui, une vision positive des nécessaires changements énergétiques, basée sur les évolutions technologiques, loin des vieux démons du « retour à la bougie » et des discours aux accents de « rationalisation forcée » existe !

Ce qu'on ne plante pas aujourd'hui ne poussera pas demain..

Voyage à Chieri

Lorsque, le 26 Septembre 2011, nous avons traversé le tunnel du Fréjus pour rendre visite à KiteGen, nous n'étions pas sûrs de ce que nous allions découvrir.

En arrivant à Sommariva Perno, nous découvrons cet igloo incroyable avec son mât géant pointé vers le ciel. Oui, ça existe vraiment et ça virevolte, et nous sommes arrivés quelque part, presque sur la Lune assurément !

Massimo Ippolito, inventeur génial de la centrale « Kite¹ » (cerf-volant en anglais) ou encore « centrale troposphérique », nous fait rentrer dans l'igloo et dans une discussion qui dure toujours et dont ce libelle est l'un des fruits.

La centrale Kite est une vraie rupture et, bien sûr, une source de remise en question, nous verrons pourquoi. Pour que le monde change, non seulement il y faut des propositions inattendues, des visions différentes qui viennent de l' « autre », mais aussi de la sollicitude pour l'entendre et le voir. Comme le soulignait George Bernard Shaw " *L'homme raisonnable s'adapte au monde ; l'homme déraisonnable s'obstine à essayer d'adapter le monde à lui-même. Tout progrès dépend donc de l'homme déraisonnable* ".

Et, si l'on ne croit pas au hasard, lorsque la chance passe, on ne la reconnaît pas.

Nous n'allons pas, ici, raconter Massimo, mais nous allons parler de son invention et de la façon dont elle peut nous aider à sortir de l'ornière nucléaire.

Ce qui nous amène à vous parler de ce que disent ces Messieurs.

¹ Les termes soulignés la première fois se trouvent définis dans le glossaire à la fin du texte

Préface

Mon avis sur la croissance économique ou démographique n'est pas utile au débat et n'a pas à intervenir. Je reconnais dans la croissance actuelle un problème majeur auquel l'humanité doit faire face, ce qui m'a stimulé dans la recherche d'une solution.

Mais les constantes de temps de ces problèmes sont en dehors de nos possibilités de contrôle. L'absence d'une énergie bon marché est la garantie d'un effondrement désorganisé ; à l'opposé, une source nouvelle d'énergie, en quantité non négligeable, nous donnera davantage de temps pour réfléchir et pour agir sur les politiques sociales.

Une énergie renouvelable bon marché résoudra élégamment les problèmes de nourriture, d'eau, de chauffage, de pollution et de déplacement. KiteGen² pourrait être capable de stopper le cours de cet effondrement, c'est mon seul objet d'attention et mon seul défi.

Une prise de conscience forte est nécessaire pour partager et valider cette vision en vue de créer une masse critique, un effort plus large, pour mettre en place et généraliser le déploiement de KiteGen.

Par ailleurs je suis convaincu que le caractère local et distribué de cette source d'énergie représente la principale composante de la solution sociale, parce que ces futures communautés locales qui exploiteront le KiteGen auront une conscience aigüe de ce que les flux énergétiques ont de soutenables.

Massimo IPPOLITO

Concepteur du projet KiteGen

² KiteGen est le nom du projet de centrale troposphérique qui a aussi donné son nom à la société KiteGen Research où ce projet est en cours de développement. Quand Massimo utilise l'expression « le KiteGen » cela signifie « la centrale troposphérique » ou « éolienne Kite ».

I. Au commencement était... le débat sur les énergies.

Les débats sur la façon de produire l'énergie et la façon de l'utiliser sont aujourd'hui au cœur de nombreux enjeux politiques et sociétaux. En toile de fond, figure la nécessité de concilier à la fois développement, accès à une énergie durable, disponible régulièrement, peu polluante et abordable pour une population mondiale en croissance forte, et allocation équilibrée des territoires entre agriculture, urbanisation et zones naturelles protégées.

Côté énergies fossiles, outre le discours chaque année renouvelé sur la fin annoncée du pétrole pour cause d'épuisement des réserves d'ici 50 ans, c'est de toute façon la question de l'accès aux réserves de pétrole et les enjeux géopolitiques qu'elle recouvre qui en feront à l'avenir une énergie incertaine. L'idéal consisterait à vivre sans pétrole pour ce qui est de la production d'énergie et les transports - et donc de trouver des alternatives durables dans ces domaines - et n'utiliser le pétrole que pour la chimie (à court et moyen-terme).

Côté nucléaire, la catastrophe de Fukushima de mars 2011 aura donné un sérieux coup d'arrêt à ses ambitions d'expansion et conduit à une nécessaire prise de conscience de son empreinte environnementale via notamment la question de la sécurité des installations et du traitement des déchets. Plus récemment, c'est la question du véritable coût du nucléaire qui est posée : d'une énergie présentée historiquement comme peu chère et à l'empreinte environnementale limitée (en apparence), on s'aperçoit aujourd'hui que si l'on intègre les coûts liés à la sécurité des installations et les coûts, dans le temps, du traitement des déchets, la facture n'est plus exactement la même³. Cette question du prix « vectoriel » des énergies est centrale et nous y reviendrons. Cependant, quelque soit ses dangers, le nucléaire ne va pas disparaître à moyen terme. Le naufrage du Titanic a seulement fait évoluer les règles de sécurité et les équipements des navires mais il n'a pas interrompu la navigation. Le nucléaire doit évoluer dans plusieurs directions à même, notamment, de réduire les déchets (Fusion) et la dangerosité.

Face aux filières dites « traditionnelles », le débat et les investissements financiers ou incitations fiscales se sont focalisés sur 2 types d'énergies renouvelables : le photovoltaïque et l'éolien « classique ». Un choix volontariste qui s'est accompagné d'investissements

³ Le rapport complet de la Cour des Comptes baptisé « Les coûts de la filière électronucléaire » est disponible sur le lien suivant : <http://www.ccomptes.fr/fr/CC/Theme-290.html>

importants à un moment où il fallait l'appui des pouvoirs publics pour enclencher une dynamique en faveur des renouvelables. Cependant, la production réelle de ces filières et plus largement leur impact en termes d'emplois suscitent aujourd'hui bien des questions.

Le photovoltaïque ou les effets pervers de la discrimination positive

Le bilan du photovoltaïque aujourd'hui, que l'on se place du point de vue efficacité énergétique, respect de l'environnement, coût ou création d'emplois ne plaide pas en sa faveur dans l'absolu, et moins encore lorsqu'on le rapporte aux moyens financiers investis et aux effets pervers engendrés. Le coût d'investissement d'une centrale voltaïque est comparable au nucléaire pour la même puissance crête, mais sa disponibilité, comprise entre 9 et 17 %, en font un moyen de production garanti extrêmement onéreux.

Que les incitations financières pour les filières voltaïques (comme pour les éoliennes classiques que nous détaillerons plus avant) aient été dictées par une certaine « discrimination positive » n'est pas choquant en soi et était même nécessaire, si l'on replace les événements dans leur contexte de l'époque : il s'agissait de créer un électrochoc et de favoriser des alternatives au pétrole et au nucléaire, quand ces filières et les grandes entreprises qui les géraient se gardaient bien de promouvoir toute alternative et considéraient encore les énergies renouvelables comme totalement anecdotiques à long-terme. L'effet positif recherché était le suivant : inciter les clients à acheter et les industriels à produire de mieux en mieux.

L'effet pervers n'a pas tardé à prendre le pas : les acheteurs de panneaux se sont avérés être des spéculateurs qui achetaient des terrains agricoles, les remplissaient de panneaux et vendaient l'électricité à un prix élevé. Côté fournisseurs, en lieu et place de pionniers d'une industrie de pointe en France et en Europe autour des technologies photovoltaïques, se sont développés des assembleurs de panneaux fabriqués en Chine à base de métaux précieux exploités en Afrique, puis transportés par voie maritime sur des milliers de kilomètres. Alors que tout ceci était censé reconstruire le tissu industriel français et européen, cela a en fait augmenté notre dépendance et fait progresser la technologie chinoise ! L'importation de panneaux voltaïques entraine pour 2 % en 2010 dans le déficit commercial des échanges avec la Chine. Aujourd'hui, seules 6 firmes fabriquant des cellules photovoltaïques se partagent 50 % du marché mondial : il s'agit des sociétés chinoises Suntech Power, JA Solar, Trina Solar et Yingly, de l'entreprise américaine First Solar et de l'allemande Q-Cells actuellement en

grande difficulté. La Chine a produit en 2010 près de la moitié des cellules photovoltaïques du monde, et c'est aussi en Chine que la majorité des panneaux sont assemblés.

Dans le même temps l'actualité européenne était émaillée de faillites dans le secteur, telle celle de Q-Cell fondée en 1999, 2400 salariés, et qui annonçait à l'été 2011 réduire de moitié ses capacités de production allemande pour augmenter celles de l'usine qu'il possède en Malaisie. Autres exemples, la faillite de Photowatt en France, reprise in extremis par EDF à 2 mois des élections présidentielles ou de Solon, en Allemagne, qui a déposé le bilan depuis la mi-décembre 2011.

Une pratique qui ne renforce pas les liens sociaux, en particulier en donnant du travail aux citoyens, n'est pas une filière durable. Mais surtout, ce qui est beaucoup plus problématique, c'est que le voltaïque n'est pas une filière compétitive. Non seulement son rendement énergétique est faible (15%) mais sa disponibilité est faible (9 à 17 %).

On discutera en détail un peu plus loin des conséquences de l'indisponibilité d'un moyen de production, mais la principale c'est que, si l'on veut disposer de 1 watt en permanence, et si la disponibilité est de 15 %, il faut investir d'une part, dans un moyen qui produit 10 watt quand il fonctionne à plein régime (il délivre 1 watt et stocke 9 watt) et d'autre part, dans un autre moyen de stockage qui emmagasine l'énergie pour les jours maigres (il doit absorber 9 watt et en restituer 1 pendant 85 % du temps).

Le coût du watt intermittent à 15 % est donc 19 fois plus élevé que le watt permanent. C'est le prix de l'intermittence, quelle que soit d'ailleurs la filière. Le voltaïque cumule le double handicap de l'intermittence et du faible rendement. En revanche, sa densité territoriale est correcte, à condition de se limiter à des petits territoires.

Le fait de promouvoir, de façon très ostentatoire, une technologie si peu efficace ne peut manquer de contribuer à discréditer la totalité de la filière renouvelable. A ce jour la filière voltaïque ne peut survivre que par les incitations fiscales, non seulement par les tarifs d'achat de l'électricité mais aussi par les aides à l'investissement. Le voltaïque n'est donc possible que parce qu'il est sous perfusion, et parce qu'il n'a pas à stocker son énergie en période de surproduction, celle-ci étant rachetée par le réseau. Si l'on intégrait le coût d'un moyen de stockage (Cf. les données économiques du projet MYRTE) on obtiendrait des coûts

d'investissement 50 fois supérieur au nucléaire et on conclurait que la seule application du voltaïque concerne les moyens de survie (voiliers, îles, déserts, etc..). Malgré sa faible efficacité énergétique et son coût prohibitif, le photovoltaïque satisfait les velléités robinsonnes de quelques privilégiés pour qui il peut constituer une énergie d'appoint, sur des espaces « perdus » comme le toit des maisons par exemple même s'il vaudrait mieux utiliser des panneaux thermiques que des panneaux voltaïques : l'investissement est moindre, l'eau chaude est d'un usage beaucoup plus quotidien, le rendement de conversion est bien meilleur et l'installation s'intègre bien dans le circuit thermique des habitations. Nous verrons que, pour la définition d'un système de production électrique, le vent est une bien meilleure option, mais certainement pas individuelle.

En dehors des habitations, il existe énormément de surfaces perdues sur les bâtiments et usines mais aussi des friches industrielles et territoires isolés. En un mot, le voltaïque ne pourrait-il pas valoriser ces surfaces mortes ? La réponse est non ! Réaliser des champs de panneaux photovoltaïques chinois pour uniquement faire profiter un spéculateur du coût de revente de l'électricité n'est pas un objectif acceptable : faut-il rappeler que ce profit est fait sur le dos de la collectivité pour une technologie sans avenir. Le citoyen peut légitimement demander compte de ces dépenses inconsidérées.

L'éolien « classique »

Par éolien « classique » on entend ici les éoliennes géantes disposées sur les crêtes des collines ou dans les plaines ventées ou encore en mer, constituées d'un mat de 80 m de haut au sommet duquel est disposé une turbine de 200 tonnes et un rotor de 100 m de diamètre. Leur puissance typique est de 3 mégawatt en fonctionnement nominal, c'est-à-dire pas souvent.

Leur disponibilité est à peine meilleure que le voltaïque (17 % en terrestre et jusqu'à 30 % en maritime). Le prix de l'intermittence à 30% est seulement de l'ordre de 5 alors qu'il est de 10 à 17 % pour le voltaïque. L'éolien, s'il se positionne mieux en terme de coût, pose en revanche des questions quant à sa densité territoriale : elle est 30 fois inférieure au voltaïque.

La faible valeur de la densité territoriale de l'éolien provient du fait que les éoliennes traditionnelles se « gênent » les unes les autres si l'on veut constituer un parc éolien. Cependant le critère est discutable, car l'éolien peut cohabiter avec une autre activité, par exemple l'agriculture, la pêche ou même.. le nucléaire. Si une cohabitation est possible

l'impression doit être nuancée.. Il n'en reste pas moins vrai qu'il n'est pas possible de faire coexister un grand nombre d'éoliennes au même endroit pour augmenter la puissance d'un parc éolien. Si par exemple on veut réhabiliter le territoire de 10 km², anciennement occupé par une centrale nucléaire, avec des éoliennes à turbines classiques, on ne pourra pas en mettre plus que 10 en moyenne, ce qui correspond à 30 Mégawatt crête (MWc), chiffre qui n'a rien à voir avec les 1330 MWc de la production nucléaire.

Par contre, si on veut mettre une éolienne de 3MWc dans chacune des 40 000 communes de France on disposera de 120 GWc., soit la puissance de 90 centrales nucléaires pendant 20 % du temps (mais bien sûr il faut nuancer la façon de s'y prendre).

Si on veut résumer la situation on pourrait voir les éoliennes comme des gardiens majestueux assez éloignés les uns des autres avec une activité agricole à leur pied.

Les investissements nécessaires pour le MWc Eolien maritime sont du même ordre que ceux du MW nucléaire (du moins les investissements officiels, on ignore totalement les coûts d'une catastrophe ou d'un démantèlement d'un site nucléaire).

On verra que les Kite ont une disponibilité bien meilleure, de l'ordre de 50% (donc un facteur 3 pour le coût de l'intermittence), une densité territoriale de l'ordre de 250 Wc/m² et donc 125 W/m² moyen.

Le développement de l'éolien est encouragé par des mesures incitatives similaires à celles du voltaïque, mais la technologie éolienne est probablement mieux appropriée aux collectivités qu'aux particuliers. Le tarif incitatif de rachat de l'électricité produite est mieux encadré (dans les ZDE, Zone de Développement Eolien, à 83 €/MWh en terrestre et 130 €/MWh en maritime) et par la loi NOME qui fixe les conditions d'achat à long terme. On peut faire des critiques similaires à l'effet de ces mesures, l'industrie éolienne française étant pour l'instant peu active. Il est vrai que le dernier appel d'offre sur les éoliennes maritimes en juillet 2011 a suscité beaucoup d'intérêt pour le sujet et que certains industriels français ont fait de fermes déclarations sur leur engagement dans une filière française, mais l'essentiel des dépenses de ces programmes se focalisera sur la logistique, les pays du Nord de l'Europe étant largement leaders dans la technologie éolienne en elle-même (pales, rotors et turbines).

Energie et développement durable : le TRE (Taux de Retour Energétique)

Un développement durable suppose que le moyen de production de l'énergie électrique fournit suffisamment d'énergie pour qu'on soit capable non seulement de le refabriquer mais de fournir suffisamment d'énergie pendant sa durée de vie. Le rapport entre l'énergie produite par un dispositif et l'énergie nécessaire à sa réalisation est ce qu'on appelle le TRE (Taux de Retour énergétique).

Lorsque le $TRE=1$, toute l'énergie produite est utilisée pour fabriquer le système de production d'énergie, il ne sert donc à rien.

Pour assurer un vrai développement durable il est généralement considéré que le TRE doit être supérieur à 10 [Réf. 3]⁴. Au début du siècle dernier, le TRE du pétrole était de 100 (il suffisait d'utiliser 1 MWh pour en extraire 100), il est aujourd'hui de 8 (avec 1 MWh on en produit seulement 8), ce qui signifie que le pétrole est beaucoup plus cher à extraire qu'il y a un siècle.

On peut avoir l'illusion que la vie économique continue normalement avec un TRE de 8, une grosse activité technique est maintenue dans la recherche de nouveaux gisements, mais le prix du pétrole va augmenter inéluctablement.

Les TRE du voltaïque (5) et de l'éolien classique (17) ne sont pas vraiment meilleurs que celui du pétrole d'aujourd'hui.

Le TRE du Nucléaire actuel est de 6, ce que reflètent assez bien les durées (150 mois) et les coûts monstrueux (6.6 G€ pour l'EPR,..pour l'instant) de construction et de recherche technologique, qui ne vont sûrement pas s'améliorer dans les nouvelles filières (Generation IV : Thorium, Sels Fondus, Fusion,..).

La vraie bonne nouvelle c'est que le TRE d'une centrale Kite a été évalué comme supérieur à 200. C'est la seule technologie connue à même d'assurer un développement durable.

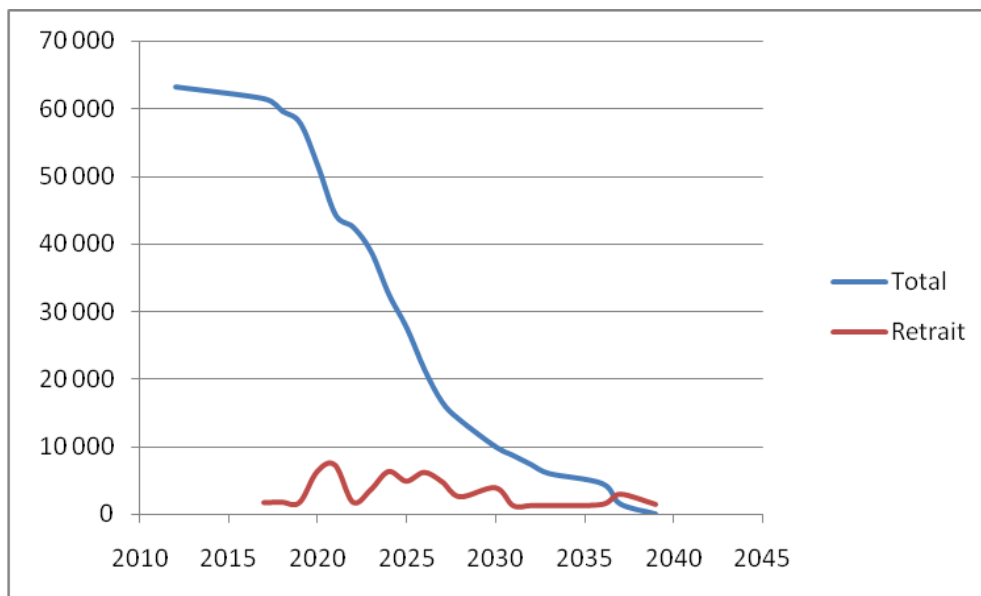
⁴ Voir références bibliographiques à la fin du texte

II. Le mix énergétique : une démarche dynamique

La sortie progressive du nucléaire doit être analysée comme la recherche d'un optimum qui permettra d'assurer la relève technologique vers le renouvelable en étant financé par le nucléaire vieillissant. A défaut d'adopter cette démarche, on se retrouve soit à investir massivement dans un traitement palliatif du nucléaire, qui permettra de prolonger la vie d'une vieille centrale de 10 ans pour un investissement énorme (3,7 G€/an), soit à investir massivement dans 11 EPR (66 G€) pour faire la substitution.

Il n'y a aucun risque de chômage pour les travailleurs du nucléaire car c'est seulement par cette filière qu'on pourra retraiter de façon économique les déchets existants et futurs. La stratégie de la filière doit être focalisée sur la production conjointe d'électricité et la réduction de durée de vie de ses déchets. Le tout avec le nombre adapté de réacteurs. Inutile de crier au loup, même le surrégénérateur pourrait avoir sa place dans cette démarche. Peut-être ceci débouchera-t-il dans 50 ans, via le projet ITER, sur une nouvelle relève avec des réacteurs à fusion (le Soleil sur terre).

Evolution de la puissance nucléaire à horizon 2040



Les courbes ci-dessus représentent la réduction de la puissance nucléaire installée en fonction du temps si on va jusqu'au bout de leur vie en respectant la planification initiale. La première centrale (Fessenheim) doit être retirée en 2017. En 2022 la puissance nucléaire restante sera de 42 GWc, au lieu des 63 GWc d'aujourd'hui. Les centrales nucléaires sont amorties sur 25-30 ans ce qui fournit une capacité financière très importante pour remplacer le matériel dépassé. Les 58 centrales ont coûté 220 G€ et le financement libéré jusqu'à 2022 sera de

l'ordre de 73 G€. Cette somme peut-être utilisée pour financer la transition vers l'énergie renouvelable.

La question est de savoir comment utiliser au mieux le capital libéré. Pour chaque GW nucléaire, on libère 3,5 G€, Cette somme peut être investie dans la réalisation du mix énergétique idéal.

Le voltaïque est adapté aux surfaces mortes à condition de réaliser aussi des équipements de stockage. Ce déploiement conjoint est le seul réaliste et il semble bien adapté aux toits voltaïques (en laissant de côté la question des coûts). Les champs voltaïques se font nécessairement au détriment de la biomasse, c'est-à-dire d'un procédé de régénération de l'oxygène et de production d'énergie renouvelable qui est très positif. Le déploiement voltaïque peut se faire au rythme des 300 000 logements neufs par an.

L'Eolien est clairement un équipement collectif qui peut être intégré à chaque commune à condition d'être associé à un moyen de stockage collectif. Une éolienne peut facilement cohabiter avec un terrain agricole.

Comme on le verra, l'éolienne Kite est probablement le plus à même de remplacer les installations nucléaires en termes de densité territoriale et en termes de coût. Elle peut être installée sur les territoires abandonnés par le nucléaire, et peut-être même en récupérer une partie des installations (réseau électrique par exemple) et des interdictions de survol.

Cette description laisse percevoir une organisation fractale de la production et du stockage de l'énergie électrique avec :

- Les toits voltaïques chez tous les particuliers (ou à l'échelle d'un quartier) et des moyens de stockage de type électrochimiques et supercapacités modernes intégrés dans l'habitation.
- A l'échelle communale, pour gérer les « trous de soleil » prolongés, des éoliennes 3MWc et des moyens de stockage plus industriels, y compris des centrales à biogaz, des générateurs à électrolytes et les échanges avec les autres 40 000 communes.
- Enfin à l'échelle industrielle il faut des installations centralisées classiques comprenant un mix de nucléaire, de centrales thermiques efficaces et d'éoliennes

Kites avec des installations de stockage corrélatives. En particulier au moins un lac
Emeraude⁵ qui pourra doubler la capacité de stockage actuel.

L'objectif n'est pas de choisir un nombre limité de sources d'énergie que l'on qualifierait « d'acceptable » au sens moral mais de choisir sur la base de critères permettant de comparer le vrai coût, le juste prix de chaque énergie. Or pour faire ce calcul, il ne suffit pas de regarder le prix facturé par l'EDF mais d'intégrer toutes les dimensions sociales, économiques, environnementales, sécuritaires, etc. dans le prix.

⁵ Les « Lacs Emeraudes » sont un concept inventé par l'ingénieur François LEMPERIERE, il s'agit d'atolls artificiels faisant office de barrage STEP. On en discute plus loin, il est décrit dans le rapport Birraux [2].

III. Le « juste prix » ou les vrais termes du débat sur les énergies

La question du « juste prix » des énergies est au cœur du débat : aujourd'hui les prix des objets et transactions, ne tiennent pas compte de la ponction faite sur la planète c'est-à-dire des éléments aux conséquences lointaines. Le prix bon marché d'un objet "Made in China" vient essentiellement des différences de traitement du coût social et de l'ignorance des coûts environnementaux.

Les négociations sur la taxe carbone sont symptomatiques de ces difficultés. En effet, concernant le pétrole, on parle de taxe carbone en fixant arbitrairement son montant, alors que son prix réel est le coût du recyclage du gaz carbonique. Le fait de ne pas fixer la taxe à ce niveau a pour conséquence de ne pas stimuler la recherche de solutions efficaces pour se débarrasser du gaz carbonique, ou plus exactement pour rendre l'oxygène à la nature. Les recherches stimulées sont celles qui consistent à enfouir le gaz carbonique, c'est-à-dire à cacher la poussière sous le tapis.

D'une façon générale ce qui doit régulariser les transactions, c'est le « juste prix » des choses. La recherche d'un optimum économique se fait facilement si on sait énoncer le coût d'une décision. Or on est frappé aujourd'hui, dans les débats sur l'énergie, par le caractère inconciliable des propositions des intervenants. Ces divergences viennent essentiellement du fait que les critères avancés se placent dans des registres différents où la comparaison n'est pas possible car elle fait intervenir des points de vue différents. La monétarisation des critères est une nécessité pour évaluer les décisions, et l'on peut d'ailleurs utiliser l'énergie comme unité de monétarisation (voir le TRE).

Un autre aspect de la question réside dans le fait que les critères douloureux non pris en compte dans le coût d'une technologie se présentent comme des événements à la fois lointains et incertains. Or, pour monétariser ce genre de phénomène, le mécanisme le plus simple est tout simplement celui de l'assurance. La difficulté est d'évaluer le montant de la prime, bien que les quelques accidents observés puissent déjà donner une idée des conséquences en termes monétaires. Esquiver le problème ne peut que faire grandir le sentiment de rejet, qui se traduira un jour dans les urnes.

L'accent est mis dans les débats sur les investissements financiers : mais ce ne sont pas les seuls qui doivent être pris en compte. Se scandaliser d'un investissement dans le renouvelable parce qu'il est 10 fois plus lourd qu'un investissement dans le nucléaire, c'est considérer que le nucléaire ne génère aucune nuisance ou que ces nuisances n'ont aucun coût. Cela est manifestement faux et il est normal que la société qui va devoir supporter les conséquences de ces dommages collatéraux s'en prémunisse sous forme d'une assurance liée au risque et à l'évaluation monétaire des conséquences. Cette pratique est courante dans de nombreux domaines. Ainsi, qui conteste aujourd'hui la nécessité des assurances automobiles ? L'expertise récente de la Cour des Comptes sur le nucléaire a fait bondir l'évaluation de son coût en faisant apparaître des nuisances sous évaluées.

Bien entendu cette façon de faire ne peut satisfaire la Nature et ses défenseurs qui exigent plutôt la grande mutation immédiate, mais si la prime d'assurance est suffisante la mutation se fera d'elle-même pour des raisons purement économiques. Et elle se fera à un rythme admissible. C'est l'exemple de la taxe carbone ou des déchets nucléaires. Ou encore très récemment celui du prix des carburants. Cependant les énergies traditionnelles ne sont pas seules à poser certaines questions ou obstacles à leur développement : les renouvelables ont également aujourd'hui des limites qu'il reste à franchir.

Gaz Carbonique : le cas du fossile

Si on admet qu'un développement durable n'est pas possible si l'on rejette du gaz carbonique, la conclusion est qu'il faut évidemment restituer l'oxygène à la nature. On ne peut pas le faire avec de l'énergie fossile, car il faut 3 fois plus d'énergie pour restituer l'oxygène à la nature que pour la brûler. On peut le faire par photosynthèse, mais l'opération de planter des arbres est bien sûr insuffisante.

On brûle chaque année en carburants fossiles ce que la nature a produit en 4 siècles. Qui peut penser qu'on plante l'équivalent de 4 siècles de forêt chaque année ? Il y faudrait 400 fois la surface de la terre chaque année.

On pourrait très bien imaginer un système de développement durable qui continue à brûler de l'énergie fossile mais à condition d'utiliser l'énergie renouvelable pour régénérer l'oxygène et fabriquer un carburant de synthèse. C'est tout à fait possible. Ce serait en fait une sorte de forêt artificielle. En plus, ce faisant on résout le problème du stockage puisque c'est le carburant de synthèse qui stocke l'énergie.

Globalement cette opération, que l'on ne sait pas encore faire, va doubler la dépense énergétique [Réf. 4] .

Déchets Nucléaires : le cas du fissile

Pour le Nucléaire on peut raisonner de la même manière ou presque. La filière nucléaire possède la propriété de transformer un produit naturel en un produit transmuté dangereux. C'est de la transmutation. Il n'est donc pas possible de le rendre à la nature, tel qu'il était avant, par une opération purement « chimique », mais ce que l'on peut faire, c'est le rendre à la nature sous forme inoffensive. Pour cela la solution connue, qui est de ne rien faire, a un coût très important car, dans l'éthique actuelle, on considère qu'il faut mettre ces matériaux en sécurité et en surveiller l'évolution pendant des milliers d'années, c'est-à-dire des durées de civilisation jamais observées auparavant.

Il existe d'autres options y compris des options préconisées par le nucléaire lui-même. L'idée générale est de proposer une filière de traitement nucléaire qui permet de transmuter les déchets en d'autres déchets dont la durée de vie est plus courte et donc le stockage moins coûteux.

La filière surrégénératrice en est un exemple qui fournit de l'énergie, mais la communication a manqué pour le moins de pédagogie et de subtilité. Ce comportement nous a coûté collectivement 12 G€ (Le prix du projet SuperPhénix).

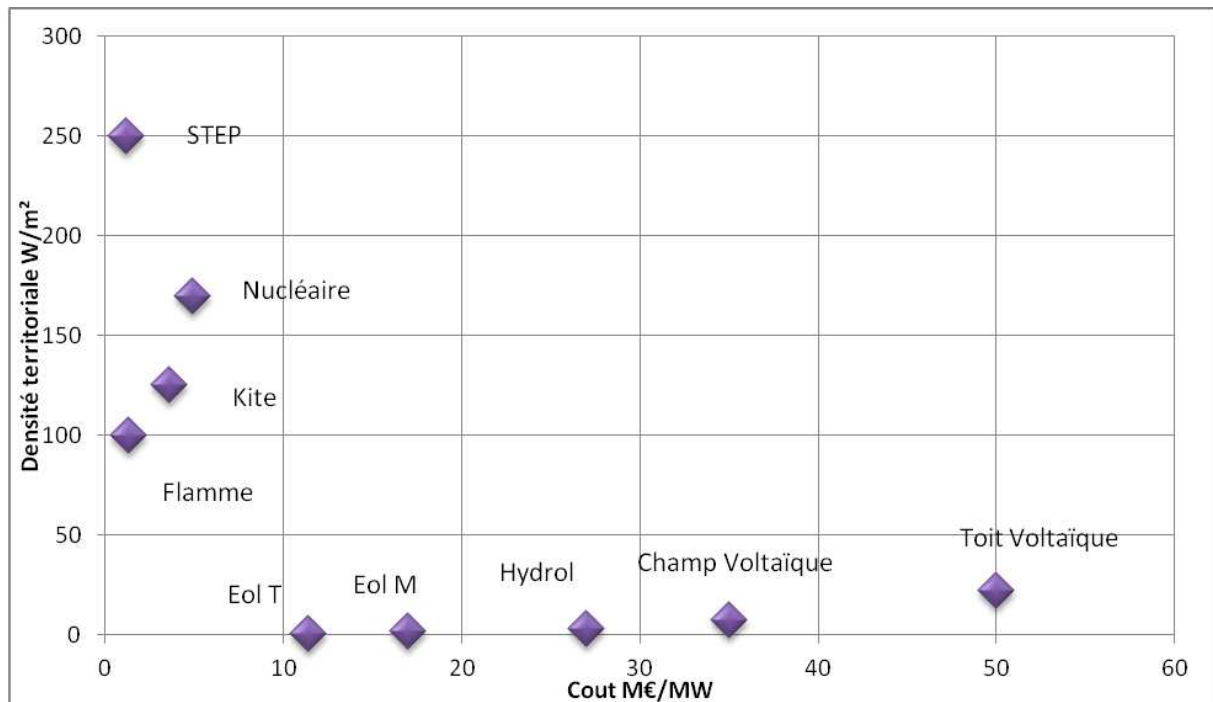
En tout cas on peut, et on doit, donner un coût à cette opération. Il faut dédramatiser le débat sur la dangerosité : à notre avis, le prix d'une taxe « nucléaire » devrait être tel que le nucléaire deviendra nettement moins compétitif, ce qui débloquera beaucoup de choses. C'est déjà ce qui commence à se passer pour l'EPR dont le coût d'exploitation prévisionnel va dépasser, à 90 €/MWh, celui de l'éolien terrestre classique. La seule façon d'avancer est de discuter en profondeur de la gestion des déchets radioactifs.

Indisponibilité : le cas du renouvelable

Concernant les renouvelables, le point qui pose problème est l'intermittence. La plupart des énergies renouvelables sont intermittentes, c'est-à-dire qu'elles ne fournissent pas de l'énergie en continue, ce qui limite leur puissance réelle à 10 à 50% de leur puissance crête.

On peut évidemment considérer que cette « nuisance » est moins catastrophique que celles engendrées par les filières classiques. Contrairement à ces dernières, l'indisponibilité n'a pas de conséquences directes sur la santé, mais elle a des conséquences économiques qu'on ne peut pas ignorer ici.

La figure ci-dessous représente chaque modalité énergétique par un point. L'axe horizontal représente le coût réel (investissement seul) du Mégawatt disponible en permanence (Le Méga watt « moyen » MW, pas le Méga watt « crête » MWc). Plus la filière est intermittente, plus le coût est élevé. Le voltaïque bat tous les records, c'est la plus ruineuse des filières. L'axe vertical correspond à la densité territoriale, c'est-à-dire le nombre de watt que l'on peut produire sur 1 m² de territoire. Plus la densité est grande moins la filière est envahissante, c'est le cas des Kite, du Nucléaire et des barrages STEP.



- Pour comparer plusieurs moyens de production d'électricité il faut le faire à service équivalent, et notamment ici, la fourniture permanente d'électricité. On peut alors appliquer des coefficients de pondération pour comparer les filières. Par exemple, le nucléaire coûte 3,5 M€/MW mais est disponible à 85 %, la pénalisation d'indisponibilité est de 1,4 pour la production et 0,2 pour le stockage. Le prix du MW nucléaire est donc de 4,9 M€, auquel il faut ajouter 0,2 MW de stockage.
- Les installations voltaïques sont beaucoup plus chères. Le projet géant (abandonné) d'EDF EN en Camargue coûtait 650 M€ pour 261 MWc soit 2,5 M€/MWc mais la pénalisation d'indisponibilité dans cette région (17%) donne une pondération de 8,8 pour la production et 7,7 pour le stockage, ce qui fait monter le prix de la production seule à 22 M€/MW. La situation est ici très favorable pour des installations de taille

plus raisonnable : l'investissement est plutôt de l'ordre de 3,5 M€/MWc et 35 M€/MW pondéré et il faut prévoir un moyen de stockage de l'ordre de 9 MW.

- La pénalisation est fortement réduite par l'augmentation de la disponibilité. Pour la même quantité d'énergie produite, il vaut mieux investir dans plusieurs moyens de production dont la disponibilité est décorrélée que d'investir dans une installation centralisée. Cet argument joue aussi bien en faveur de l'utilisation de plusieurs filières multimodales: par exemple voltaïque et éolienne) que sur leur dispersion territoriale (foisonnement). Le parc des 58 centrales nucléaires dont la disponibilité individuelle est de 85 % est un système de production continu grâce au foisonnement.
- L'Eolien terrestre avec une disponibilité moyenne de 17 % et un coût de 1,3 M€/MWc sera donc pondéré à 11,4 M€/MW ; c'est un peu moins cher que l'Eolien maritime à 16 M€/MW dont la disponibilité est de 30% et un coût de 3,5 M€/MWc, comparable au nucléaire. Par contre il faudra stocker 7,7 MW en terrestre contre 3,5 MW en maritime. Si on imagine un coût de stockage de l'ordre de 1M€/MW, cela donne des coûts finalement très comparables, pour les deux filières. Comme par ailleurs aller en mer génère moins de conflits territoriaux, c'est une démarche qui semble aller dans le bon sens.
- Les centrales à flamme (centrales thermiques à Gaz, Charbon ou Fuel) sont très bien placées en termes d'investissement mais leurs coûts d'exploitation font intervenir de carburants fossiles (au coût croissant) et des émissions de gaz carbonique dont le coût n'est pas comptabilisé correctement pour l'instant. Il en est de même pour les centrales nucléaires pour lesquelles le coût d'exploitation ignore aujourd'hui les coûts induits par la gestion du risque et des déchets à long terme.
- Parmi les renouvelables, la filière Kite est la seule à sortir du lot. Elle est économique, bien mieux que les éoliennes terrestres en raison d'une disponibilité de 50 % au lieu de 17 %. Sa densité territoriale est comparable à celle du nucléaire.

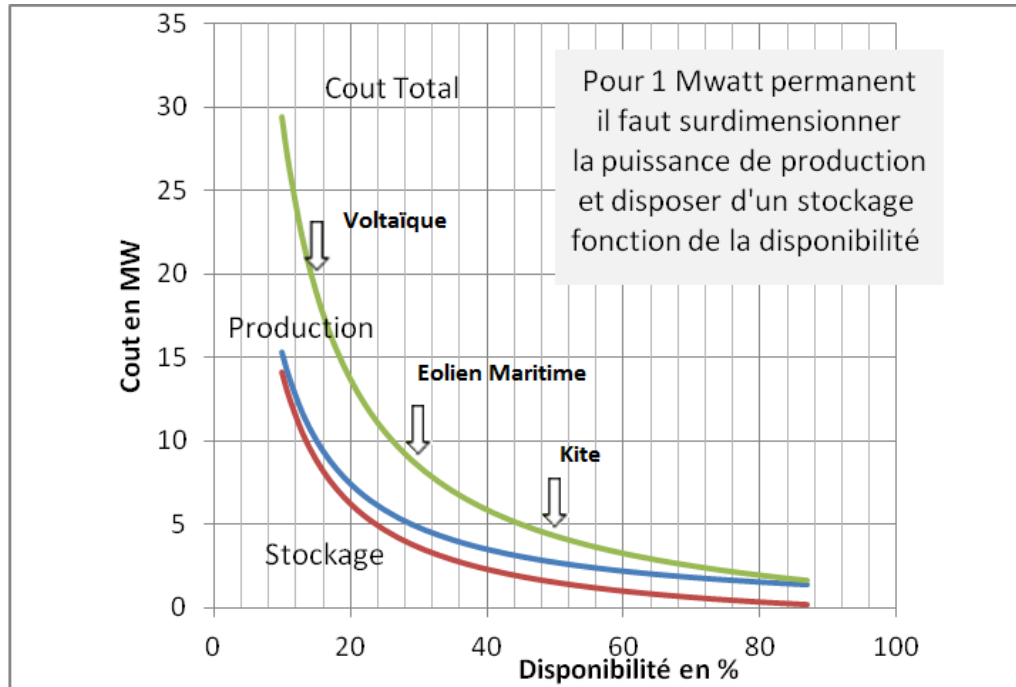
IV. Les enjeux de demain : le stockage et le partage

La Nature est le domaine de l'intermittence, de la respiration et de l'alternance des jours, des saisons, des récoltes. Le monde industriel quant à lui ne le supporte pas ; l'intermittence pour lui signifie immobilisation non productive de capital et s'assimile à une panne, un dysfonctionnement majeur. Très souvent, les dispositifs techniques ne sont tout simplement pas conçus pour pouvoir s'arrêter (une centrale nucléaire par exemple).

Le monde agricole s'en est accommodé et offre l'exemple d'une intermittence « bien vécue » où l'on sait exploiter positivement tous les temps « morts »... ou plutôt libres !

Le coût de l'intermittence

La figure ci-dessous représente les conséquences quantitatives de l'indisponibilité d'un moyen de production (il en a été plusieurs fois question dans le texte sous les termes de « pénalisation », « surcoût » ou « coût pondéré »). L'axe horizontal correspond à l'indisponibilité en %, et nous y avons positionné les chiffres correspondant aux diverses modalités dont nous avons parlé plus haut (Voltaïque, Eolien Maritime, Kite) . L'axe vertical correspond à un coût mesuré en MW.



Il y a 3 courbes, associées à la fourniture permanente de 1 MW. La plus basse dimensionne le moyen de stockage en MW nécessaire pour fournir 1 MW pendant les périodes d'indisponibilité. La courbe intermédiaire dimensionne le moyen de collecte en MW pour alimenter à la fois l'utilisateur et le moyen de stockage pendant les périodes de production. La

courbe supérieure est la somme des deux précédentes en MW, même si le moyen de collecte et le moyen de stockage sont de technologies très différentes.

Exemple : Sur ces courbes on peut lire : Pour obtenir 1 MW en continu avec un panneau voltaïque dans le Sud (disponibilité 17%), il faut disposer d'un moyen de collecte de 10 MW et d'un moyen de stockage de 9 MW, pour un total donc de 19 MW. On dit donc que le coefficient de surcoût est de 19.

Stockage et partage sont les réponses structurelles à l'intermittence et elles sont toutes deux exploitées par le système énergétique actuel pour gérer les fluctuations de la consommation électrique. Le stockage est une production différée dans le temps et le partage une production délocalisée dans l'espace. Stockage et partage supposent un réseau de transport électrique, et dans le cas du partage, une interconnexion à très grande échelle.

Le stockage

Le principe même de la filière renouvelable est d'associer un moyen de collecte renouvelable qui puisse être « biberonné » par un moyen de stockage (à vrai dire cela n'est pas absolument indispensable, une approche « paysanne » est aussi possible, avec des process industriels tolérants à l'intermittence). Aujourd'hui, on se contente de mettre l'énergie à disposition du réseau et d'utiliser les moyens standards de stockage du réseau. Comme on sait, on ne dispose aujourd'hui que des STEP qui sont dimensionnés pour gérer les pics de consommation, mais tout à fait insuffisants pour gérer un système de production renouvelable généralisé. Tant que la contribution du renouvelable reste marginale cette situation ne pose pas problème, mais cela ne sera pas toujours le cas. L'absence de solution de stockage empêchera à brève échéance le développement du renouvelable.

En l'absence de moyens de stockage, le rachat d'électricité à l'étranger est la technique utilisée pour parer les excès de consommation. Les tarifs sont incroyables. Lors des pics de consommation de février 2012, le prix d'achat est monté jusqu'à 1900 €/MWh, c'est-à-dire près de 38 fois le prix de production nucléaire et près de 22 fois le prix de rachat de l'énergie éolienne.

Si on s'arrête un instant sur la question des technologies de stockage de l'énergie électrique, on constate que la situation n'est guère brillante. Le stockage n'est intéressant que s'il permet de conserver l'énergie indéfiniment, qu'il supporte un nombre illimité de cycles stockage-

déstockage avec un rendement suffisant. Il n'y a que deux technologies qui émergent parmi toutes les options : le stockage gravitationnel et le stockage chimique.

Le stockage gravitationnel, c'est-à-dire les STEP, possède une densité énergétique très faible (de l'ordre de 1,5 Wh/Kg). C'est une technique éprouvée mais qui prend beaucoup de place (il faut des lacs de montagne). En France on considère généralement qu'il n'y a plus de territoires disponibles pour installer de nouveaux barrages. C'est pourquoi d'ailleurs il a été évoqué (François Lempérière et les Lacs Emeraudes [Réf. 2]) de les installer à la surface de la mer sous forme d'atolls artificiels.

Le stockage chimique est beaucoup plus compact. La liaison chimique contient une quantité d'énergie beaucoup plus importante (de l'ordre de 100 à 1000 Wh/Kg). Mais la technologie n'est pas suffisamment mûre. Les batteries sont hors de prix et de durée de vie limitée, les piles à combustibles sont également coûteuses et d'un rendement faible (le système électrolyseur-pile à hydrogène du projet MYRTE a un rendement de 40 %).

Parmi les solutions les plus prometteuses, il y a la fabrication de carburant de synthèse à partir du gaz carbonique et d'eau. Le carburant produit peut faire tourner des moteurs. On pourrait alors envisager d'associer un parc d'éoliennes troposphériques à une usine de production de carburant.

Mais, globalement, les solutions de stockage pour la régulation d'un système électrique à l'échelle d'une nation ne sont pas encore établies, même s'il y a quelques pistes « chimiques » très intéressantes et à développer.

Le partage : L'Europe ou la vraie dimension des enjeux

La deuxième approche pour réduire les conséquences de l'intermittence, surtout en l'absence d'une vraie solution de stockage, est tout simplement de travailler à la réduction de l'intermittence : c'est l'objet du partage.

Le partage (ou le foisonnement) est une pratique courante dans le domaine de l'énergie électrique. Prise isolément une tranche nucléaire est un moyen de production dont la puissance est de 1,33 GWe et sa disponibilité de 85 %, pour une indisponibilité de quelques mois, disons 60 jours par exemple. Il est clair que les STEP de 240 GWh ne peuvent pas

absorber les 1440 GWh d'énergie manquante. Un tel moyen de production est clairement intermittent et ses indisponibilités de plusieurs mois ne sont supportables que parce que cette centrale fait partie d'un réseau de 58 centrales. Dans ce cas, le partage est la bonne réponse. Le réseau de 58 centrales possède une puissance nominale de 45 GW avec une disponibilité globale de 100 % et le stockage n'est pas nécessaire.

Donc le foisonnement des moyens de production et le partage permettent de réduire le besoin de stockage. C'est bien sûr une règle générale qui va contribuer à améliorer la viabilité de la filière renouvelable. Il ne faut cependant pas s'y tromper, pour profiter du foisonnement il faut investir dans le moyen de production ; par contre on fait des économies significatives dans le moyen de stockage. En France, il existe 3 régimes de vent qui permettent d'espérer une disponibilité globale de l'ordre de 100 % pour des éoliennes Kites réparties sur le territoire. Mais pour obtenir cette disponibilité il faut tripler le nombre de centrales en divisant par 2 leur puissance, c'est un investissement rentable pour réduire le coût du stockage.

Le partage utilise des moyens de production également intermittents mais dont les disponibilités sont non corrélées. Il consiste à répartir les différents moyens de production selon des modalités différentes (mix énergétique renouvelable : voltaïque, éolien, maritime,..) et sur des territoires différents (par exemple une ferme éolienne à Brennilis et une autre à Montpellier). On réduit l'indisponibilité et donc la dimension du stockage nécessaire. Le partage suppose évidemment un réseau interconnecté de qualité.

Le problème de l'intermittence sera d'autant plus facile à résoudre que la disponibilité initiale est élevée (donc avec des Kite à 50 % plutôt que des éoliennes classiques à 17 %) et que le territoire considéré est grand, ce qui nous amène à conclure que le territoire européen est plus à même de réguler la fourniture d'énergie renouvelable que le territoire national (une autre raison de faire plus d'Europe ?). A ce sujet on peut rappeler que les traités fondateurs de l'Europe sont concernés d'abord par l'Energie (Charbon, Acier, Atome). N'aurions nous pas un peu oublié nos origines ?

L'attitude de la France avec ses réticences à s'engager dans la voie du renouvelable affaiblit la démarche générale de l'Europe.

V. Un vent nouveau souffle sur les renouvelables... l'éolienne Kite⁶

Le « saut technologique » décrit ci-après est à même de donner accès à une ressource plus importante, capable d'être beaucoup mieux acceptée par les riverains en raison de bien plus faibles nuisances sonores, visuelles et environnementales et de réduire les coûts d'investissements et de production.. Tout cela bien sûr par rapport à la technologie éolienne actuelle.

Le concept est le suivant : produire de l'énergie électrique éolienne collectée par des voilures volantes déployées à haute altitude (300-2000 m au dessus du sol). Il s'agit de ce qu'on appellera une « Eolienne Troposphérique » ou « Eolienne Kite ».

Technologie

Le principe de la collecte de l'énergie du vent est le même que celui utilisé pour faire voler un cerf-volant. La voile (50 à 200 m²) se déploie en étant contrôlée par deux câbles de commande qui permettent de lui impulser un mouvement « en huit » à grande vitesse (typiquement 8 à 12 fois la vitesse du vent, selon la technologie de la voile). Ce mouvement engendre une force de plusieurs tonnes sur chaque câble et fait tourner des treuils auxquels sont fixés des alternateurs qui produisent donc de l'électricité. Arrivée à son altitude maximale (typiquement 1000 m) la voile est mise en drapeau et le câble est rembobiné sans effort. La succession de ces cycles en « yoyo » fournit de l'énergie par bouffée qui est mise en forme par un convertisseur électronique. La puissance typique instantanée est de 3 MégaWatt (MW). A la base tout est là ! La difficulté, désormais résolue, consiste à faire un automate qui fait cela tout seul.

La filière est à la fois ancienne (il s'agit d'éolienne) et nouvelle (déployer une voile à haute altitude pour produire de l'énergie électrique n'est pour l'instant pas banal). La collecte d'énergie mécanique d'une voile est évidemment vieille comme le monde, sous des formes plus ou moins évoluées depuis la voile jusqu'au « Kitesurfing ».

La technologie existe, elle a été développée depuis plusieurs années par une entreprise Italienne (KGR=KiteGen Research) qui en a validé les principes et la faisabilité technique, mais pas la faisabilité économique. On se trouve aujourd'hui dans cette délicieuse incertitude où tout semble possible mais où rien n'est assuré.

⁶ Kite est la traduction anglaise de « cerf-volant », l'expression est familière dans « Kitesurf » par exemple.

Plus de ressources

Nous avons tous l'intuition que les aspérités du terrain gênent terriblement le vent - c'est en effet le cas ! - et que le vent est plus puissant et plus régulier en altitude – c'est le cas également !-. Ces deux caractéristiques sont également celles qui conduisent à augmenter leur hauteur et qui conduisent vers la mer les éoliennes traditionnelles. La présence d'obstacles (collines, végétation, bâtiments) perturbe considérablement la répartition du vent et ceci sur des distances considérables (jusqu'à 10 fois la hauteur de l'obstacle). C'est d'ailleurs la raison pour laquelle, dans les fermes éoliennes, il est nécessaire de respecter des distances d'au moins 5 fois leur hauteur (soit environ 1 Km pour les plus grosses). En mer, pour une éolienne isolée, l'espace est libre et le vent plus puissant.

Le fait de monter en altitude permet finalement de s'affranchir des obstacles environnants et d'être « comme en mer » et ceci n'importe où sur terre. A haute altitude, on a donc accès au grand rotor atmosphérique sans avoir besoin des ruineuses installations off-shore (selon les dernières réponses aux appels d'offre de Juillet 2011 les installations éoliennes offshore couteront 4.1 Millions d'Euros par Méga watt crête) M€/MW⁷ à comparer aux 1.3 M€/MWc de l'éolien terrestre).

Un point tout à fait important est que cette ressource est disponible partout, pas seulement sur des territoires privilégiés. Ceci ne peut que contribuer à réduire les inégalités territoriales sources de bien des conflits passés.

Le vent, en tant que ressource énergétique, a été étudié en détail dans un remarquable travail de compilation de données météorologiques au Carnegie Institute (Standford) sur une période d'une dizaine d'années [Réf. 1]. Un atlas (couverture mondiale depuis le sol jusqu'à 10 000 m) a été publié et est accessible au public. Il permet de démontrer que la quantité d'énergie mécanique contenue dans le rotor atmosphérique est près de 10 fois plus importante en altitude qu'à proximité du sol et que le principe exposé ici s'applique mondialement.

La disponibilité de ce moyen de collecte de l'énergie du vent, qui est de l'ordre de 17 % en moyenne pour une éolienne terrestre, sera plutôt plus proche de 50 % pour une éolienne troposphérique. Ce gain de productivité provient directement du domaine d'exploitation (le vent d'altitude) mais aussi du mode d'exploitation (l'utilisation de voilure).

⁷ 1 M€ c'est 1 millions d'euros.. et 1 MWc c'est 1 Méga watt « crête » ou « pic ». Voir le glossaire à la fin.

Une éolienne classique à turbine est adaptée à une vitesse de vent optimale et elle ne peut bien profiter ni des vents faibles (les plus abondants), ni des vents très forts (les plus énergiques). Son hélice à pas variable ne lui permet pas de s'adapter aux vents de vitesse inférieure à 4 m/s ni à ceux de vitesse supérieure à 24 m/s. Au-delà d'une vitesse de sécurité il faut mettre l'hélice en drapeau pour éviter que le mât ne fléchisse sous l'effet d'un énorme couple rabattant. Ce couple est absorbé, jusqu'à un certain point, par les profondes fondations qu'exigent généralement ces éoliennes. Les éoliennes troposphériques n'ont pas ce problème et les voilures peuvent naviguer dans des conditions beaucoup moins restrictives. En particulier elles peuvent s'adapter à des vents beaucoup plus forts car elles ne sont pas limitées par la hauteur d'un mât : il n'y a aucun couple rabattant appliqué à la structure, quelle que soit la force du vent. En fait la situation d'une éolienne troposphérique est similaire à celle d'un voilier qui peut adapter sa voile au régime de vent, la réduire, naviguer « grand largue » ou « au près » selon les circonstances.

Pour résumer cette question, non seulement le vent est plus régulier, et l'on peut se retrouver « comme en mer » en restant à terre, mais en plus le vent est nettement plus fort à 1000 m qu'à 100 m et la « fenêtre » de vitesse de vent exploitable est bien plus grande, ce qui donne une disponibilité de l'ordre de 50 %, soit une durée de production annuelle de 4300 heures.

Il est fondamental de comprendre en quoi ce chiffre de 50% est « réaliste ». Nous encourageons le lecteur à lire les données techniques et scientifiques disponibles sur le site du concepteur du projet Kitegen⁸.

Mais le point le plus important concernant la ressource est le suivant : Nous avons vu que, dans les fermes d'éoliennes classiques, territoires où sont regroupées plusieurs éoliennes pour améliorer à la fois la production et la gestion et concentrer la nuisance sur un seul site, il est nécessaire de les écarter de 5 fois leur hauteur pour éviter les interférences. Ceci a pour conséquence qu'un territoire de 1 Km² ne peut pas contenir plus d'une éolienne de 200 m de haut (Nacelle à 120 m). Une éolienne de ce type aura une puissance nominale de l'ordre de 3 MW. Cela signifie que, pour une éolienne classique à turbine, la densité territoriale de puissance est de l'ordre de 3 (watt-crête/m²) Wc/m². Dans le cas des voilures d'altitude où le domaine de vol est un volume tridimensionnel dans lequel chaque voile perturbe un volume minime, il est possible d'utiliser un nombre bien plus grand d'éoliennes troposphériques. La

⁸ <http://www.kitegen.com/en/>

distance entre générateurs peut être réduite d'un facteur 10 et la densité territoriale est estimée à 250 W/m². Cette densité énergétique est comparable à celle du nucléaire. Mais, à la différence du nucléaire, il n'y a ni risque pour les populations, ni problème de déchets.

Moins de nuisances

Les éoliennes troposphériques seront davantage « acceptables » d'abord parce qu'elles occupent des bâtiments de petite taille (à peu près la dimension d'une maison avec une empreinte réduite au sol : Imaginez un igloo de 13 m de diamètre surmonté d'une tige très fine de 20 m de long qui ressemble à une canne à pêche, Cf. la photo de la couverture). L'ensemble est au sol, peu visible. Il n'y a pas besoin de fondations mais seulement d'un ancrage sous forme de pieux fixés sur quelques mètres de profondeur. L'aménagement du lieu et sa réhabilitation en fin de vie seront bien plus simples que celui d'un terrain où est installée une habitation.

Les nuisances sonores seront faibles, voire inexistantes. Sur les éoliennes classiques ces nuisances proviennent de deux causes principales, les engrenages des réducteurs et le sifflement des pales de la turbine. Or ces deux nuisances vont pratiquement disparaître dans l'éolienne troposphérique. En effet d'abord il n'y a pas d'engrenages, les câbles de puissance sont bobinés sur des treuils via des poulies... il y a des roulements mais pas d'engrenages..Le bruit au sol est donc négligeable... Le bruit de sifflement est le même que celui d'une éolienne classique mais la voilure est située en altitude et ses sifflements considérablement atténués par la distance (au moins 30 dB d'atténuation, soit un facteur 1000). Il est prévu qu'il soit inférieur au bruit ambiant. Quant au sifflement des câbles il sera imperceptible, leur balancement à proximité du sol étant assez lent.

Les nuisances « visuelles » dont se plaignent parfois les riverains (la dégradation paysagère et l'effet « hypnotique » de rotation des pales) sont également inexistantes, le bâtiment est petit, les câbles invisibles et la voilure à haute altitude n'est pas plus gênante qu'un oiseau.

Pour ce qui concerne les nuisances environnementales, on peut affirmer qu'elles seront très faibles. On a vu que les nuisances paysagères seront réduites au maximum du fait de la petite taille de l'installation et de l'absence de superstructures géantes. Manifestement l'intégrité du territoire sera également bien mieux respectée. La vie animale sera également moins perturbée

que dans le cas d'une éolienne classique. Là où ça va vite il n'y a pas d'oiseaux, les voilures volent trop haut pour eux et près du sol le mouvement des câbles sera assez lent.

Des coûts bien plus faibles, aussi bien en investissements qu'en exploitation

Les coûts d'investissements seront moins élevés que dans les installations classiques de même puissance. Les bâtiments n'ont pas de fondations, les travaux d'installation et de montage sont rapides. Les composants sont de taille réduite. Ils sont livrés sur site par camion dans 3 containers ordinaires. Ils ne nécessitent pas de refaire des routes ni d'engins de levage de taille exceptionnelle.

Les voiles sont en Dacron et les câbles sont en Dyneema d'environ 24 mm de diamètre (utilisés couramment chez les professionnels de la voile) et pèsent 10 Kg pour 100m, il s'agit d'une matière recyclable aisément (polyéthylène). Leurs remplacements préventifs ne nécessitent qu'une intervention humaine par trimestre. Le personnel de gestion, maintenance et surveillance est affecté à un parc de centrales Kite tout entier et non pas à une centrale particulière. La maintenance est d'une grande simplicité et n'exige pas d'acrobaties au sommet d'un mât géant. Tout se passe au sol.

Quant au fonctionnement quotidien il n'y a aucun personnel dans les centrales. Elles sont entièrement automatiques (comme les éoliennes traditionnelles), y compris pour les phases de déploiement ou de débrayage d'urgence (la centrale est équipée d'un radar aéronautique).

Filière industrielle

Les matériaux qui interviennent dans la réalisation de ce type de centrale sont « standards », les matériaux modernes (fibres de carbones par exemple) interviennent dans plusieurs dispositifs pour les rendre plus solides et plus légers (bras, écarteurs, poulies, treuils) mais ils sont d'un usage courant dans l'industrie. Les composants électroniques sont usuels (informatiques, liaisons radios), certains capteurs ou servomécanismes sont spécifiques mais ils sont disponibles sur le marché Européen. La câblerie et la voilerie font partie de la technologie maritime standard.

En ce qui concerne le déploiement de la filière industrielle, la fabrication, le conseil, l'instrumentation, la gestion, la maintenance des parcs éoliens associés sont aussi autant d'activités de services générateurs d'emplois locaux. La technologie est également amenée à

progresser non seulement technologiquement (R&D), mais aussi commercialement pour développer des systèmes adaptés à des problèmes spécifiques pour les applications hors réseau (milieux polaires ou désertiques, applications insulaires, applications embarquées déployables rapidement, applications captives industrielles).

Les coûts de référence

On considère que les grandes éoliennes permettent de réduire les coûts de l'électricité produite par leur plus grande productivité. Les coûts d'investissements des éoliennes terrestres sont de l'ordre de 1.3 M€/MWc tout compris (en théorie, car les questions du démantèlement et de la réhabilitation des sites ne sont jamais approfondies jusqu'au bout). Les coûts des éoliennes maritimes sont au moins 3 fois plus élevés. Les projets prévus dans le cadre des appels d'offre de 2011 sont de l'ordre 4.1 M€/MWc.

Si on veut résumer la situation qui préside au choix de la filière troposphérique, on peut dire que sa disponibilité sera supérieure à celle de l'éolien en mer avec des investissements inférieurs à ceux de l'éolien terrestre. En outre les nuisances seront bien plus faibles et la productivité territoriale bien plus élevée que celles de l'approche classique. Le coût de production de l'électricité sera très inférieur aux 49.5 €/MWh⁹ évalués récemment par la cour des comptes pour l'énergie nucléaire.

Alors direz-vous... Où est l'erreur ?

Et bien il ne faut pas oublier un problème potentiel mais il n'est ni technique, ni commercial : il s'agit simplement d'un aspect réglementaire. Voler à 1000 m est du ressort du contrôle aérien et il faut obtenir les autorisations de vol. Il est clair que cette industrie nouvelle qui propose d'exploiter un territoire nouveau doit négocier sa place avec l'occupant principal de cette zone. La chose n'a rien d'impossible et de nombreux sites, pour d'autres activités, ont déjà négocié des zones réservées et interdites de survol (centrales nucléaires, sites militaires, grosses agglomérations, etc.).

D'ailleurs ce problème, qui n'est rien d'autre que celui de l'organisation du territoire, est une question récurrente dans le domaine des énergies renouvelable dont le mode de production est « diffus », ce qui nécessite toujours des surfaces (et ici des volumes) de collecte important.

⁹ On mesure le coût de production de l'énergie en €/MWh c'est-à-dire des euros par megawattheure. Le tarif de nos factures EDF utilise plutôt des centimes par Kwh (Kilo Watt heure), il suffit de multiplier par 1000. 1 MWh c'est 1000 KWh. A titre d'exemple le tarif de rachat de l'énergie éolienne sur les zones autorisées (les fameuses ZDE) est de 82 €/MWh actuellement.

En bref, ce type de centrale est à même de remplacer les centrales nucléaires. Les 63 GW de nucléaire sont disponibles à 85 % et peuvent être remplacés par 36 000 éoliennes Kite de 3 MWc disponibles à 50 %. Ces 36 000 éoliennes coûtent moins de 50 G€ (c'est-à-dire 4 fois moins que les 58 centrales nucléaires) et peuvent être regroupées en une centaine de parcs de 360 éoliennes.

Le point fondamental qui explique pourquoi ce type de centrale diffère des éoliennes classiques c'est que la ressource et le moyen de collecte sont tridimensionnels et exploitent une couche aérienne de 1000 m d'épaisseur, là où les éoliennes classiques n'exploitent qu'une couche superficielle de 80 m d'épaisseur.

Qui pourrait comprendre qu'on écarte d'un revers de main une filière moins coûteuse et moins risquée ?

Bien sûr, il y a la question du partage de l'espace aérien, mais cette décision appartient à la collectivité et au domaine politique. Pourquoi la liberté de pratiquer l'aviation par quelques riches oisifs devrait elle primer sur d'autres nécessités ?

VI. Alors, à quand une véritable transition énergétique ?

Les discussions précédentes ont évoqué les critères quantitatifs utiles à l'évaluation de la situation ainsi que les filières possibles qui pourraient cohabiter. Le mix énergétique idéal qui doit à la fois contribuer au progrès et le pérenniser n'est pas évident à définir, et chaque option est portée par des convictions plus que par des preuves. Toutes les convictions sont respectables, mais beaucoup d'entre elles se considèrent comme des certitudes et, bien sûr, la vérité refuse de négocier avec le mensonge. Comment choisir ?

"Une erreur ne devient pas vérité parce que tout le monde y croit !" Gandhi

Au bout du compte nous sommes tous dans la conviction et c'est par l'échange que l'on peut la faire évoluer vers une forme de vérité. Aucune science aujourd'hui n'est entièrement maîtrisée par un individu et il est forcément nécessaire de faire confiance au processus de mémorisation collective pour anticiper. Ensuite nous sommes libres d'utiliser notre esprit critique pour évaluer la cohérence du schéma proposé et pour y adhérer ou non. Bien souvent malheureusement la recherche de la preuve d'une conviction est un processus sélectif guidé par la conviction elle-même : on cherche rarement la preuve que l'on a tort ! Le dialogue est forcément difficile et intérieur.

Nous avons nous, par exemple, la conviction que sortir de l'uranium est possible et nécessaire, mais certainement pas en un jour, et ce dont nous avons discuté ici est un modèle énergétique qui le permet, ou plutôt qui le permettra un jour, si nous en avons la volonté.

Comment changer ce mix ? On ne peut pas, dans le cadre du « développement durable » décréter l'arrêt des centrales nucléaires sans peser les conséquences de l'opération et détailler soigneusement leur déroulement. Dans un premier temps, ce n'est pas une opération anodine sur le plan de l'organisation et cela ne peut pas être réalisé instantanément. Dans un second temps, on s'apercevra peut-être que le nucléaire « non uranium » a un avenir.

Le développement durable n'est pas hostile au développement, il est hostile à la fuite en avant (que ce soit le « développement » à tout prix ou le « durable » à tout prix), et la durabilité est une opération qui nécessite une mise en œuvre soigneusement planifiée, qui peut difficilement être mise en œuvre par ses plus farouches adversaires. Lorsqu'une commission d'experts, tous

issus du CEA, se réunit pour réfléchir à la mise en œuvre de la filière renouvelable, est-il si surprenant que les conclusions lui soient hostiles ? Un jury partial ne saurait mener un procès équitable.

Le modèle allemand offre un exemple de mix énergétique cohérent qui est basé sur l'énergie renouvelable et sur le remplacement rapide du nucléaire par des centrales thermiques. L'énergie produite par les éoliennes fait faire des économies de carburants. Par ailleurs, elle achète de l'électricité à l'extérieur.

Le mix énergétique allemand comprend du renouvelable, du thermique et des achats. Si on peut regretter l'augmentation du CO₂, on ne peut que saluer la réduction du rejet de déchets toxiques.

On peut espérer un jour, avec les progrès de la science, le développement massif des carburants de synthèse qui rendront « vertes » les centrales thermiques. Ce processus est d'ailleurs déjà engagé au travers de la méthanisation de la biomasse et de la méthanation du gaz carbonique, par exemple. Cette évolution du mix énergétique allemand est cohérente avec une intégration réaliste d'une part croissante des énergies renouvelables.

La puissance maximum de son parc éolien doit être ajustée à la puissance minimale nécessaire en continu. De cette façon l'énergie produite n'est jamais gaspillée. Lorsque les procédés de synthèse de carburant à partir d'énergie renouvelable seront au point, cette limite pourra être franchie.

Quelle est l'arithmétique de la France ? La situation est bien différente. D'abord le développement de l'énergie renouvelable, à ce jour, n'est pas du tout à la hauteur de celui envisagé par l'Allemagne, la Grande Bretagne ou l'Espagne.

Typiquement, le parc renouvelable est équivalent (en continu) à la puissance d'une seule centrale nucléaire et on pourrait sans doute sans trop de dommage en fermer une.

Doubler le parc éolien ne va pas changer la situation. On peut jouer sur le même registre que les allemands en faisant des économies sur le carburant consommé par les centrales thermiques.

Ceci est un raisonnement au niveau national.

Au niveau Européen la situation est plus intéressante, la capacité de production est très supérieure et la disponibilité potentielle beaucoup plus grande via le foisonnement. On peut donc dire que si le système de production d'énergie électrique joue un jeu solidaire, on peut

avoir un système globalement plus efficace. L'Europe est une chance pour l'énergie renouvelable et réciproquement.

En France, non seulement la discrimination positive vis-à-vis des filières voltaïques et éoliennes va finir par décrédibiliser l'ensemble de la filière renouvelable, mais, plus généralement, l'Etat pratique une discrimination négative (de fait) vis-à-vis des PME en faveur de grands groupes. 90 % des grands groupes existant en France aujourd'hui existaient déjà au siècle dernier. Le traitement palliatif de ces dinosaures a fait son office et on peut difficilement dire que c'est une bonne nouvelle. La conjonction de ces mesures discriminatoires maladroitement positives et structurellement négatives a pour conséquence une désindustrialisation inquiétante de notre pays.

Dans le domaine de l'énergie renouvelable, des pans technologiques entiers ont été abandonnés ou mis en veilleuse, l'hélio-thermodynamique, les électrolyseurs, les moteurs à combustions externes, les piles à combustibles, et bien d'autres. Sur tous les ingrédients et le tissu industriel qui rendent le renouvelable possible, la France est en retard. Le seul domaine où elle focalise ses moyens est celui du nucléaire, avec une opposition croissante de la population. Comme nous sommes encore en démocratie, le risque n'est pas négligeable que l'abandon du nucléaire devienne une décision politique nécessaire, comme cela est actuellement le cas en Allemagne. Et comme cela a été également le cas en France pour la filière du surrégénérateur (Super Phénix), qui paradoxalement aurait pu contribuer à améliorer la situation. A force de stériliser le paysage énergétique national, le lobby nucléaire va transformer sa sortie en catastrophe, ce qui est une forme de chantage suicidaire. La sortie du nucléaire n'aura pas du tout les mêmes conséquences en Allemagne car son tissu industriel lui permet cette mutation de manière harmonieuse.

En résumé, *"la planète peut pourvoir aux besoins de tous, mais pas à la cupidité de certains."*
Gandhi

Références

[1] C.L. Archer, K. Caldeira, “Atlas of High altitude wind power”, June 2008. Department of Global Ecology, Carnegie Institute for Science, Standford

Cet atlas est téléchargeable sur internet sur le lien suivant :

<http://www.mdpi.com/1996-1073/2/2/307>

[2] Christian Bataille, Claude Birraux. « Rapport sur L’Evaluation de la stratégie nationale de recherche en matière d’énergie ». 3 Mars 2009. Office Parlementaire d’évaluation des choix scientifiques et technologiques.

Ce rapport est téléchargeable par le lien suivant :

http://www.cnisf.org/biblioth_cnisf/rapports/rapport1493%20Birraux.pdf

[3] Charles A.S. Hall, Stephen Balogh & David J.R. Murphy, « What is the minimum EROI that a sustainable society must have ? ». Energies 2009, 2, 25-47.

[4] David JC MacKay, « L’énergie durable-pas que du vent ! », 2009 UIT Cambridge

Cet ouvrage est disponible sous forme électronique (gratuite) sur Internet à l’adresse

<http://www.withouthotair.com> (version anglaise ou traduction française) ou encore

<http://www.amides.fr> (traduction française).

Glossaire

Biogaz : Le méthane d'origine « biologique », engendré par la « digestion » (fermentation anaérobie) des déchets agricoles ou urbains (fumiers, végétaux, déchets d'abattage, ordures ménagères), peut alimenter des centrales à gaz ou des véhicules.

Densité territoriale : Il s'agit de la puissance énergétique que peut fournir une surface de territoire donnée. Sur 1 m² (un mètre carré) de territoire on peut choisir de disposer de panneaux voltaïques, d'éolienne ou de surface agricole ou forestière. Le rendement énergétique qu'on peut espérer de ce territoire intervient dans le calcul économique. Par exemple une éolienne terrestre a une densité territoriale de 3 Wc/m² ou de 3 MWc/ Km². Mais comme sa disponibilité est de 17 % sa densité territoriale moyenne est de 0.5 W/m², ce qui est très faible. La densité territoriale est un concept qui intervient dans les réalisations centralisées, dans le cas des éoliennes terrestres ou des moyens de production diffus (comme c'est presque toujours le cas en énergie renouvelable) il n'est pas certain que cette notion soit entièrement adaptée. En particulier une éolienne peut cohabiter avec des activités agricoles qu'elle perturbe assez peu.

Disponibilité : Dans un système de production intermittent la puissance disponible est variable (le voltaïque ne fonctionne pas la nuit, l'éolien ne marche pas sans vent, etc.). La disponibilité est la fraction du temps de production à pleine puissance pour fournir la même énergie que celle qu'on observe sur une durée donnée (généralement l'année). Par exemple une éolienne terrestre ne fonctionne à pleine puissance que 1500 heures par an, on dit que sa disponibilité est de 17 % soit le rapport entre 1500 heures et les 8760 heures qu'il y a dans une année.

Electrolytes : Les batteries électriques utilisent un composé chimique qui délivre du courant et qui sont régénérables électriquement en réinjectant ce courant en fin de cycle. Cette commodité est extrêmement rare et n'est possible que pour un nombre réduit de composés chimiques. Les piles à électrolytes utilisent un composé chimique qui se transforme de manière irréversible mais qui peut être régénéré à l'extérieur de la pile. Les possibilités sont beaucoup plus nombreuses et les meilleures piles régénérables peuvent avoir des performances très supérieures à celles des batteries. Les piles à combustibles (en particulier la pile à hydrogène) font partie de cette catégorie.

Foisonnement : L'utilisation simultanée de moyens de production électrique intermittents dont les périodes d'indisponibilité ne coïncident pas. Par exemple l'utilisation de plusieurs modalités de production (voltaïque, éolien, hydrolien, etc.) ou de moyens de productions éloignés soumis à des conditions météorologiques indépendantes. Le foisonnement permet de réduire les effets de l'intermittence.

Giga watt abrégé en GW : Un milliard de watt. La puissance d'une « tranche nucléaire » est de 1.33 GW, soit 1330 MW.

Kite : est la traduction anglaise de « cerf-volant », l'expression est familière dans « Kitesurf » par exemple.

Méga watt abrégé en MW : Un million de watt. La puissance nominale (ou maximale) d'une éolienne terrestre de 80 m est de l'ordre de 3 MW.

Méga watt heure abrégé en MWh : Un million de watt heure, soit mille Kilo watt heure. Il s'agit d'une quantité d'énergie, celle développée par une éolienne de 3 MW en 20 minutes ou bien celle développée par une centrale nucléaire de 1.33 GW pendant 2.7 secondes.

Energie = Puissance x Durée. Un Français moyen dépense 8 MWh chaque année.

Méthanation : Il s'agit des procédés destinés à combiner le gaz carbonique et l'hydrogène pour produire du méthane. Si l'hydrogène est produite par Electrolyse et le CO2 est un rejet d'une centrale thermique et si l'énergie est d'origine renouvelable, le procédé constitue un moyen de stockage. Le méthane est beaucoup plus facile à stocker que l'hydrogène.

Méthanisation : Il s'agit de la fabrication de méthane à partir de la matière organique. Le terme de méthanisation s'applique aux déchets biologiques qui subissent une fermentation anaérobie. C'est un procédé utilisé dans les déchetteries par exemple. Le méthane ainsi produit peut être utilisé dans les véhicule (GNV=Gaz Naturel Véhicule) ou réinjecté dans le circuit public.

Mètre par seconde abrégé m/s : Mesure de vitesse. 1 m/s c'est 3.6 Km/h. Les éoliennes terrestres sont exploitables pour des vents de 4 à 24 m/s soit de 14 à 87 Km/h.

Projet ITER : Ce projet international implanté géographiquement à Cadarache est l'avatar le plus récent de la recherche dans le domaine de la fusion nucléaire. Cette recherche piétine depuis 50 ans, peut-être faute de moyens suffisants (bien qu'ils soient énormes !), mais son débouché sur une véritable centrale industrielle n'est pas prévue avant 50 ans. Si c'est le cas, la recherche aura duré plus d'un siècle. Bien sûr l'enjeu est important puisqu'il devrait théoriquement déboucher sur une méthode de production d'énergie pratiquement sans limitations de ressources, sans déchets nucléaires et sans rejets atmosphérique. Le Soleil sur Terre. On peut cependant se demander si le même investissement, pendant la même durée, sur des sujets plus terre à terre du renouvelable, n'aurait pas été mieux employé. Pour l'instant la fusion contrôlée sur terre reste une utopie, mais une utopie « officielle ».

Projet MYRTE : Le projet MYRTE installé en Corse à VIGNOLA, près d'Ajaccio, offre pour le voltaïque un exemple d'installation intégrant un moyen de stockage, mais le bilan économique est catastrophique pour l'instant : 560 KWc pour 3000 m² de panneaux voltaïques associés à un électrolyseur pour la production d'hydrogène et à une pile à combustible de 100 KW pour un investissement de 21 M€. Le rendement du stockage-déstockage est de 40 %, et la disponibilité du voltaïque de 17%, ce qui conduit à une puissance permanente garantie de 50 KW.. L'investissement est donc de 220 M€/MW, soit plus de 50 fois le seul coût financier du nucléaire. Evidemment il s'agit d'une installation pilote, de très petite taille. Mais l'approche ne semble adaptée que pour des milieux isolés, ensoleillés et stratégiques.

Rendement énergétique : C'est la fraction de l'énergie restituée par rapport à l'énergie fournie (généralement sous une autre forme). Le rendement énergétique d'un panneau photo voltaïque est de 15 % ce qui signifie que lorsqu'il reçoit 1000 watt du rayonnement solaire il ne peut restituer que 150 watt sous forme électrique. Le rendement énergétique de la transformation de l'essence en puissance motrice (mécanique ou électrique) est de l'ordre de 30 % dans le meilleur des cas. Une centrale nucléaire aura également un rendement de 30 % car elle fournit 70 % de chaleur qui pourrait servir à d'autres fins (chauffage urbain, distillation). Ici nous parlons aussi de rendement énergétique dans le cas du stockage électrique (on perd 25 % d'énergie à la stocker dans un barrage STEP et à la restituer plus tard) ou dans le cas du transport de l'énergie électrique ou la perte en ligne est non négligeable.

STEP : Station de Transfert d'Énergie par Pompage. Il s'agit d'un barrage hydraulique disposant de deux bassins, le contenu du bassin de récupération en aval est « remonté », quand c'est possible, dans le bassin de production en amont. Sur ses 25 GW de puissance hydraulique la France dispose de 5 GW de barrage STEP permettant de fournir 50 heures de production. L'énergie fournie par ces barrages STEP est en fait de l'énergie nucléaire « mise en réserve » pendant les trous de consommation. En dépit de leur taille imposante la densité énergétique d'une STEP, comme moyen de stockage, est très faible, de l'ordre de 1 Wh/Kg, à comparer aux 120 Wh/Kg d'une batterie électrochimique moderne.

Supercapacités : Ce sont des dispositifs électrochimiques qui permettent de stocker des charges électriques. A la différence des batteries électrochimiques les supercapacités sont capables de supporter des courants très forts, ce qui permet de les recharger très rapidement et de les décharger rapidement en délivrant des puissances élevées. Leur densité énergétique est faible (15 Wh/Kg dans le meilleur des cas, au lieu de 120 Wh/Kg pour une batterie LiPo (Lithium Polymère)). Leur courant de fuite est également assez élevé ce qui limite la durée de stockage (typiquement une perte de 50 % par jour). Par rapport à une batterie au Lithium, l'intérêt se situe dans le fait que la durée de vie (nombre de cycles) est quasi infinie.

Taux de Retour Énergétique ou TRE : Il s'agit du rapport entre l'énergie fournie par un dispositif et l'énergie dépensée pour le fabriquer. L'intérêt de cette notion est qu'elle n'est pas directement monétaire, elle est indépendante du prix de l'énergie. Dans le cadre du développement durable on considère qu'il faut un TRE supérieur à 10 pour assurer les conditions d'un développement similaire à celui connu aujourd'hui. Le TRE du pétrole, qui était de 100 en 1900 est aujourd'hui de l'ordre de 8. Le TRE du nucléaire (Filière Uranium-Plutonium) est de l'ordre de 6. Celui des centrales Kite est supérieur à 200.

Tera Watt heure abrégé TWh : Un million de MWh ou mille GWh. C'est une quantité d'énergie. La production nationale annuelle d'énergie électrique est de 513 TWh en 2010.

Troposphère : c'est la couche de l'atmosphère terrestre comprise entre 0 et 10 000 m. Elle contient 80 % de l'atmosphère terrestre et est le lieu des phénomènes météorologiques. Dans le présent contexte on en exclut la « couche limite » entre 0 et 500 m où le vent est souvent turbulent et perturbé par le relief.

Watt : James WATT est un physicien écossais, un contributeur majeur à l'invention de la machine à vapeur. L'unité de puissance est le watt qui s'écrit en minuscule alors que l'abréviation s'écrit en majuscule W. Une puissance de 1 watt permet de soulever une masse d'environ 100 grammes de 1 mètre en 1 seconde. 1 Cheval-Vapeur, vieille unité qui survit encore sur nos cartes grises, ça fait 736 W.

Watt crête abrégé en Wc : ou Wp, (de l'anglais Watt-peak) est une unité de mesure représentant la puissance maximale d'un dispositif. Dans les installations à production intermittente, comme les éoliennes, on qualifie l'installation par sa puissance crête, même si cette puissance n'est pas disponible tout le temps. Ceci est une source de malentendu. 1 MWc intermittent à 20 % c'est comme 200 KW, c'est-à-dire pas grand-chose. Donc faites attention à la lettre « c ».

Remerciements au comité de lecture, sans qui ce texte serait autre.

François CHESNAIS (Paris)

Marcello CORONGIU (Chieri-Italie)

Pierre CHAMPON (Quimper)

Isabelle RUBAN (Vitrolles en Luberon)

Jean-Christophe SELMI (Vitrolles en Luberon)

André ARNERA (Romans)

Agnès DURAND (Romans)

Hélène DREYFUS (Labuisse)

Jérôme ZEILIGER (Labuisse)

Martine CARDO (Suresnes)

Christophe JOUXTEL (Grenoble)

Sophie JOUXTEL (Grenoble)

Michel EYRIES (La Colle sur Loup)

Yvan SAUVEUR (Quimper)

Florence BAPTISTE (Berzano di San Pietro)

Christine BACCON (Vercors)

Frederic MOSCA (Standford)

Les auteurs

Laurent Kopp

Diplômé de Polytechnique (1971) et de Telecom Paris (1976), Laurent a débuté sa carrière sur les plateformes pétrolières aux Emirats Arabes Unis puis travaillé pendant 15 ans dans les systèmes sonars pour sous-marins stratégiques. Il a ensuite poursuivi ses travaux dans le traitement de signal pour la téléphonie, dans l'échographie médicale et les sonars de pêche. Au fil de sa carrière il a eu l'occasion de publier un certain nombre d'études, de déposer des brevets et de recevoir un prix scientifique.

Marine Champon

Licenciée en Droit (1996) et diplômée de Sciences Po Paris (1998), Marine travaille depuis 12 ans dans la communication Corporate, la communication de crise et le lobbying, en France et à l'étranger, dans de grands groupes internationaux de l'énergie et de l'agroalimentaire. Son expérience dans le domaine de l'énergie au sein du Groupe Esso/ExxonMobil lui a apportée une bonne connaissance des stratégies de lobbying et d'influence développées par l'énergie pétrolière.