

## CONSIDERATIONS SUR LES ENERGIES INTERMITTENTES.

### 1. Introduction.

*Les données utilisées sont pour l'essentiel issues des deux documents statistiques qui comportent des séries internationales longues complètes et mises à jour :*

*-la publication statistique annuelle de British Petroleum (BP) : Statistical Review of world energy, édition 2014, qui comporte des séries longues mondiales pour toutes les sources d'énergies, jusqu'en 2013 inclus ;*

*-le « pocketbook » 2014 publié par la direction de l'énergie de la commission européenne, qui comporte des séries pour l'Union européenne dans son ensemble et pour chaque Etat de l'UE, jusqu'en 2012 inclus ; ces séries proviennent d'Eurostat, d'où la mention « source Eurostat » sur les graphiques.*

*En outre on a consulté pour la France les documents publiés par le comité de régulation de l'énergie (CRE).*

Le terme d'« énergies intermittentes », désigne génériquement deux des sources de production d'électricité dites « renouvelables » : l'énergie éolienne et l'énergie solaire. Ce terme est notamment utilisé par la Commission européenne et Eurostat pour les distinguer des autres énergies, qu'elles soient renouvelables (biomasse, déchets etc.) ou non renouvelables. On pourrait tout aussi bien les qualifier d'« aléatoires » si ce terme n'avait pas une charge péjorative.

### 2. La production électrique et la place des énergies intermittentes.

#### 2.1. La production électrique totale.

On trouvera ci-après un ensemble de graphiques représentant l'évolution de la production électrique selon les différentes sources d'énergies, et ceci respectivement pour :

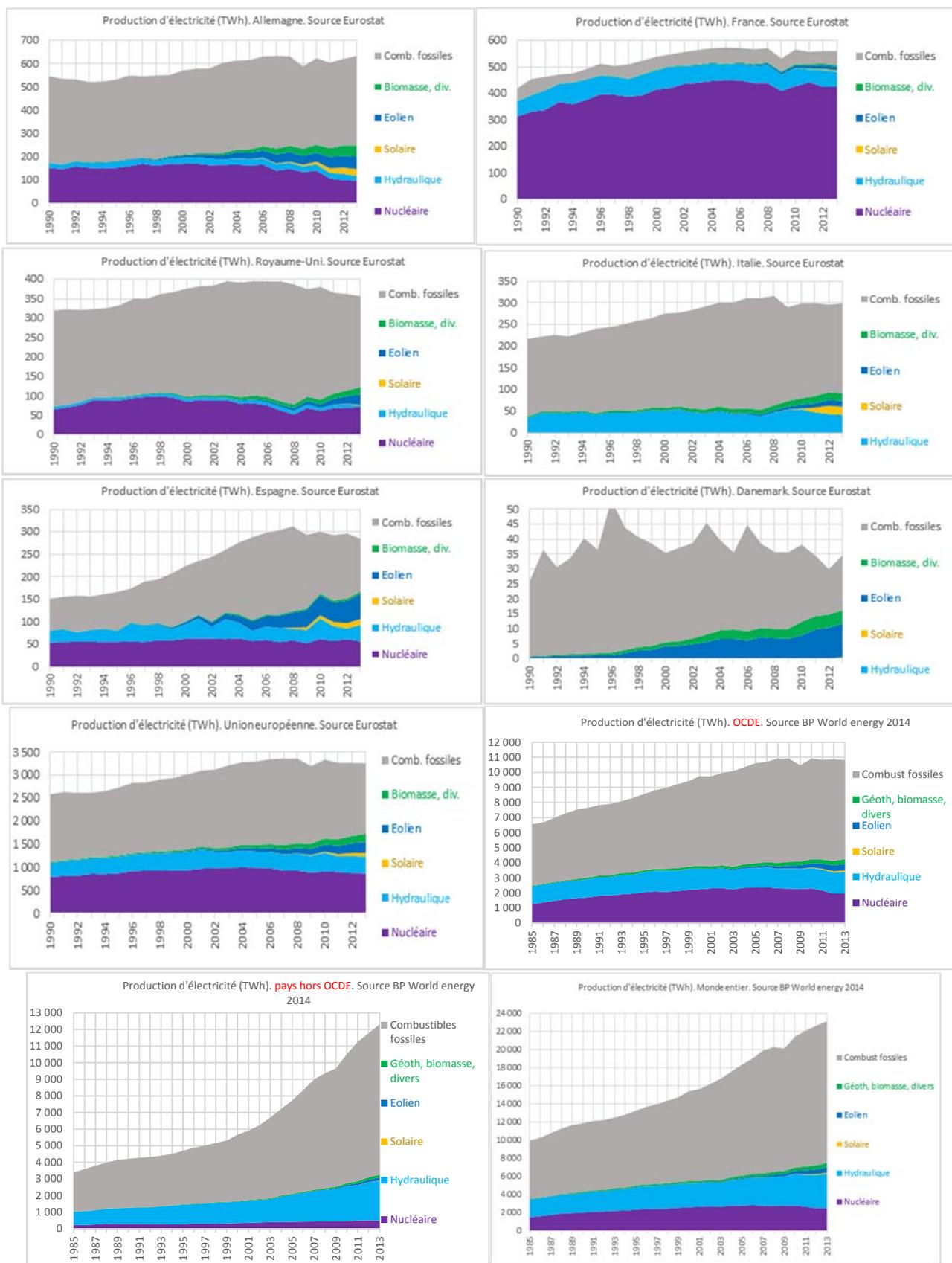
- les cinq principaux Etats de l'UE (plus le Danemark pour des raisons qui seront expliquées)
- l'Union européenne,
- les pays de l'OCDE <sup>1</sup>,
- les pays n'appartenant pas à l'OCDE
- le monde entier.

A la lecture de ces graphiques, on voit que l'Union européenne a pratiquement stabilisé sa production électrique depuis une dizaine d'années, avec même une légère décroissance dans certains Etats. Il en va à peu près de même dans l'ensemble des pays de l'OCDE.

Par contre, dans les Etats moins développés qui n'appartiennent pas à l'OCDE, la production électrique continue à augmenter car les populations de nombreux pays dits « en développement » n'ont encore que partiellement accès à l'électricité.

---

<sup>1</sup> Organisation de développement et de coopération économique, regroupant actuellement les 34 Etats les plus développés (dont 21 Etats de l'Union européenne), représentant 18% de la population mondiale (1,26 milliards d'habitants sur 7,3 milliards) et 63% du PIB mondial (47 milliards de dollars sur 75 milliards).



Selon la Banque mondiale, le pourcentage de population qui n'a pas accès à l'électricité va de 40% à 85% en Afrique subsaharienne, de 25% à 40% en Asie du sud-est (hors la Chine qui est pratiquement à jour) et 10% à 20% dans certains pays d'Amérique centrale. On estime à 1,2 milliards de personnes la population non encore raccordée, dont 600 millions en Afrique.

De plus, les habitants qui sont « raccordés » à l'électricité ne disposent pas tous, et de loin, d'une puissance installée ni d'une régularité de livraison capable de satisfaire leurs aspirations, car l'électricité peut y être plus ou moins insuffisante, irrégulière ou dégradée.

A titre de comparaison, on peut par exemple prendre comme critère la production électrique rapportée à la population ; les chiffres suivants sont relatifs à l'année 2013.

-Les Etats de l'OCDE dans leur ensemble ont produit 11 000 TWh pour 1 260 millions d'habitants, soit 8,7 TWh/Mhab<sup>2</sup>.

-Les Etats non-OCDE ont produit 12 000 TWh pour 6 000 millions d'habitants, soit 2,0 TWh/Mhab ; pour aboutir aux standards « occidentaux », il faudrait qu'ils produisent 52 000 TWh, ce qui au rythme actuel de croissance prendrait plus d'un demi-siècle.

On voit l'étendue des besoins restant à satisfaire, et qui explique la forte croissance de la production dans les pays en développement.

## 2.2. Les énergies intermittentes.

Les graphiques précédents montrent que l'éolien et le solaire n'ont commencé à se développer notablement qu'assez récemment : l'éolien depuis une dizaine d'années, le solaire depuis cinq ou six ans.

Le tableau ci-après fournit un aperçu des pourcentages de production d'électricité intermittente en 2013 dans un certain nombre de pays et de groupes de pays ; ce tableau est classé par ordre décroissant de production intermittente (on a aussi indiqué pour mémoire les pourcentages d'énergie fossile, hydro-électrique et nucléaire). Dans tous les autres pays du monde, le pourcentage de production intermittente est inférieur à 1%

Pourcentages de production d'électricité intermittente en 2013.

		éolien	solaire	éolien + solaire	fossile	hydraulique	nucléaire
Danemark	(*)	32,5%	1,5%	34,0%	53%	0,0%	0,0%
Espagne	(*)	19,5%	4,6%	24,1%	41%	12,9%	19,9%
Portugal	(*)	22,3%	0,9%	23,2%	44%	25,6%	0,0%
Irlande	(*)	18,0%	0,0%	18,0%	78%	2,3%	0,0%
Allemagne	(*)	8,4%	4,7%	13,2%	61%	3,2%	15,4%
Italie	(*)	5,2%	7,8%	13,0%	62%	17,8%	0,0%
Union européenne		7,3%	2,5%	9,8%	47%	11,1%	26,9%
Royaume-Uni	(*)	7,7%	0,6%	8,3%	65%	1,3%	19,8%
Belgique	(*)	4,2%	2,3%	6,5%	35%	0,4%	50,1%
Pays-Bas	(*)	5,9%	0,5%	6,3%	83%	0,1%	2,9%
Suède	(*)	6,2%	0,0%	6,2%	6%	38,3%	41,7%
Australie	(*)	3,8%	1,5%	5,2%	86%	8,2%	0,0%
Etats de l'OCDE		4,1%	1,0%	5,1%	61%	13,0%	18,3%
Nouvelle-Zélande	(*)	4,7%	0,0%	4,7%	26%	53,4%	0,0%
USA	(*)	4,0%	0,2%	4,2%	68%	6,4%	19,5%
France	(*)	2,7%	0,8%	3,5%	9%	12,0%	74,6%
Monde entier		2,7%	0,5%	3,3%	68%	16,4%	10,8%
Inde		3,2%	0,0%	3,2%	80%	12,0%	3,0%
Chine		2,5%	0,2%	2,7%	77%	17,0%	2,1%
Etats non-OCDE		1,5%	0,1%	1,7%	74%	19,3%	4,2%
Japon	(*)	0,5%	1,0%	1,5%	87%	7,6%	1,3%
Norvège	(*)	1,4%	0,0%	1,4%	2%	96,1%	0,0%
Brésil		1,2%	0,0%	1,2%	18%	69,1%	2,6%
Suisse	(*)	0,2%	0,7%	0,8%	10%	51,5%	35,7%

(\*) Etats appartenant à l'OCDE

<sup>2</sup> Pour les Etats de l'Union européenne : entre 5 et 10 TWh/Mhab (sauf quelques exceptions). Pour la Chine, réputée entièrement raccordée (?) : 3,9 TWh/Mhab. Pour l'Inde, seulement 0,9 TWh/Mhab, etc.

La part des énergies intermittentes est de 10% dans l'Union européenne et 5% dans l'OCDE. Par contre, leur part dans les autres pays du monde reste encore modeste, inférieure à 2%.

L'essor est donc apparu surtout dans les pays développés, c'est-à-dire les pays dont les besoins en électricité étaient déjà amplement satisfaits, qui disposaient de sources d'énergies permanentes et fiables, et qui pouvaient donc se permettre de procéder à une diversification vers des énergies réputées renouvelables et plus aléatoires.

Cette politique de diversification a été stimulée par le souci de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> (pour des raisons qui ne seront pas discutées ici) et donc de restreindre le recours aux énergies fossiles, et aussi par une certaine méfiance des opinions publiques à l'égard de l'énergie nucléaire. Sans oublier la puissance de certains lobbies et le conformisme des pouvoirs politiques.

Le Danemark occupe le tout premier rang au monde avec près du tiers d'énergie éolienne, ce qui résulte d'un choix politique<sup>3</sup>. Sa production électrique annuelle varie très irrégulièrement d'une année à l'autre ce qui illustre assez bien son caractère intermittent ; le Danemark atténue ces irrégularités par une énergie fossile encore conséquente (plus de 50%)<sup>4</sup> et des échanges fréquents avec notamment ses voisins scandinaves qui disposent de sources permanentes, à savoir hydraulique et nucléaire pour la Suède, hydraulique pour la Norvège.

Les Etats du sud de l'Europe ont tiré parti de leur ensoleillement et/ou d'un régime de vents favorable, les Etats du nord ont tiré parti du vent régnant sur les côtes de la mer du nord.

Le cas de l'Allemagne est particulier, car ce pays n'est particulièrement favorisé ni par le vent ni par le soleil : il résulte d'une volonté politique forte dont les résultats restent d'ailleurs discutables à plusieurs égards.

Enfin la France, qui dispose de près de 90% d'énergies non émettrices de CO<sub>2</sub>, et qui n'avait donc pas les mêmes raisons de s'engager dans cette politique, ne s'est décidée que plus tardivement à suivre le mouvement.

Autre fait à signaler, le Japon vient de basculer 250 TWh (soit 25% de sa production) du nucléaire vers les énergies fossiles pour les raisons que l'on sait.

### **2.3 Conséquences des énergies intermittentes sur le recours aux énergies fossiles.**

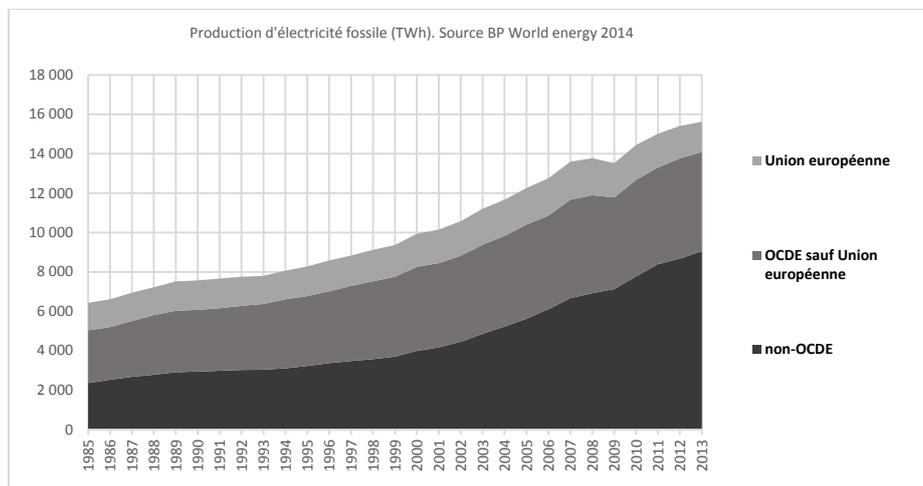
L'objectif principal de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> n'a pas été atteint puisque le recours aux énergies fossiles n'a fait qu'augmenter dans l'intervalle. En effet, seule l'Union européenne a réussi à inverser la tendance, mais son poids dans l'ensemble du monde est très modeste : environ un dixième de l'électricité fossile, ce poids étant en diminution constante et pour cause.

Le graphique ci-après illustre bien ce phénomène. On y a distingué trois ensembles : l'Union européenne, l'OCDE moins l'UE, enfin les pays non-OCDE.

---

<sup>3</sup> Il existe au Danemark 4 700 éoliennes (dont 500 offshore) réparties dans 1 150 « parcs ». Si elles étaient réparties sur l'ensemble du territoire, on aboutirait à un quadrillage d'une éolienne tous les 3 km.

<sup>4</sup> Le Danemark prétend éliminer l'électricité fossile en 2035 : l'expérience sera intéressante à suivre ; toutefois, l'organisation énergétique du Danemark est très spécifique et elle paraît impossible à transposer dans de grands pays.



En dix ans, l'UE a réduit sa production d'électricité fossile annuelle de 300 TWh, mais les autres pays de l'OCDE l'ont augmentée de 500 TWh, et les pays non-OCDE de 4 200 TWh. Soit au total 4 400 TWh fossiles de plus en 2013 qu'en 2003.

### 3. Disponibilité des énergies intermittentes.

#### 3.1 Le facteur de capacité.

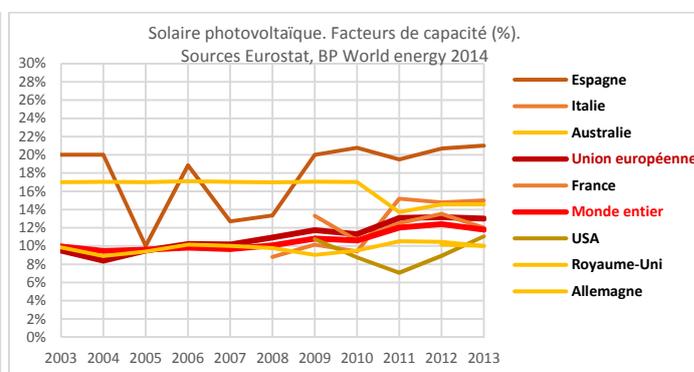
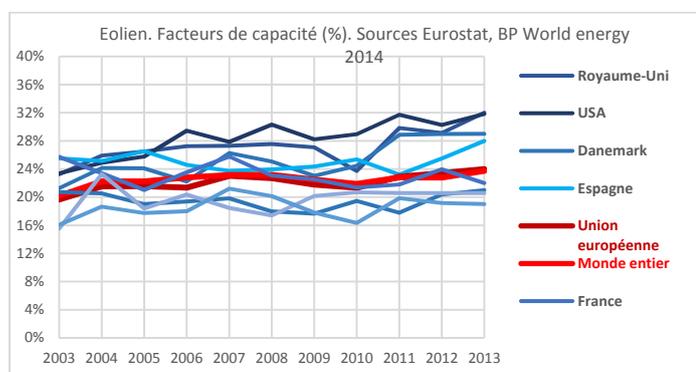
Pour mesurer la disponibilité d'une source d'énergie, on a recours au concept de « facteur de charge » ou « facteur de capacité »<sup>5</sup>.

Si on divise la production électrique annuelle observée exprimée en watt-heure (Wh) par la puissance installée exprimée en watts (W) on obtient un nombre d'heures annuel de production, soit N heures par an.

Le facteur de capacité est défini comme étant le rapport « N heures / 8 760 heures (année entière) », exprimé en général sous forme de pourcentage.

A titre de référence, le facteur de capacité de l'énergie nucléaire est de l'ordre de 80% à 90% selon les Etats (de l'ordre de 80% en France). Un parc nucléaire ne fonctionne pas toute l'année à pleine puissance, puisqu'il subit nécessairement des interruptions pour maintenance et entretien, incidents éventuels, travaux d'amélioration et de mise à jour des centrales anciennes, rechargement et déchargement de combustible, etc.

Les deux graphiques ci-après représentent l'évolution des facteurs de capacité de l'éolien et du solaire dans un certain nombre de pays caractéristiques, ainsi que ceux de l'ensemble de l'Union européenne et du monde entier.



<sup>5</sup> C'est le terme de « facteur de capacité » ou « capacity factor » qui est utilisé par Eurostat. On le retiendra ici.

Compte tenu de l'évolution rapide, d'une année à l'autre, des capacités installées dans certains pays, on a préféré comparer la production de l'année  $n$  à la capacité moyenne de l'année, soit  $(C_n + C_{n-1})/2$ .

Notons que les bases de données du solaire sont parfois contradictoires et douteuses ; elles comportent de nombreuses anomalies et des valeurs aberrantes. C'est pourquoi le nombre de pays sélectionnés est réduit. On peut toutefois penser que les valeurs globales (UE et monde) sont assez fiables vu le nombre de pays concernés.

Sans détailler ces résultats, on peut retenir comme valeurs moyennes actuelles :

-Pour l'éolien, un facteur de capacité compris entre 18% et 30%, avec une valeur moyenne de 24% (21% en France en 2013).

La valeur élevée du Royaume-Uni s'explique par l'importance de l'éolien offshore (plus du tiers du total de la puissance installée) dont le facteur de capacité semble être de l'ordre de 35%<sup>6</sup>. Il est d'ailleurs assez normal que l'éolien offshore, qui coûte environ deux fois plus cher que l'éolien terrestre, ait des performances supérieures.

-Pour le solaire photovoltaïque, un facteur de capacité compris entre 10% et 20%, avec une valeur moyenne de 12% (11% en France en 2013). On ne s'étonnera pas des valeurs élevées observées en Espagne, pays ensoleillé. Par ailleurs, il n'est pas surprenant que le solaire soit deux fois moins disponible que l'éolien, puisque par définition il n'est susceptible de produire que la moitié du temps.

Si l'on en juge par l'allure des courbes, il semble que ces valeurs se soient légèrement améliorées en dix ans, ce qui s'explique par les progrès technologiques réalisés dans l'intervalle, alors même que les installations, généralement récentes, n'ont pas encore subi les effets de l'usure et du vieillissement.

### **3.2 Conséquences de la disponibilité des énergies intermittentes.**

Quoiqu'il en soit des valeurs précises des facteurs de capacité, on peut retenir deux conclusions importantes :

-à puissance installée égale, l'éolien produit environ trois à quatre fois moins d'électricité qu'une centrale nucléaire et le solaire environ six à huit fois moins ;

-on ne peut compter sur l'éolien et le solaire pour satisfaire à tout instant les besoins en électricité. A certains égards, on peut même dire que ces types de production fonctionnent souvent à contre-emploi (pas de solaire la nuit où on a précisément besoin d'éclairage, pas de vent lors des épisodes anticycloniques de grands froids ou de fortes chaleurs, etc.).

Le caractère intermittent de ces deux types d'énergie leur est inhérent et il est inévitable, car leur électricité n'est pas produite en fonction de la demande mais en fonction de l'alternance jour-nuit, du climat local et de la météorologie.

Ce caractère intermittent a deux conséquences :

-pour éviter que cette électricité soit produite en pure perte, il faut donc l'introduire de force dans le réseau de distribution, en lui donnant si nécessaire la priorité sur les autres sources.

-de façon symétrique, lorsque les énergies intermittentes s'interrompent, il faut mobiliser presque instantanément d'autres sources d'énergie pour répondre à la demande.

---

<sup>6</sup> Lors des deux derniers appels d'offres lancés en France, les facteurs de capacité escomptés par les adjudicataires étaient en 2012 de 35% (6,8 TWh / an pour 1 928 MW installés) et en 2014 de 40% (3,9 TWh / an pour 992 MW installés) ; cette dernière valeur paraît très optimiste, surtout tout au long des 20 ans de production prévus, ce qui pourrait ouvrir la porte à des contentieux.

En effet, on sait que l'électricité ne peut être stockée de façon massive avec les technologies existantes. Il est possible que ce problème trouve sa solution dans le grand avenir mais cette solution nécessitera des installations spécifiques coûteuses et dont les coûts d'investissement et d'exploitation devront être ajoutés aux coûts de production pour respecter la réalité économique.

Par ailleurs, dans le cas d'excédents et de déficits, les échanges d'électricité entre pays producteurs ne peuvent se faire qu'à des distances relativement modestes, c'est-à-dire entre Etats immédiatement voisins, notamment pour des raisons de pertes en ligne <sup>7</sup>. Le système ne dispose donc pas de la souplesse que permettraient des échanges à longues distances. Là encore, il est possible que ce problème trouve sa solution dans l'avenir, mais moyennant encore des coûts supplémentaires.

Le développement de ces sources d'énergie rend donc indispensable la présence d'énergies de substitution capables de suppléer sans délai aux carences des intermittentes. Seules les centrales thermiques classiques au charbon, au fioul ou au gaz sont susceptibles d'un démarrage rapide pour répondre à cette obligation. Le problème est que, comme la priorité est donnée aux intermittentes, les centrales thermiques classiques deviennent elles aussi intermittentes malgré elles, ce qui diminue leur rentabilité et peut conduire à leur fermeture. On arrive alors au paradoxe consistant à rémunérer des centrales thermiques simplement pour qu'elles restent en place en stand-by, voire à subventionner des remises en route de centrales ayant fermé.

Non seulement ce dispositif entraîne des coûts supplémentaires, mais il contribue à augmenter les émissions de CO<sub>2</sub> ce qui est semble-t-il le contraire du but principal recherché <sup>8</sup>.

#### **4. Coût de production des énergies intermittentes.**

On s'en tiendra au cas de la France, pour laquelle on dispose de données récentes et indiscutables grâce au comité de régulation de l'énergie (CRE) <sup>9</sup> qui tient une comptabilité précise des éléments techniques et financiers concernant la production électrique.

Le gouvernement lance périodiquement des appels d'offres en vue de la fourniture d'électricité éolienne et solaire. Selon l'importance des lots, les candidats peuvent aller depuis de petites sociétés locales, jusqu'à des consortiums d'énergéticiens européens (c'est le cas plus particulièrement pour l'éolien offshore). Le CRE est sollicité pour donner un avis sur la dévolution de ces appels d'offres. On ne détaillera pas ici le contenu des contrats qui sont ensuite passés avec les fournisseurs. En substance, ces contrats comportent une durée (en général 15 à 20 ans à compter de la mise en service) et un prix d'achat garanti pendant toute cette durée, avec quelques modalités complémentaires.

Comme il s'agit d'appels d'offres ouverts à la concurrence, on peut penser que les prix d'achat proposés par les adjudicataires reflètent correctement les coûts de production estimés.

A titre indicatif, et au vu des derniers appels d'offres, les tarifs de rachat sont d'environ :

- 85 €/MWh pour l'éolien terrestre (environ 2 fois le tarif de référence)
- 180 €/MWh pour l'éolien offshore (environ 4 fois le tarif de référence)
- 150 €/MWh pour le photovoltaïque (environ 3 fois le tarif de référence).

On désigne par tarif de référence (en simplifiant) le tarif auquel l'électricité s'échange au niveau européen en moyenne sur l'année, soit actuellement environ 45 €/MWh.

---

<sup>7</sup> La France (qui est exportatrice nette d'électricité sur l'année) importe et exporte exclusivement avec ses sept voisins immédiats.

<sup>8</sup> C'est ce qui est en train de se passer en Allemagne. Mais ce sujet mériterait un développement spécial.

<sup>9</sup> Site <http://www.cre.fr/>

Les distributeurs, au premier rang desquels EDF, ont ensuite l'obligation d'acheter l'électricité à ces fournisseurs, aux prix fixés par leurs contrats.

EDF refacture ce supplément à ses clients, dans le cadre d'une « contribution au service public de l'électricité » (CSPE) qui figure sur la facture mensuelle ou bimestrielle <sup>10</sup>.

En 2014, les obligations d'achat d'électricités dites « renouvelables » auront représenté une majoration de l'ordre de 10% de la facture des usagers particuliers. Cette majoration, déjà reconnue comme insuffisante pour compenser les obligations d'achats, ne cesse d'augmenter d'année en année.

On n'entrera pas dans les détails concernant ces mécanismes. D'une façon plus générale, les aspects financiers du recours accru aux énergies intermittentes mériteraient d'amples développements. En raison des déséquilibres physiques qu'elles engendrent (brusques excédents à des moments inopportuns et vice-versa) elles sont susceptibles de désorganiser la répartition du courant sur le réseau interconnecté et par corollaire le marché des prix « spot » de l'électricité <sup>11</sup>.

## 5. Conclusions.

Autant que l'on sache, les deux principales raisons alléguées par l'UE en faveur de sa politique énergétique sont, d'une part la réduction du recours aux énergies fossiles et des émissions de CO<sub>2</sub>, d'autre part la réduction de la dépendance énergétique. On y ajoute parfois le désir de servir d'exemple au monde entier.

On a vu ce qu'il en était du recours aux énergies fossiles. Ce problème serait de toute façon mondial et l'UE ne pèse dans ce domaine que de façon de plus en plus marginale, ce qui montre que le reste du monde est loin de partager notre enthousiasme.

L'Union européenne a cru devoir s'engager résolument et à grand frais dans les énergies intermittentes : pour une population égale à 7% de la population mondiale, l'UE compte actuellement 35% de la puissance installée en éolien et 55% en photovoltaïque.

Les conséquences économiques de ce choix commencent à se faire sentir, notamment en Allemagne et au Royaume-Uni, où des voix s'élèvent pour réclamer un ralentissement (voire un moratoire) des investissements en matière éolienne et photovoltaïque. Les récriminations portent notamment sur l'augmentation du prix de l'électricité qui nuit à la compétitivité ainsi que sur les risques de coupures de courant en hiver.

De toute évidence, le monde ne pourra pas se sortir du sous-développement énergétique et électrique à l'aide de l'éolien et du solaire <sup>12</sup>, mais en utilisant les ressources fossiles. Celles-ci sont quasi-inépuisables à vue humaine, largement réparties au travers du globe (comme on commence à le découvrir), leur extraction et leur transformation font appel à des techniques éprouvées, et elles peuvent être transportées aisément à de grandes distances.

Les énergies intermittentes n'ont pu et ne pourront dans l'avenir se développer que moyennant des subventions massives (plus de 3 milliards d'euros pour l'année 2014 en France, qui n'est pourtant pas en pointe dans ce domaine). Elles représentent pour les utilisateurs d'électricité – particuliers et entreprises, c'est-à-dire en fin de compte tous les citoyens - un coût supplémentaire qui ne peut aller qu'en s'aggravant.

---

<sup>10</sup> La CSPE ne comporte pas uniquement la compensation des obligations d'achats des intermittentes, mais aussi celles d'autres énergies renouvelables (biomasse) et de cogénération, ainsi que diverses contributions, sociales et autres.

<sup>11</sup> De sorte qu'il peut arriver que les prix d'achat de l'électricité deviennent négatifs en cas de surproduction momentanée.

<sup>12</sup> Ni en détruisant des forêts au motif que le bois combustible serait « renouvelable ».

L'intermittence qui leur est inhérente ne pourrait être corrigée ou compensée que par des dispositions de caractère futuriste - et de toute façon coûteuses - de stockage, de distribution et de transport d'énergie électrique.

Enfin, et c'est une question qui n'a pas été abordée ici, ces sources d'énergies ne sont pas sans comporter quelques inconvénients qui n'ont pas encore tous été dévoilés <sup>13</sup>.

Toutes ces considérations ne constituent pas un motif suffisant pour condamner les énergies intermittentes, ne serait-ce que parce que les technologies qu'elles contribuent à développer peuvent engendrer des applications imprévues et bénéfiques.

Mais il serait raisonnable de ne pas céder aux engouements, et de leur réserver dans les politiques énergétiques la part qu'elles méritent qui ne saurait être que limitée.

---

<sup>13</sup> Parmi les opposants aux éoliennes, on commence à trouver des associations écologistes.