

Prévisions futur énergétique de l'Allemagne, comparaison avec France Négatep

Claude Acket et Pierre Bacher

Présentation du document

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. Les économies d'énergie et les renouvelables peuvent-ils répondre à cette question ? Une étude très détaillée répond à ces questions. Elle présente différents scénarios répondant à ces objectifs. Nous nous proposons, non pas d'examiner point par point les hypothèses sur lesquelles sont bâtis ces scénarios, mais simplement de faire ressortir les bases du nouveau paysage énergétique.

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 août 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 toutes 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 TWh_e = 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.

Bilan énergie primaire

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 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 bilan positif du solde export-import. Dans le scénario 1A, la production totale mesurée en énergie primaire passe de 338 à 167 Mtep. Elle 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 Mtep¹. Globalement, il serait nettement supérieur aux 2 chiffres 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.

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	7 644 (182 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)	11 701 PJ (279 Mtep)

Tableau 1 : Energies primaires en PJ (10¹⁵ joules)

¹ Il peut paraître surprenant que le bilan énergie primaire 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.

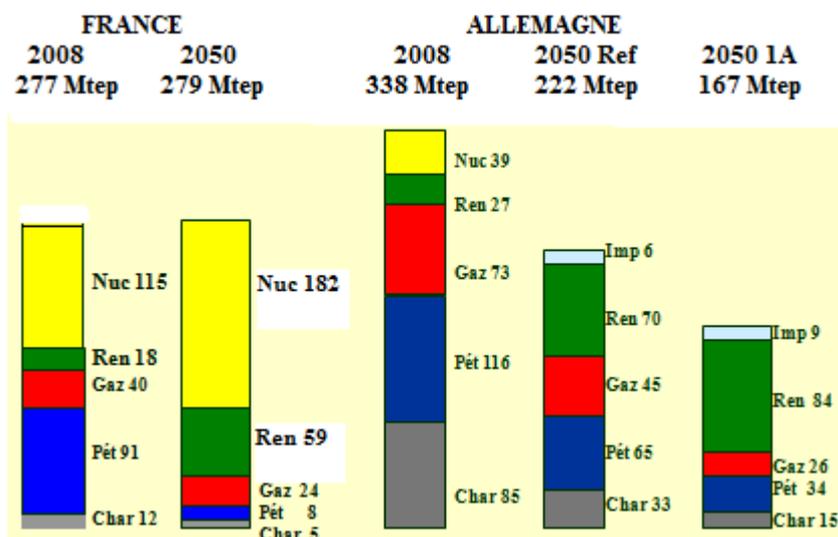


Figure 1 Bilan énergies primaires en Mtep

Bilan énergie finale à la consommation

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

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.2008 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	164 Mtep	125 Mtep	162 Mtep	149 Mtep

	2.6 tep/h	2.2 tep/h	1.7 tep/h	2.6 tep/h	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.

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 aurait été 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,	All.2050,	Fr 2008	Fr. 2050
--	------------------	-------------------	------------------	----------------	-----------------

		Ref	1A		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

Rejets de gaz carbonique

Remarque préliminaire:

Dans tous les scénarios allemands étudiés la séquestration de gaz carbonique (CSC pour Captage, Séquestration du Carbone) est mise en œuvre dès les années 2030. Pour le scénario 1A, le CSC recouvre en 2050 la quasi-totalité du charbon utilisé pour la production d'électricité (environ 30 TWh)². 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.

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.

² 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.

	All. 2008	All. 2050 Ref	All.2050 1A	FR 2008	Fr.2050 Négatep
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 de gaz carbonique

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 reprenant les calculs sur la base des facteurs d'émission utilisés pour Négatep³, nous trouvons des rejets nettement plus élevés que ceux donnés dans l'étude allemande, environ 200 millions de tonnes, au lieu de 138 ! Il n'y a pas unanimité sur les facteurs d'émission et d'autres valeurs plus basses que celles prises en enveloppe pour Négatep sont aussi utilisées, 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 évaluer fortement.⁴

Renouvelables

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)
- électricité : 22 Mtep (éolien, hydraulique, partie de biomasse, photovoltaïque)
- transports (biomasse : biocarburants) : 18 Mtep.

³ - 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.

⁴ . 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.

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

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

- en déplacements, biomasse : biocarburants : 15 Mtep

- en électricité 15 Mtep (175 TWh, voir détail ci-dessous)

	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 4 : Les renouvelables

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.

Electricité

C'est au niveau du vecteur 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.

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 tableau⁵. 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 945 TWh (nucléaire 700, 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 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.

	Al. 2008	Al. 2050, Ref	Al.2050, 1A	Fr. Négatep
Habitat et tertiaire	273 TWh	230 TWh	192 TWh	477 TWh
Industrie et alimentaire	234 TWh	222 TWh	144 TWh	320 TWh
Transports	17 TWh	44 TWh	65 TWh	93 TWh
Total	524 TWh	496 TWh	402 TWh	890 TWh

Tableau 5 Consommation d'électricité

⁵ 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)

	All. 2008	All. 2050, Ref	All.2050, 1A	Fr. Negatep
Nucléaire	149 TWh	0	0	700 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	945 TWh
Importations	- 22 TWh	67 TWh	102 TWh	
Total	609 TWh	544 TWh	440 TWh	945 TWh

Tableau 6 : La fourniture d'électricité (hors pompage)

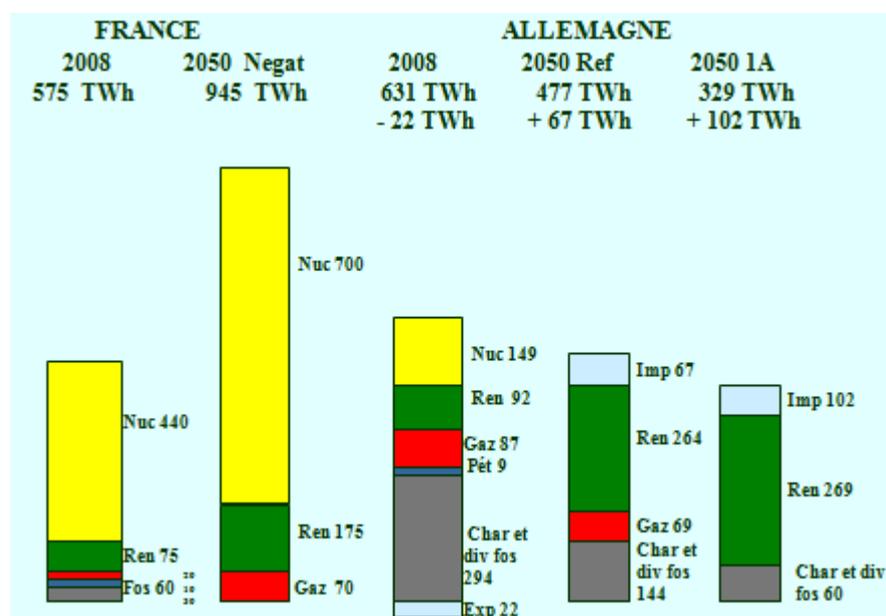


Figure 2 La fourniture d'électricité

Commentaires : intermittence des sources de production d'électricité et importations

Pour le scénario de référence la production d'une énergie électrique annuelle de 555 TWh correspond à une puissance moyenne de 63 GW. La réponse à des besoins, qui dépasseront de loin cette valeur moyenne à certains moments de l'année, repose sur une puissance totale installée de 179 GW. Cette puissance se répartit comme suit :

- 41.5 GW de gaz (pour 1 542 heures par an)
- 36.4 GW d'éoliennes terrestres (1 520 heures/an)
- 17 GW d'éoliennes offshore (4 000 heures par an)
- 39 GW de photovoltaïque (1 000 heures par an)
- 18.8 GW de charbon (pour 7 240 heures par an)
- 6 GW de biomasse (pour 6830 heures par an)
- 5.6 GW d'hydraulique hors pompage
- 7.7 GW de pompage (pour 1 100 heures par an)
- 7 GW de divers

Le photovoltaïque, de façon évidente, disparaît totalement selon les cycles solaires journaliers bien prévisibles, notamment le soir lorsque les besoins sont souvent au maximum. De son côté, la puissance de l'éolien peut retomber à quasiment zéro, rapidement au sein d'une journée de façon peu prévisible, et se maintenir à des valeurs très basses pendant de longues périodes anticycloniques. En garantie, ne seraient disponibles au maximum que 87 GW, soit 38 % de marge au dessus de la puissance moyenne, ce qui est peu. Il faut donc ajouter les possibilités de l'importation. L'importation représenterait une puissance moyenne de 7.6 GW, mais compte tenu des lignes prévues avec les voisins européens pour 2050, la puissance instantanée pourrait atteindre 20 GW. Globalement le bilan hors intermittents, devrait ainsi permettre de dépasser 107 GW et répondre à des pointes de consommation atteignant 70% au-delà de la puissance moyenne.

Pour le scénario 1A, la puissance moyenne serait de 50 GW. La puissance totale installée serait de 162 GW dont 100 d'intermittents non garantis. Il ne resterait en disponible garanti que 62 GW, soit une marge de 24 % au dessus de la moyenne. Il faut préciser que dans la présentation 20 GW de gaz sont maintenus en puissance installée, mais sans aucune fourniture. Il faut peut être lire ceci comme réserve ultime.

Il faudrait encore plus d'importation que dans le scénario de référence. Avec 20 GW possible d'importation, la puissance disponible garantie serait de 82 GW soit une réserve de 64 % au-dessus de la puissance moyenne.

Ce besoin d'électricité importé 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 GW d'électricité ⁶ installée

⁶ 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.

en Afrique du Nord et au Sahara 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 pour une puissance de 9 GW et 3 000 km de câbles entre la ville d'Adrar (désert saharien en Mauritanie et Aachen (Aix-la-Chapelle)).

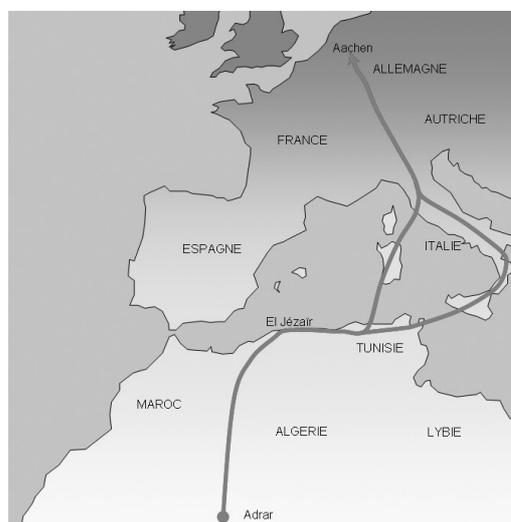


Figure 1 Le projet Adrar-Aachen

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. Il n'est pas nécessaire de compter sur l'importation pour répondre aux besoins fluctuants du réseau électrique.

Les coûts

Hors inflation de 2008 à 2050 dans le scénario 1A, les coûts varient comme suit

Pour l'industrie :

Fuel léger passe de 699 à 1 354 €/t (+ 1.6 % /an)

Gaz passe de 3.5 à 5.6 c€/kWh (+ 1.2 %/an)

Electricité passe de 9.6 à 10.6 c€/kWh (+0.2 %/an)

Pour le consommateur privé

Fuel domestique passe de 77 à 140 c€/l (+ 1.4 %/an)

Gaz passe de 7.1 à 9.6 c€/kWh (+ 0.7 %/an)

Essence passe de 1.4 à 2.1 €/l (+ 0.9 %/an)

Diesel passe de 1.34 à 2 €/l (+1%/an)

Electricité prix stable à 21.7 c €/kWh

Comme globalement le PIB aurait augmenté de 1.4, soit ramené par habitant à 1.54 (+ 1 %/an), la variation du coût de l'énergie serait insensible.

Toutefois, 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 corrigés par les facteurs de charge. Ceci repose sur des hypothèses de baisse progressive de ces coûts, ainsi qu'une amélioration du facteur de charge pour aboutir en 2050 à :

- Eolien terrestre : 950 €/kW (pour 1 500 en 2008) et 2 100 h/an (pour 1 700 en 2008), soit globalement une division par 1.9 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.

Récapitulatif : 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.

Récapitulatif : 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/an⁷, 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.

Il n'est pas question ici de faire une analyse comparative détaillée de ce scénario allemand 1A et du scénario Négatep. 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 importé. 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 ?

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 croissant à 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 %.

⁷ Il faut rappeler notre réserve sur le calcul des rejets de gaz carbonique, peut être sous-évalués de 20 à 30 %

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.