



Electricité éolienne et solaire, émissions de CO₂, et prix de l'électricité pour les ménages en Europe de l'Ouest



B.DURAND *

** Ancien directeur de la division Géologie-Géochimie de l'IFPEN, puis de l'ENS de Géologie, ancien président du Comité Scientifique de l'European Association of Geoscientists and Engineers.*

Electricité éolienne et solaire, émissions de CO₂, et prix de l'électricité pour les ménages en Europe de l'Ouest.

Résumé :

Depuis environ 15 ans, la plupart des pays d'Europe s'efforcent à des degrés divers d'augmenter la part des électricités renouvelables intermittentes (ELRi), essentiellement l'éolien et le photovoltaïque, dans leur production d'électricité. Les raisons officiellement invoquées sont de réduire substantiellement dans ces pays les émissions de CO₂, et d'accroître leur indépendance énergétique.

L'étude d'un groupe de 15 pays d'Europe de l'Ouest, à peu près homogène sociologiquement, technologiquement et économiquement, montre que les résultats de cette politique sont mauvais :

- Les émissions de CO₂ de la production électrique sur cette période y ont davantage diminué grâce au remplacement progressif de centrales à charbon par des centrales à gaz à cycle combiné, que grâce aux ELRi. En fait, les seuls pays qui ont des émissions faibles, sont ceux dont le mix électrique repose maintenant principalement sur l'hydraulique et/ou le nucléaire. Ils n'ont donc eu nullement besoin des ELRi pour abaisser leurs émissions.*

- Le prix de l'électricité payé par les ménages y a augmenté de façon directement proportionnelle aux capacités installées d'ELRi.*

- Enfin, le développement des ELRi a nécessité dans les pays sans ressources très importantes en hydroélectricité et/ou en nucléaire, de garder en soutien ("back-up") de grandes capacités de centrales à charbon et/ou à gaz pour gérer leur intermittence. Le développement des ELRi y a ainsi lié ainsi l'avenir de la production électrique à la disponibilité future de ces combustibles fossiles. Mais en Europe, les productions de ceux-ci sont maintenant en déclin rapide. L'avenir de la production électrique et l'avenir des ELRi seront donc dans ces pays de plus en plus liés à la disponibilité de charbon et de gaz importés.*

Si la politique actuelle de développement à marche forcée des ELRi est guidée par des motivations climatiques ou économiques, comme le prétendent les milieux politiques et les médias, c'est alors une grave erreur. Elle ne réduit pas de façon significative les émissions de CO₂. En France, où les émissions sont déjà de loin les plus faibles de tous les grands pays industrialisés, elle les fera même augmenter. Elle y fera aussi augmenter le prix de l'électricité pour les ménages, et rendra la France de plus en plus dépendante au charbon et au gaz importés.

Cette politique énergétique anéantira également l'avantage que possède la France sur les grands pays industrialisés de pouvoir mettre en place une mobilité électrique globalement peu émettrice de CO₂. Or cet acquis est précieux, étant donnée l'incertitude croissante sur la disponibilité future du pétrole sur le marché international, et la diminution de déjà 50 % de la production européenne qui est observée depuis 2000.

Introduction

Depuis quinze ans environ, les pays européens s'efforcent à des degrés divers d'augmenter dans leur production d'électricité la part des électricités renouvelables intermittentes (ELRi), électricité éolienne et électricité solaire photovoltaïque pour l'essentiel. Ces efforts sont officiellement justifiés par la lutte contre le réchauffement climatique, et donc la volonté de faire décroître les émissions de CO₂, considérées comme les principales responsables de ce réchauffement. Il est vrai que ces ELRi, tout comme l'hydroélectricité et le nucléaire, et contrairement aux électricités produites avec des combustibles fossiles, ne contribuent en elles-mêmes que peu à ces émissions (**figure 1**).

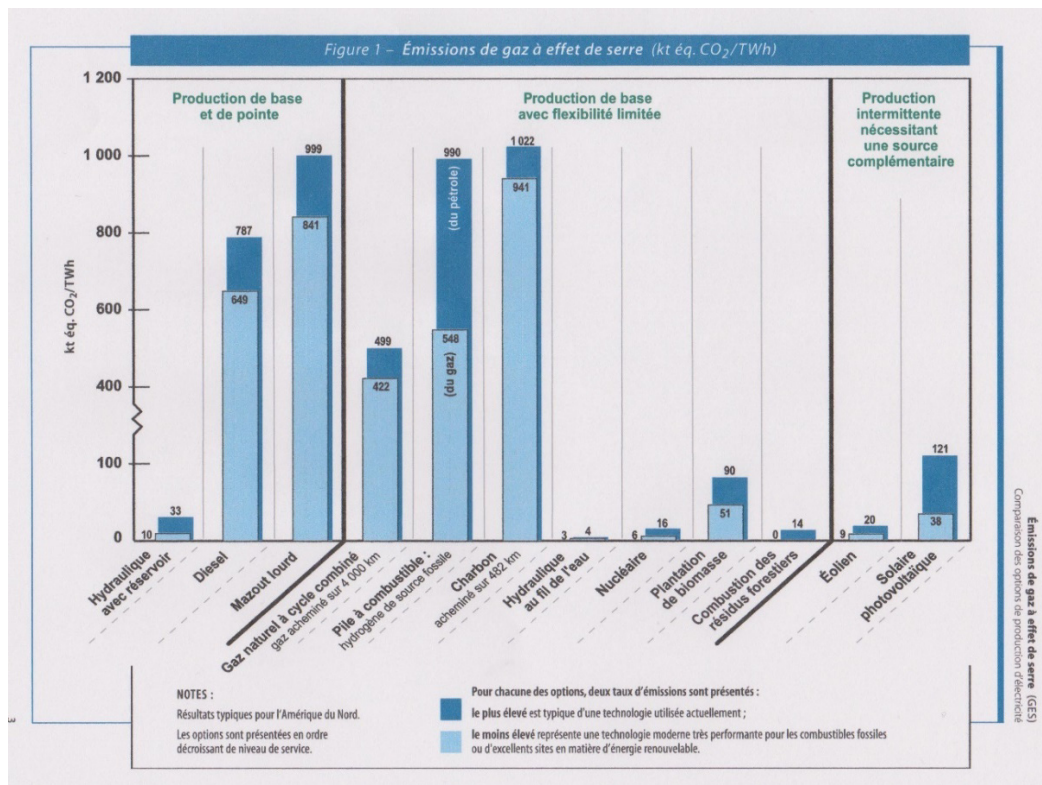


Figure 1 : Emissions de gaz à effet de serre (GES), en kilotonne-équivalent-CO₂ par TWh (= g/kWh) d'électricité produite en Amérique du Nord selon le mode de production, calculées par la méthode de l'analyse du cycle de vie (ACV). Source : Hydro Québec, <http://www.hydroquebec.com/developpement-durable/centre-documentation/pdf/15094F.pdf>

La recherche d'une plus grande indépendance énergétique de l'Europe est aussi un motif invoqué.

Les méthodes utilisées pour favoriser le déploiement des ELRi sont d'une part une promotion agressive, pour ne pas dire dans bien des cas subversive, faite auprès de l'opinion publique par les milieux politiques, les médias et les lobbys industriels, et d'autre part l'octroi à ces modes de production électrique de privilèges financiers très importants, sous forme d'une priorité absolue d'accès au réseau, et de tarifs d'achat très rémunérateurs garantis aux producteurs, et ce par des contrats de longue durée.

Le développement des ELRi s'est accéléré à peu près en même temps, vers 2000, dans pratiquement tous les pays d'Europe, mais à des rythmes assez divers. Nous examinons ici si, 15 années plus tard, le but principal affiché, c'est-à-dire l'élimination grâce à elles des émissions de CO₂ de la production électrique européenne, est sinon atteint, du moins en vue.

Nous examinons également les conséquences de ce développement sur le prix de l'électricité payé par les ménages.

Nous limitons cette étude à 15 pays de l'Europe de l'Ouest, parce que, de notre point de vue, ils constituent un groupe de pays à peu près homogène sociologiquement, technologiquement et économiquement, avec toutefois de grandes différences dans l'importance du développement des ELRi.

Les données utilisées pour cette étude proviennent des sources suivantes : - L'Agence internationale de l'énergie (www.iea.org, rubrique statistics) pour les productions brutes d'électricité et leur répartition par mode de production (mix de production électrique) d'électricité - L'European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSOE) (www.entsoe.eu/db-query/miscellaneous/net-generating-capacity) pour les capacités de production - L'Agence européenne de l'environnement (EEA 2016, ENER038 Overview of electricity production and use in Europe, <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/overview-of-the-electricity-production-2/assessment>) pour les émissions de CO₂ de la production brute d'électricité, à l'exclusion de la Norvège et de la Suisse – Eurostat (<http://ec.europa.eu/eurostat/fr/data/database>) pour les prix payés par les ménages) - British Petroleum Statistical Review of World Energy (<https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2016/bp-statistical-review-of-world-energy-2016-full-report.pdf>) pour l'historique des productions et des consommations de combustibles fossiles.

1 - Le mix électrique des 15 pays considérés :

On appelle mix électrique d'un pays l'éventail des sources d'énergie utilisées pour produire de l'électricité, présenté en pourcentage de l'énergie électrique (mesurée par exemple en kWh, MWh ou TWh) produite par chacune de ces sources. Dans cette étude, nous ne considérons que la production brute d'électricité, c'est-à-dire sans déduire les pertes dues à l'autoconsommation des centrales et les pertes sur le réseau.

Les mix de production électrique brute des 15 pays considérés sont très divers (**tableau 1**) : Ils ont été historiquement largement dictés par la disponibilité des ressources locales, garantes d'un minimum d'indépendance énergétique : C'est ainsi que la Norvège, pays dont les ressources hydrauliques sont par habitant les plus importantes d'Europe, produit 96 % de son électricité grâce à celles-ci. Le Royaume-Uni, pauvre en ressources hydrauliques mais longtemps riche en charbon, puis en gaz grâce à la Mer du Nord, utilise encore essentiellement ces deux combustibles fossiles. L'Allemagne, également pauvre en ressources hydrauliques, mais riche en charbon (surtout maintenant du lignite, c'est-à-dire la variété de charbon au contenu énergétique le plus faible et donc aux émissions de CO₂ par kWh produit les plus grandes), fait encore une très grande part de son électricité grâce à lui. La France, pays relativement peu doté en ressources hydrauliques par habitant comparativement à la

Norvège, ou encore l’Autriche et la Suisse, et pauvre en combustibles fossiles, a développé très fortement le nucléaire. Dans tous ces pays, depuis les chocs pétroliers de 1973 et 1979, le pétrole n’est plus guère utilisé pour produire de l’électricité.

Les proportions d’ELRi dans les mix de production électrique sont très variables. En 2014, année la plus récente considérée ici, faute de données toutes bien validées ensuite, elles varient de presque rien pour la Norvège à 42,6 % pour son voisin le Danemark.

Pays	Production 2014, TWh	Charbon	Pétrole	Gaz	Nucl.	Hydro	Eolien	Solaire PV	Autres
Allemagne	627,8	45,4	0,9	9,9	15,4	4	9,1	5,7	9,6
Autriche	65,4	7,5	0,9	8,2		68,5	5,9	1,2	7,8
Belgique	72,7	6	0,2	26,5	46,4	2,1	6,3	4	8,5
Danemark	32,2	34,3	1	6,5		0,05	40,6	2	15,5
Espagne	278,8	16,2	5,1	17	20,6	15,4	18,7	2,9	4,1
Finlande	68,1	17,4	0,3	8,1	34,6	19,7	1,6		19,3
France	562,8	2,1	0,3	2,3	77,6	12,2	3,1	1	1,5
Irlande	26,3	24,6	0,7	49,1		3,8	19,5		2,3
Italie	279,8	16,6	5,1	33,5		21,5	5,4	8	6,9
Pays-Bas	103,4	31,3	1,8	49,8	3,9		5,6	0,8	6,9
Portugal	52,8	22,6	2,6	12,9		31,1	22,9	1,2	6,7
Norvège	142,3	0,1		1,8		96	1,6		0,5
Royaume-Uni	338,9	30	0,5	29,7	18,8	2,6	9,5	1,2	7,7
Suède	153,7	1,1			42,2	41,6	7,3		7,8
Suisse	71,7			0,7	38,4	55,4		1,2	4,3
Europe 15	2876,7	20	1,5	14,7	28,1	18,2	8,1	3,3	6,1

Tableau 1 : 15 pays d’Europe de l’Ouest année 2014 : production d’électricité, en TWh, et principaux composants du mix de production électrique, en %, selon l’Agence internationale de l’énergie (www.iea.org). L’éolien et le solaire photovoltaïque sont ici en rouge. La catégorie « Autres » comprend essentiellement l’électricité produite avec de la biomasse et des déchets ménagers et industriels organiques. A noter cependant dans le cas de l’Italie dans cet « Autres », la contribution de l’électricité géothermique pour environ 2 % de sa production d’électricité. Les cases en blanc correspondent à des contributions très faibles, moins de 0,1 %, auquel cas on retrouve ces contributions dans la rubrique « Autres », voire inexistantes (cas du nucléaire dans 6 pays par exemple).

Le **tableau 2** montre pour chacun de ces 15 pays en 2014 leur population, en millions d’habitants, et les capacités de production existantes en fin de cette année, en watt par

habitant, de leurs principaux modes de production d'électricité. En comparant les tableaux 1 et 2 on peut évaluer dans chaque pays le facteur de charge annuel de chacun de ces modes, c'est-à-dire le rapport de la production réelle à la production qui serait la sienne s'il était utilisé toute l'année au maximum de sa capacité. On peut aussi comparer l'efficacité globale des mix électriques, ou des différents modes de production : on observe ainsi par exemple que la France produit en moyenne environ 1,3 fois plus d'électricité par watt de capacité installée par habitant que l'Allemagne. On observe aussi que l'Allemagne produit à peu près, par watt de capacité installée par habitant, environ 6,5 fois plus d'électricité avec son nucléaire qu'avec son éolien et son solaire ! Pour la France, il s'agit de 4,4 fois seulement, car le nucléaire n'y est pas seulement utilisé en base comme en Allemagne, mais aussi en semi-base.

Pays	Population	comb.foss.	nucléaire	hydro.	éolien	solaire	biomasse
Allemagne	81,2	1057	149	132	450	468	78
Autriche	8,6	842	0	1578	245	69	60
Belgique	11,3	588	524	126	172	264	105
Danemark	5,7	1564	0	2	859	106	107
Espagne	46,4	1023	163	420	496	150	16
Finlande	5,5	1582	500	588	92	0	379
France	66,4	357	951	383	139	80	24
Irlande	4,6	1338	0	115	471	0	2
Italie	60,8	1119	0	363	143	306	59
Pays-Bas	16,9	1513	29	2	170	59	24
Portugal	10,4	627	0	547	437	38	23
Norvège	4,6	348	0	6757	186	0	7
Roy.-Uni	64,8	775	151	61,2	120	0	18
Suède	9,7	464	982	1683	559	8	318
Suisse	8,2	61	406	1686	7	92	34
Europe 15	405,1	868	283	410	273	199	55
Europe 15	Total capa.	351622	114609	166018	110627	80624	22202

Tableau 2 : 15 pays d'Europe de l'Ouest, année 2014: populations en millions d'habitants et, d'après l'European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E), capacités installées par habitant, en watt, et capacités totales en MW, des principaux modes de production d'électricité en 2014. On constate que les ELRi représentaient en 2014 22,6 % des capacités totales installées dans ces 15 pays, mais ne produisaient d'après le tableau 1 que 11, 4 % de la production totale d'électricité. Les combustibles fossiles représentaient 41,5 % de la capacité installée pour 36 % de la production d'électricité et avaient donc une efficacité moyenne 1,7 fois supérieure à celle des ELRi. L'hydroélectricité représentait 19,6% de la capacité installée pour 18,2 % de la production soit une efficacité moyenne 1,9 fois supérieure à celle des ELRi. Le nucléaire représentait 13,6 % de la capacité installée, mais produisait 28,1 % de l'électricité, et avait donc une efficacité moyenne 4,2 fois supérieure à celle des ELRi. La biomasse (en fait biomasse et déchets organiques ménagers et industriels) représentait 1,3 % de la capacité installée, pour environ 5 % (sur le tableau 1, autres ne comprend pas que la biomasse) de la production, et avait donc une efficacité moyenne environ 7 % fois supérieure à celle des ELRi. Ce tableau n'est pas exhaustif de toutes les sources d'électricité utilisées en Europe de l'Ouest. Mais les sources non répertoriées ici représentent moins de 0,5 % du total des capacités installées.

2- Développement des ELRi, émissions de CO₂ et prix de l'électricité pour les ménages en Europe de l'Ouest

Le **tableau 3** montre pour l'année 2014 la proportion d'ELRi (électricité éolienne + solaire photovoltaïque) dans le mix électrique, les émissions de CO₂ de celui-ci, en millions de tonnes et en grammes par kWh d'électricité produite, et les prix de l'électricité payés par les ménages, en euros par MWh de consommation, pour les 15 pays considérés. Il montre aussi, en watt par habitant, la capacité totale installée en ELRi. Les relations entre ces grandeurs apparaissent plus clairement sur les **figures 2 et 6**.

Pays	ELRi % du mix	ELRi W/hab.	CO ₂ émis par l'électricité, en Mt	CO ₂ g/kWh	Prix euros/MWh
Allemagne	14,8	918	266,8	425	298
Autriche	7,1	314	3,9	60	202
Belgique	10,3	436	15,3	211	210
Danemark	42,6	965	5,3	166	304
Espagne	21,6	646	84,7	304	217
Finlande	1,6	92	7,2	106	156
France	4,1	216	19,7	35	159
Irlande	19,5	471	11,9	456	241
Italie	13,4	449	64	229	184
Pays-Bas	6,4	229	46,6	451	218
Portugal	24,1	475	18,9	359	165
Norvège	1,6	186	1,7	12	192
Royaume-Uni	10,7	120	131,8	389	197
Suède	7,3	567	1,5	10	192
Suisse	1,2	99	0,9	12	195
Europe 15	11,4	472	680,7	237	218

Tableau 3 : 15 pays de l'Europe de l'Ouest en 2014 : Proportions d'ELRi (éolien + solaire PV) dans le mix de production électrique en %, capacités d'ELRi en watt par habitant, émissions de CO₂ du mix électrique en millions de tonnes et en grammes par kWh, et prix de l'électricité payé par les ménages. Sources : Eurostat (<http://ec.europa.eu/eurostat/data/database>) pour les prix, Agence Internationale de l'Energie (www.iea.org, rubrique statistics) pour les proportions d'ELRi, et Agence Européenne de l'Environnement (EEA 2016, ENER038 Overview of electricity production and use in Europe, <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/overview-of-the-electricity-production-2/assessment>) pour les émissions de CO₂, Norvège et Suisse exclues, pour lesquelles les données sur les émissions de CO₂ proviennent d'autres sources. Noter que la moyenne des prix payés par les ménages pour l'ensemble des 15 pays considérés est ici calculée en supposant que la proportion de l'électricité produite qu'ils consommaient, c'est-à-dire hors échanges aux frontières, était à peu près la même dans chaque pays. Les deux pays les plus émetteurs de CO₂ sont l'Allemagne et le Royaume-Uni, qui émettent à eux deux 59 % du total des émissions de ces 15 pays, mais ne représentent que 36 % de leur population. Par comparaison, la France émet 2,9 % du total des émissions pour 16 % de la population. Les capacités de l'Allemagne en ELRi ont encore sensiblement augmenté depuis 2014 et dépassent maintenant les 1000 watts par habitant, «mieux» encore que le Danemark !

ELRi et émissions de CO₂

La **figure 2** montre pour les 15 pays considérés les émissions de CO₂ en 2014 du mix électrique, en fonction des proportions d'ELRi. On observe une corrélation globalement positive entre ces deux grandeurs. **La question est donc : alors que les ELRi et en particulier l'éolien émettent peu de CO₂ par kWh produit (figure 1), comment se fait-il que les**

émissions de CO₂ de ces pays augmentent-elles globalement avec la fraction d'ELRi dans leur mix électrique ?

Les seuls déterminants des émissions de CO₂ sont bien sûr le poids des combustibles fossiles dans le mix électrique, et leur nature (gaz, charbon ou fuel). Or de ces quinze pays, il n'y en a que cinq, l'Autriche, la France, la Norvège, la Suède et la Suisse qui ont réussi à ce jour à s'en passer à peu près complètement. Les émissions de CO₂ de leur production d'électricité sont donc très faibles. Un de ces pays, la Norvège, exceptionnellement doté en ressources hydrauliques par habitant (tableau 2), produit 96% de son électricité grâce à elles. L'Autriche, avec près de 70 % d'hydroélectricité dans son mix électrique, est également très bien dotée. Elle complète son mix avec des combustibles fossiles et de la biomasse, et a les émissions les plus élevées de ces cinq pays. Les trois autres, France, Suède et Suisse, qui ont des mix électriques basés principalement sur le nucléaire et l'hydraulique, utilisent encore moins de combustibles fossiles que l'Autriche. La Suède et la Suisse, bien mieux dotées en ressources hydrauliques par habitant que la France, utilisent encore moins qu'elle les centrales à combustibles fossiles, ce qui conduit à des taux de CO₂/kWh plus faibles.

Vient ensuite la Finlande, qui a du nucléaire et de l'hydroélectricité, mais pas encore assez pour éliminer suffisamment les combustibles fossiles.

A juste titre, tous ces pays n'ont que relativement peu d'ELRi dans leur mix électrique. En effet, ils n'en ont nul besoin pour faire baisser significativement leurs émissions de CO₂ : Les émissions des cinq premiers sont déjà très faibles et la Finlande, moins bien placée pour l'instant, continue de développer son parc de centrales nucléaires: elle rejoindra ainsi d'ici peu le peloton de tête. Cependant la Suède a une proportion relativement importante d'ELRi et semble vouloir encore l'augmenter, malgré un facteur de charge de son parc actuel qui est en dessous de la moyenne européenne de son parc actuel (Tableau 2).

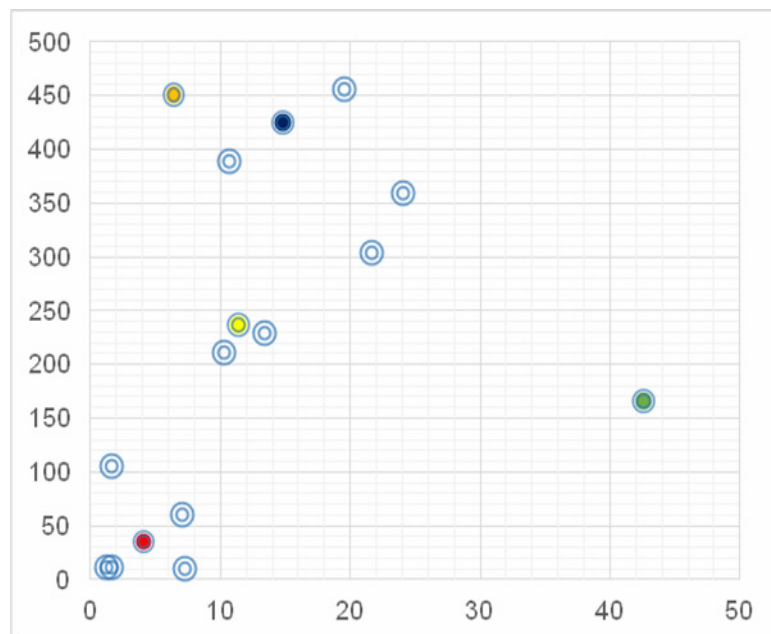


Figure 2 : Emissions de CO₂ du mix électrique en grammes par kWh en fonction de la proportion en % d'éolien + solaire PV dans ce mix pour les 15 pays considérés. En rouge la France, en noir l'Allemagne, en orange les Pays-Bas, en vert le Danemark et en jaune la moyenne des 15 pays considérés.

A l'autre extrême, quatre pays ont de très fortes émissions de CO₂ : Les Pays-Bas, le Royaume-Uni, l'Allemagne et l'Irlande. Ils ont en commun de n'avoir que très peu, voire pas du tout, d'hydraulique. En 2014, deux d'entre eux avaient encore une contribution non négligeable de nucléaire dans leur mix électrique, le Royaume-Uni (18,8 %), et l'Allemagne (15,4 %). Leurs émissions sont un peu plus faibles que celles des Pays-Bas qui en a très peu (3,9 %) et de l'Irlande qui n'en a pas. Bien que l'Irlande compte une fraction d'ELRi plus grande (19,5 %) que les Pays-Bas (6,4 %), ses émissions de CO₂ sont pourtant un peu supérieures.

Quatre pays ont des situations intermédiaires : Belgique, Italie, Espagne et Portugal. La Belgique n'a pas de ressources hydrauliques notables, mais a une forte proportion de nucléaire (46,4 %). Les trois autres ont des ressources hydrauliques par habitant importantes, inférieures toutefois à celles de l'Autriche, de la Suède, de la Suisse et bien sûr de la Norvège, mais supérieures à celles de la France. Notons que le mix de l'Espagne comporte une fraction importante de nucléaire (20,4 %).

Enfin le Danemark mérite une attention particulière : Il n'a pas de nucléaire. Il n'a pas non plus de ressources hydrauliques. Toutefois sa petite taille et sa position géographique lui permettent d'utiliser les importantes ressources hydrauliques de ses voisins suédois et surtout norvégien pour gérer l'intermittence de ses ELRi (essentiellement de l'éolien). Comme nous le verrons plus loin cela lui permet d'introduire sans risque technique majeur une proportion élevée d'ELRi dans son mix de production électrique, et donc de diminuer le taux de CO₂ / kWh de celui-ci. Il lui suffit pour cela de pouvoir se servir chez ses voisins, du Nord en hydroélectricité, et du Sud en fossile. Toutefois si, à l'instar de l'Irlande, ce pays avait été isolé électriquement, il n'aurait pu doter son mix de telles proportions d'ELRi (42,6%) et ses émissions de CO₂ par kWh seraient bien plus élevées. Il s'agit donc là d'une situation de niche. En dehors de toute considération économique sur laquelle nous reviendrons plus loin, elle n'est pas extrapolable à l'ensemble de l'Europe, dont les ressources hydrauliques sont bien trop faibles pour pouvoir accepter de telles proportions d'ELRi dans son mix électrique sans avoir recours à des productions conventionnelles (fossiles, nucléaires) afin d'assurer la stabilité du réseau.

On constate donc une grande variété des situations d'un pays à l'autre. L'Europe de l'électricité n'existe pas, et il y a souvent de bonnes raisons pour qu'un pays n'aligne pas son mix électrique sur celui de son voisin. Bien sûr cette discussion montre que c'est en diminuant la part des combustibles fossiles dans le mix électrique, et en particulier celle du charbon (ses émissions de CO₂ par kWh produit sont environ deux fois plus fortes que celles du gaz (figure1)) qu'un pays peut faire baisser les émissions de CO₂ de sa production électrique. Les pays qui, de par leur géographie, disposent d'importantes ressources hydrauliques par habitant ont ici un grand avantage naturel. ***Pour ceux qui n'en disposent pas, le nucléaire est beaucoup plus efficace que les ELRI pour diminuer leurs émissions de CO₂. La raison en est simple : pour gérer leur intermittence, les ELRI requièrent un soutien (back-up) par des centrales « conventionnelles », capables de produire dans l'année beaucoup plus d'électricité qu'elles. En l'absence d'hydraulique et/ou de nucléaire en quantités suffisantes, celles-ci ne peuvent être que des centrales utilisant des combustibles fossiles, produisant de grandes quantités de CO₂.***

En Europe de l'Ouest, les cinq pays ayant le plus misé sur l'éolien et/ou le solaire photovoltaïque pour leur production d'électricité sont l'Allemagne, le Danemark, l'Espagne, l'Irlande et le Portugal. Il est donc instructif de comparer l'évolution des émissions de CO₂ de

leur électricité au cours des années de fort développement de ces sources d'électricité, c'est-à-dire depuis 2000, avec celles de pays ayant misé sur le nucléaire et l'hydroélectricité : On constate qu'aucun de ces cinq pays, malgré les annonces flatteuses des médias et des partis ou ONG écologistes, n'a réussi à diminuer ses émissions au niveau de celles de la France et à fortiori de la Suède et cela de très loin (**figure 3**). Parmi ces pays le Danemark est celui qui a la meilleure performance. On a évoqué plus haut pour quelles raisons et on y reviendra plus en détail plus loin.

On observe cependant une baisse progressive très sensible des émissions de ces cinq pays au fil du temps

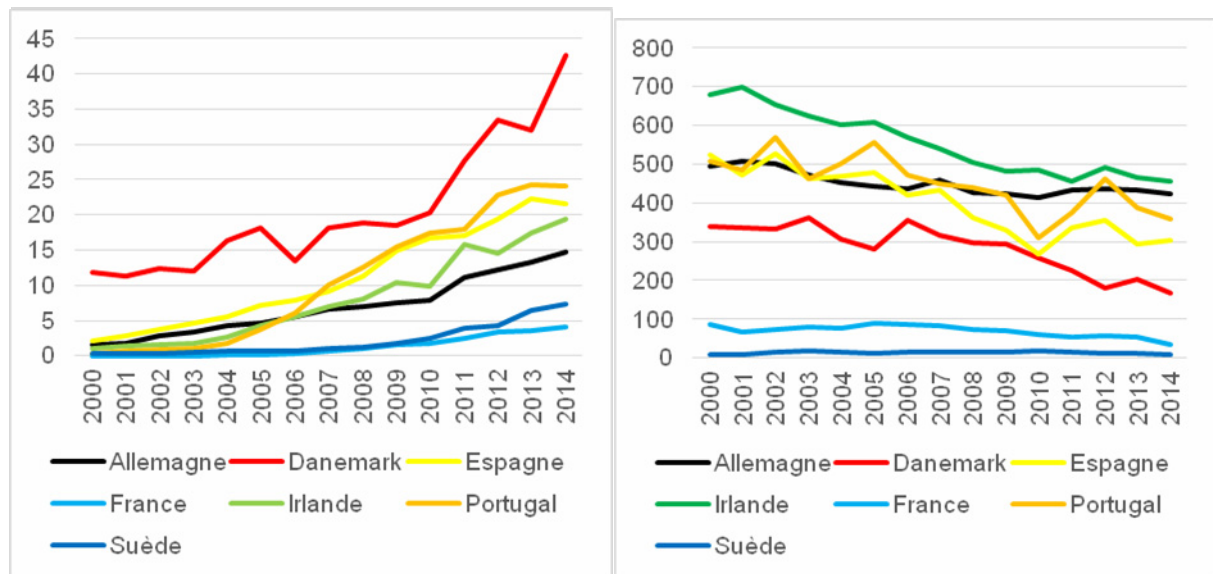


Figure 3: Evolutions de 2000 à 2014, à gauche des proportions d'ELRi dans le mix de production électrique brute, en %, et à droite des émissions de CO₂ de ce mix, en grammes de CO₂ par kWh, pour les pays européens ayant le plus misé sur l'éolien et/ou le solaire photovoltaïque, comparées à celles de la France et de la Suède, qui s'appuient principalement sur le nucléaire et l'hydroélectricité. Source: Agence européenne de l'énergie (EEA 2106, ENER038 Overview of electricity production and use in Europe)

On peut d'abord faire une remarque générale qui relativise les progrès illustrés par ces courbes décroissantes : en ce qui concerne les réductions d'émissions de CO₂, c'est « le PREMIER pas qui coûte le MOINS ». Donc plus on est mauvais, plus il est facile de trouver des marges de manœuvre pour s'améliorer. De ce fait, la comparaison en pourcentage de gain sur une période donnée d'un pays par rapport à un autre a peu d'intérêt si on ne prend pas en compte le point de départ. De toute façon, au plan climatique ce sont les émissions totales de CO₂ qui importent. Ceci dit, la baisse progressive des émissions de ces cinq pays est bien visible. La question est de savoir à quoi on peut l'attribuer. Elle est d'abord due pour une faible part à l'amélioration progressive des rendements énergétiques des centrales à combustibles fossiles. Toutefois certains des gains les plus notables (cas de l'Espagne, de l'Irlande et du Portugal) sont avant tout le résultat d'un transfert progressif de la production d'électricité du charbon au gaz, beaucoup moins émetteur de CO₂ par kWh produit (Figure 1), et plus souple que celui-ci pour gérer l'intermittence de l'éolien et du solaire PV. Par ailleurs, le Portugal, et dans une moindre mesure l'Espagne, ont récemment pu développer notablement leur production d'hydroélectricité. Seule l'Allemagne, parce qu'elle a trop peu d'hydroélectricité et utilise toujours beaucoup le charbon (en particulier sa variété la plus émettrice au kWh produit, le lignite) n'a pas véritablement progressé, en dépit d'un

déploiement massif des ELRi. Notons aussi que l'Allemagne et l'Espagne ont encore quelques réacteurs nucléaires en fonctionnement. Que se passera-t-il s'ils sont (Espagne) ou quand ils seront (Allemagne) fermés ?

La Figure 3 montre que le Danemark est celui des cinq pays qui a le mieux réussi à faire baisser ses émissions bien qu'il n'ait pas de nucléaire et pratiquement pas d'hydroélectricité. Il continue toutefois à utiliser beaucoup le charbon (ce qui de toute façon, à son échelle, en fait un des gros pollueurs de l'atmosphère européenne). Mais, si son potentiel hydroélectrique est faible, pour gérer l'intermittence de son éolien il peut faire appel aux « batteries de stockage » de ses voisins : ce sont les centrales hydroélectriques de Norvège et de Suède qui sont principalement utilisées pour cela. Cela a certes un coût financier pour le Danemark (prix faible du kWh éolien exporté, prix important du kWh hydraulique importé) mais au plan technique cela lui permet d'atteindre une fraction élevée de l'éolien dans son mix de production électrique. Toutefois la proportion est bien moins grande dans sa consommation, puisqu'il exporte une bonne partie de son éolien et importe de l'hydroélectricité ! Et il importe aussi bien sûr, en quantités bien difficiles à évaluer, de l'électricité nucléaire de Suède, mais aussi d'Allemagne et de France via ses interconnexions avec l'Allemagne.

C'est à partir de 2008 que la baisse des émissions CO₂ y est la plus prononcée. On verra plus bas que ce phénomène est corrélé à l'augmentation rapide de ses importations d'électricité à partir de cette date, associée à la reprise des constructions d'éoliennes, qui avaient stagné de 2003 à 2008 comme l'illustre la **figure 4** ci-dessous :

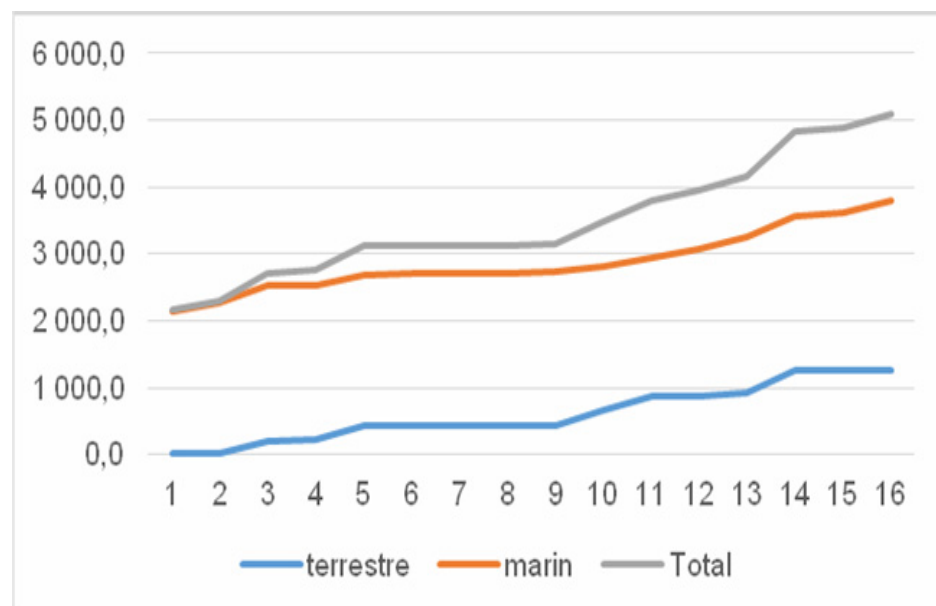


Figure 4 : Evolution, en MW, des capacités d'éolien installées au Danemark de 2000 (1 sur axe horizontal) à 2015 (16 sur axe horizontal), au 31 Décembre de chaque année. On observe le peu d'importance des installations nouvelles de 2003 à 2008. Données Energinet, Danemark. Courtoisie Bjarke Nielsen.

Si un tel système peut fonctionner à l'échelle d'un petit pays comme le Danemark entouré de grands voisins auquel il est lié par des capacités de transfert importantes, il est impossible à appliquer à l'échelle de l'EU 28. Par exemple, la production d'électricité de l'Allemagne est 20 fois celle du Danemark. Avec le même pourcentage de pénétration d'ELRi dans son mix, l'Allemagne aurait besoin de 20 Scandinavie(s) pour l'assister ! La performance danoise, tant célébrée par les médias, n'est donc en fait qu'un trompe-l'œil. En réalité, il convient de

rapporter cette production d'éolien à la production totale d'électricité de la Scandinavie et non à celle du seul Danemark ! Comme on l'a dit, et comme l'illustrera la comparaison avec l'Irlande, il s'agit d'une situation de niche, non généralisable à l'échelle de l'Europe entière. Le Danemark utilise aussi beaucoup la biomasse mélangée au charbon. Cette biomasse n'est pour l'instant pas comptabilisée administrativement pour les émissions CO₂ de la production électrique (alors que selon la figure 1 on devrait plutôt la comptabiliser à environ 1/3 de celle du gaz).

La Suède fait mieux que la France. Cela provient du fait qu'elle dispose de beaucoup plus d'hydroélectricité par habitant (table 2). Cela lui permet également d'utiliser relativement plus d'éolien que la France, en gérant son intermittence au moyen de l'hydroélectricité plutôt qu'en brûlant des combustibles fossiles.

La France doit donc ses bonnes performances au fait que, comme la Suède, elle utilise peu les combustibles fossiles pour sa production d'électricité et qu'elle s'appuie surtout sur le nucléaire et l'hydraulique. ***Ainsi en 2014, elle a produit 12 fois moins de CO₂ par kWh que l'Allemagne !*** En effet, malgré un développement ininterrompu de l'éolien et du solaire photovoltaïque depuis quinze ans, notre voisin utilise quasiment toujours autant de combustibles fossiles, et en particulier de charbon. Sur la **figure 5** on constate que la progression des ELRi n'a eu que très peu d'effet sur les émissions de CO₂ de son mix électrique.

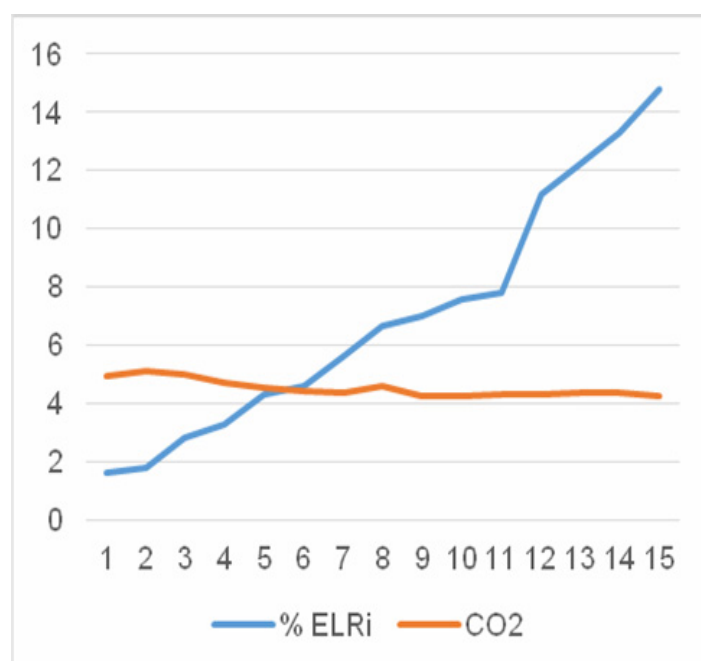


Figure 5 : Allemagne sur 15 ans de l'an 2000 (1 sur l'axe horizontal) à 2014 (15 sur l'axe horizontal): Evolution des proportions d'ELRi dans le mix électrique (courbe bleue, unité de l'axe vertical %) et des émissions de CO₂ de ce mix, (courbe rouge, même échelle unité de l'axe vertical en centaines de grammes par kWh).

L'impact de la politique énergétique allemande sur la santé publique en Europe est vraisemblablement considérable ainsi que des ONG ont tenté de le quantifier dans un rapport récent (http://awsassets.wwfffr.panda.org/downloads/dark_cloud_full_report.pdf ; on pourra aussi regarder <https://vimeo.com/172886975>). Ces dommages sont principalement le fait des particules fines et des oxydes de soufre et d'azote, émis par les centrales à combustibles fossiles, et particulièrement celles à charbon et à lignite. Comme les mouvements de

l'atmosphère ne connaissent pas les frontières, l'Allemagne, ainsi que d'autres pays (Pologne par exemple) qui produisent aussi une grande partie de leur électricité avec des combustibles fossiles, exporte cette pollution dangereuse vers les pays voisins. Parmi ceux-ci il y a la France, pour laquelle le rapport cité plus haut se risque à évaluer la mortalité additionnelle résultant de ces « importations » indésirables de pollution à plus de 1000 morts prématurées par an, rien que pour le charbon !

Dans les pays où il a été important, le développement des ELRi en Europe de l'Ouest a probablement entraîné une diminution des émissions de CO₂ quand ces pays avaient un mix électrique ne comportant pour l'essentiel que des combustibles fossiles. Cependant cet effet positif est marginal comme le démontrent les statistiques européennes. De fait, quand il a eu lieu, c'est le passage du charbon au gaz dans le mix électrique qui a eu le rôle le plus déterminant dans la diminution observée des émissions. L'extension à d'autres pays des expériences faites par ces pays risque donc d'être tout aussi décevante.

Notons au passage que ces pays qui s'engagent dans ces politiques de déploiement massif d'ELRi lient de facto leur avenir électrique aux combustibles fossiles, donc aux émissions de CO₂ et de polluants atmosphériques qui vont avec, mais aussi aux futurs problèmes d'approvisionnement qui pourraient survenir.

Les pays qui, comme la France ont des mix électriques très peu émetteurs de CO₂ n'ont aucun intérêt à développer les ELRi, puisqu'elles ne peuvent faire baisser significativement leurs déjà très faibles émissions.

ELRi et prix de l'électricité pour les ménages

Sur la **figure 6** qui reprend les chiffres du tableau 3 on a porté le prix de l'électricité payé par les ménages dans les 15 pays étudiés en fonction de la proportion d'ELRi dans leur mix électrique, en %, et à droite de la capacité installée d'ELRi en watts par habitant. On observe une corrélation positive : le prix est d'autant plus élevé que la proportion d'ELRi ou la capacité installée d'ELRi est importante. Cette corrélation, déjà bonne en utilisant les proportions d'ELRi, est encore plus forte avec les capacités installées.

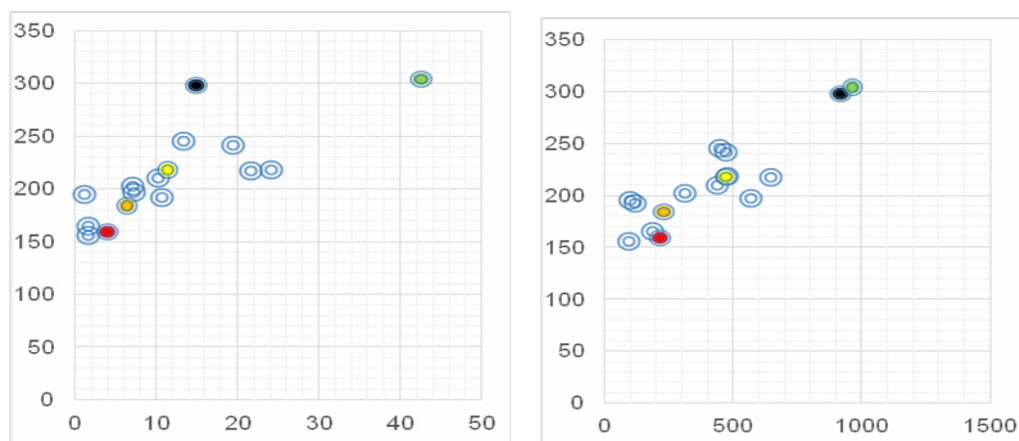


Figure 6 : 15 pays d'Europe de l'Ouest en 2014 : prix de l'électricité payé par les ménages en fonction à gauche de la proportion en % d'ELRi dans le mix électrique, et à droite de la proportion de capacité d'ELRi installée en watt par habitant. Source : Eurostat et l'European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO E). En rouge la France, en orangé les Pays-Bas, en noir l'Allemagne, en vert le Danemark et en jaune la moyenne des quinze pays (superposée avec le Portugal dans le diagramme de droite).

Les prix les plus élevés sont ceux de l'Allemagne et du Danemark. On observe cependant que le Danemark est à peine plus cher que l'Allemagne pour une proportion d'ELRi beaucoup plus importante dans sa production électrique ! Mais on remarque aussi que cet écart devient très réduit quand on rapporte les prix aux capacités de production. Ceci s'explique par un facteur de charge des ELRi (rapport entre la quantité d'électricité effectivement produite dans l'année à celle qui résulterait d'un fonctionnement à la puissance nominale), qui est environ 2,7 plus faible en Allemagne qu'au Danemark. En effet, les parcs d'ELRi de ces deux pays ont des caractéristiques différentes : environ la moitié du parc allemand, contre seulement 10 % du parc danois, est constitué de panneaux solaires (tableau 2), dont le facteur de charge annuel est environ 2 fois plus faible que celui de l'éolien. D'autre part le vent est en moyenne beaucoup plus favorable au Danemark qu'en Allemagne, pays continental qui ne bénéficie que dans sa partie côtière de la Mer Baltique de vents de vitesse moyenne comparable à ceux du Danemark. Mais cela est dû aussi aux particularités du mix électrique danois déjà décrites : en s'appuyant sur les équipements hydroélectriques de ses voisins scandinaves le petit (en termes de volume de production électrique bien sûr) Danemark a pu se permettre de produire beaucoup plus d'éolien pour une même capacité de production que s'il avait été isolé électriquement. Mais ses dépenses en capital et en infrastructures par unité de capacité d'ELRi sont à peu près les mêmes que celles de l'Allemagne.

La Suède et la Norvège achètent (à bas prix) les excédents temporaires de production éolienne du Danemark et l'utilisent pour conserver dans leurs barrages, l'eau qu'ils auraient autrement utilisée pour leurs besoins propres. En sens inverse elles lui fournissent de l'hydroélectricité (à prix fort) quand le vent est insuffisant en mer du Nord. Ceci est impossible à envisager pour l'Allemagne, car les ressources hydrauliques de l'Europe entière n'y suffiraient pas.

Pour l'Allemagne, on observe pour la période 2000- 2014 (**figure 7**) une corrélation très étroite entre l'augmentation du prix de l'électricité pour les ménages et l'augmentation des proportions d'ELRi dans le mix électrique.

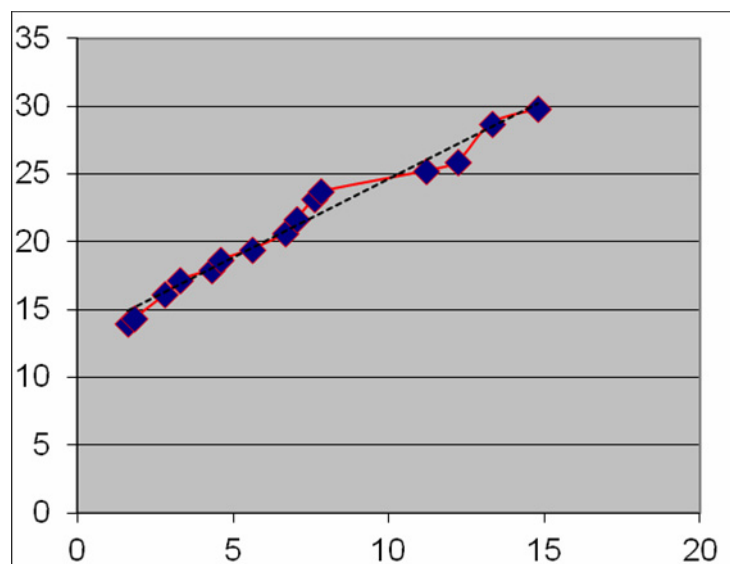


Figure 7 : Allemagne 2000-2014 : Relation entre, en abscisses la proportion d'ELRi dans le mix électrique en %, et en ordonnées le prix de l'électricité payé par les ménages en centimes d'euros par kWh, de 2000 à 2014. On constate une étroite corrélation, à raison de 6,4 % d'augmentation de prix par % d'augmentation d'ELRi dans le mix électrique.

Cette corrélation, bien que moins régulière, s'observe aussi en France, alors que la contribution des ELRi y est pourtant bien plus faible (**figure 8**).

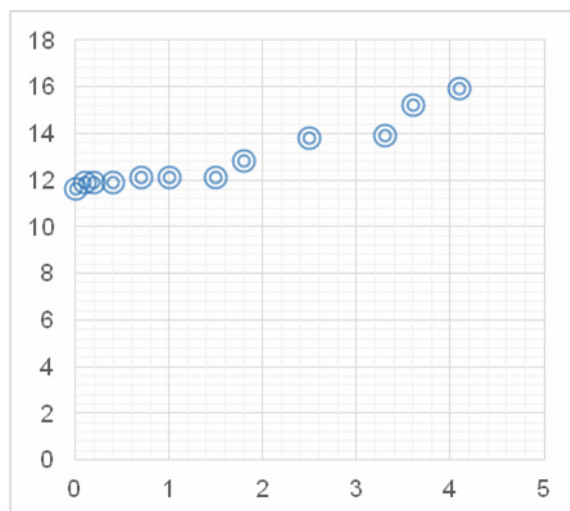


Figure 8 : France : relations entre le prix de l'électricité payé par les ménages, en centimes d'euro par kWh, et la proportion d'ELRi dans le mix électrique de 2003 à 2014, en %. Source Agence internationale de l'Energie pour les proportions, Eurostat pour les prix. Eurostat ne donne pas de prix avant 2003.

Force est de constater que le prix de l'électricité observé en 2014 en France pour un peu plus de 4 % d'ELRi est voisin de celui payé en Allemagne quand la proportion d'ELRi dans son mix électrique a atteint cette même valeur, c'est-à-dire en 2003.

La **figure 9** montre comment ont évolué de 2003 à 2014 les prix de l'électricité dans les 5 pays d'Europe de l'Ouest ayant le plus d'ELRi dans leur mix électrique, ainsi que par comparaison en France et en Suède, qui n'en ont pour l'instant que peu.

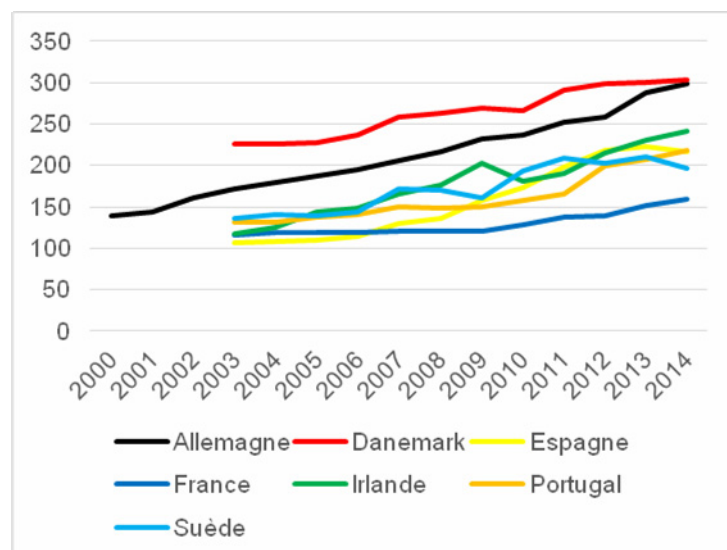


Figure 9 : Evolution des prix de l'électricité (en €/MWh) pour les ménages pour les cinq pays d'Europe de l'Ouest ayant les plus fortes proportions d'ELRi dans leur mix électrique, et comparaison avec la France et la Suède. Source Eurostat. Il n'y a pas de données disponibles pour les prix avant 2003, sauf pour l'Allemagne.

La formation des prix de l'électricité dans un pays est un processus complexe qui dépend en partie des politiques publiques et du prix des matières premières, combustibles fossiles ou uranium. L'augmentation des prix de l'électricité que l'on observe depuis quelques années en Europe de l'Ouest ne dépend donc bien sûr pas que de la proportion des ELRi dans le mix électrique. Mais les corrélations observées et surtout les différences en fonction du poids relatif des ENRi dans le mix montrent que celui-ci est un facteur important de cette augmentation. Cela se comprend d'ailleurs aisément : pour être utilisables à l'intérieur d'un réseau intégré ne disposant pas de capacités de stockage suffisantes (cas de l'Europe aujourd'hui et pour longtemps), les ELRi ne peuvent se passer de centrales « conventionnelles » de backup.

Les capacités d'ELRi ne remplacent donc pas les capacités conventionnelles existantes dont le réseau a toujours besoin mais pour l'essentiel s'y rajoutent. L'exemple de l'Allemagne est de ce point de vue spectaculaire : d'après l'European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO E), les capacités installées totales, tous modes confondus, y sont passées en chiffres ronds de 104 GW en 2000, dont 2,6 GW d'ELRi, à 188 GW en 2015, dont 82 GW d'ELRi (pour la France, les valeurs correspondantes sont de 111 GW, dont 0,2 GW d'ELRi, en 2000, et de 129 GW, dont 17,4 d'ELRi, en 2015). Le développement des ELRi a conduit à presque doubler les capacités électriques de l'Allemagne en 15 ans et ce pour une production d'électricité qui n'a pas beaucoup varié.

En d'autres termes, pour le même service rendu (fourniture d'énergie électrique au citoyen) on a massivement augmenté les dépenses en capital. En outre, en diminuant la production des centrales conventionnelles, on a augmenté le prix du kWh qu'elles produisaient, puisque leurs charges fixes restaient les mêmes pour une production plus faible. Enfin, les adaptations des réseaux, et les constructions de nouvelles lignes à très haute tension qui sont nécessaires à l'insertion des ELRi, augmentent encore ce coût. Il faut bien que quelqu'un paye tout cela. A la fin des fins, quel que soit le mécanisme adopté, c'est toujours le consommateur.

On observe sur la figure 9 que le prix de l'électricité en Suède est nettement plus élevé qu'en France. Corrélativement, les capacités installées d'ELRi sont maintenant de plus du double de ce qu'elles sont en France (tableau 3).

Trois pays très différents : Le Danemark, l'Irlande et la France

Pour finir nous comparons ici à la France deux pays ayant beaucoup développé les ELRi mais qui ne font pas appel au nucléaire et ne disposent pratiquement pas de ressources en hydraulique et en combustibles fossiles. La France, elle aussi, n'a quasiment pas de ressources en combustibles fossiles. Mais elle a par contre beaucoup développé son parc nucléaire et elle dispose d'un bon parc hydraulique (fleuves et retenues, y compris près de 4 GW de stations de transfert d'énergie par pompage (STEP)). Loin d'être négligeable ce dernier reste toutefois limité puisque, selon les années, il n'est en mesure de fournir qu'entre 10 à 15 % de la production brute actuelle d'électricité.

Danemark et Irlande sont deux pays dont la production brute d'électricité et la population sont assez voisines. Toutefois, contrairement au Danemark, l'Irlande a peu d'interconnexions électriques avec le reste de l'Europe. La France « pèse » environ 10 fois la production d'électricité de l'ensemble Danemark plus Irlande (tableau 1), pour une population seulement 6 fois supérieure.

Le Danemark

Le Danemark n'a pas de nucléaire. Il n'a pas non plus de ressources hydrauliques. Il n'a pas de charbon. En Mer du Nord, il dispose de quelques ressources en pétrole et gaz. Toutefois celles-ci sont en voie d'épuisement. Très tôt, il a été relié de manière efficace au réseau électrique des pays scandinaves voisins, la Norvège et la Suède mais aussi bien sûr à celui du grand voisin allemand. Le système électrique Danois présente une bizarrerie : les interconnexions entre sa partie Ouest et sa partie Est, ont une faible capacité, 600 MW, et ces deux parties sont donc presque indépendantes électriquement l'une de l'autre. La partie Ouest est par contre bien reliée au réseau électrique interscandinave, et échange constamment de l'électricité avec la Norvège et la Suède, tandis que la partie Est est bien reliée à l'Allemagne, avec laquelle elle échange également constamment.

La **figure 10** montre l'évolution de 2000 à 2014 de la proportion d'ELRi dans le mix électrique du Danemark. Cette proportion, de l'éolien essentiellement car le Danemark a peu de solaire PV, atteignait déjà plus de 10 % en 2000. Elle a semblé plafonner un peu en dessous de 20 % entre 2007 et 2010, puis s'est remise à grimper rapidement pour dépasser les 40 % en 2014.

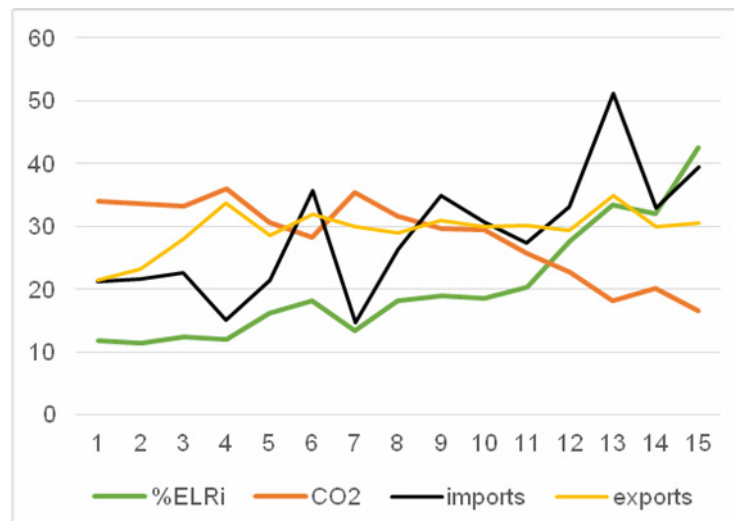


Figure 10 : Danemark : Evolution de 2000 (1 sur l'axe horizontal) à 2014 (15 sur l'axe horizontal) des proportions d'ELRi en % (courbe verte, axe vertical) dans le mix de production brute électrique et des émissions de CO₂ de ce mix (courbe rouge, axe vertical **en dizaines de grammes par kWh**), et évolution pour la même période des exportations (courbe orange, axe vertical en % de la production brute) et importations d'électricité (courbe noire, axe vertical en % de la production brute). On remarque les grandes fluctuations des importations (courbe noire), ainsi que leur augmentation moyenne au cours de cette période et leur bonne corrélation avec les maximums des émissions de CO₂ (courbe rouge). On observe aussi le déclin prononcé des émissions de CO₂ après 2008, en corrélation avec l'augmentation des exportations. <http://euanmearns.com/co2-emissions-variations-in-ccqts-used-to-balance-wind-in-ireland/>

La figure 10 montre l'exceptionnelle importance des exportations et des importations d'électricité par rapport à la production brute d'électricité. Le Danemark électrique ne peut survivre tel qu'il est que grâce à ses voisins qui d'une part absorbent ses surplus et d'autre part l'alimentent quand l'éolien s'effondre. Depuis 2003 les exportations sont assez régulièrement d'environ 30 % de celle-ci, tandis que les importations, très fluctuantes et tout

d'abord en moyenne inférieures aux exportations jusqu'en 2008, sont devenues ensuite supérieures. En 2014, la solde des imports- exports a représenté 9,3% de la consommation finale. En 2012, il a même atteint 16,7 % ! Corrélativement, on observe la baisse importante des émissions de CO₂ de la production déjà discutée. On observe toutefois que les pics d'émissions de CO₂ correspondent à des baisses des importations. Plus le pays s'appuie sur ses propres ressources, plus il produit de CO₂ ! Ce sont là les effets de la véritable symbiose qui existe entre ce pays et ses voisins scandinaves, Norvège et Suède. C'est cette symbiose, et surtout la disponibilité chez ceux-ci de considérables ressources hydrauliques, qui permet donc au Danemark d'afficher à la fois un taux record d'ELRi dans son mix électrique et des émissions de CO₂ sensiblement plus faibles que celles des autres pays ayant eux aussi fortement développé les ELRi.

La puissance installée des interconnexions du Danemark avec ses voisins est passée en 2015 de 5 GW à 6 GW, et les exportations ont encore augmenté. Une liaison de 1 GW est en préparation avec les Pays-Bas. Par comparaison la France, avec une production d'électricité d'environ 17,5 fois plus importante, n'a guère plus que le double d'interconnexions avec ses voisins. Un système de production électrique à la Danoise serait non seulement impensable à créer pour la France mais aussi impossible à gérer, car il faudrait pour cela 17 Scandinavie pour l'aider à accepter une proportion similaire d'ELRi dans son mix de production électrique.

Le Danemark utilise aussi beaucoup la biomasse comme ajout au charbon dans ses centrales à charbon.

Grâce aux importations il a été possible au Danemark de faire baisser très sensiblement les proportions de charbon et de gaz dans son mix de production électrique. On observe ainsi une forte corrélation entre l'évolution des émissions de CO₂ et celle de la fraction charbon (figure11).

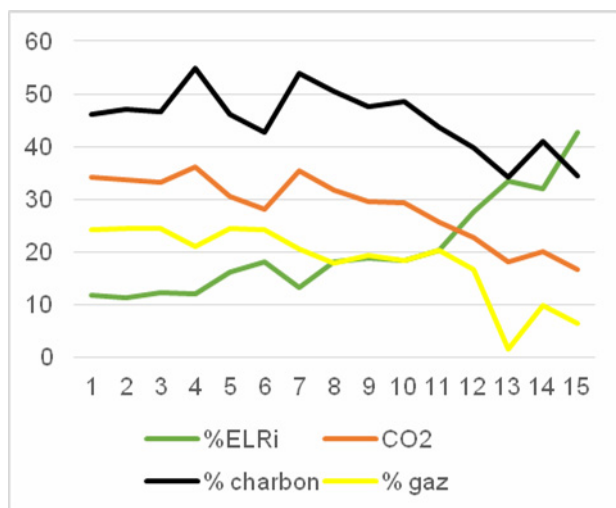


Figure 11 : Danemark : évolutions de 2000 (axe horizontal, point 1) à 2014 (axe horizontal point 15) des proportions de charbon (courbe noire en % du mix) et de gaz (courbe jaune en % du mix) dans la production brute d'électricité, en % du mix, et des émissions de CO₂ (courbe rouge, unité **dizaines de grammes par kWh**), et comparaison avec celle de la proportion d'ELRi (courbe verte en % du mix).

L'Irlande

La production brute d'électricité de l'Irlande est voisine de celle du Danemark (tableau1). Il en est de même de sa population (tableau 2).

Comme le Danemark, l'Irlande n'a ni nucléaire, ni ressources hydrauliques notables. Elle a encore moins de ressources en combustibles fossiles.

On observe (**figure 12**) que l'Irlande est importatrice nette d'électricité mais que ses échanges avec l'extérieur sont bien plus faibles que ceux du Danemark. De 2000 à 2014 la part d'ELRi dans son mix électrique est passée de pratiquement 0 à 19,5 %. Simultanément, le prix de l'électricité a plus que doublé (**figure 9**).

C'est une île qui, sans être totalement isolée électriquement, n'est reliée à l'Angleterre que par deux interconnexions de 500 MW chacune : L'une, Moyle, a été créée en 2001 avec l'Ecosse via l'Irlande du Nord, et l'autre, East-West, a été créée en 2012 entre l'Irlande et le Pays de Galles. A noter que cette dernière vient de connaître le 8 Septembre une avarie durable, qui a conduit à limiter la production des éoliennes à certains moments. Cela montre que cette production est déjà devenue partiellement dépendante des capacités d'imports-exports d'électricité avec les pays voisins. <http://www.independent.ie/irish-news/broken-power-line-between-ireland-and-britain-to-spark-electricity-bills-rise-35094500.html>.

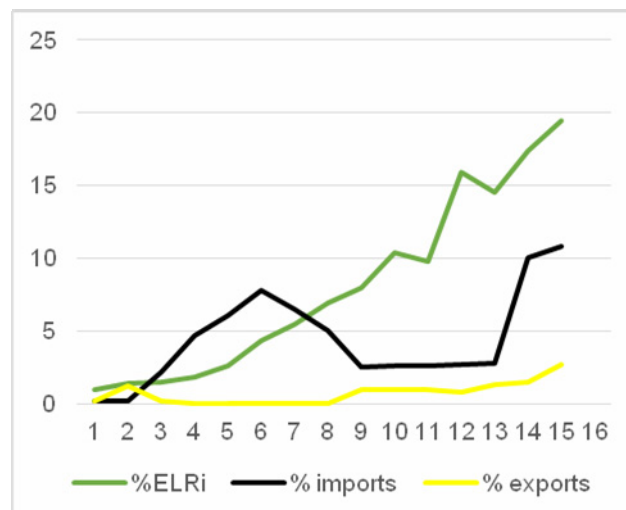


Figure 12 : Irlande : Evolution de 2000 (axe horizontal, point 1) à 2014 (axe horizontal, point 15) des proportions d'ELRi (courbe verte, axe vertical en %), d'importations (courbe noire, axe vertical en % de la production brute) et d'exportations d'électricité (courbe jaune, axe vertical en % de la production brute) de 2000 à 2014. On observe l'augmentation brutale des importations après la mise en service en 2012 de l'interconnexion East-West avec l'Angleterre.

La proportion de combustibles fossiles dans le mix électrique est encore d'environ 75 %, mais la part du gaz est devenue progressivement bien plus importante que celle du charbon (**figure 13**).

Les émissions de CO₂ restent très importantes. Elles ont toutefois diminué sensiblement, mais beaucoup plus à cause du remplacement du charbon par le gaz, moins émetteur, qu'à cause du déploiement massif des ELRi. On observe clairement sur la figure 13 une bonne corrélation entre la diminution des émissions et la diminution de la part du charbon dans le mix électrique. Notons à ce propos qu'une étude récente montre que le bénéfice du développement

de l'éolien pour réduire les émissions de CO₂ de la production électrique pâtit de la baisse de rendement des centrales à gaz, qui résulte des incessantes variations de régime qui leur sont imposées pour gérer l'intermittence éolienne.

(<http://euanmearns.com/co2-emissions-variations-in-ccgts-used-to-balance-wind-in-ireland/>)

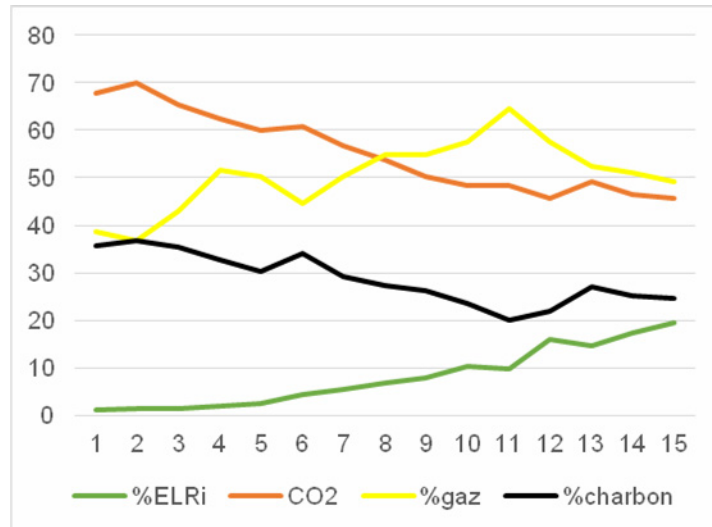


Figure 13 : Irlande : Evolution de 2000 (axe horizontal, point 1) à 2014 (axe horizontal, point 15) des proportions d'ELRi (courbe verte en % du mix), de charbon (courbe noire en % du mix) et de gaz (courbe jaune en % du mix), et des émissions de CO₂ (courbe rouge en dizaines de grammes par kWh). On observe la croissance des ELRi, la diminution de la part du charbon et l'augmentation de celle du gaz. La décroissance des émissions de CO₂, qui restent toutefois très importantes, est pratiquement parallèle à la diminution de la part du charbon.

Du fait de son relatif isolement électrique, il paraît difficile que l'Irlande puisse accroître encore de façon importante la part des ELRi dans son mix électrique, du moins tant qu'à l'instar du Danemark elle n'aura pas pu développer plus ses interconnexions avec le reste de l'Europe. Mais si cela lui sera sûrement très coûteux en investissements il ne semble pas qu'elle pourra en tirer un grand bénéfice, le Danemark occupant déjà la seule véritable niche hydraulique européenne : celle de la Scandinavie. Par exemple, une liaison est actuellement à l'étude avec la Bretagne. On en comprend mal la finalité puisque la Bretagne actuellement dépend à plus de 80 % d'importations électriques du reste de la France. L'Irlande peut par contre totalement remplacer le charbon par le gaz pour diminuer ses émissions de CO₂. Ce faisant, elle deviendra bien sûr totalement dépendante des fournisseurs étrangers de gaz (Russie ?) puisqu'elle n'a pas de gisement sur son territoire, et que ses ELRi seraient largement inutilisables sans centrales de back up à gaz.

La France

La France a du nucléaire, qui assure environ les trois quarts de sa production brute d'électricité, et de l'hydraulique, qui assure entre 10 et 15 % environ de cette production selon les années, en fait selon la pluviométrie. La **figure 14** montre l'évolution des proportions dues aux ELRi, au charbon et au gaz dans le mix de production électrique, ainsi que celle des émissions de CO₂ de ce mix.

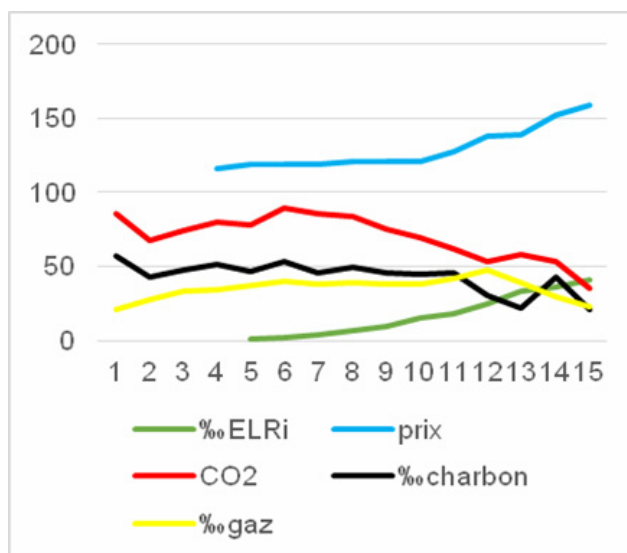


Figure 14 : France : Evolution de 2000 (axe horizontal, point 1) à 2014 (axe horizontal, point 15) des proportions d'ELRi (courbe verte en ‰ du mix), de charbon (courbe noire en ‰ du mix) et de gaz (courbe jaune en ‰ du mix) dans le mix de production électrique de 2000 à 2014. Evolution des émissions de CO₂ de ce mix (courbe rouge en grammes par kWh) et des prix de l'électricité pour les ménages, (courbe bleue en euros par MWh ; depuis 2003 seulement). On remarque le parallélisme entre l'évolution des prix et celle de la proportion d'ELRi.

On notera que sur cette figure les fractions des diverses productions sont cette fois données en ‰ et non en % (dix fois plus petit). On observe que l'augmentation de la fraction d'ELRi dans le mix de production est bien corrélée avec celle des prix de l'électricité. L'explication pourrait être double : d'une part l'augmentation de la Contribution au Service Public de l'Electricité (CSPE), taxe sur la consommation d'électricité qui dépasse maintenant avec sa TVA 6 milliards d'euros par an, et dont près des trois-quarts servent à couvrir les surcoûts des tarifs d'achat des ELRi, et d'autre part l'augmentation régulière des frais de réseau qu'implique le déploiement des ELRi (Tarif d'utilisation des réseaux publics d'électricité (TURPE)).

La contribution des combustibles fossiles est très faible et a diminué de 2012 à 2014. Elle a été particulièrement faible en 2014. Corrélativement, les émissions de CO₂ du mix électrique (ici en g/kWh) sont très faibles. Elles diminuent de façon assez régulière depuis 2007 (figure 14). La cause en est d'ailleurs la fermeture ou la mise sous cocon de centrales à charbon et leur remplacement progressif par des centrales à cycle combiné gaz (CCG), bien plus que l'augmentation de la proportion d'ELRi : la **figure 15** montre en effet qu'en 2000, la capacité des centrales à charbon en fonctionnement était d'environ 8 GW. Elle n'était que la moitié en 2015. Il n'y avait pas de CCG en 2000 ; il y en avait environ 5 GW en 2015. Il se peut bien sûr qu'on puisse assigner aux ELRi une petite contribution à cette baisse, car la météo permet

parfois une forte production éolienne lors des pointes de consommation du soir (19h-21h). Dans ce cas favorable, l'éolien peut en effet se substituer aux combustibles fossiles qui sont utilisés pour gérer ces pointes. Par contre pendant cette tranche horaire critique, le solaire n'est d'aucune utilité.

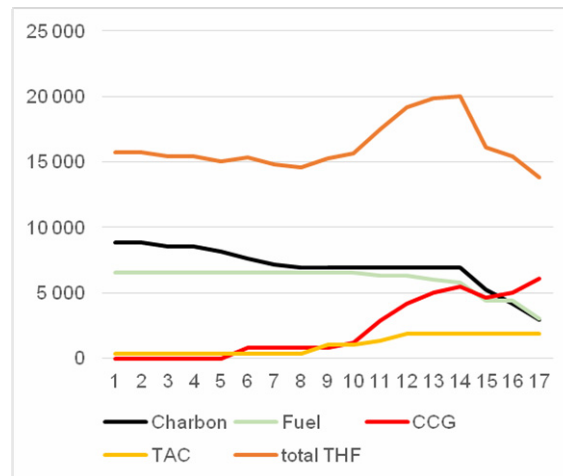


Figure 15 : France : évolutions des capacités de centrales thermiques à flamme (THF) de 2000 (1 sur l'axe horizontal) à 2016 (17 sur l'axe horizontal). On observe la diminution importante des capacités totales à partir de 2013, l'augmentation rapide des capacités en centrales à gaz à cycles combinés (CCG) à partir de 2009, et la diminution des capacités des centrales à charbon et à fuel à partir de 2013. Il y a aussi augmentation des capacités en turbines à combustion (TAC) en 2008. Courtoisie F. Poizat et J. Patel

La **figure 16** montre les variations de la production d'hydroélectricité, ainsi que des exportations et d'importations d'électricité. On constate que la production hydroélectrique varie d'une année sur l'autre, en fonction de la pluviométrie (entre 8 et 14 % du mix). Les exportations se situent dans la même gamme. Elles sont largement supérieures aux importations. Grâce à son parc nucléaire la France est le premier exportateur européen d'électricité avec une contribution positive sur sa balance commerciale. Jusqu'en 2012 on observait néanmoins une tendance à la hausse des importations.

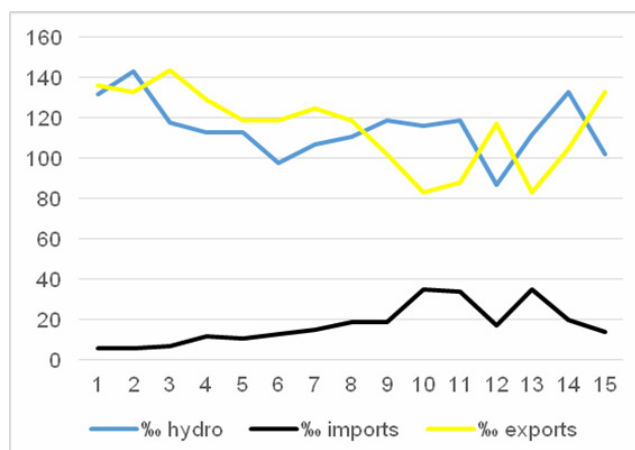


Figure 16 : France : Evolution de 2000 (axe horizontal, point 1) à 2014 (axe horizontal, point 15) de la contribution de l'hydroélectricité (courbe bleue en % du mix), des importations (courbe noire en % du mix) et des exportations (courbe jaune en % du mix).

Conclusion

ELRi et émissions de CO₂

C'est bien évidemment l'importance des combustibles fossiles dans le mix d'un pays qui détermine pour l'essentiel l'importance des émissions de CO₂ de son secteur électrique. La nature des combustibles fossiles utilisés a aussi son importance : le gaz émet environ deux fois moins de CO₂ que le charbon par kWh d'électricité produite (figure1). Quant au pétrole, il n'est plus guère utilisé.

Des quinze pays examinés, il n'y en a que cinq dont le mix électrique émet très peu de CO₂ : ce sont en effet tous des pays qui ont réussi à se passer à peu près complètement des combustibles fossiles pour produire leur électricité : l'Autriche, la France, la Norvège, la Suède et la Suisse. Ils le doivent à des ressources hydrauliques par habitant exceptionnelles comme c'est le cas de la Norvège et dans une moindre mesure de l'Autriche, ou à un mix de production électrique associant pour l'essentiel hydraulique et nucléaire, en proportions variables selon les possibilités offertes par l'hydraulique, pour les trois autres. Pour ces cinq pays, si le but est vraiment de diminuer leurs émissions de CO₂, on ne voit pas quel peut être l'intérêt de développer fortement les ELRi. On peut même avancer que si on les développait en baissant la contribution nucléaire dans les pays qui l'utilisent, la performance en termes d'émission CO₂ ne pourrait que se dégrader puisqu'il faudrait mettre en place des moyens de compensation de l'intermittence à base de combustibles fossiles.

Les dix autres pays, faute d'avoir pu ou voulu développer des ressources suffisamment importantes en hydraulique et/ou en nucléaire ont des contributions variables mais importantes des combustibles fossiles à leur mix électrique. Cinq d'entre eux ont développé plus que les autres les ELRi dans le but (médiatement affiché au moins) de diminuer leurs émissions de CO₂. Ce sont l'Allemagne, le Danemark, L'Espagne, l'Irlande et le Portugal. Toutefois ils n'ont pas réussi pour autant à abaisser leurs émissions au niveau des cinq meilleurs et cela de très loin. Cela s'explique aisément : l'intermittence des ELRi impose qu'on leur associe des centrales de back-up, qui doivent produire bien plus d'électricité qu'elles dans l'année. Dans des pays insuffisamment pourvus en ressources hydraulique et/ou nucléaires, ce sont bien sûr surtout des centrales à combustibles fossiles qui joueront ce rôle. Parmi ces cinq, le Danemark, champion mondial de l'éolien, est celui de ces pays qui a réussi à baisser le plus substantiellement ses émissions. Cependant, à l'analyse, on s'aperçoit que c'est un pays qui utilise en back-up de son éolien les centrales hydroélectriques de ses voisins scandinaves, la Norvège et la Suède. Ce qui est possible à l'échelle d'un petit pays ne le serait plus à l'échelle de l'Europe, qui n'aurait pas pour cela suffisamment de ressources hydrauliques, et de très loin. Par contre les performances médiocres de l'Allemagne en dépit d'un imposant déploiement d'ELRi ne plaident vraiment pas en faveur d'une utilisation des ELRi pour faire baisser les émissions de CO₂.

ELRi et prix de l'électricité pour les ménages

Bien que la formation des prix de l'électricité dans un pays soit largement le résultat des politiques publiques, ainsi que des prix des matières premières, combustibles fossiles et uranium, la corrélation observée entre le prix de l'électricité pour les ménages et les capacités installées d'ELRi est ici évidente (figure 6). Elle est d'ailleurs logique : les ELRi ne peuvent se passer, pour être utilisables, de centrales «conventionnelles» de backup. Les capacités d'ELRi s'ajoutent donc aux capacités conventionnelles existantes sans permettre de supprimer ces capacités conventionnelles de façon très significative. Ainsi en Allemagne, le

développement d'ELRi a conduit à pratiquement doubler les capacités électriques de ce pays en 15 ans pour une production d'électricité qui n'a guère varié. Les dépenses en capital ont donc augmenté et doivent, d'une façon ou d'une autre se répercuter sur le prix payé par le consommateur. En outre, en diminuant la production des centrales conventionnelles, on a augmenté le prix du kWh qu'elles produisaient, puisque leurs charges fixes restaient les mêmes pour une production plus faible. Enfin, les adaptations des réseaux qui sont nécessaires à l'insertion des ELRi dans ceux-ci augmentent encore ce coût.

ELRi et indépendance énergétique de l'Europe.

L'un des objectifs assignés officiellement au développement des ELRi est de diminuer l'indépendance énergétique de l'Europe.

Le développement des ELRi en Europe y a sans doute fait baisser un peu la consommation de combustibles fossiles, mais il s'agit là d'un phénomène marginal. Par contre, ce développement est indissociable dans les pays où il est le plus important de la disponibilité de centrales de back-up à combustibles fossiles. Or on constate l'épuisement des réserves européennes, qui entraînent une diminution maintenant très rapide des productions. On trouvera en annexe des graphiques montrant ce phénomène.

Les ELRi, loin de faire décroître la dépendance énergétique de l'Europe, ont donc bien au contraire créé dans les pays qui les ont fortement développées une dépendance durable de leur production d'électricité aux combustibles fossiles, alors que leurs productions de ceux-ci sont déjà inexistantes pour beaucoup de pays européens ou en voie de disparition rapide dans les principaux pays encore producteurs, à l'exception notable de l'Allemagne pour le lignite. Les ELRi ne pourront donc bientôt se maintenir dans ces pays que grâce à des combustibles fossiles importés de pays non européens.

Et la France ?

Etant donné les émissions de CO₂ déjà très faibles du mix électrique français, et la relation entre proportions d'ELRi et coût de l'électricité, observée dans tous les pays européens, il n'y a aucune raison d'ordre climatique ou économique, d'augmenter encore en France la part des ELRi dans le mix électrique.

D'autre part, du fait de la faiblesse en relatif de sa production hydroélectrique et de l'absence de possibilités suffisantes, contrairement au cas du Danemark, d'utiliser l'hydroélectricité d'autres pays européens comme « batterie de stockage », l'élimination du nucléaire accompagnée d'un fort développement des ELRi, comme le souhaitent certains, ne pourrait conduire la France qu'à une situation à l'allemande ou à l'irlandaise, où malgré un fort développement des ELRi, l'essentiel de la production électrique reste assuré par des combustibles fossiles. Les conséquences d'une telle politique serait donc pour la France un accroissement considérable de ses émissions de CO₂ et de sa pollution atmosphérique, une dépendance durable aux combustibles fossiles importés et donc une dégradation de sa balance commerciale.

On a d'ailleurs pu récemment (Automne 2016) vérifier en pratique qu'une indisponibilité de la puissance nucléaire (18 GW de nucléaire arrêtés par l'ASN à fins de contrôles métallurgiques) ne pouvait absolument pas être compensée par les 18 GW de puissance ELRi (éolien plus solaire) déployés en France depuis le début de ce siècle. En l'absence de

nucléaire ce sont bien les centrales à combustibles fossiles étrangères qui par des importations ont permis d'assurer la stabilité du réseau électrique français. La voie des ELRi est donc une impasse pour notre pays.

Une autre conséquence serait la perte d'un avantage considérable que possède la France sur tous les autres grands pays industrialisés, du fait des très faibles émissions de sa production électrique : la possibilité de réduire considérablement les émissions de CO₂ de ses transports routiers, grâce au développement de la mobilité électrique (**figure 17**). En effet, si les véhicules électriques n'émettent pas directement de CO₂, la production de l'électricité qu'ils consomment en émet beaucoup si elle est faite dans une très forte proportion avec des combustibles fossiles, comme c'est le cas dans tous les grands pays industrialisés, à l'exception de la France !

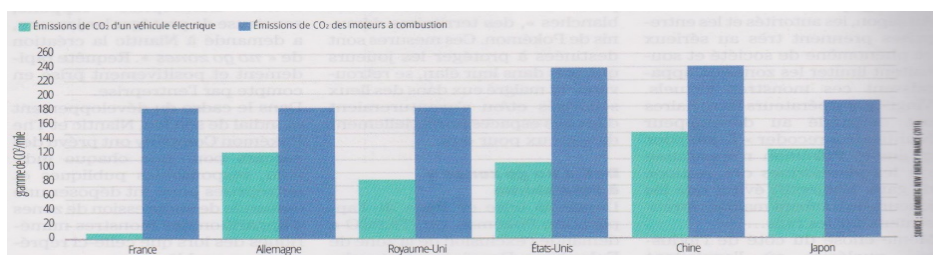


Figure 17 : Emissions de CO₂, pour une même distance parcourue, d'un véhicule à moteur électrique, comparées à celles d'un véhicule à moteur diesel pour quelques grands pays industriels. Les véhicules électriques n'émettent pas par eux-mêmes, mais la production de l'électricité qu'ils consomment oui. Source : Bloomberg

Cet avantage est d'autant plus précieux que la production de pétrole de l'Europe a décru très rapidement depuis 2000 (voir annexe), et que ce déclin va se poursuivre, malgré un petit sursaut temporaire dû aux cours très élevés du pétrole entre 2003 et 2014, qui a permis des investissements très importants portant leurs fruits actuellement. Et comme les quantités de pétrole qui sont mises sur le marché international, et donc les possibilités d'importation par l'Europe, ont commencé à décliner depuis 2008, sous le double effet d'une stagnation de la production mondiale et d'une consommation intérieure croissante des grands pays exportateurs, les pays européens vont pâtir de difficultés croissantes à se fournir sur le marché mondial. Or les transports dépendent actuellement à 98 % du pétrole.

Si la politique actuelle de développement à marche forcée des ELRi et de diminution de la part du nucléaire en France est vraiment guidée comme le prétendent les milieux politiques et les médias par des motivations climatiques et économiques, elle paraît donc de ces points de vue, disons ... peu pertinente, pour éviter de risquer ... l'impertinence.

Annexe

D'après la Statistical review of world energy 2016 de la compagnie britannique British Petroleum (<https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2016/bp-statistical-review-of-world-energy-2016-full-report.pdf>), la consommation de combustibles fossiles (**hors bois**) pour l'ensemble de l'économie (production électrique mais aussi surtout transport, chauffage, etc.) représente en 2015 une proportion plus faible de la consommation totale d'énergie primaire dans l'ensemble EU 28 + Norvège qu'il y a 50 ans (**figure 18 partie haute**). Cependant cette proportion demeure toujours très élevée, de l'ordre de 75% ! D'autre part, l'écart d'environ 400 Mtep (million de tonne-équivalent-pétrole) observé en 2015 entre consommation d'énergie primaire et consommation de combustibles fossiles provient aux deux-tiers de l'hydroélectricité et du nucléaire. En 2015, les énergies renouvelables hors bois autres que l'hydroélectricité, ne représentaient en effet, selon la même source, que 136 Mtep soit environ 1/3 de ces 400 Mtep, et environ 8,5 % des 1600 Mtep de la consommation totale d'énergie primaire. De ces 136 Mtep les ELRi, ne représentaient qu'environ 30 Mtep, soit 7,5 % de ces 400 Mtep et un peu moins de 2 % de la consommation totale d'énergie primaire !

On observe aussi que malgré une diminution de consommation de combustibles fossiles très sensible depuis 2006, atteignant environ 300 Mtep en 2015, le déclin des productions de combustibles fossiles de l'ensemble EU 28 + Norvège est pour cette période à peu près de la même valeur. La dépendance de l'Europe aux combustibles fossiles importés n'a donc pas décliné. Elle est d'environ 700 Mtep en 2015.

Toujours selon la BP statistical review, la partie basse de la figure 18 montre les productions de combustibles fossiles de l'ensemble EU 28 + Norvège de 1981 à 2015 : le charbon décline depuis 1982, le pétrole depuis 2000 et le gaz depuis 2004. La période de prix très élevés de 2003 à 2014 n'a pas inversé le cours de l'histoire, malgré les progrès des techniques de production et les meilleures rentabilités des exploitations pendant cette période. Ce phénomène inéluctable est la conséquence de l'épuisement des réserves.

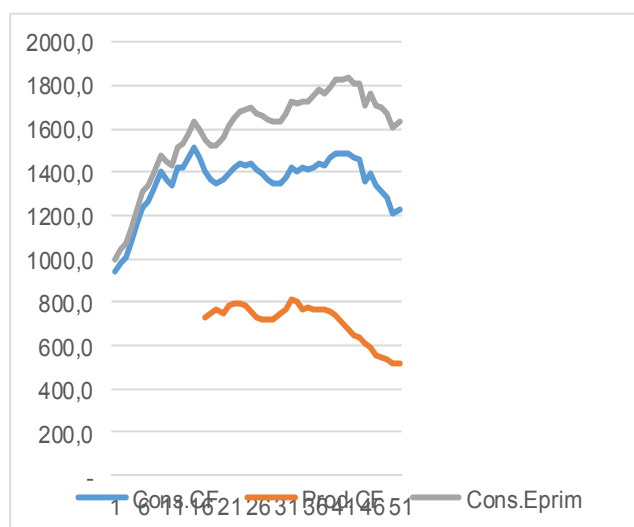


Figure 18 : Europe des 28 + Norvège : évolutions sur les cinquante dernières années (1=1965) de la consommation d'énergie primaire (Cons.Eprim), et de la consommation de combustible fossiles (Cons.CF), et de la production (Prod.CF) de combustibles fossiles de 1981 (BP ne donne pas de statistiques de production avant 1981) à 2015. La consommation d'énergie primaire des statistiques de la BP ne comprend pas celle de bois de chauffage, mais celle-ci ne représente en moyenne en Europe qu'environ 5 % de la consommation d'énergie primaire.

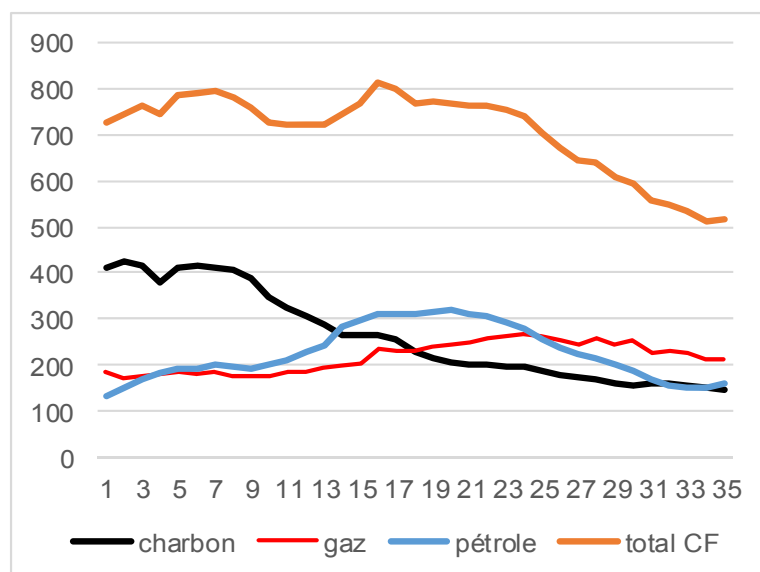
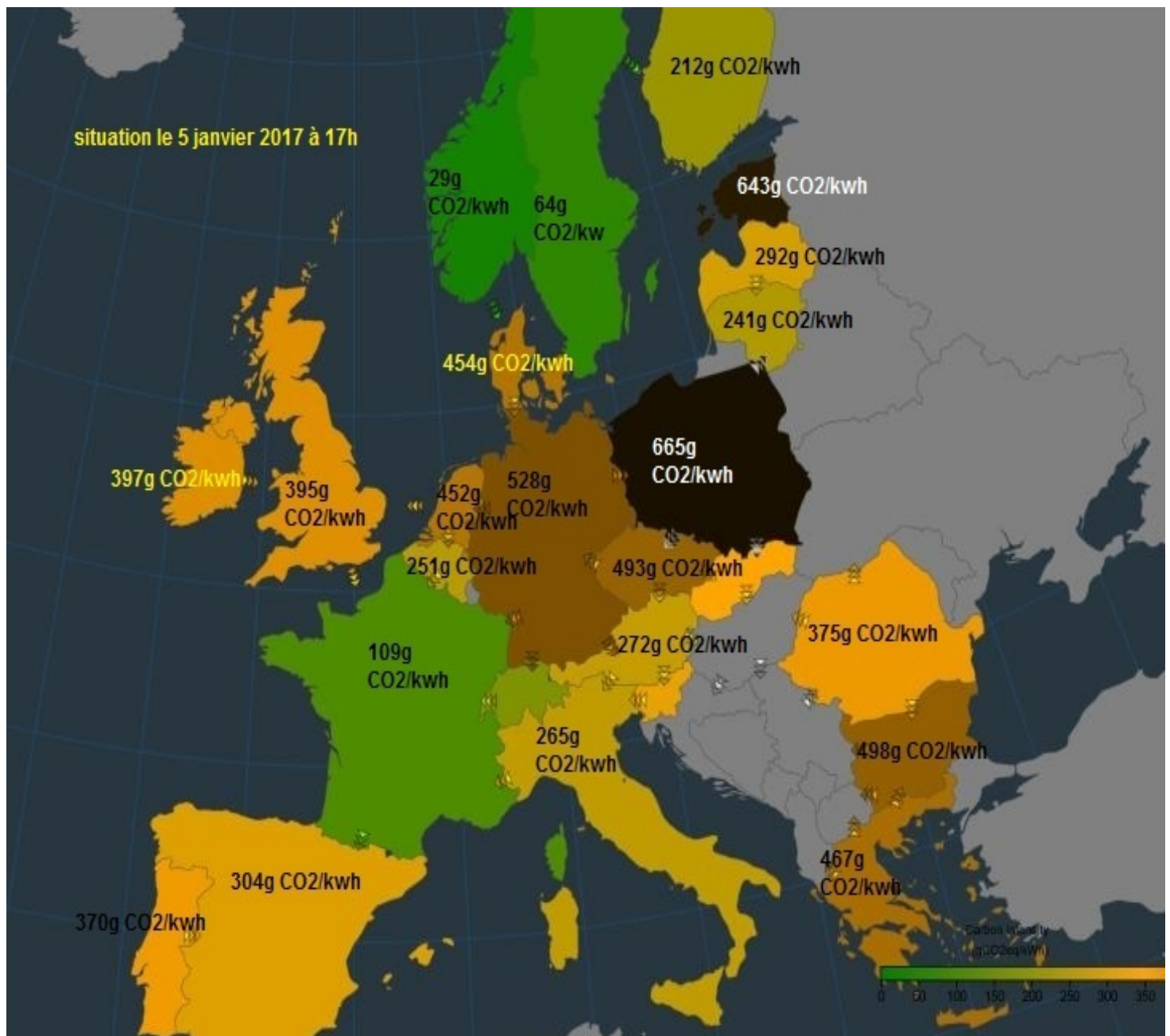


Figure 19 : évolution des productions de charbon, de pétrole et de gaz de l'Europe de 1981 à 2015. L'unité d'énergie est le million de tonne-équivalent-pétrole (Mtep). Source : BP statistical review of world energy 2016.



Emissions de CO2 en Europe par kwh

Source : <http://electricitymap.tmrow.co/>



FEDERATION ENVIRONNEMENT DURABLE

(Fédération Nationale:1070 associations)

<http://environnementdurable.net/>