

Sauvons Le Climat



Sauvons le Climat

Le futur énergétique de l'Allemagne. Comparaison avec le scénario France Négatep

Claude Acket et Pierre Bacher¹

Janvier 2011

¹ Membres du Conseil Scientifique de Sauvons le Climat

Présentation

Les Allemands ont décidé de sortir du nucléaire. Celui ci assure aujourd'hui 23 % de la production électrique du pays alors que la part des combustibles fossiles en représente 58 %. Comment se passer de cette production énergétique non émettrice de gaz carbonique, s'il faut en plus réduire les rejets de gaz carbonique ? Ces rejets sont actuellement de plus de 9 tonnes par habitant et par an et l'objectif de réduction serait de les ramener sous les 2 tonnes d'ici 2050. Les économies d'énergie et les renouvelables peuvent ils répondre à cette question ? Une étude allemande très détaillée répond à ces questions². Elle propose différents scénarios répondant à ces objectifs d'émissions de CO2 en présentant notamment la phase de transition de différentes sorties du nucléaire. Comme en 2050, la sortie du nucléaire est effective pour tous les scénarios, nous examinerons essentiellement l'état final et ferons ressortir les bases du nouveau paysage énergétique allemand.

Presentation

The Germans have decided to abandon nuclear energy, which today provides 23 % of their electricity, while fossil fuels provide 58%. Is it possible to do without the non carbon nuclear energy and simultaneously reduce the CO2 emissions ? The German CO2 emissions today are over 9 tonnes per year per person, while the objective is to reach less than 2 tonnes per year by 2050. Can energy efficiency and renewable energies be the solution ? A thorough German study brings answers to these questions. It presents several scenarios meeting the overall emission objectives, with different transition periods for nuclear energy. Since in all the scenarios, no nuclear is left in 2050, we shall examine the energy balance in 2050 and point out the main characteristics of the German energy mix at that time.

² « Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung » (Prognos / EWI / GWS 2100 ; Projekt Nr 12/10, des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Berlin

TABLE

Présentation

Introduction

- A) Bilan énergie primaire
- B) Bilan énergie finale à la consommation
- C) Combustibles fossiles
- D) Rejets de gaz carbonique
- E) Renouvelables
- F) Electricité
- G) Intermittence des ENR et production d'électricité
- H) Les coûts de l'électricité
- I) Un zoom sur les transports
- J) Récapitulatifs

Introduction

Les Allemands ont décidé de sortir du nucléaire. Celui ci assure à ce jour 23 % de la production électrique du pays, alors que les combustibles fossiles en assurent 58 %. A l'approche des premières échéances d'arrêt de centrales nucléaires, des examens sont en cours, non pas pour remettre en cause la sortie du nucléaire, mais pour prolonger de quelques années les durées de vie initialement prévues de ces centrales. Le document publié en aout 2010, intitulé : « Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung » (Prognos / EWI / GWS 2100 ; Projekt Nr 12/10, des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Berlin) fait un point détaillé sur l'avenir énergétique de l'Allemagne. Il passe en revue les différents scénarios possibles de la sortie du nucléaire, en faisant varier notamment les prolongations éventuelles de vie de 4 à 28 ans des centrales en service. Il donne ainsi, avec différentes hypothèses, pour chacune des années 2020, 2030, 2040 et 2050, la situation détaillée énergétique du pays. Mais en 2050, dans tous les cas, toutes les centrales nucléaires existantes sont considérées comme arrêtées et aucune construction nouvelle n'est prévue pour une relève.

L'étude présente un scénario dit de référence qui diviserait par environ deux les rejets de CO₂ entre 2008 et 2050 (passage de 752 à 363 Mt/an) et huit scénarios qui visent à avoir en 2050 des rejets de gaz carbonique d'environ 150 Mt/an, soit 5 fois moins qu'en 2008, et un peu moins de 2 tonnes par habitant et par an. Cet objectif de 150 Mt doit aussi être situé par rapport aux rejets qui se montaient à 960 Mt en 1990 (année repère du protocole de Kyoto). Ainsi il est couramment fait état d'un facteur 6 de réduction des rejets. Comme les huit scénarios conduisent en 2050 à des situations très voisines, notre analyse détaillée ne portera que sur l'un d'eux : le 1A, avec comme point de repère en parallèle le scénario de référence.

En France, l'objectif fixé par la loi d'orientation sur l'énergie de 2005 est sensiblement le même : un peu moins de 2 tonnes de CO₂ par habitant. En partant de 414 Mt de rejets en 2008, soit 6.7 t/hab et par an, il faut diviser par environ 3.3 les rejets globaux. C'est moins que le facteur 4 souvent avancé, come valeur repère pour la moyenne des pays développés. C'est beaucoup moins que le facteur de réduction allemand, grâce au départ à une production d'électricité à plus de 90 % non carbonée (le nucléaire assure 76 % de la production électrique et les énergies renouvelables près de 15 %). En France, il n'est pas envisagé de sortir du nucléaire, bien au contraire : la prolongation de durée de vie est engagée pour toutes les centrales, et de nouvelles sont en construction ou en projet pour assurer la relève et aussi répondre à un éventuel accroissement des besoins d'électricité. Dans ce cadre et en liaison avec les économies d'énergie et le développement des renouvelables, le scénario Négatep ramène les rejets annuels au voisinage de 120 Mt/an. Ce scénario est bâti sur une priorité : « sortir des fossiles » plutôt que « sortir du nucléaire ».

Nota :

Le document allemand exprime les données énergétiques de façon générale en PJ pour pétajoule (million de milliards de joules), sauf lorsque seule l'électricité est en question,

et alors les données sont exprimées en TWh (milliard de kilowattheures). Le document Négatep donne ces mêmes données en Mtep et TWh. Nous transformerons les PJ en Mtep (1 tep = 42 GJ, 1 PJ = 10¹⁵J ; 1 Mtep = 42 PJ). En thermique 1 TWh vaut 0.086 tep. Pour la transformation du TWh électrique en tep d'énergie primaire, nous adoptons les conventions officielles : 1 TWhe = 0,26 Mtep pour l'électricité nucléaire, 0,86 pour l'électricité géothermique, 0,086 pour les formes de production d'électricité qui ne passent pas par la chaleur (hydraulique, éolien, photovoltaïque) et 0.22 pour l'électricité fossile, lorsque la consommation réelle de fossile mesurée en tep n'est pas précisée.

Données initiales

Population : 82.1 Mhab en 2008; 73.8 Mhab en 2050

Nombre de logements 39.6 M. en 2008 (2.08 hab./log)
 39.7 M en 2050 (1.86 hab./log)

Déplacements (les chiffres varient peu avec scénarios)
Personnes de 1 102 Md P. km en 2008; 1 046 Md P.km en 2050.
Marchandises 654 Md t.km en 2008 ; 1 050 Md t.km en 2050.

PIB: 2 270 Md € en 2008; 3 158 Md € en 2050.

Hypothèses « externes » sur l'évolution des coûts

Coût du baril : 314 \$ en 2050.

Coût du CO² :
50 €/tonne en 2050 (référence) ; 75 €/tonne en 2050 (1A).

Essence :
1.4 €/litre en 2008 ; 2.1 en 2050 (référence) ; 4.3 en 2050 (1A).

Gaz Industrie :
3.5 c€/kWh en 2008; 5.1 en 2050 (Ref) ; 5.6 en 2050 (1A).

Public : 7.1 c€/kWh en 2008; 9.1 en 2050

Houille Industrie :
118 €/t en 2008; 263 en 2050 (Ref) 332 en 2050 (1A)

A) Bilan énergétique primaire

Point de départ : Allemagne et France en 2008.

Comme l'indique la figure 1, si chaque Allemand fait sensiblement appel aux mêmes besoin de pétrole(- 4%) et de renouvelables (+7 %) que chaque Français, si ses appels sont sensiblement supérieurs pour le gaz (+ 38 %), il se distingue complètement quand il s'agit du charbon et du nucléaire. La différence de la balance nucléaire /charbon entre la France et l'Allemagne saute aux yeux : par habitant il y a 5.3 fois plus de charbon et 3.9 fois moins de nucléaire en Allemagne qu'en France. Il est clair qu'en France le nucléaire a remplacé le charbon pour la production d'électricité. Ceci se retrouve dans les écarts de rejets de gaz carbonique par habitant: 6.1 tonnes par an en France, contre 9.4 en Allemagne. Un saut plus important est à faire en Allemagne pour aboutir à 2 tonnes par habitant et par an en 2050.

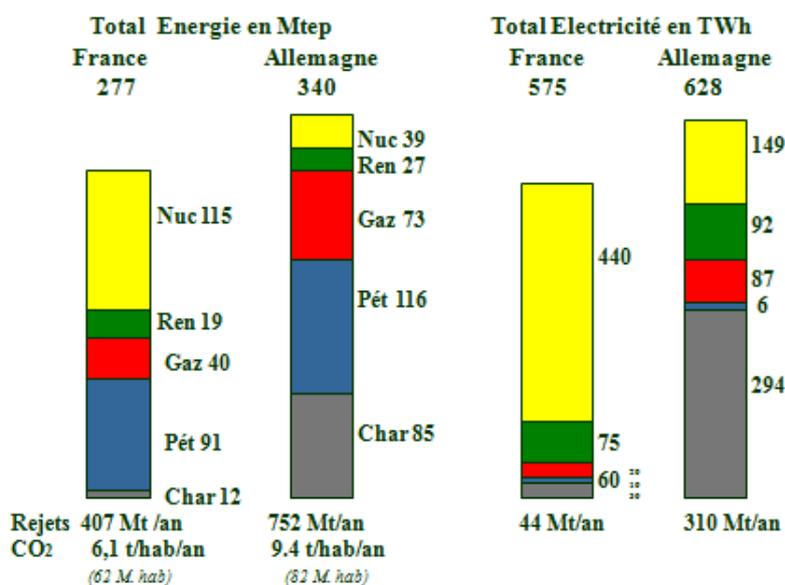
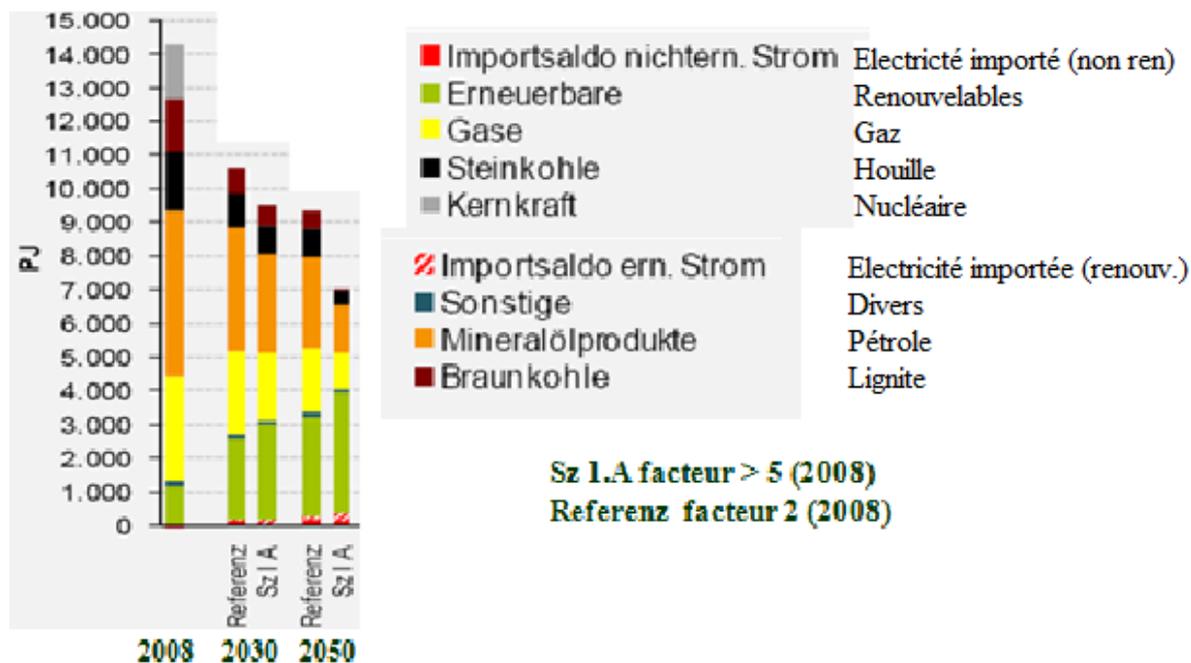


Figure 1 Energie Primaire France et Allemagne en 2008 en Mtep

L'avenir : bilan énergie primaire en 2050

La figure 2 est une simple copie d'une partie de figure plus détaillée du document allemand, copie qui sélectionne les seuls scénarios de référence et à celui repéré 1A et se limite aux seules années 2030 et 2050 (pour montrer la continuité des efforts de baisse)



**Figure 2 : Extrait du document allemand :
Energie Primaire en PJ (1 Mtep = 42 PJ)**

Le tableau 1 reproduit exactement (à l'unité près) les chiffres du document allemand exprimés en PJ. Les chiffres Négatep exprimés aussi en PJ sont recalculés à partir des valeurs d'origine (document « Négatep 2010 ») exprimées en Mtep.

En Allemagne de 2008 à 2050 dans le scénario de référence la production totale mesurée en énergie primaire serait divisée par environ 1.5 (environ -33 %), la part des fossiles serait divisée par un peu moins de 2, les renouvelables multipliés par un peu moins de 3. Un poste d'importation d'électricité significatif apparaîtrait, alors que ces dernières années, l'Allemagne avait un solde export-import positif. Dans le scénario 1A, la production totale passe de 338 à 167 Mtep et serait donc divisée par 2. Celle venant des fossiles serait divisée par 3.8 et celle venant des renouvelables multipliée par plus de 3, et on retrouverait un poste d'importations plus important que dans le scénario de référence.

Pour Négatep (France) le chiffre de l'énergie primaire 2050 serait de 279 Mtep³. Globalement, il serait nettement supérieur aux chiffres des deux scénarios allemands, celui de référence ou celui 1A. Mais par contre il est 2 et 4 fois plus faible en ce qui concerne l'usage des fossiles. La présence du nucléaire explique l'essentiel des écarts.

³ Il peut paraître surprenant que le bilan énergie primaire Négatep en 2050 soit légèrement supérieur à celui de l'année 2008, alors que le paysage énergétique s'est profondément modifié et que comme nous le verrons le bilan énergie final montre une baisse, significative du fait des économies d'énergie. Ceci est la conséquence de la substitution d'énergie thermique produite à partir des combustibles fossiles, par de l'électricité produite à partir du nucléaire. Par exemple, une même énergie finale de 10 Mtep produite par un combustible fossile est ainsi remplacée par une énergie primaire nucléaire de 30 Mtep.

Nota :

Dans le tableau 1, la conversion Mtep utilisée pour négatep en PJ a été effectuée pour faciliter la comparaison. Dans la suite du document, seuls les Mtep ou les TWh seront utilisés.

	All.2008	All.2050, Réf	All.2050, 1A	Fr. Négatep
Fossiles	11 301	5 995	2 981	1 554 (37 Mtep)
Renouvelables	1 147	2 954	3 540	2 503 (59.6 Mtep)
Nucléaire	1 623	0	0	8 135 (193.7 Mtep)
Divers	201	141	133	
Importations	- 81 (- 22 TWh)	240 (67 TWh)	367 (102 TWh)	
Total	14 191 PJ (338 Mtep)	9 331 PJ (222 Mtep)	7021 PJ (167 Mtep)	12 192 PJ (290 Mtep)

Tableau 1 : Energies primaires en PJ (10^{15} joules)

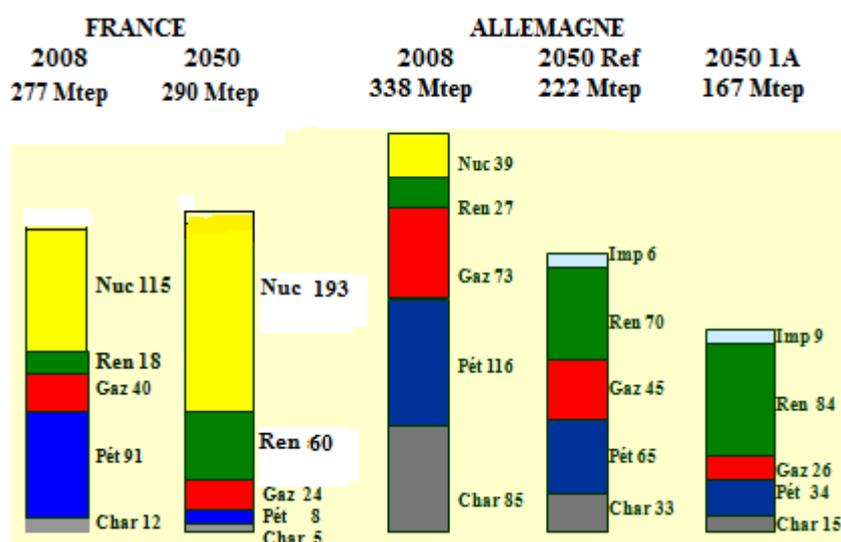


Figure 3 : Bilans énergies primaires France et Allemagne en Mtep.

B) Bilan énergie finale à la consommation

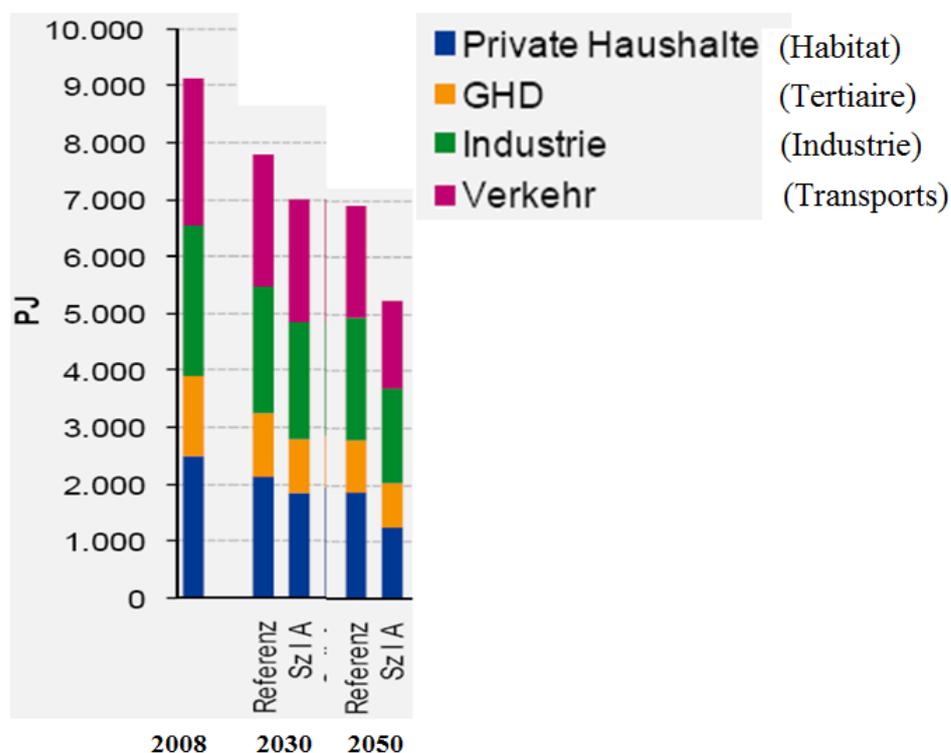


Figure 4: Extrait du document allemand : Energie finale en PJ (1 Mtep = 42 PJ)

Le tableau 2 donne, pour les principaux postes de consommation, le bilan énergétique mesuré en énergie finale en Mtep.

Pour l'Allemagne en 2050 le scénario de référence correspondrait à une baisse de 25 %, entre 2008 et 2050, de l'énergie finale, et le scénario 1A à une baisse de 42 %.

Pour Négatep (France) le chiffre 2050 de l'énergie finale serait de 149 Mtep. En 2006 le chiffre de l'énergie finale était de 161.7 Mtep. De 2006 à 2050 la consommation finale devrait baisser de 8%.

	All.2008	All. 2050, Ref	All.2050, 1A	Fr.2008	Fr.2050 Négatep
Habitat	60 Mtep	45	30 (24 %)	48	41 (28 %)
Tertiaire	33	22	19 (15%)	23	23 (15 %)
Industrie	63	51	40 (32 %)	40	55 (37 %)
Transports	61	46	36 (29 %)	51	30 (20 %)
Total	217 Mtep 2.6 tep/h	164 Mtep 2.2 tep/h	125 Mtep 1.7 tep/h	162 Mtep 2.6 tep/h	149 Mtep 2.2 tep/h

Tableau 2 : Energies finales en Mtep (1 Mtep = 42 PJ) et en tep par habitant

Commentaires.

- Globalement pour l'Allemagne, les besoins mesurés au niveau de l'énergie finale devraient selon le scénario 1A baisser de 42 % entre 2008 et 2050. Mais la population étant censée passer de 82 à 74 millions d'habitants (donnée d'entrée) la baisse par habitant serait ramenée à 35 %, pour atteindre 1.7 tep/hab et par an.
- Pour la France selon Négatep, les besoins mesurés en énergie finale ne baisseraient que de 8 % (passage de 162 à 149 Mtep). Mais contrairement à l'Allemagne, l'hypothèse est un accroissement de la population et passage de 62 à 67 millions d'habitants, et donc la baisse d'énergie par habitant serait de 14 %. Le chiffre par habitant serait de 2.2 tep/an, soit la même valeur que pour la référence allemande et 30 % de plus que le scénario allemand 1.A.
- Plus d'efforts d'économies d'énergie seraient donc demandés aux Allemands pour aboutir sensiblement au même niveau de rejets de gaz carbonique par habitant.

C) Combustibles fossiles

Le tableau 3 donne la répartition mesurée en énergie primaire des combustibles fossiles.

En Allemagne, de 2008 à 2050 l'utilisation de combustibles fossiles serait divisée par pratiquement 2 dans le scénario de référence et par 3.7 fois dans le scénario 1A. Pour ce dernier, la baisse de pratiquement 200 Mtep est surtout relativement importante pour le charbon, particulièrement le lignite qui a quasiment disparu (passage de 37 Mtep à moins de 1 Mtep). L'utilisation des 71 Mtep de fossiles dans le scénario 1A se répartirait en 15 Mtep pour la production électrique et 57 Mtep pour la chaleur directe et les déplacements.

Pour Négatep le chiffre 2050 serait de 37 Mtep (10 pour la production électrique et 27 pour la chaleur et les déplacements). En 2008, les combustibles fossiles représentaient 114 Mtep. Il y en aurait 3 fois moins en 2050. La baisse la plus importante porte sur le pétrole destiné à la mobilité (passage de 50 Mtep à 8 Mtep), conséquence de l'arrivée des biocarburants pour 15 Mtep et de l'importance prise par l'électricité, autant dans les transports en commun, que ceux individuels.

	All. 2008	All. 2050, Ref	All.2050, 1A	Fr 2008	Fr. 2050 Négatep
Charbon	80 Mtep	33	11.6	12.3	5
Pétrole	116	65	33.6	78.5	8
Gaz	73	45	25.8	39	24
Total	269 Mtep	143	71	130	37

Tableau 3 : Combustibles fossiles en Mtep

D) Rejets de gaz carbonique

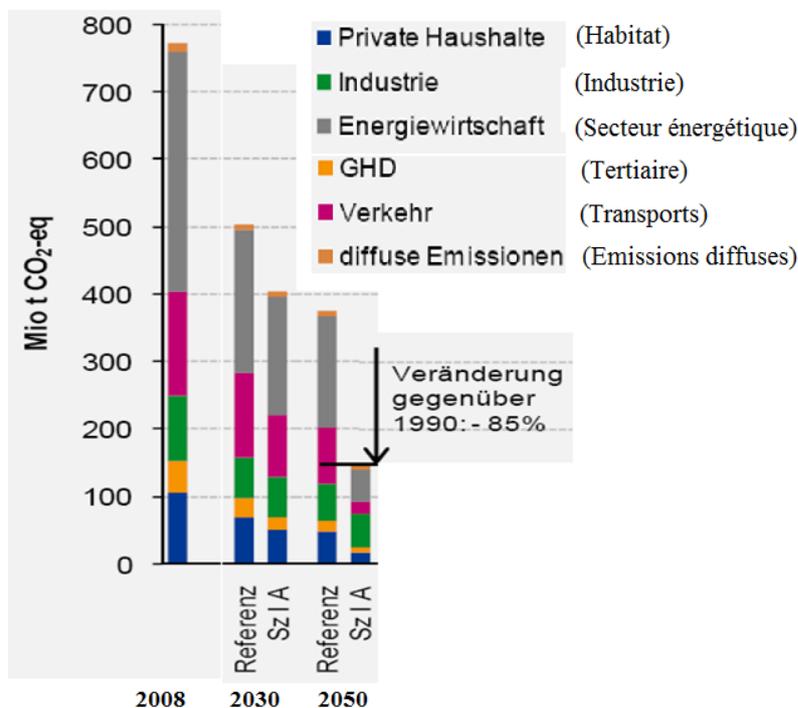


Figure 5: Extrait du document allemand : rejets totaux en équivalent gaz carbonique

Le tableau 4 donne les rejets des seuls gaz carboniques, qui constituent la part principale du total (97 % en 2008) des rejets en gaz carbonique équivalent, tels que donnés sur la figure 5. En 2008, les 3 % restants sont dus au méthane et au dioxyde d'azote. Ce pourcentage de gaz à effet de serre, hors gaz carbonique, reste relativement faible, environ 5 %, pour 2050.

	All. 2008	All. 2050 Ref	All.2050 1A	Fr 2008	Fr.2050 Negatep
Total des rejets de CO₂	752 Mt	363 Mt	138 Mt	415 Mt	117 Mt
Rejets par habitant /an	9.2 t/hab	4.9 t/hab	1.9 t/hab	6.7 t/hab	1.8 t/hab

Tableau 4 : Rejets du seul gaz carbonique

Pour l'Allemagne en 2050 le scénario 1A affiche des rejets de gaz à effet de serre de 146 millions de tonnes par an d'équivalent CO₂, dont 138 pour le seul CO₂ (+ 6 pour CH₄ et + 1 pour N₂O). Le chiffre global était de 990 Mt en 1990 et de 773 en 2008. Il faut noter que l'effort de réduction est présenté par rapport à la référence de l'année

1990, (repère du protocole de Kyoto), qui intègre les rejets de l'ex Allemagne de l'Est. Ainsi la baisse annoncée est de 85 %, ce qui conduit à parler de facteur 6.

Pour Négatep les rejets de gaz carbonique seraient ramenés de 415 (année 2006) à 117 Millions de tonnes par an, soit un facteur de réduction de 3.5.

En 2050, par habitant les rejets annuels de gaz carbonique prévus en Allemagne dans le scénario 1A seraient un peu inférieurs à 2 tonnes par habitant et par an, soit du même ordre de grandeur : que ceux en France pour Négatep.

Séquestration de gaz carbonique

Dans tous les scénarios allemands la séquestration de gaz carbonique (CSC pour Captage, Séquestration du Carbone) est mise en œuvre dès les années 2030. Ceci concerne les centrales électriques au charbon (houille ou lignite). Le tableau 5 indique les puissances concernées par ces installations.

	2008	Référence 2050	1A 2050
Total charbon	53.1 GW (275 TWh)	18.8 GW (116 TWh)	15.8 GW 32 TWh
Charbon avec CSC		11.9 GW (70 TWh)	11.3 GW (30 TWh)

Tableau 5 : Production d'électricité au charbon, puissance installée et énergie produite

Pour le scénario 1A, le CSC recouvre en 2050 la quasi-totalité du charbon utilisé pour la production d'électricité (environ 30 TWh)⁴.

Pour le scénario de référence 70 TWh, sur un total de 116 produits à partir du charbon, feraient l'objet de la séquestration. Il faut noter que cette séquestration ne serait pas appliquée aux 69 TWh de production électrique à partir du gaz dans ce scénario de référence.

Commentaire.

Toutefois, il est surprenant qu'en utilisant pratiquement deux fois plus de combustibles fossiles, comme le montre le tableau 3, le scénario 1A allemand ne produise que 18 % de plus de gaz carbonique que le scénario Négatep. En fait une partie des combustibles fossiles n'est pas utilisée par le secteur énergétique. En soustrayant cette part et en appliquant les taux de rejets retenus pour Négatep⁵, nous obtenons en 2008 : 850 Mt et non 752 (l'IAE donne 804 pour l'Allemagne en 2008) et en 2050 : 168 Mt et non 138. Il n'y a pas unanimité sur les facteurs d'émission unitaires et d'autres valeurs plus basses que celles prises en enveloppe pour Négatep sont aussi utilisées,

⁴ Aux 30 TWh associés à cette séquestration correspondraient environ 30 Mt de CO₂ Il est considéré en général que dans le cycle CSC, un quart ne sera pas capté et sera rejeté à l'atmosphère, ce sont donc 22 Mt qui seraient à stocker. Mais nous n'avons pas l'impression que ceci ait été pris en compte.

⁵ - Facteurs d'émission utilisés par Négatep : Charbon : 4,3 t CO₂/tep ; - Pétrole : 3,27 t CO₂/tep ; Gaz : 2,71 t CO₂/tep ; - Divers : 3,5 t CO₂/tep.

mais il est difficile de retrouver des valeurs aussi basses que les résultats allemands ! Si Négatep surévalue peut être les rejets, les calculs allemands semblent les sous évalués⁶.

E) Renouvelables

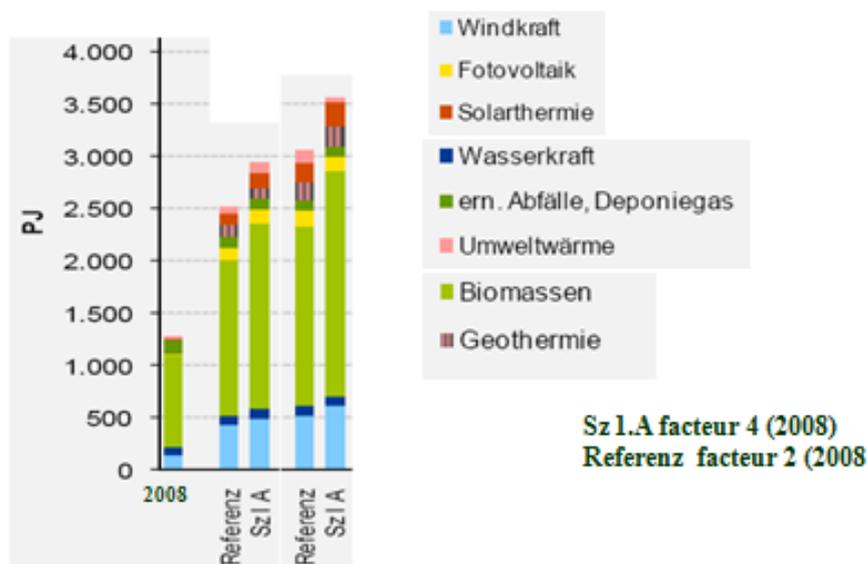


Figure 6: Extrait du document allemand : les renouvelables en PJ

Il est bien connu que l'Allemagne mise à fond sur les énergies renouvelables pour « sortir du nucléaire ». Si en 2008 les renouvelables totalisaient 27 Mtep, ce chiffre passerait à 70 dans le scénario de référence et à 84 dans le scénario 1A. Pour ce dernier les usages des renouvelables se répartiraient comme suit :

Chauffage : 44 Mtep (biomasse, géothermie et chaleur environnement, solaire thermique)

Electricité : 22 Mtep (éolien, hydraulique, partie de biomasse, photovoltaïque)

Transports (biomasse : biocarburants) : 18 Mtep.

Pour Négatep le total des renouvelables se monterait à 59.6 Mtep en 2050

Chauffage : 30 Mtep (biomasse : 17.5 Mtep, solaire thermique 4.5 Mtep, géothermie et pompes à chaleur: 8 Mtep)

Electricité : 15 Mtep (175 TWh, voir détail ci-dessous)

Transports (biomasse, biocarburants) : 15 Mtep

⁶ Ce n'est que de façon indirecte que nous avons pu trouver un des facteurs d'émission : celui du pétrole, car il est aisément isolable à partir du poste de consommation déplacements, où il est prépondérant. L'énergie totale issue des produits pétroliers pour les déplacements est de 2 433 PJ, soit 58 Mtep. Les rejets de gaz carbonique donnés dus aux déplacements sont de 153 millions de tonnes. Le facteur trouvé est de 2.6 t CO₂/tep, soit 20 % plus bas que celui Négatep.

	All. 2008	All. 2050, Ref	All.2050, 1A	Fr. Negatep
Eolien	3.4 Mtep	12.6 Mtep	14.7 Mtep	6.4 Mtep
Hydraulique	1.7 Mtep	2.1 Mtep	2.1 Mtep	6 Mtep
Photovoltaïque	0.4 Mtep	3.4 Mtep	3.3 Mtep	1.7 Mtep
Biomasse	21.1 Mtep	40.8 Mtep	51.3 Mtep	32.3 Mtep
Géothermie	0.2 Mtep	7.1 Mtep	7.1 Mtep	8 Mtep
Solaire Therm.	0.4 Mtep	4.2 Mtep	5.8 Mtep	4.5 Mtep
Total	27.2 Mtep	70.2 Mtep	84.3 Mtep	59.6 Mtep

Tableau 6 : Les renouvelables en Mtep.

Nota :

- sous le terme *géothermie* nous regroupons la *géothermie profonde*, dite des hautes et moyennes énergies pouvant produire de l'électricité, la *géothermie des basses énergies* servant au chauffage et enfin de ce que couvre les pompes à chaleur (*géothermie de surface*, ou *géosolaire* ou *aérothermie*).

- le terme *biomasse* regroupe les *biocarburants*, les *bois de chauffe* et destinés à la *production électrique*,

Commentaires

Indépendamment de la forte augmentation de l'électricité renouvelable, que nous évoquerons ci-dessous, il faut noter aussi bien en France, qu'en Allemagne, la forte augmentation absolue de la biomasse. Par ailleurs la géothermie et le solaire thermique connaissent de très fortes augmentations relatives (facteur > à 10), sans atteindre le niveau absolu de la biomasse.

F) Electricité

C'est au niveau de l'appel à l'électricité que se mesure le plus grand écart entre l'Allemagne et la France : d'un côté une baisse sensible et de l'autre une très forte augmentation.

	Al. 2008	Al. 2050, Ref	Al.2050, 1A	Fr. Negatep
Habitat et tertiaire	273 TWh	230 TWh	192 TWh	478 TWh
Industrie et alimentaire	234 TWh	222 TWh	144 TWh	321 TWh
Transports	17 TWh	44 TWh	65 TWh	93 TWh

Total	524 TWh	496 TWh	402 TWh	892 TWh
--------------	----------------	----------------	----------------	----------------

Tableau 7 : Consommation d'électricité en TWh

	All. 2008	All. 2050, Ref	All.2050, 1A	Fr. Negatep
Nucléaire	149 TWh	0	0	745 TWh
Fossiles	371 TWh	185 TWh	32 TWh	70 TWh
Divers non ren.	19 TWh	28 TWh	28 TWh	
Eolien	40 TWh	147 TWh	154 TWh	75 TWh
Hydraulique	20 TWh	25 TWh	24 TWh	70 TWh
Photovoltaïque	4.4 TWh	39 TWh	39 TWh	20 TWh
Biomasse	27 TWh	41 TWh	41 TWh	10 TWh
Autres ren.		11 TWh	11 TWh	
Total production	631 TWh	477 TWh	329 TWh	990 TWh
Importations	- 22 TWh	67 TWh	102 TWh	
Total	609 TWh	544 TWh	440 TWh	990 TWh

Tableau 8 : La fourniture d'électricité (hors pompage)

Pour l'Allemagne en 2050 le scénario 1A donnerait 440 TWh en énergie électrique brute nécessaires à la production aboutissant à la consommation finale électrique de 402 TWh indiquée dans le tableau⁷. L'apport des renouvelables étant de 269 TWh, l'ajout de 68 TWh de non renouvelables ne permet pas de répondre aux besoins et il faut importer de l'électricité. Il faut noter que le gaz n'est plus utilisé pour la production d'électricité dans tous les scénarios après 2040, sauf celui de référence pour 69 TWh. En 2008 la production électrique était de 636 TWh et le bilan export-import légèrement positif de 22 TWh (exportateur net d'électricité). Donc pour le scénario 1A, on note une forte baisse de la production électrique, presque d'un facteur 2, un appel à l'importation pour 102 TWh et enfin la mise en œuvre de la séquestration, CSC, avec 22 millions de tonnes de gaz carbonique à mettre sous terre chaque année.

Pour Négatep le chiffre de la production électrique serait de 990 TWh (nucléaire 745, renouvelables 175, fossiles 70). Parmi les fossiles, seul le gaz est conservé. Il est maintenu notamment compte tenu de sa souplesse pour faire face aux variations brutales de puissance de l'éolien. Pour les renouvelables, le total de 175 TWh se décline comme suit : éolien 75, hydraulique : 70 ; photovoltaïque : 20 ; biomasse : 10). Il faut noter

⁷ L'écart de 38 TWh entre les deux chiffres correspond à l'auto consommation des installations de production et aux pertes pour le transport et la distribution)

qu'en France, comme en Allemagne, l'hydraulique ne bouge presque pas, tout ayant déjà été fait. En 2008 la production brute d'électricité en France était de 575 TWh (nucléaire : 440 TWh, thermique classique : 60 TWh, renouvelables 75 TWh) et environ 60 TWh exportés. Par contre il est supposé que le bilan import export sera sensiblement équilibré en 2050.

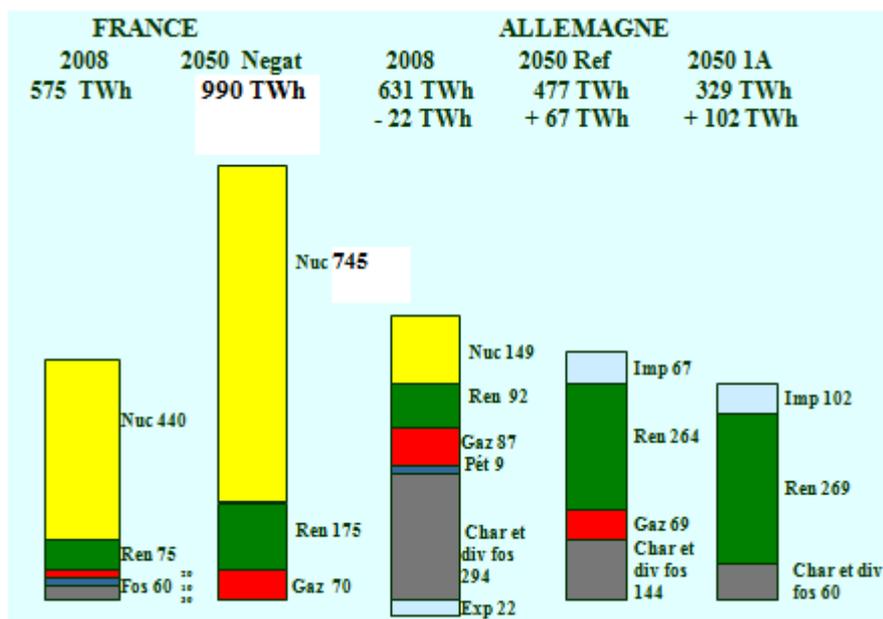


Figure 7 : La production d'électricité

G) Intermittence des renouvelables et production d'électricité

Remarques préliminaires :

- Le photovoltaïque, de façon évidente, disparaît totalement selon les cycles solaires journaliers bien prévisibles, pas de photovoltaïque le soir, lorsque les besoins sont souvent au maximum, par contre du photovoltaïque au milieu de journée, lorsque les besoins sont aussi élevés.

- L'éolien ne présente pas cette régularité. La prévisibilité est nulle à moyen et long termes, mais présente une certaine qualité à court terme (la veille pour le lendemain). Cette prévisibilité à 24 heures, utile pour préparer les programmes de charge des autres sources, reste sujette à aléas. La puissance de l'éolien peut varier en quelques heures, par exemple passage en 6 heures d'un extrême à l'autre. La puissance peut retomber à quasiment zéro et se maintenir à des valeurs très basses pendant les longues périodes anticycloniques, qui peuvent durer des semaines. Mais dans l'autre sens, l'éolien peut aussi produire beaucoup conduisant à une surproduction d'électricité que le réseau peut avoir des difficultés à absorber.

Dans les deux cas, il faut disposer de la capacité de remplacement ou d'effacement. La question de l'imprévisibilité et surtout de la vitesse de réaction se pose surtout pour l'éolien.

Ces questions ne sont pas traitées dans le document allemand, ou tout au moins pas de manière explicite⁸. Mais, comme le sujet nous semble crucial, nous l'aborderons, sur la base des données chiffrées du dossier allemand.

Dans le scénario de référence, sous l'aspect énergétique, cette part des renouvelables intermittents représente 34 % des besoins (186/544) et 44 % (193/440) dans le cas du scénario 1A. Ce poids relatif, déjà très important sous l'aspect énergétique, devient considérable si l'on se ramène à la puissance.

Pour analyser cet aspect puissance, nous rassemblons dans la figure ci-dessous les données pour chaque source dans le cas du scénario 1A.

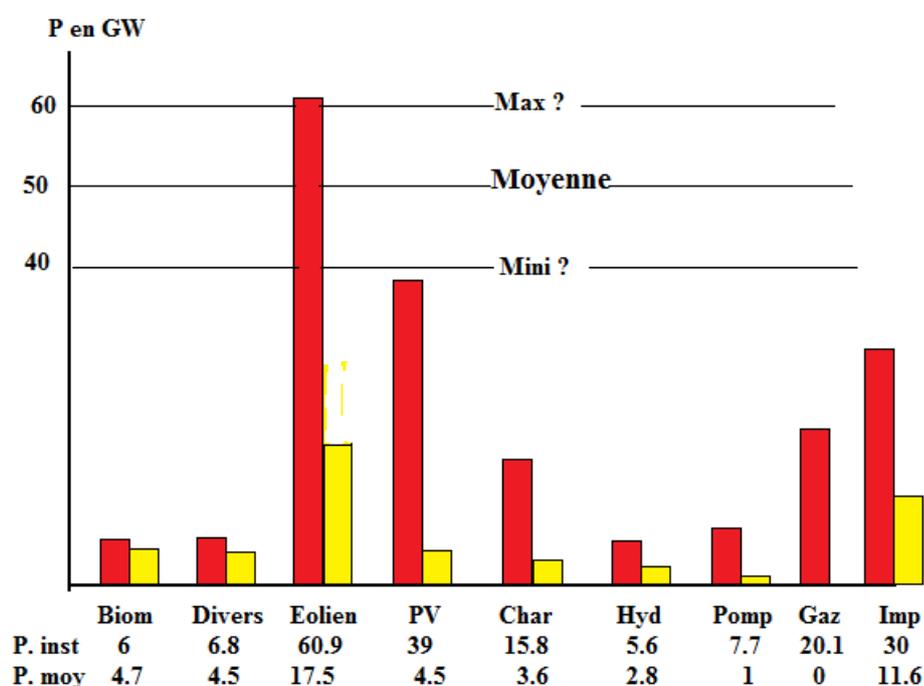


Figure 8 : scénario 1A. par source : puissances maximale et moyenne
(en rouge la puissance dite de crête et en jaune la puissance moyenne annuelle)

Pour le scénario 1A, la consommation d'énergie électrique annuelle de 440 TWh correspond à une puissance moyenne de 50.2 GW. La puissance instantanée oscillera autour de cette moyenne avec les variations jours/nuits, jours ouvrés et non ouvrés et enfin les grandes variations saisonnières. Nous supposons que les variations possibles autour de la moyenne ne seront que de ± 10 GW, en soulignant, qu'en comparaison avec la France, les variations saisonnières sont supposées limitées du fait de l'absence

⁸ Cette question est abordée très directement dans une étude récente de la European Climate Foundation : « Practical guide to a prosperous, low carbon Europe » ; une critique de cette étude a été faite par les deux auteurs : « Suggestions/contribution pour la refonte de la politique énergétique européenne – comparaison du scénario ECF « road map 2050 » et du scénario Négatep extrapolé à l'Europe ».

de chauffage électrique dans les scénarios allemands. Nous regardons comment produire entre 40 et 60 GW.

La réponse aux besoins repose sur une puissance totale installée qui semble très importante, puisqu'elle atteint 162 GW, hors importations. Mais il faut détailler pour connaître l'état réel dans toutes les situations. La puissance productible se répartit comme suit :

- 36.4 GW d'éoliennes terrestres (1 530 heures/an)
- 24.5 GW d'éoliennes offshore (4 000 heures par an)
- 39 GW de photovoltaïque (1 000 heures par an)
- 15.8 GW de charbon (pour 2 000 heures par an)
- 6 GW de biomasse (pour 6 830 heures par an)
- 5.6 GW d'hydraulique hors pompage (4 360 heures par an)
- 7.7 GW de pompage (pour 1 030 heures par an)
- 6.8 GW de divers (pour 5 780 heures par an)
- 20.1 GW de gaz (pour 0 heure par an), en réserve ?

En enlevant les 100 GW d'intermittents éolien et photovoltaïque, il ne resterait disponibles en garantie au maximum que 62 GW, soit pratiquement la limite de 60 GW des besoins. Il n'y aurait donc aucune marge pour répondre aux besoins et faire face aux incidents. Si nous regardons au vu des heures de fonctionnement les seules sources apparemment destinées à avoir une puissance ajustable, nous retenons le charbon + l'hydraulique + le pompage + le gaz, et trouvons un total maximum de 49.2 GW. Il faut retenir moins de 49 GW, par exemple 40, car la totalité de l'hydraulique ne peut être comptée (la part du fil de l'eau étant peu ajustable) et il faut aussi faire face à des incidents. Donc hors intermittents la puissance ne peut être assurée, et **pour équilibrer le réseau, un appel à l'importation s'impose en Allemagne.**

L'Allemagne, à ce jour exportateur net d'électricité devient fortement importatrice. Ceci est prévu à un niveau énergétique de 102 TWh, soit une puissance moyenne de 11.6 GW. Il s'agit bien d'une puissance moyenne, en aucun cas représentative des besoins de pointe, pour lesquels en premier ordre de grandeur un minimum de 20 GW semble s'imposer. Le document allemand aborde ce sujet en présentant sa vision du réseau européen en 2050 et on pourrait en déduire qu'ils comptent en effet sur plus de 20 GW de fourniture.

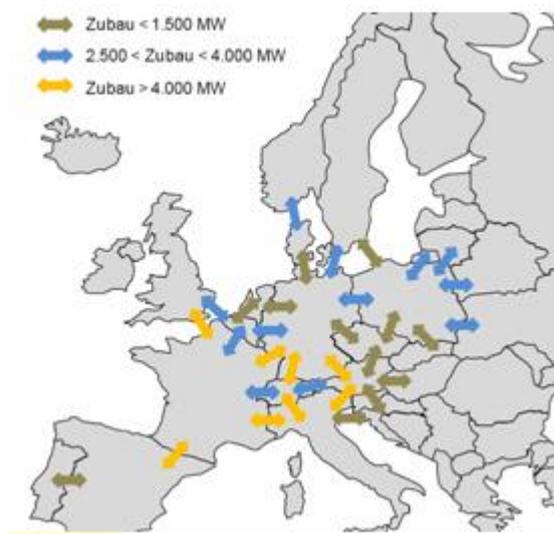


Figure 9 : Extrait du document allemand : capacités d'interconnexion en 2050.

Ce besoin d'électricité importée explique probablement la forte implication de l'Allemagne dans le projet Desertec. Ce projet concerne l'ensemble du pourtour méditerranéen. Il vise pour 2050 une puissance totale de 100 GW⁹ d'électricité installée en Afrique du Nord et l'acheminement d'une partie jusqu'au centre de l'Europe. Il faut noter aussi un autre projet plus modeste et spécifique Algérie-Allemagne avec 3 000 km de câbles entre la ville d'Adrar (désert saharien) et Aachen (Aix-la-Chapelle) et pour une puissance de 9 GW.

⁹ Les centrales seraient du type solaire à concentration, technique solaire beaucoup plus intéressante que le photovoltaïque, surtout avec ajout d'un stockage de chaleur. Ce stockage permet la production d'électricité quelques heures en l'absence de soleil. Les centrales à concentration peuvent être associées à d'autres sources de chaleur. Le cas particulier du gaz comme source de chaleur mérite d'être détaillé. Avec des turbines à gaz dans des installations hybrides, le gaz vient en appoint en l'absence de soleil ou en fin d'utilisation du stockage chaleur. Dans le cas des centrales à cycle combiné, on compte 2 MW de turbine à gaz pour 1 MW de turbine à vapeur ; dans le cas des centrales hybrides solaire/gaz, l'intérêt économique pour le producteur est de faire tourner en permanence la turbine à vapeur, environ 40 % du temps alimentée par le solaire et 60 % du temps par les turbines à gaz, ce qui donne sans stockage 3 fois plus d'électricité produite à partir du gaz. Si on introduit un stockage de la chaleur solaire, on peut réduire ce ratio à deux environ. Donc cette électricité dite solaire ne signifie pas nécessairement l'absence de rejets de gaz carbonique.

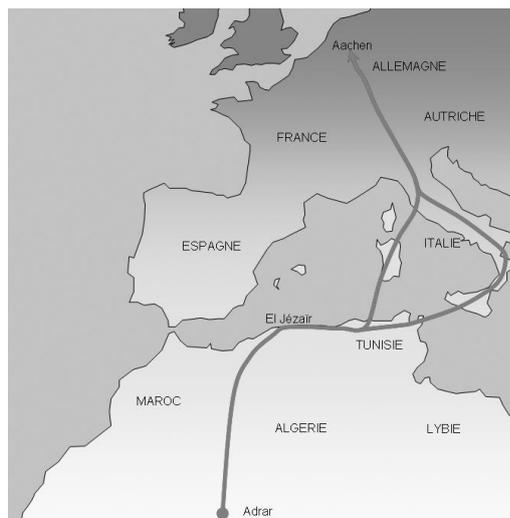


Figure 10 : le projet Adrar-Aachen une liaison Afrique - Allemagne

Mais il faut aussi raisonner en sens inverse : le déversement vers l'étranger d'un trop plein d'électricité renouvelable. Le pays n'est pas si étendu d'est en ouest pour avoir un décalage temporel dans la production photovoltaïque. Il n'y aura pas étalement dans le temps de la puissance photovoltaïque et il faut donc considérer qu'un maximum proche de 39 GW peut être atteint au milieu de la journée, ce qui coïncide en général avec une heure de forte consommation et donc bien au dessus du minimum. Néanmoins ceci ne donne pas beaucoup de marge pour une éventuelle production éolienne. Si nous ajoutons une puissance éolienne de 50 GW (la dispersion de l'éolien conduit à ne pas retenir comme puissance maximale la puissance installée de 60.9 GW), un fort vent au milieu de la journée conduirait à devoir exporter environ 40 GW, en notant qu'au même moment des pays, comme le Danemark, très équipés en éoliennes et soumis au même régime de vent auront les mêmes problèmes de surproduction.

Nous avons jusque là fait un raisonnement semi statique sur l'équilibre du réseau. Mais le problème va surtout se poser en dynamique avec les variations de vent. La figure 12 montre l'évolution de la puissance pendant 15 jours d'un réseau basé sur 26 GW d'éolien (terrestre pour l'essentiel) et 9.8 GW de photovoltaïque. Des variations de 10 GW en 5 heures peuvent être observées. L'extrapolation aux 60 GW d'éoliens prévus dans le scénario 1A allemand conduirait à plus que doubler la variation de 10 GW. Qui pourra fournir ou absorber en faisant varier en fait ses productions de plus de 20 GW en 5 heures ?

En posant cette question fondamentale, nous émettons de sérieux doutes sur la stratégie allemande qui repose sur une électricité européenne, massivement interconnectée, en répartissant les productions en fonction des intermittences locales, en associant solaire et éolien (relations nord/sud), en globalisant la gestion de l'hydraulique de barrages (Suisse, Suède, Norvège).

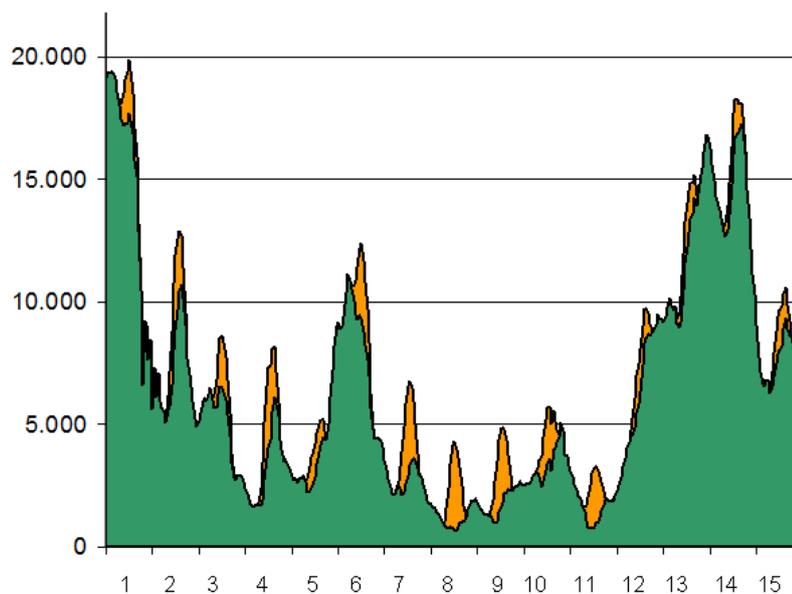


Figure 11 : Les variations de puissance sur 15 jours en GW (en vert l'éolien, en jaune le photovoltaïque) ; extrait de « Outlook for the German Generation portfolio of the future » RWE par Matthias Dürr le 13/10/2010 à Bruxelles

Pas surprenant que les Allemands mettent tellement en avant le « Super Grid » ce réseau à l'échelle de l'Europe, prévu pour faire transiter toutes ces électricités renouvelables, comme le montre la figure 12 extraite d'une présentation RWE, donnant 42 GW de liaison entre l'Allemagne et ses voisins.

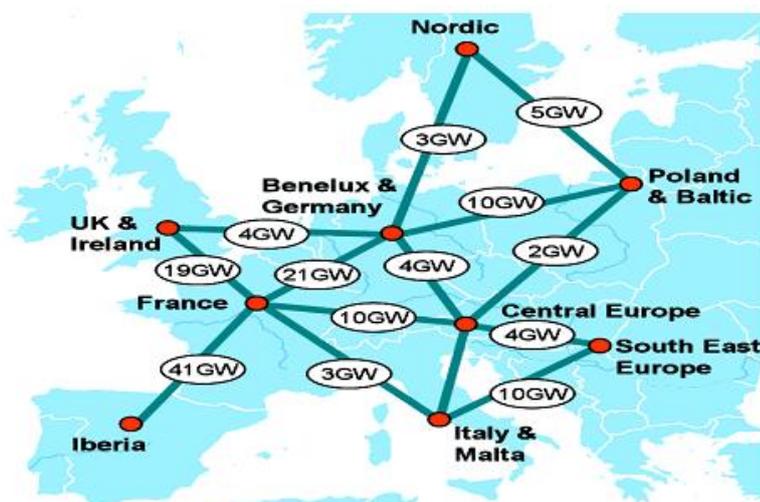


Figure 12 : Le super réseau européen : Extrait de « Outlook for the German Generation portfolio of the future » RWE par Matthias Dürr le 13/10/2010 à Bruxelles.

Il faut noter l'importance de la traversée des Pyrénées, clé de la liaison vent au nord et soleil au sud et le rôle de plaque tournante que devrait jouer la France. Nous sommes loin de l'image du renouvelable local, décentralisé !

En France, pour Négatep, l'apport du photovoltaïque a été limité pour des questions de coût, et celui de l'éolien pour faire face à ce problème d'intermittence, sans compter sur les liaisons export-import pour répondre aux besoins fluctuants du réseau électrique.

H) Les coûts de l'électricité

En dépit d'une forte présence des renouvelables, qui selon nos données actuelles reviennent beaucoup plus chères, le coût de l'électricité selon le document allemand ne semble pas affecté significativement, puisque hors inflation, de 2008 à 2050 dans le scénario 1A, les coûts pour le public restent stables à 21.7 c €/kWh, et pour l'industrie ils passent de 9.6 en 2008 à 10.5 en 2050. (en France ces coûts sont à ce jour de 12 c€/kWh pour le public et de 6 c€/kWh pour l'industrie).

Cette quasi stabilité du coût de l'électricité peut surprendre. En effet même si le coût combustible est nul (sauf pour la biomasse qui représente moins de 10 % de la production) la production a basculé vers des installations beaucoup plus chères en investissements rapportés aux kWh produits.

Cette quasi stabilité du coût de l'électricité repose sur des hypothèses de baisse progressive des coûts d'installations qui semblent discutables, ainsi qu'une amélioration du facteur de charge pour aboutir en 2050 à :

- Eolien terrestre : 950 €/kW (pour 1 500 en 2008), soit globalement une division par 1.6 de la part investissement dans le coût du kWh

- Eolien offshore : 1 350 €/kW (pour 2 500 en 2008) et 4 000 h/an (pour 3 000 en 2008), soit globalement une division par 2.5 de la part investissement dans le coût du kWh

- Photovoltaïque : 1 000 €/kW (pour 3 500 en 2008) et 1 .000 h/an (pas de changement)

Il faut noter que ces coûts annoncés peuvent paraître très optimistes, puisque à ce jour les meilleurs coûts connus sont ceux indiqués ci-dessus (1 500 €/kW pour l'éolien terrestre, 2 500 €/kW pour l'éolien offshore et 3 500 €/kW pour le photovoltaïque, l'optimisme étant particulièrement marqué pour ces deux derniers postes).

Un zoom sur les transports

En 2008 en Allemagne les transports représentent 28 % de l'énergie finale et 20 % des rejets de gaz carbonique. En France, si la part énergie finale est sensiblement la même (31 %), par contre les transports sont à l'origine de 39 % des rejets de gaz carbonique. Cet écart relatif de l'importance des transports dans les rejets de gaz carbonique n'est pas représentatif d'une différence dans les transports eux-mêmes, mais est une conséquence indirecte des rejets des autres secteurs dont ceux de la production d'électricité.

Les 2 approches pour réduire les rejets et sortir du tout pétrole, sont assez semblables, à savoir : mettre l'accent sur les biocarburants et sur un usage accru de l'électricité, comme le montre la figure 12 pour l'Allemagne seule et le tableau 9 pour la comparaison. Il faut noter que Négatep mise un peu plus sur l'électricité en usage direct dans les transports (voitures électriques et hybrides rechargeables), ainsi qu'en usage indirect, faisant intervenir l'énergie électrique dans la production des biocarburants (les 15 Mtep sont produits à partir de 22.5 Mtep de biomasse et de 87.5 TWh d'électricité).

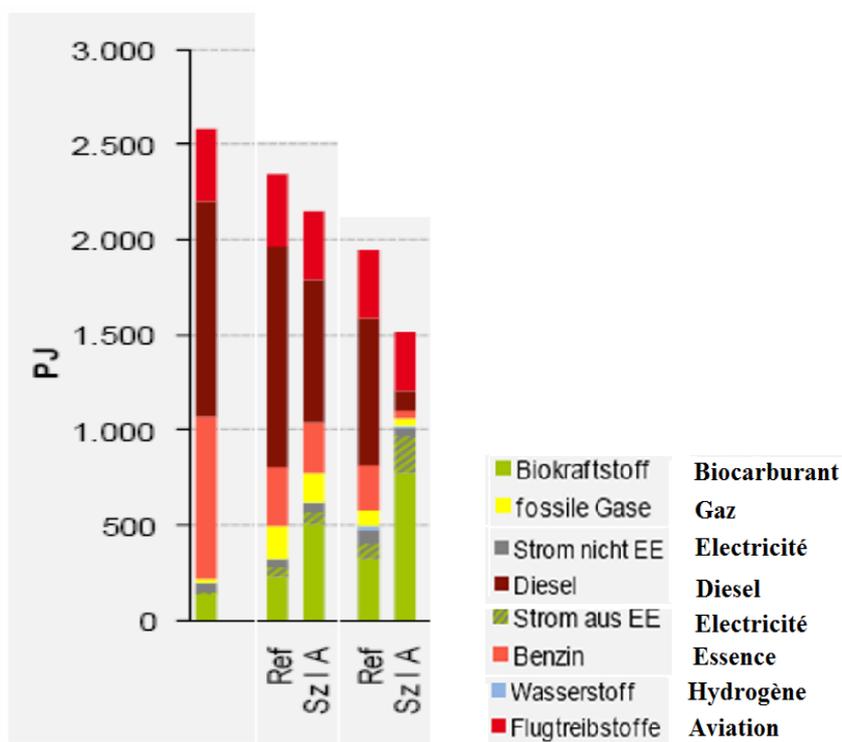


Figure 12 : Extrait du document allemand : les transports

Nota : La figure indique que l'hydrogène est utilisé dans les transports. Ceci reste marginal, puisqu'avec 15 PJ soit 0.36 Mtep ne représente que 1.2 % de l'ensemble des transports.

	All 2008	All 2050 Référence	All 2050 1A	Fr 2008	Fr 2050 Négatep
Fossiles	56.7 Mtep	33.5 Mtep	12 Mtep	49 Mtep	7 Mtep
Biocarburants	3.1	8.9	18.4	0.7	15
Electricité	1.4	3.8	5.6	1	8
Total	61.2 Mtep	46.2 Mtep	36 Mtep	50.8 Mtep	30Mtep

Tableau 9 : Les transports

J) Récapitulatifs

Vue d'ensemble sur le scénario de référence

Le scénario de référence correspond, semble-t-il, à la poursuite de la politique des dernières années. Il divise par un peu plus de deux, entre 2008 et 2050, les rejets de gaz carbonique et les amène à 4.9 t/hab et par an. Entre 2008 et 2050, le besoin total en énergie primaire baisse de 34 % et la consommation finale énergétique par habitant

baisse de 16 %. La part des renouvelables monte de 27 à 70 Mtep, la part des combustibles fossiles représente 143 Mtep au lieu de 269. Ce dernier point se traduit évidemment par une baisse d'un facteur proche de 2 des rejets de gaz carbonique (363 Millions de tonnes par an au lieu de 752). Le CSC s'applique à 70 TWh de production électrique et 67 TWh sont importés.

Vue d'ensemble sur le scénario 1A

Pour le scénario 1A, qui permettrait de ramener en 2050 les rejets de gaz carbonique par habitant sous 2 t/an¹⁰, le besoin total en énergie primaire baisse entre 2008 et 2050 de 50 %, la consommation finale énergétique par habitant étant réduite de 36 %. La part des renouvelables passe de 27 Mtep à 84 Mtep et la part des combustibles fossiles passe de 269 Mtep à 71 Mtep. Le CSC concerne 30 TWh d'électricité. L'importation qui porte sur 102 TWh soit environ 30% de la production interne, apparaît essentielle pour faire face aux intermittences des renouvelables.

Comparaison des scénarios 1A et Négatep (2 tonnes de CO2 paran et par hab)

Il n'est pas question ici de faire une analyse comparative détaillée des 2 scénarios : le 1A allemand et le Négatep français. Chacun a son orientation, suit une idée directrice. Nous ne ferons dans ce commentaire général que soulever les points clés.

Le scénario allemand vise à ne pas retenir le nucléaire, en misant essentiellement sur les renouvelables. Si on parle beaucoup des énergies nouvelles renouvelables, il faut constater que l'essentiel reposera sur la classique et traditionnelle biomasse, assurant 30 % des besoins de production énergétique primaire. L'éolien, la championne des énergies nouvelles renouvelables assure 9 % des besoins de production énergétique, mais l'apport du photovoltaïque, pourtant tant médiatisé, n'a qu'un rôle limité à 2 %.

Mais comme les renouvelables producteurs d'électricité ont des limites essentiellement liées à l'intermittence, s'il faut fortement réduire les usages de l'électricité de 23 %, il faut aussi commencer à miser sur la séquestration du gaz carbonique et surtout faire appel à de l'électricité importée. Celle-ci sera-t-elle produite avec des énergies non carbonées ? Rien n'est moins sûr, à moins de compter sur la France et son nucléaire ou la Norvège avec son hydraulique pour le faire ? Ou alors va-t-on se reposer sur ces liaisons Afrique-Europe que les Allemands poussent tant, mais dont on a vu qu'elles peuvent n'être que très partiellement non carbonées ? On peut s'interroger sur le réalisme d'une révolution écologique qui transforme l'Allemagne en importateur important d'électricité, et sur ce que seraient les conséquences si les pays périphériques adoptaient des orientations similaires.

Le scénario Négatep après avoir mis en avant les économies d'énergie, mais à moindre titre que le scénario 1A, met la priorité sur la limitation de l'usage des combustibles fossiles, même si pour ce il faille accroître la production d'électricité. Nous sommes souvent face à ce paradoxe : la limitation des rejets de gaz carbonique peut conduire à augmenter les besoins d'énergie primaire. Cet appel croisant à

¹⁰ Il faut rappeler notre réserve sur le calcul des rejets de gaz carbonique, peut être sous-évalués de 20 à 30 %

l'électricité n'est acceptable que dans la mesure où ceci n'est pas source de rejets de gaz carbonique supplémentaires à la production. Négatep pousse aussi beaucoup pour les renouvelables, mais a une approche un peu plus réservée sur les limites de ceux-ci du fait de leur caractère intermittent. Cette réserve s'applique surtout pour l'éolien et ses sauts de puissance, pas bien prévisibles. Ceci conduit à n'avoir que 2 % des besoins de production énergétique produits par l'éolien. Par contre, ce sont des questions de coût qui limitent la pénétration du photovoltaïque à 0.6 %.

Globalement compte tenu des économies d'énergie, d'un effort significatif sur les renouvelables, le scénario Négatep, pour fortement réduire les rejets de gaz carbonique, mise sur un accroissement de l'électricité nucléaire, dont la production passe de 440 à 700 TWh. Cet accroissement de 60 %, ne conduirait pas à un accroissement significatif du nombre de centrales, puisque chaque nouvelle installation de type EPR est une fois et demi plus puissante que la moyenne des centrales en service à ce jour.

Les scénarios allemands et français traduisent bien deux approches radicalement opposées : dans un cas réduire la consommation d'électricité avec comme objectif de sortir du nucléaire ; dans l'autre cas, mettre en priorité absolue la baisse des énergies fossiles, en utilisant le plus possible l'électricité, sans accroître les rejets de gaz carbonique, ce qui nécessite de faire largement appel au nucléaire.