

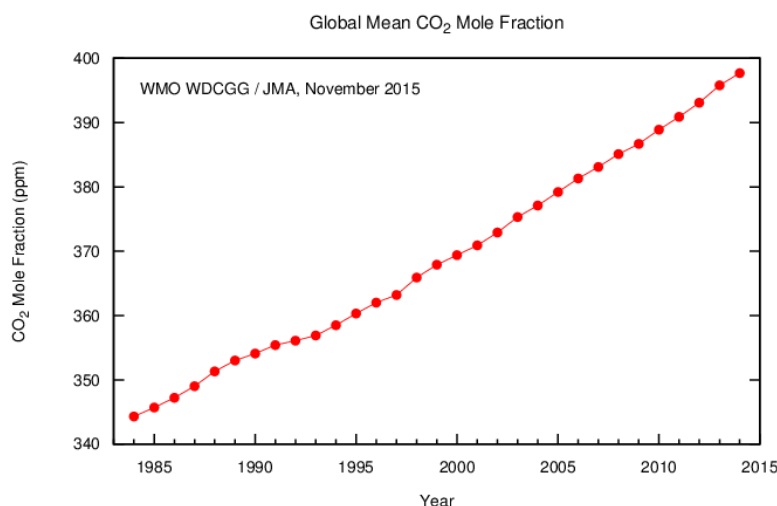
Energie – économie – société

Patrick MICHAILLE¹

1. PRÉAMBULE : L'URGENCE CLIMATIQUE

Depuis trois siècles l'humanité s'est développée en exploitant les combustibles fossiles sans trop se préoccuper de leurs impacts environnementaux. Une évolution radicale de la vision du futur depuis 1992 (« Sommet de la terre » à Rio) résulte du constat quasi-certain d'un emballement de la machine climatique conduisant à une augmentation potentiellement dangereuse pour nos sociétés de la température moyenne du globe (sécheresse, inondations). Pourraient en résulter des famines et des migrations massives de population. Or l'effet des gaz à effet de serre (GES) est cumulatif en raison de la durée de vie du gaz carbonique dans l'atmosphère (supérieur à 100 ans). [F1].

Lutter contre le réchauffement climatique implique donc une action urgente car un volume de GES évité aujourd'hui sera plus efficace que le même volume économisé dans 20 ou 50 ans. Faire vite implique de favoriser l'usage des moyens de production d'énergie décarbonée, et de piéger et stocker le gaz carbonique, en mobilisant tous les moyens matures et économiquement supportables : c'est le challenge qui est en face de nos sociétés.



F1 – Évolution du CO₂ dans l'atmosphère de 1983 à 2015

<http://ds.data.jma.go.jp/gmd/wdcgg/pub/global/globalmean.html>

2. LIEN ENTRE ÉNERGIE, ÉCONOMIE ET SOCIÉTÉ

La maîtrise de l'énergie a été le moteur de l'évolution de l'Homme, depuis la conservation du feu et la capacité de le produire.

Aussi, parler de l'énergie, c'est parler de l'organisation de la société, et notamment de sa composante économique, puisque la maîtrise de l'énergie sert tout particulièrement à décupler la force humaine : depuis l'esclavage et la domestication des animaux pour leur force et leur capacité de transport terrestre, ainsi que la maîtrise du vent pour les déplacements fluviaux et les voyages maritimes, les maîtrises successives de la vapeur, des moteurs à explosion et de l'électricité ont permis la « révolution industrielle », avec les bouleversements sociaux associés : passage d'une organisation féodale puis monarchique, fondée sur la possession de la terre et la richesse de l'agriculture, à une société bourgeoise, fondée sur la capacité d'entreprendre et d'amasser des capitaux.

¹ Texte relu et complété par MM. Jean-Pierre PERVÈS et Maurice MAZIÈRE – SFEN/GR21.

3. ÉVOLUTION DE LA SOCIÉTÉ ET DE L'ÉCONOMIE AU XX^{ÈME} SIÈCLE

La période de reconstruction après la guerre a été appelée « les 30 glorieuses » : industrie lourde, construction, fabrication d'automobiles, battaient leur plein. Plein emploi (les enfants pouvaient arrêter leurs études à 14 ans et trouver un emploi dans les forges, les chantiers navals, etc.), et société hiérarchisée. Un marqueur de l'évolution sociétale fut mai 1968, quand les étudiants, de plus en plus nombreux par classe d'âge, se mirent à critiquer la « société de consommation » qui succédait à une société de pénurie où les biens étaient rares (les tickets de rationnement mis en place pendant la guerre existèrent jusqu'en 1948), et les produits du quotidien devaient être entretenus (bas reprisés, pneus rechapés,...).

Le « choc pétrolier » de 1973 mit fin à la course au progrès illimité et, pour conserver une part d'indépendance alors que les mines de charbon fermaient en cascade, la France dut se doter de centrales nucléaires, réservant le pétrole importé essentiellement aux transports. D'autres pays ont suivi la même voie : la Suède, la Suisse, le Japon, notamment ; mais aussi l'Allemagne, la Belgique, l'Espagne. A noter que la Grande-Bretagne, qui était le premier pays nucléarisé en Europe, a stoppé son effort avec la découverte des champs de pétrole et de gaz de Mer du Nord, dans les années 70.

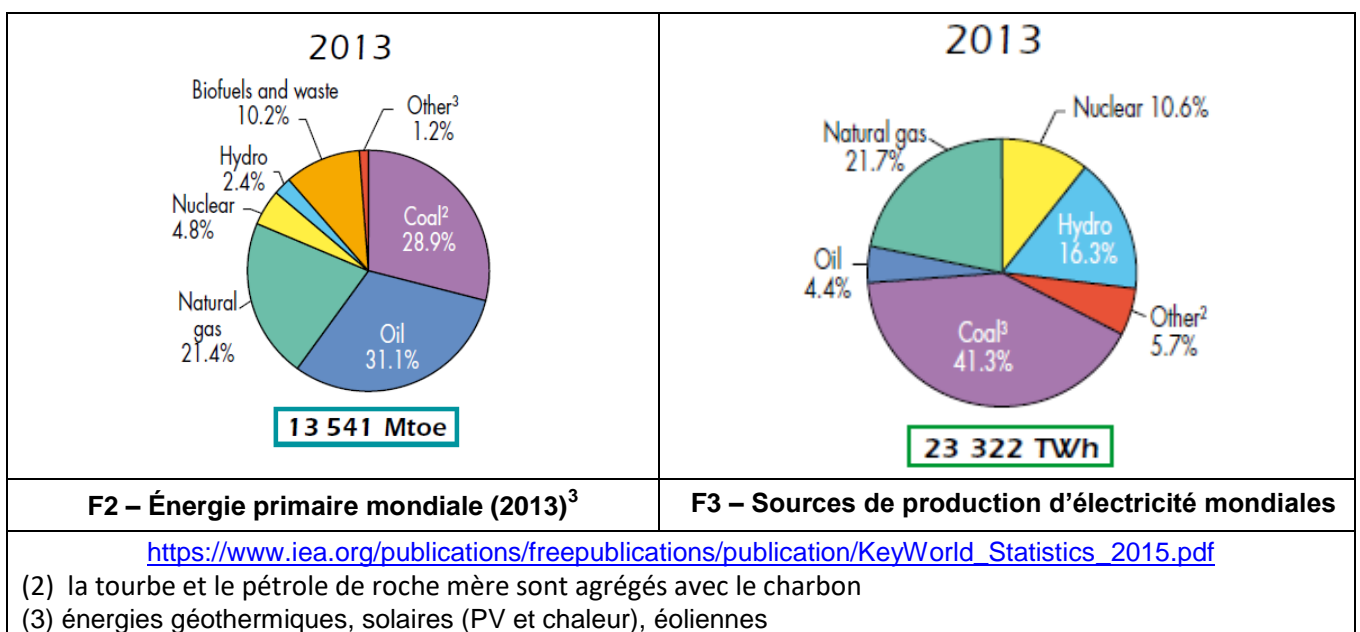
4. LES DÉFIS DU XXI^{ÈME} SIÈCLE

Notre société se trouve confrontée à de nouveaux défis :

L'évidence que notre planète est un monde fini : les sources d'énergie fossiles que nous exploitons, depuis deux siècles pour le charbon et un siècle pour le pétrole, ne sont pas durables, même si de nouvelles techniques d'exploitation permettent de repousser les limites (1 à 3 siècles pour le charbon, 50 à 100 ans pour le pétrole et le gaz, en fonction du coût d'extraction). Pour autant, leur consommation n'a cessé de croître, de plus de la moitié en un quart de siècle ! (+ 56 % entre 1990 et 2015).

Les déchets s'y accumulent : on parle de « 6ème continent » pour les déchets plastiques qui s'agglutinent dans l'océan Pacifique ; plus grave pour le long terme, les déchets de combustion des sources d'énergie fossile s'accumulent dans l'atmosphère, tout particulièrement le CO₂ dont la durée de vie est longue (F1), provoquant ce qu'on peut comparer à un effet de serre qui modifiera le climat, et impactera la structure des sociétés humaines.

Or actuellement, l'essentiel de l'énergie mise en œuvre dans le monde produit du CO₂ (F2). Les deux tiers de l'électricité sont produits à partir de combustible fossile (F3). Moins de 15 % de l'énergie primaire consommée est renouvelable (F2, F4) – même si la production d'origine renouvelable a été multipliée par plus de 4 dans les 10 dernières années (F5). Par ailleurs, l'agriculture produit des GES² (méthane, N₂O) plus que proportionnellement à l'augmentation de la population, du fait de l'attrait pour les régimes carnés quand le niveau de vie augmente (T1).



² GES : gaz à effet de serre (principalement : gaz carbonique CO₂, méthane CH₄, protoxyde d'azote N₂O).

³ toe : tonne of oil equivalent = tep : tonne équivalent pétrole = 107 kcal = 11,6 MWh ; 1 Mtoe = 1 Mtep = 11,6 TWh.

kg ou litre de produit	côtelettes grillées	jambon blanc	lait	lentilles cuites
kg éq. CO ₂	14	6,5	8,1	1,3

T1 – Equivalence CO₂ de quelques produits alimentaires (kg éq. CO₂ pour un kg de produit)

<http://www.rac-f.org/Le-poids-de-notre-alimentation-en-terme-d-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-des>

Il faudrait que les pays industrialisés aient réduit leurs émissions de CO₂ d'un facteur 3 à 6 d'ici 2050 pour que la température du globe n'augmente pas de plus de 2°C d'ici la fin du siècle, ce qui est à l'évidence une gageure (T2).

tCO ₂ /H/a (1)	≈ 16	≈ 10	≈ 7	≈ 5	< 4
Durée (ans) (2)	≈ 11	≈ 16	≈ 22	≈ 28	≈ 33
Pays (1) [% électricité thermique fossile] (3)	USA [67], Canada [21] Australie [86]	Pays-Bas [82] Allemagne [57] Japon [85]	Norvège [2], DK [52], Irlande, UK [63] Chine [77]	France [7,8] Espagne [40] Suisse [1,9]	Suède [1,7]

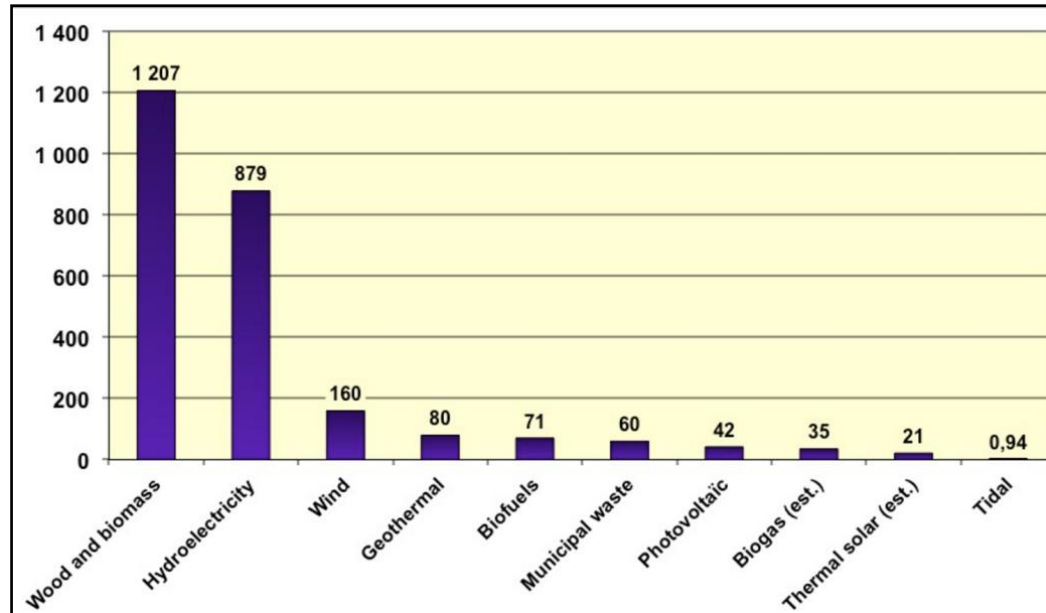
T2 – Durée de la transition pour épuiser le budget carbone par pays

(1) Données : https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld_Statistics_2015.pdf

(2) Hypothèse de calcul : décroissance linéaire pour atteindre 2 tCO₂/H/a avec un budget limité à 100 tCO₂/H

(3) [% électricité thermique fossile] ; source : Wikipédia (2013)

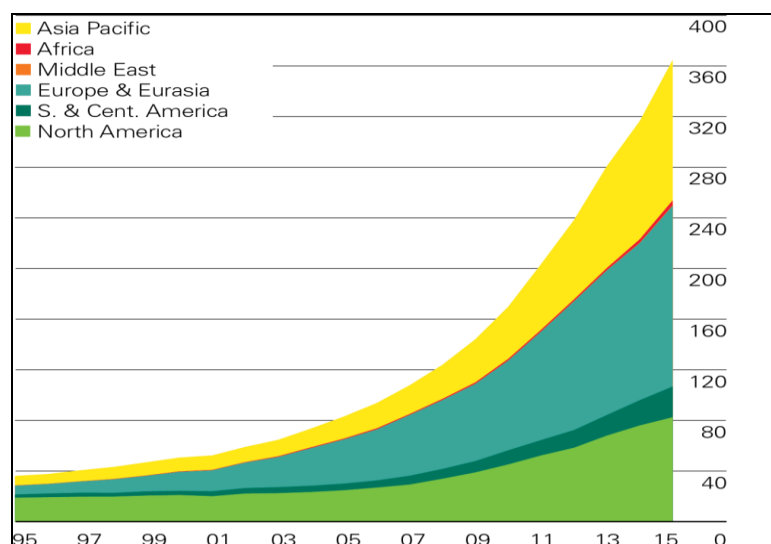
(Hypothèses : le budget mondial d'émissions nettes de CO₂ pour limiter l'augmentation à 2°C est de 1.000 GtCO₂, soit 30 ans au rythme mondial actuel, en supposant qu'ensuite le taux d'émission soutenable soit limité à 2 tCO₂/H/an⁴. Pour atteindre cet objectif, il est parlant de calculer la durée de la transition pour chaque pays : en supposant la population mondiale à 10 milliards au milieu du siècle, le budget est de 100 tCO₂/H. On suppose une décroissance linéaire en fonction du temps. T2 montre que seuls les pays actuellement les moins émetteurs de CO₂ ont la possibilité d'étaler leur transition sur une trentaine d'années, ce qui est considéré comme une durée raisonnable pour réaliser une telle transition.)



F4 – Production mondiale d'énergie renouvelable en 2014, en Mtep (Manicore, 2015)

On note la prédominance de la biomasse, en 2014 (c'est particulièrement dans les pays les moins développés pour le chauffage et la cuisson des aliments). On constate également sur F5 un développement sensible des énergies renouvelables depuis 2005 (facteur 4,5). Mais leur contribution reste limitée, soit 17,2 % en 2014, dont 15,6 % pour l'hydraulique et la biomasse et 1,26 % pour le solaire et l'éolien (Wikipedia : ressources et consommations énergétiques mondiales).

⁴ tCO₂/H/an : tonne de CO₂ par Homme par an ; Gt : milliard de tonnes.



F5 – Evolution de la consommation mondiale d'énergie renouvelable* de 1995 à 2015 en Mtep

*Éolien, géothermie, solaire, biomasse & déchets (BP statistical review of the world 2016)

5. QUELLES ÉVOLUTIONS DE LA SOCIÉTÉ D'ICI 2050 ?

Il ne s'agit pas de prédire l'avenir, ce qui serait bien téméraire, mais de tracer des lignes directrices raisonnables ; on peut aussi réfléchir en scénario haut et bas, ou définir une ligne volontairement prudente.

Une littérature abondante décrit des options faisant appel massivement aux énergies renouvelables dans tous les domaines, associées à des programmes ambitieux d'efficacité énergétique. Pour la plupart d'entre eux, et en particulier pour le scénario « 100% renouvelables » de l'ADEME pour la France, le cheminement pour y parvenir n'est pas décrit et le coût du scénario fait appel à des évolutions très optimistes des coûts futurs. Or le préambule rappelle que nous sommes en face d'une urgence climatique et que, pour être efficace, le cheminement vers les mix énergétiques 2050 doit faire appel dès maintenant à toutes les énergies décarbonées matures, compétitives et disponibles localement, pour maintenir les économies à flot et permettre ainsi un effort sur la durée.

Si on considère les 35 années passées, ce qui nous ramène au début des années 80, on note en Occident le mouvement de « deregulation » mis en place par Reagan et Thatcher et repris par la Commission européenne. En France aujourd'hui, cela se traduit en matière d'énergie par la mise en concurrence des opérateurs pour la production d'électricité, la vente des centrales hydroélectriques, l'exploitation des autoroutes par des compagnies privées, la concurrence du transport ferroviaire par la route, tant pour les marchandises que pour les voyageurs.

Ce mouvement met aussi à mal le secteur électrique en raison d'une intervention lourde des états, et de l'Europe en particulier, pour soutenir massivement le développement des énergies renouvelables, que l'initiative soit privée ou non, par des subventions parfois très importantes (jusqu'à 6 fois le prix de marché). On peut penser que cette vague de fond d'ouverture des marchés, de privatisation, de désengagement des États – couplé paradoxalement à leur interventionnisme sans vision économique, va se poursuivre, même si des excès pourront occasionner des retours en arrière limités, comme en Grande Bretagne vis-à-vis du transport ferroviaire.

Une autre grande tendance est la montée en puissance de l'écologie, où le mouvement en faveur de la protection de l'environnement devient un dogme, voire une idéologie politique. Par la célébration du « small is beautiful », l'écologie s'oppose à toute économie centralisée, faisant fi de ses avantages en termes de compétitivité, et se conjugue avec la tendance individualiste, favorisée par le développement extraordinaire de l'ordinateur personnel. Largement propagé par Greenpeace, l'écologie politique s'est positionnée dès le départ contre l'énergie nucléaire, tant dans ses applications militaires que civiles. Cette opposition, violente parfois⁵, a exploité largement les inquiétudes résultant des catastrophes de Tchernobyl et de Fukushima. Cette opposition inconditionnelle à la production d'électricité d'origine nucléaire prend clairement le pas sur l'intérêt pour les risques du changement climatique, comme le montre en Allemagne un recours toujours soutenu au charbon et au lignite.

On peut espérer aussi des progrès en matière d'efficacité énergétique de production (des technologies comme le façonnage 3D sont économes en énergie et génèrent un minimum de rebuts) et de réduction des déplacements grâce aux technologies d'information et de communication.

⁵ Actions contre la construction de réacteurs comme Super Phénix, mais aussi contre les constructions de barrages.

6. QUELLES CONSÉQUENCES SUR LES BESOINS ÉNERGÉTIQUES

1973 15 515 Mt CO ₂										2013 32 190 Mt CO ₂										2013 / 1973
SUPPLY AND CONSUMPTION	Coal ¹	Crude oil	Oil products	Natural gas	Nuclear	Hydro	Biofuels and waste ²	Other ³	Total	Coal ¹	Crude oil	Oil products	Natural gas	Nuclear	Hydro	Biofuels and waste ²	Other ³	Total	Total 2,00	
Industry	360.91	16.41	432.59	356.29	-	-	-	86.71	286.90	1539.81	844.02	12.78	298.34	520.72	-	-	193.55	833.02	2702.44	1,75
Transport ⁵	31.96	-	1020.82	17.72	-	-	-	0.24	10.60	1081.34	3.22	0.02	2373.66	96.22	-	-	64.52	25.86	2563.52	2,37
Other	237.92	0.00	520.41	259.19	-	-	-	522.15	219.26	1758.93	157.35	0.20	430.60	628.53	-	-	872.28	1125.40	3214.34	1,83
Non-energy use	6.01	5.73	256.45	18.37	-	-	-	-	-	286.56	64.81	9.80	590.95	155.20	-	-	-	-	820.76	

T3 – Consommation d'énergie finale dans le monde en 1973 et 2013

https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld_Statistics_2015.pdf

Les besoins mondiaux ont doublé entre 1973 et 2013 – et les émissions de CO₂ aussi (T3), ce qui représente une croissance annuelle de 1,75 %. On peut penser que le développement des pays pauvres (Inde, Afrique) et l'augmentation de la population africaine pourrait conduire à une croissance du même ordre jusqu'au milieu du siècle.

Par contre, la production d'électricité a cru dans le monde de 6.131 à 23.322 TWh, soit une augmentation d'un facteur 3,8 ce qui représente 3,4 % en rythme annuel. On peut penser que cet engouement pour l'électricité se poursuivra pour les raisons suivantes :

- L'électricité est un moyen simple et pratique d'accéder à l'énergie et donc à beaucoup de services.
- Besoins croissants en informatique et en systèmes électro-commandés
- Lutte contre la pollution, notamment des grandes villes

En France et plus largement en Europe et en Amérique du Nord, la croissance sera a priori moindre pour les raisons suivantes :

- Politique d'économie d'énergie (efficacité)
- Diminution des besoins (sobriété)
- Informatisation, diminuant dans une certaine mesure les besoins de déplacement.

Rappelons qu'un taux de croissance de 1 % conduit au bout de 35 ans à un accroissement de 40 %, mais que des taux supérieurs ne sont pas soutenables à long terme (T4).

Taux de croissance annuel	Croissance après 35 ans	Croissance après 100 ans
1 %	+ 40 %	x 2,7
3 %	x 2,8	x 19

T4 – Croissance en fonction du taux annuel

L'« ubérisation » de la société requerra par contre un recours accru à une électricité fiable et stable, ce que ne peuvent assurer les énergies fatales et intermittentes qui dépendent de la météo (soleil et vent).

7. L'« ENERGIEWENDE⁶ » EST-T-ELLE POSSIBLE ?

Il est intéressant de comparer les émissions de CO₂ et de GES par habitant en Europe sur quelques pays représentatifs des différents mix énergétiques et de différentes situations industrielles et agricoles.

Pays	Emission CO ₂ t/H/an (1)	Emission GES teqCO ₂ /H/an (1)	% hydro + nuc ds la prod. élect. (2)
Suède	4,8	5,8	83,5
France	5,7	7,5	87,3

⁶ Energiewende : tournant énergétique défini dans la loi allemande EEG.

Espagne	5,9	6,9	34,5
Royaume-Uni	7,6	9	21,8
Pologne	8,4	10,4	1,8
Allemagne	10	11,8	19,9

T5 – Émissions de CO₂ et de GES pour quelques pays d'économie diversifiée en Europe

(1) 2014 (AIE) ; (2) 2013 (Wikipedia)

T5 montre que les pays les plus performants sont ceux qui bénéficient d'un nucléaire important (France) ou d'un ensemble nucléaire + hydraulique (Suède).

Les éoliennes : un mirage danois ?

Le Danemark a réussi en 15 ans à diminuer de moitié ses émissions annuelles de CO₂ par tête (de 13,7 t en 1996 à 7,1 t en 2014)⁷. Leurs émissions sont désormais stabilisées.

Géographiquement, la Suède est attenante, et il n'y a que quelque 150 km de mer à traverser pour atteindre la Norvège, qui est le champion mondial de l'hydroélectricité (96 % de sa production électrique avec 129 TWh).

La complémentarité est donc excellente pour pallier l'intermittence des éoliennes danoises, dont le facteur de charge est potentiellement le meilleur d'Europe (T6). L'appel à l'électricité des pays voisins est essentiel en périodes de vents calmes ; en période de production éolienne, l'essentiel de la production doit être exporté, car les centrales à cycle combiné, qui contribuent au chauffage, ne peuvent pas être arrêtées.

Pays	Capacité potentielle en GW (1)	Facteur de charge (%) (1)	Capacité (GW) installée en 2014 (2)	% installé / potentiel	Production 2014 (2) TWh/an
Union Européenne	992	22,6	130,4	13	247
France	158	20,3	9,3	6	17
Allemagne	54,4	22,2	40,4	74	56
Danemark	25,5	36,3	4,85	19	11,6
Espagne	118	18,3	23	19	51,1
Irlande	50	28,9	2,3	5	4,9
Pologne	65	18,1	3,8	6	7,2
Suède	153	22,0	5,4	4	10,5
Royaume-Uni	179	28,2	12,5	7	31,4

T6 – Éoliennes en Europe

(1) La capacité potentielle (http://www.green-x.at/RS-potdb/potdb-long_term_potentials.php) est donnée pour les valeurs théoriques suivantes : coût < 110 €/MWh ; ressource < 3 MW/km²

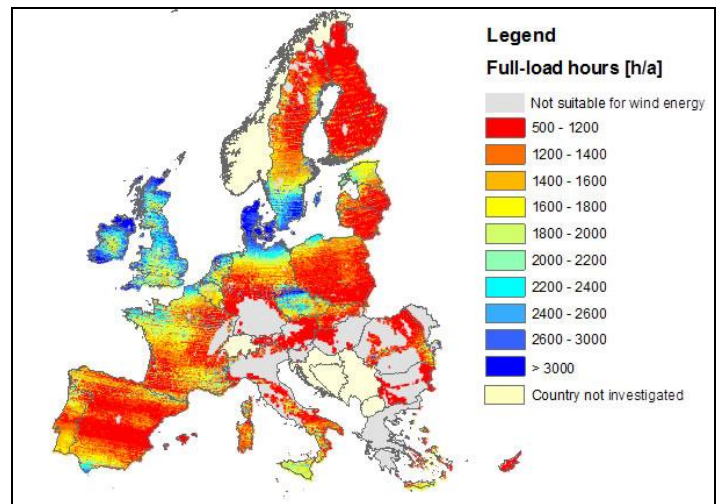
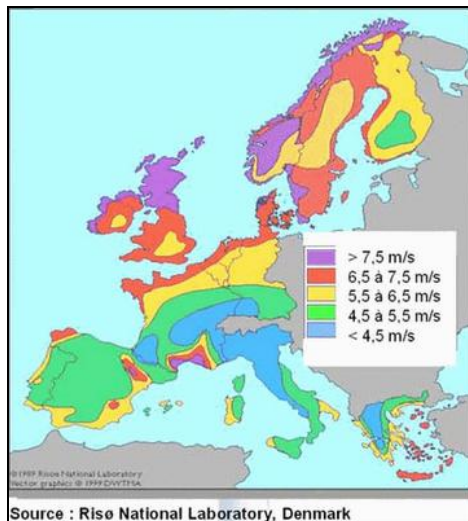
(2) Capacité installée et production en 2014 : source <http://www.eurobserv-er.org/category/barometer-2015/>

Cette configuration favorable ne se retrouve pas du tout en Allemagne, dont les montagnes de Bavière sont à plus de 1000 km des champs d'éoliennes de la Baltique ; les nouvelles lignes THT doivent traverser tout le pays, ce qui soulève l'opposition de la population.

En France (F5), les côtes où les vents sont les plus forts (Roussillon, Languedoc, Provence) sont proches de montagnes (Pyrénées orientales, Massif Central et Alpes), mais l'exemple de Sirvens illustre l'opposition des activistes à la création de nouveaux réservoirs hydrauliques.

T6 montre que, même avec un facteur de charge moyen, la France pourrait produire une partie significative de son électricité à partir de l'éolien à moins de 110 €/MWh (281 TWh – soit la moitié de la production annuelle).

⁷ <http://donnees.banquemondiale.org/indicateur/EN.ATM.CO2E.PC?locations=DK>



F5 – Cartes des vents en Europe ; F5a : intensité maxi ; F5b : HEPP

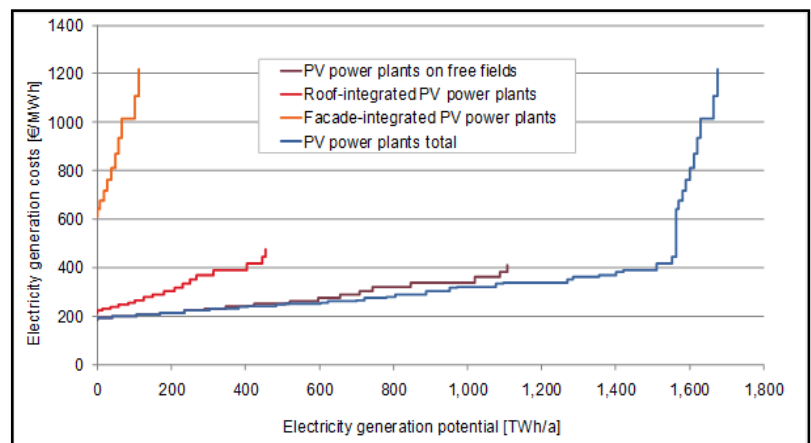
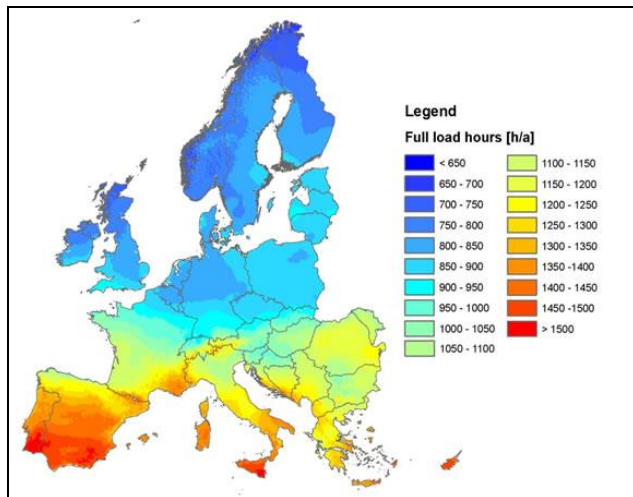
http://www.green-x.at/RS-potdb/potdb-long_term_potentials.php

Il faudrait pour cela une capacité installée de 158 GW, soit 2,5 fois la puissance nucléaire actuelle. Mais s'il suffit d'arrêter les éoliennes excédentaires lorsqu'elles surproduisent à plein régime, comment s'approvisionner quand il n'y a pas de vent ? La taille de l'Europe ne donne pas lieu à équilibrage⁸ : les dépressions qui frappent la façade atlantique, ou les anticyclones qui créent des marais barométriques, sont de la taille de notre sous-continent⁹.

Les systèmes de stockage ne permettent pas de compenser les journées de non-production : il faudrait qu'ils soient d'une taille colossale.

Le solaire : un mirage californien ?

Le photovoltaïque, issu de la technologie spatiale, s'est fortement développé en Californie et au Japon, états situés à la latitude de l'Espagne et du Maroc : les taux d'ensoleillement y sont nettement plus favorables qu'en Europe, et surtout le besoin en électricité (pour la climatisation) est cohérent avec les périodes d'ensoleillement, alors qu'en Europe, on dépense plutôt de l'énergie pour se chauffer, quand le soleil est faible !



http://www.green-x.at/RS-potdb/potdb-long_term_potentials.php

F6 – Carte de l'ensoleillement en Europe et potentiel de production PV en fonction du coût

F6 montre l'ensoleillement de l'Europe, et le graphique associé – la production qu'on peut espérer à un coût donné. Si la production peut atteindre quasiment la même valeur que pour l'éolien (1600 TWh/an pour l'UE), les coûts sont nettement plus élevés : de 200 à 400 €/MWh. (NB : ils baissent rapidement vers 140 €/MWh pour les installations de taille industrielle, et on peut espérer des prix de 90-100 €/MWh vers 2020).

⁸ Appelé « foisonnement » : il y aurait toujours du vent quelque part ; les enregistrements⁷ montrent que cet a priori est faux.

⁹ Cf. l'article de Hubert Flocard et Jean-Pierre Pervès, *Sauvons-le-Climat*.

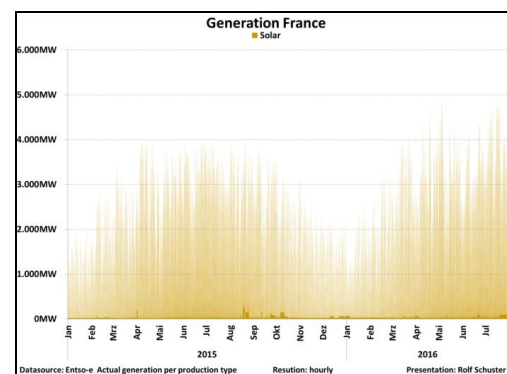
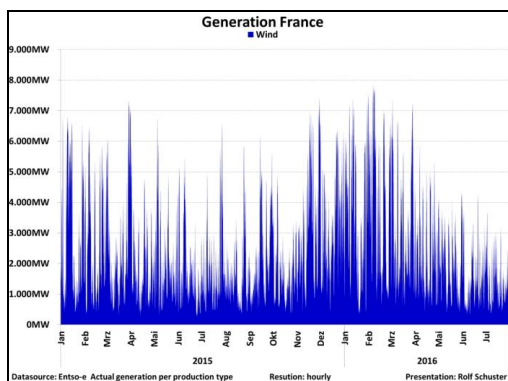
À noter que l'étendue en longitude de l'Union européenne (2 fuseaux horaires) limite le foisonnement ; que le cycle diurne – nocturne limite les utilisations domestiques ; et que la production est très faible en hiver (en France : 5 à 6 fois moins qu'en été).

La France ne s'étend pas qu'en Europe !

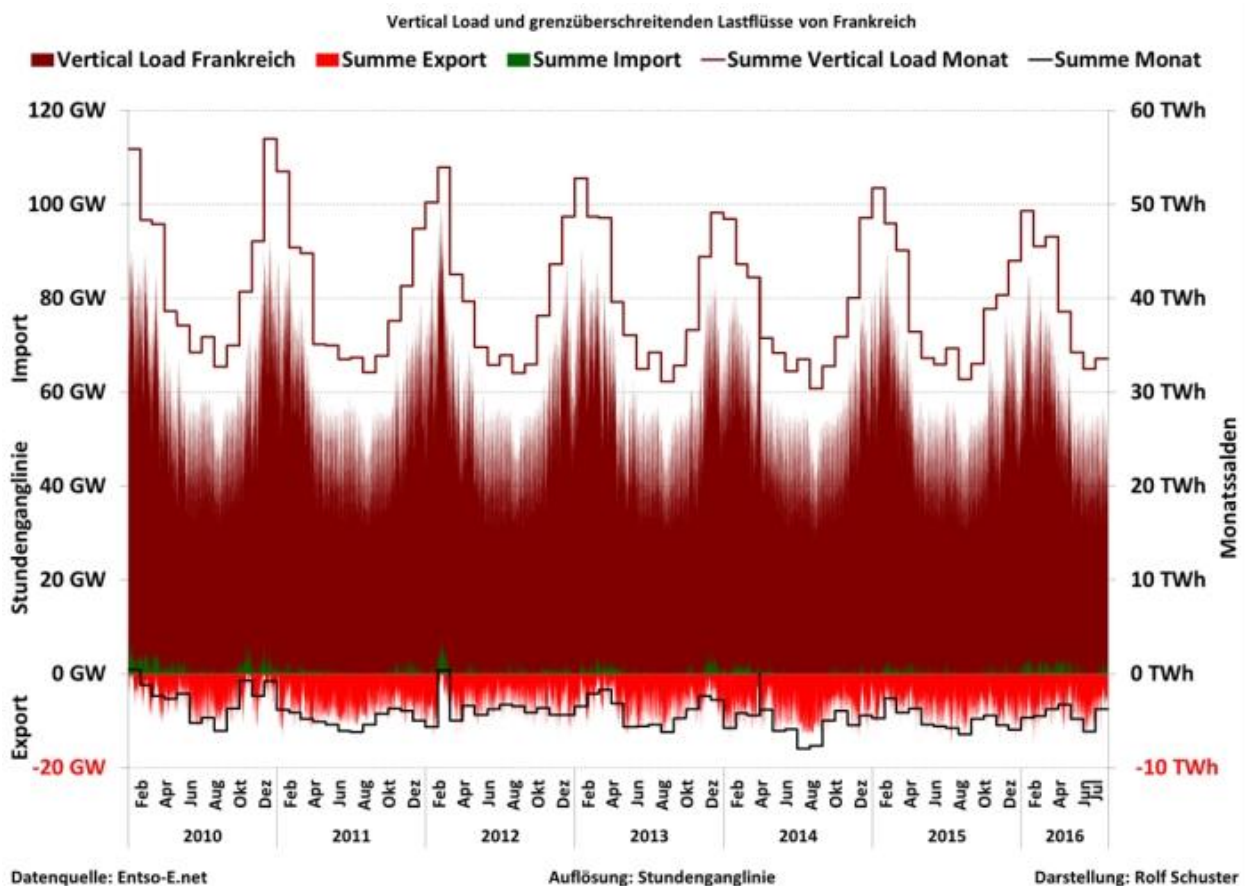
Pour autant, la France possède un atout majeur avec ses îles et ses régions d'outre-mer isolées. Outre la Corse, une montagne au milieu d'une mer ensoleillée, les Antilles et la Réunion sont autant de régions isolées où les énergies éolienne et solaire pourraient se combiner à l'hydraulique pour offrir une énergie renouvelable et pilotable. À noter cependant que, s'agissant de volcans, l'instabilité du sol peut être un frein à la construction de barrages (risque de rupture et d'inondation).

Il faut souligner un avantage important de la production d'électricité à partir du vent et du soleil, c'est qu'elle ne nécessite pas d'eau. Cela convient tout particulièrement aux régions désertiques, ... mais ce ne sont pas les plus peuplées !

F7 montre le caractère extrêmement fluctuant de la production d'électricité éolienne et photovoltaïque, qui ne s'accorde pas aux besoins mis en évidence en F8.



F7 – Production d'électricité en France a) par les éoliennes ; b) par le photovoltaïque



F8 – Production d'électricité en France depuis 2010

NB : La France étant globalement exportateur net d'électricité, les « importations » correspondent essentiellement à des transits d'électricité excédentaire allemande et espagnole (en raison des EnR) vers les autres pays limitrophes (Belgique, Italie).

8. UNE ESQUISSE DE TRANSITION POUR LA FRANCE

Les objectifs et les critères doivent être bien précisés, pour ne pas prendre le moyen pour le résultat, en confondant la puissance installée et l'énergie produite, ou encore l'investissement et la production !

Il faut décarboner les énergies, aussi rapidement que raisonnablement possible d'un point de vue économique et social : diminuer le CO₂ émis, en visant d'atteindre 2 tCO₂/H/an pour 2050 (soit un taux annuel de -2,5 % pendant 35 ans).

Favoriser l'indépendance énergétique, pour rester maître de la politique et du coût associé.

Mesurer l'efficacité de l'argent investi en tenant compte de toutes les externalités : à ce sujet, les EnR ne sont qu'un outil parmi d'autres qu'il s'agit d'évaluer.

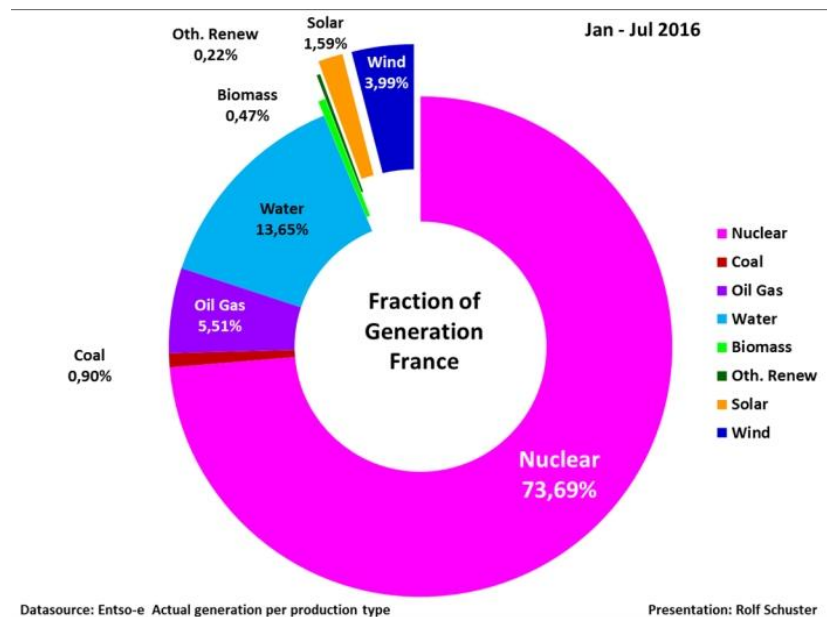
Ce qui est faisable immédiatement

L'électricité étant en France une forme d'énergie décarbonée (à 93 % en 2015 – F9), on visera un développement soutenu des usages de l'électricité décarbonée, un développement durable de la biomasse énergie sans y consacrer des terres arables, et le développement des mesures les plus économiques d'efficacité énergétique.

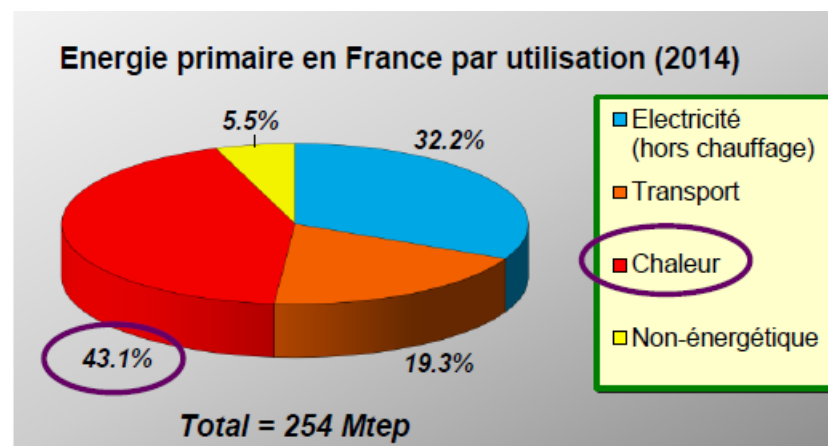
F9 – Répartition de la production d'électricité en France

<http://epaw.org/echoes.php?lang=fr&article=n538>

2015	TWh	Mtep
nucléaire	415,4	
hydraulique	58,5	
pétrole-gaz	25,3	
éolien	19,6	
charbon	8,6	
solaire	7,2	
biomasse	1,9	
autres EnR	1,8	
production	538,3	46,3
export	59,1	
pertes	9,1	
consommation	470,1	40,4



La plus grande part de la consommation d'énergie primaire se fait sous forme de chaleur, dans l'industrie et dans les immeubles résidentiels et pour les activités tertiaires (F10).



F10 – Usages de l'énergie primaire en France (NB : 254 Mtep = 2954 TWh) (www.allianceenergie.fr)

Dans l'industrie, toutes les formes de chaleur peuvent provenir de l'électricité. En outre, l'étude de l'ANCRE¹⁰ a montré que, sur les 100 TWh consommés dans la gamme de température accessible à la cogénération nucléaire, le parc pourrait en fournir rapidement 22 TWh, 11 des 19 centrales disposant d'un marché accessible de plus d'1 TWh, dont 90 % correspond au besoin de 130 grands sites très consommateurs (papeterie, agro-alimentaire, chimie). Le gain annuel d'émission de CO₂ serait de 6 Mt par rapport au gaz naturel. Pour des besoins moins énergivores, la chaleur peut provenir de la biomasse.

Les usages « chauffage » et « eau chaude sanitaire » représentent, à eux seuls, 75 % de l'énergie consommée dans le bâtiment, soit plus de 30 % de la consommation totale finale française. Le parc de logements résidentiels datant d'avant 1990 (77 % du parc total), pèse pour 82 % sur l'ensemble des consommations de chauffage et d'eau chaude sanitaire du résidentiel. L'étude de l'UFE¹¹ montre que, pour réaliser 178 TWh d'économie d'énergie dans le bâtiment, résidentiel et tertiaire, il faut investir 162 Md€. Mais pour en économiser 50 % de plus, il faudrait dépenser le double de plus !

Ceci montre la nécessité de cibler les actions en fonction de leur retour sur investissement (T7). De fait, le rapport constate qu'il faudrait doubler – voire tripler le prix de l'électricité, et tripler – voire quadrupler le prix du gaz, pour déclencher les investissements sur les gisements d'efficacité les plus importants en termes d'économie de chauffage. Au résultat, les opérations rentables (et rentables-sous-condition) concernant le résidentiel (16,3 TWh, compte tenu de l'effet rebond¹²) sont l'isolation des combles, et, pour les immeubles chauffés au fioul, l'isolation des parois par l'extérieur, l'installation de chaudières à condensation à gaz, ou sinon des pompes à chaleur air/air.

Pour le tertiaire, les opérations juste rentables (pour 16,9 TWh épargnés) sont : les pompes à chaleur air/air en place du chauffage électrique par effet Joule, des chaudières gaz à condensation ou des pompes à chaleur air/eau. Or sur les 33 TWh des gisements rentables et rentables-sous-condition, le coût de la tonne de CO₂ évitée s'évalue à 2 000 €¹³ !

Type de rénovation	Coût type de l'action (€)	Temps de retour sur investissements sans subvention (années)
Isolation des combles perdus	2500 – 5000	5 – 8
Chaudière à condensation	3000 – 7000	6 – 9
Remplacement des fenêtres	6000 – 8000	> 12
Isolation des murs par l'intérieur	6000 – 12000	17 – 25
Isolation des murs par l'extérieur	8000 – 16000	18 – 24

T7 – Temps de retour sur investissement dans les économies d'énergie du résidentiel [UFE]

Contrairement aux idées propagées, les emplois créés seront peu nombreux (30 000, soit 1 % des sans-emplois en France en 2016) pour un coût de 95 000 € par emploi créé. En ce qui concerne l'impact des actions d'efficacité énergétique sur la balance commerciale nationale, seules les filières « solaire thermique » et « bois énergie » présentent un solde positif. Les autres contribuent à la dégradation de la balance commerciale française : les chaudières à condensation (pour 173 M€) et l'isolation thermique des parois opaques et vitrées (pour 213 M€) sont importées des pays du nord de l'Europe, les pompes à chaleur (pour 479 M€) sont importées d'Asie.

Il est à noter que cette rénovation pousse au chauffage collectif, du fait de l'importance des investissements (géothermie) ainsi que pour limiter la pollution : les cheminées individuelles non filtrées polluent autant en particules fines que des moteurs diesel.

En comparaison, le transport peut apporter une économie d'énergie à un coût modéré : la réduction de la vitesse de 10 km/h sur autoroutes et routes nationales amènerait plus de 10 TWh d'économies d'énergie.

Pour les déplacements en ville, on favorisera des véhicules avec batteries (électriques ou hybrides rechargeables), moyennant l'équipement des parkings en prises électriques¹⁴. Pour les transports à longue distance, on peut équiper les autoroutes de caténaires pour les camions et les cars...

¹⁰ ANCRE : Agence Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Énergie (www.allianceenergie.fr)

¹¹ UFE : Union Française de l'Électricité ; http://ufe-electricite.fr/IMG/pdf/ufe_etude_1_.pdf

¹² Les résidents poussent la température quand le coût du chauffage baisse.

¹³ La tonne de CO₂ valait 30€ en 2005 et 6 € à mi 2016 (<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Le-prix-du-carbone.html>)

¹⁴ L'électricité nécessaire à couvrir l'ensemble des déplacements en Ile-de-France (100 millions de km parcourus chaque jour) correspond à l'électricité produite par un seul des deux réacteurs de Fessenheim, que le gouvernement veut arrêter.

Bien sûr, une telle politique ne peut se réaliser qu'en maintenant et renforçant notre programme nucléaire, qui représente actuellement la moitié de la capacité de notre production électrique. La prolongation de la durée de vie des réacteurs actuels jusqu'à 60 ans, comme aux États-Unis, assortie des mises à niveau de sûreté et des mesures complémentaires suite à l'accident de Fukushima¹⁵, en fera un des parcs les plus sûrs au monde.

Les conditions :

Accepter la collectivisation de certains services (chauffage, transports), ce qui n'est pas forcément dans l'air du temps.

Par contre, la tendance actuelle de rechercher le service plutôt que la possession est favorable à des solutions partagées, ce qui va dans le sens de la sobriété et de l'efficacité.

Les incitations sont : Responsabiliser les habitants au gaspillage de chaleur¹⁶. Pour le transport en commun : sensibiliser à la lutte anti-pollution en ville.

Pour les pays qui continueront à utiliser des énergies fossiles pour la production d'électricité et de chaleur¹⁷, il faudra les inciter à capter et stocker le CO₂ (CSC) soit dans les poches étanches de pétrole, de gaz, ou de charbon à grande profondeur, soit dans les aquifères salins. La seule solution pour atteindre ce résultat est de taxer les émissions de CO₂ à un niveau supérieur au coût du CSC.

Un programme pour 'après 2050'

Pour la France, les critères doivent inclure un souci d'exportabilité :

- Rendre le nucléaire exportable dans les pays pauvres : plus sûr, plus modulaire
- Stocker les énergies intermittentes (éolien, solaire)

Nucléaire

Les catastrophes de Tchernobyl et de Fukushima auraient été supportables sans l'émission des produits de fission¹⁸. Il faut donc concevoir des combustibles et des enceintes qui empêchent absolument le relâchement de ces produits dans la nature en cas d'accident, sans intervention de l'homme. Des combustibles à base de carbure d'uranium gainés de carbure de silicium ont été étudiés dans le cadre très exigeant de réacteurs refroidis au gaz (programme Allegro¹⁹). Par ailleurs, le principe des réacteurs à sels fondus exclut le relâchement de produits de fission.

Comme on projette que les 3/4 de la population mondiale vivra à moins de 100 km des côtes en 2035, des solutions de petits réacteurs immergés, et donc constamment refroidis, sont pertinentes (projet Flexblue).

Les conditions

Les pays émergents n'ont ni la technologie, ni le personnel qualifié et l'environnement technologique pour l'exploitation et la maintenance des réacteurs, ni le financement pour des investissements dont la rentabilité n'est acquise que dans la durée : il faut donc que la société exportatrice offre un service complet, en se finançant sur la revente de l'électricité. Les risques financiers sont importants, et une structure ad hoc doit être mise en place, comme pour le projet Hinkley Point.

EnR

Les énergies fatales et intermittentes ne pourront se développer qu'en développant les moyens de stockage pour pallier les défaillances de production.

Pour ce qui est des **éoliennes**, la solution la plus évidente est le stockage mécanique, en faisant monter de l'eau dans des réservoirs. Le problème est l'impact environnemental, le volume requis pour le réservoir dépendant de la hauteur de chute disponible.

¹⁵ « Noyau dur » qui couvre pour les accidents graves la prévention, la limitation des conséquences et la gestion de la crise (Poste de commande de repli) ; création et entretien d'une Force d'action rapide nucléaire (FARN).

¹⁶ La pose de compteurs de calories consommées dans un appartement est considéré comme difficile à rentabiliser.

¹⁷ Y compris la France, si la politique EnR+gaz est poursuivie.

¹⁸ Les radio-iodes, dont ¹³¹I, ont provoqué des cancers de la thyroïde chez les enfants, mais la parade est connue (saturer préventivement l'organisme d'iode), et d'autre part la demi-vie de l'iode-131 n'est que de 8 jours ; par contre, les radio-césiums, analogues du potassium, provoquent des pathologies cardiaques (le ¹³⁷Cs a 30 ans de demi-vie, mais 100 jours de période biologique).

¹⁹ RGN N°3 – mai-juin 2013 p.44.

Dans le cas d'éoliennes maritimes, comme on craint de polluer les sols avec le sel de l'eau de mer, on pourra utiliser de l'eau douce en circuit fermé, ce qui oblige à construire un réservoir inférieur en bord de mer.

D'autres solutions mécaniques sont imaginées, comme de comprimer des gaz dans d'énormes poches souterraines ou sous-marines...

Une autre direction est la voie chimique, en produisant par exemple de l'hydrogène. Outre que ce gaz est extrêmement explosif, sa fabrication par électrolyse a un faible rendement et requiert des conditions stabilisées, peu compatibles avec les fluctuations météorologiques qui impactent la production (voir F7).

L'utilisation la plus immédiate de l'hydrogène est de le diluer dans les réseaux de gaz ; sa combustion redonne de l'eau qui ne pollue pas. D'autres utilisations sont possibles : hydrogéner le CO₂ en alcools et acides, ou en méthane par la réaction de Sabatier, ce qui permet d'utiliser les réseaux de distribution existants.

Ces réactions ont actuellement des rendements faibles, et elles mettent en œuvre des métaux coûteux ; il faudra pousser les études pour mettre au point des catalyseurs peu chers et à faible impact sur l'environnement.

Pour la propulsion des véhicules au moyen de piles à combustible (dont le développement nécessite encore de gros efforts) alimentées en hydrogène, il faudra développer tout un réseau de distribution d'hydrogène, ce qui posera des problèmes de coût et de sécurité, peu compatibles avec l'évolution actuelle de la société.

Photovoltaïque

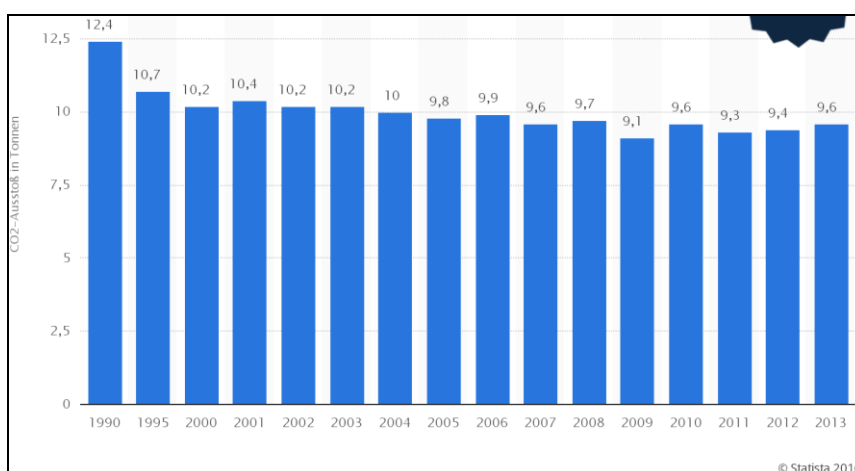
Les recherches sont très actives, car elles touchent à la découverte de nouveaux matériaux avec des propriétés innovantes, applicables aussi dans d'autres domaines. Grâce à la production en grande série, les coûts ont déjà fortement baissé, au niveau de 90 €/MWh aux États-Unis pour des installations de taille industrielle. Par contre, les rendements augmentent peu depuis 15 ans : ils restent de l'ordre de 15 %.

Pour une utilisation domestique, le stockage d'électricité est constitué de batteries, tant pour les besoins du logement (hors chauffage) que pour les véhicules électriques. Les prix des batteries sont eux aussi en forte baisse, et des percées spectaculaires sont espérées, y compris dans les filières de traitement et de recyclage des batteries. Il n'en reste pas moins qu'il faudra continuer en ville à être connecté au réseau : seules des installations isolées dont le coût de raccordement serait très élevé trouveront un intérêt à vivre en autarcie.

9. L'ACCEPTABILITÉ DU PROGRAMME

Dénoncer l'ineptie de l'Energiewende

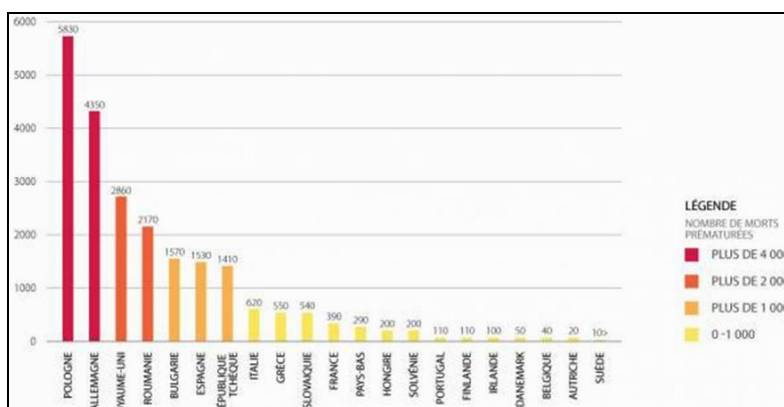
Le coût du programme allemand est de l'ordre de 30 milliards d'euros par an, ce qui sur 30 ans représentera plus que le coût de la réunification allemande. Or F11 montre que, après une période d'une dizaine d'années après la réunification – le temps d'arrêter les centrales d'Allemagne de l'Est les plus polluantes, aucune diminution des émissions n'est notable malgré les sommes colossales englouties.



F11 – Évolution des émissions de CO₂ en Allemagne par habitant (<http://de.statista.com>)

Rappelons, pour comparaison, que le programme de prolongation de durée de vie des réacteurs nucléaires français au-delà de 40 ans est estimé à 50 milliards d'euros d'investissement, le double si on compte toutes les dépenses de fonctionnement occasionnées par les travaux de rénovation, soit au maximum l'équivalent du coût de 3 années d'Energiewende ; or cette politique allemande n'apporte aucun gain ni en diminution de pollution, ni

en valeur d'énergie produite, puisque les excédents des éoliennes, dont personne n'est acquéreur, doivent être bradés à un prix négatif pour ne pas faire tomber le réseau (black-out). Par ailleurs, F12 montre la nocivité du charbon, en nombre de morts prématurés par an et par pays.



F12 – Nombre de morts prématurés en Europe dues au charbon (WWF/HEAL/CAN Europe/Sandbag)

Proposer des programmes utiles, durables, créateurs d'emploi, dont les résultats soient visibles immédiatement

Abandonner rapidement le chauffage au fioul : remplacer par le gaz (gain CO₂ : 40%) ou mieux – des pompes à chaleur (cf. chapitre 9).

Isoler les immeubles les plus anciens, voire réaliser une réfection complète aux normes basse consommation pour ceux qui ne peuvent être réhabilités à un coût acceptable.

Créer des réseaux de chauffage urbain utilisant la géothermie ou la biomasse, et les pompes à chaleur (surtout dans le neuf, placer un réseau dans l'ancien est souvent trop coûteux).

Investir dans les transports urbains électriques, avec création de filières françaises (comme Autolib).

Communiquer sur le modèle de sûreté nucléaire français, et sur le fait que les réacteurs mis au niveau post-Fukushima seront à un niveau d'exigence maximal au monde.

Communiquer sur la différence de prix de l'électricité et sur les émissions de CO₂ en France et dans les autres pays européens.

Responsabiliser les producteurs d'énergies fatales et intermittentes

Mettre une taxe carbone sur l'ensemble des énergies carbonées fossiles. Cette taxe, qui existe déjà en Suède, devra être étendue à toute l'UE, et impacter les importations de produits manufacturés à partir d'énergie carbonée, pour ne pas créer de distorsion de concurrence. Les exigences de traçabilité, qui relèvent des procédures de qualité, devraient faciliter l'intégration du calcul des quantités de CO₂ émis pour chaque type de production.

Obliger les producteurs d'électricité éolienne et solaire de masse à garantir un accès à des sources décarbonées ou des stockages en cas de temps calme pour assurer la fourniture de l'électricité décarbonée en fonction de la demande de la clientèle.

Faire adopter au niveau européen l'objectif d'un taux d'émission par tête égal pour tous les pays en 2050, en visant le niveau mondial soutenable de 2 tCO₂/H/an.

Quels déclencheurs pour faire prendre conscience de l'urgence ?

Difficile de faire prendre conscience à un Français du début du XXI^{ème} siècle qu'il y a urgence à réagir pour des catastrophes qui se produiront dans 50 ans, surtout dans une société dominée par des financiers court-termistes et avec un État soucieux des fluctuations mensuelles du niveau de l'emploi mais qui a perdu son rôle de stratégie !

Pourtant, les signes se multiplient, même en zone tempérée comme en France : montée du niveau de la mer avec érosion des côtes et augmentation de la fréquence des inondations maritimes ; nombre de journées chaudes en été et douce en hiver ; avancée de 3 à 4 semaines de la date des vendanges, etc.

Or 5°C seulement nous séparent de la dernière glaciation. Les lois du climat ne sont pas linéaires : il peut se produire un dégazage brutal des tourbières, du pergélisol, des hydrates de méthane océaniques, rejetant brutalement et de façon irréversible des quantités importantes de gaz à effet de serre. C'est comme de jeter une allumette dans un sous-bois desséché : l'incendie qui en résulte est hors de proportion avec la cause qui l'a fait naître.

Par ailleurs, le cours des hydrocarbures n'est pas un indicateur didactique : à 100 \$/bl, chacun sentait la tension sur les marchés et le risque de choc pétrolier, comme dans les années 1973 et 1976. Mais à 30 \$/bl, la vie peut continuer comme un long fleuve tranquille !

Les producteurs d'électricité en faillite ?

Or l'Europe souffre désormais de la faiblesse des cours du pétrole et du gaz, et aussi du charbon, due à l'abondance de la production états-unienne d'hydrocarbures non conventionnels : les grandes compagnies allemandes de production d'électricité sont au bord de la faillite en raison des cours extrêmement bas de l'électricité qui couvrent à peine les frais de fonctionnement. En effet, les contrats prévoient que l'électricité éolienne et solaire soit prioritaire sur le réseau de transport d'électricité, car de fait elle ne coûte pratiquement rien à produire quand la météo est favorable (elles sont pilotées à distance).

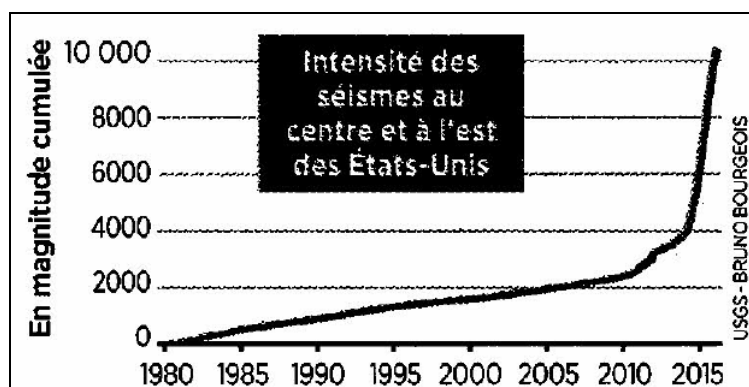
Par contre, elles sont largement subventionnées (plus de 80 €/MWh pour l'éolien terrestre et 220 €/MWh pour l'éolien en mer, alors que les cours moyens sont descendus en deux ans de 50 à 30 €/MWh en moyenne. Ce qui incite les grands producteurs allemands (E.On, RWE, Vattenfall) à séparer leurs activités en société EnR subventionnée d'une part, et société de défaisance d'autre part. Le choc viendra le jour où elles déclareront ces dernières en faillite : les Länder ou l'état fédéral n'auront plus qu'à en reprendre l'exploitation afin de pallier les défaillances de production des énergies intermittentes !

Nul doute qu'auparavant ce sera produit un formidable *black-out* au niveau européen, comme il y en eut en Californie en 2000-2001 du temps des spéculations de la compagnie Enron²⁰.

L'impact de la pollution sur la santé

Une autre préoccupation touche nos concitoyens : la pollution des villes. L'interdiction des moteurs diesel à Paris est prévue en 2020 ; il faudra anticiper leur remplacement par des véhicules électriques, d'autant qu'ils présentent, outre la robustesse et la durabilité des moteurs, l'avantage de ne pas faire de bruit, ce qui en ville est très appréciable. La pollution de Paris en hiver, en partie liée aux émissions des centrales à charbon allemandes, commence à poser problème (F12) : elle réduit de 6 mois en moyenne la durée de vie des Parisiens.

Des catastrophes naturelles plus fréquentes en raison du changement climatique (incendies, inondations) ne suffisent pas aux habitants des pays de l'OCDE pour remettre en cause leur politique énergétique ; seule une pollution gigantesque par des relâchements de gaz toxiques et dévastateurs, éventuellement provoqués par les tremblements de terre occasionnés par les forages (F13), pourrait nous amener à remettre en cause le modèle de développement basé sur l'énergie à gogo²¹.



F13 – Séismes aux États-Unis (nb x magnitude) (Sciences et Avenir août 2016)

Ne pas compter sur les instances internationales

²⁰ https://en.wikipedia.org/wiki/California_electricity_crisis

²¹ Lire à ce sujet « Mauvais climat – du froid sur le réchauffement » de Jacques Masurel, éditions feuillage.fr

Après l'échec de la conférence de Copenhague, la COP21 à Paris permet des effets d'annonce. En fait, l'accord ne sera définitif qu'en avril 2017 à la condition que 55 pays signent, représentant plus de 55 % des émissions de GES.

Par ailleurs, la Commission européenne ne vise pas l'égalité entre les Européens : en appliquant aux pays riches le même taux de réduction 2030 / 2005 de ≈ 40 %, l'UE prolonge les disparités entre pays (T8).

Ces faits justifient que la France, qui ne représente que 1 % des émissions de GES mondiales, reprenne en main sa politique énergétique nationale, en visant efficacité des résultats et sobriété de moyens pour ne pas peser davantage sur le budget des contribuables.

Tonnes de GES/habitant	2005	2013	% réduction 2030/2005	2030	Ratio % pays sur Allemagne en 2030
Allemagne	12,31	11,9	38	7,63	100
France	9,11	7,74	37	5,74	75
Danemark	12,71	10,29	39	7,75	102
Suède	7,63	6,07	40	4,58	60
Royaume-Uni	12,18	9,46	37	7,67	101
Belgique	13,8	11,06	35	8,97	118

T8 – Programme européen de réduction de GES d'ici 2030 (Source : SLC)

NB : Les valeurs de GES incluent, outre le CO₂, le méthane CH₄ et le protoxyde d'azote N₂O dus à l'agriculture et aux transports.

10. BIBLIOGRAPHIE

Le présent article s'inspire largement des exposés présentés sur le site www.energethique.com

Fiches actu

N°3 : Un scénario raisonné de l'évolution de l'énergie électrique en France au XXIème siècle

Fiches argumentaires

Fiche N°02 : Évolution du besoin énergétique dans le monde

Fiche N°04 : France : Quelle énergie pour demain ?

Fiche N°26 : Stockage de l'énergie électrique

Fiche N°28 : Énergie solaire photovoltaïque

Fiche N°31 : L'énergie éolienne

Fiche N°35 : Le captage – stockage du CO₂

Fiche N°37 : Énergie solaire thermique et thermodynamique

Fiche N°53 : La réhabilitation thermique dans le bâtiment en France

Fiche N°54 : La géothermie

Articles

Article N°34 : L'effet de serre atmosphérique

Article N°37 : Changement de climat anthropique – Réponse à ceux qui doutent de sa réalité

Article N°41 : L'électricité : vecteur énergie de demain ?

Article N°48 : Relation Coût – Prix de l'électricité en France

Article N°50 : Le système électrique français : analyse des années 2009 à 2015

Article N°52 : L'énergie nucléaire et les énergies renouvelables sont-elles complémentaires