

Ambiguïtés et limites de la transition énergétique en Allemagne

Ambiguities and limits to the energy transition in Germany

Zusammenfassung: Unklarheiten und Grenzen der Energiewende in Deutschland

Michel Deshaies

Volume 14, Number 3, December 2014

Transition énergétique : contexte, enjeux et possibilités

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/1034935ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Université du Québec à Montréal
Éditions en environnement VertigO

ISSN

1492-8442 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Deshaies, M. (2014). Ambiguïtés et limites de la transition énergétique en Allemagne. *VertigO*, 14(3).

Article abstract

The energy transition is the basis of the German energy policy means a policy of reducing consumption and substitution of renewable energy to fossil fuels. Germany is one of the countries with the most highly developed renewable energy providing 25% of the total electricity production. However, as and when the share of renewables increases, many problems appear and amplify. Problems with the acceptability of increasingly large wind turbines have emerged with the massive development of wind energy. But the main limitations to the development of renewable energy come from a part of the location of production areas to the main consumption areas and secondly from their intermittent and unpredictable production which greatly complicates their integration into the electrical system. There is a significant imbalance between northern Germany where the largest wind generation capacity is located and Rhenish and South Germany, where electricity consumption is higher due to the concentration of population and industries. The need to compensate for fluctuations in power generation of renewables imposes a long time to have a fleet of power plants with a high-emitting of carbon dioxide. To increase continuously the production capacity of renewables, without having storage capacity through pump storage hydropower, can only lead to amplify these problems and can be solved only at European level.

Tous droits réservés © Université du Québec à Montréal et Éditions en environnement VertigO, 2014



This document is protected by copyright law. Use of the services of Érudit (including reproduction) is subject to its terms and conditions, which can be viewed online.

<https://apropos.erudit.org/en/users/policy-on-use/>

Michel Deshaies

Ambiguïtés et limites de la transition énergétique en Allemagne

Introduction

- 1 La transition énergétique (*Energiewende*) est devenue le mot d'ordre de la politique énergétique allemande et l'un des sujets les plus couramment évoqués en Allemagne, à tel point que certains ont pu y voir la Réforme du XXI^e siècle (Möller, 2013). L'expression désigne une politique destinée à réduire la consommation en améliorant l'efficacité énergétique et à substituer les énergies renouvelables aux énergies fossiles. L'Allemagne est en effet l'un des pays qui a le plus fortement développé les énergies renouvelables, grâce à une politique volontariste de soutien sous forme de tarifs d'achat. Cette politique a principalement favorisé l'accroissement de la production d'électricité à partir de sources d'énergies renouvelables qui fournissent actuellement près de 25 % de la production du pays. Cet essor doit permettre d'assurer la transition énergétique, avec pour objectif de se passer dès 2022, de l'utilisation du nucléaire, dont la sortie programmée a été confirmée après l'accident de Fukushima. Pourtant, au fur et à mesure que la part des énergies renouvelables augmente, un certain nombre de problèmes apparaissent et s'amplifient. L'essor des énergies renouvelables provoque des transformations du fonctionnement du système énergétique qui se traduisent par trois types de problèmes : l'intermittence des énergies renouvelables et la nécessité de la compenser, les déséquilibres géographiques croissants des productions d'électricité et la question de l'acceptabilité des nouvelles infrastructures nécessaires au nouveau système de production. Aussi, existe-t-il des interrogations concernant la possibilité de réussir la transition énergétique suivant le calendrier envisagé par le gouvernement, en particulier depuis la décision de tenir les délais de sortie du nucléaire.

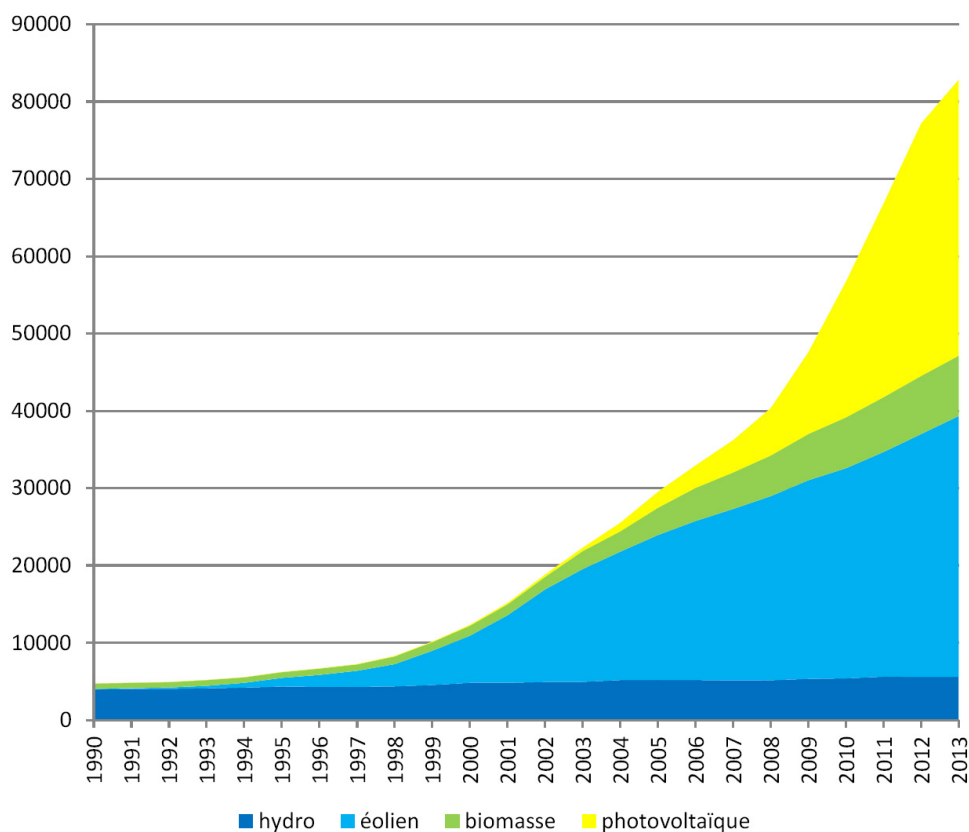
L'émergence et la mise en oeuvre de la transition énergétique

- 2 Évoquée dès les années 1980 (Krause et al., 1980), la transition énergétique est conçue dans le contexte allemand comme un tournant radical. À l'image du changement politique de 1989 qualifié de « *die Wende* », *Energiewende* a le sens de tournant énergétique. C'est pourquoi elle a d'abord été envisagée par les opposants au nucléaire comme le moyen de se passer de l'utilisation de l'atome (Bruns et al., 2009). En fait, aux yeux des promoteurs de la transition énergétique, il s'agit non seulement de réaliser un changement du système énergétique, mais aussi une transformation profonde de l'économie et de la société, comparable à celui provoqué par la révolution industrielle. Dans cette optique, l'objectif de la transition énergétique est de substituer aux structures de production centralisées et contrôlées par de grandes sociétés capitalistes, un système très décentralisé de petites structures de production qui, dans l'idéal, appartiendraient aux citoyens pouvant ainsi assurer leur autonomie énergétique. Ce renversement de situation conduirait à passer du système établi depuis la révolution industrielle de *l'energy for space* à celui de *l'energy from space* (Brücher, 2009), puisque la production d'énergie en quantités importantes à partir de sources renouvelables nécessite d'équiper de grandes surfaces en éoliennes ou en panneaux photovoltaïques.
- 3 Dès les années 1980 et 1990, on a vu se multiplier les mouvements de citoyens organisés autour de ce concept de transition énergétique. De nombreuses initiatives locales se sont ainsi développées afin de recourir davantage aux énergies renouvelables (solaire dans certaines villes, mais aussi éolien en Allemagne du Nord). On peut citer notamment la fondation de la Solar-Agentur de la région de Freiburg en Breisgau en 1993, ou celle d'Eurosolar qui dès 1994 propose un programme pour le développement du solaire au niveau communal. Parmi les expériences pionnières sur la voie de la transition énergétique, il faut mentionner l'île de Pellworm en Frise du Nord, sur laquelle est mise en place dès 1983 une centrale hybride (éolien

et solaire), ou l'initiative solaire de Lübow-Krassow en Mecklembourg-Poméranie occidentale (Bruns et al., 2009). Se fondant sur ces initiatives, un expert comme Hermann Scheer (1999, 2005) a expliqué dans ses ouvrages engagés qu'une économie fondée entièrement sur le solaire était possible et que les 500 milliards de kWh consommés en Allemagne chaque année pourraient être produits par environ 166 000 éoliennes ou par 5 000 km² de cellules photovoltaïques couvrant moins de 2 % de la superficie du pays (Brücher, 2009)!

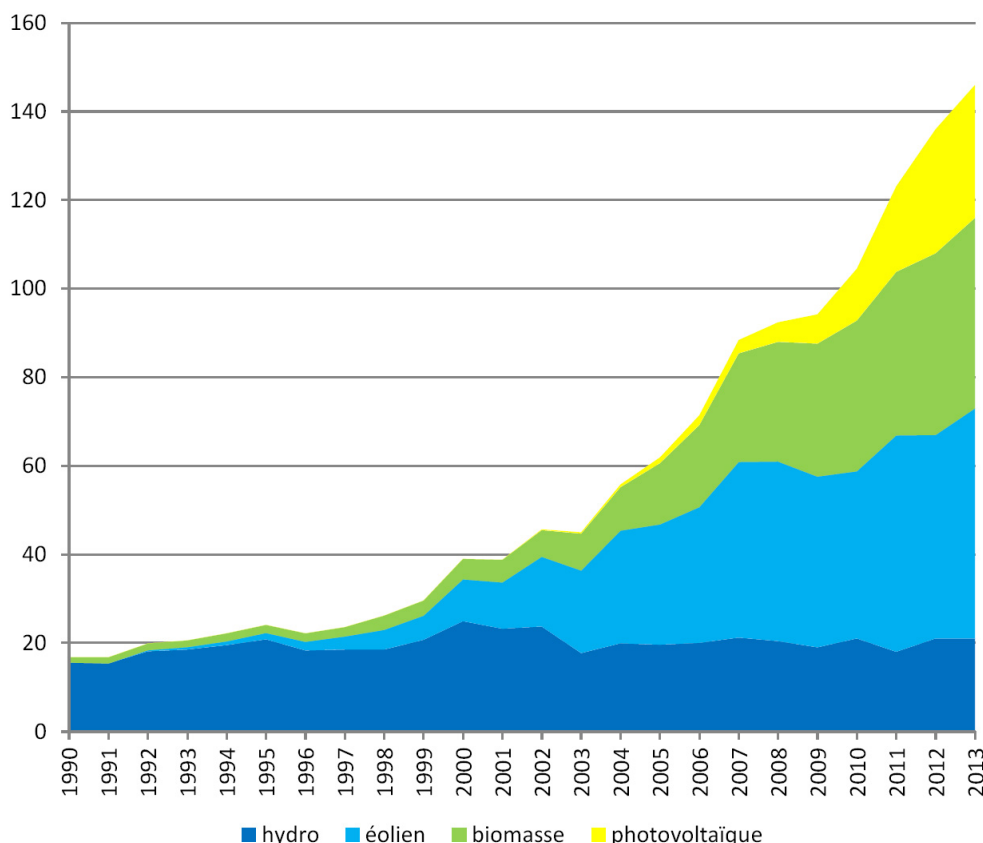
- 4 Cependant, la mise en œuvre de la transition énergétique n'a commencé à se concrétiser qu'avec l'arrivée au pouvoir de la coalition rouge-verte dirigée par Gerhard Schröder (1998-2005). À la suite de l'accord conclu en juin 2000 entre le gouvernement fédéral et les quatre principales entreprises de production d'électricité, la loi sur la cessation programmée de l'utilisation de l'énergie nucléaire (avril 2002), a constitué la décision la plus spectaculaire avec une sortie du nucléaire prévue à l'horizon 2021. Dans le même temps, il a été décidé de mettre en place une politique de soutien financier aux énergies renouvelables afin que celles-ci puissent à terme, prendre le relais du nucléaire, puis des autres énergies fossiles. C'est l'origine de la loi EEG (*Erneuerbaren Energien Gesetz*) du 1^{er} avril 2000 qui met en place un système de tarifs d'achat avantageux pendant 20 ans pour les producteurs d'énergies renouvelables, rendant l'investissement dans ce secteur particulièrement attractif (Bruns et al. 2009, 2010; Mautz et al., 2008).
- 5 Si avec près de 3000 MW en 1998 le pays possédait déjà la première puissance éolienne installée dans le monde, la loi de 2000 va accélérer l'essor. En quelques années, la capacité éolienne installée est multipliée par six pour dépasser 18 000 MW dès 2005. Les investissements dans les autres sources d'énergie renouvelables, aux technologies plus coûteuses comme le photovoltaïque, se développent également. Leur « décollage » est cependant un peu plus tardif, à partir de 2004 pour le photovoltaïque et les utilisations de la biomasse pour la production de courant électrique, notamment à la suite de la révision de la loi EEG. Doté d'un tarif d'achat très généreux de 50,62 centimes d'Euro en 2000, relevé à plus de 54 centimes d'Euro en 2004, le photovoltaïque a alors connu une explosion d'investissements, au moment où les progrès industriels permettaient d'abaisser le coût de fabrication des cellules (celui-ci a été divisé par deux entre 1996 et 2009, puis une nouvelle fois par deux après 2009 avec l'arrivée des panneaux chinois). Il s'est alors produit une explosion d'investissements dans le photovoltaïque dont la capacité a progressé à un rythme effréné, en particulier après 2008. Alors que la capacité photovoltaïque est d'environ 1100 MW en 2004, elle atteint 6500 MW en 2009 pour se hisser à 35 700 MW fin 2013, et dépasse désormais largement celle de l'éolien (figure 1).

Figure 1. Évolution des capacités installées de production d'électricité à partir de sources d'énergie renouvelable (en MW).



- 6 Cet emballement des investissements dans le photovoltaïque a amené le gouvernement fédéral à réviser ces tarifs à la baisse à plusieurs reprises. Mais, jusqu'en 2012, chaque annonce de baisse a déclenché une nouvelle ruée d'investissements pour profiter des dernières opportunités, notamment sous forme de grands parcs photovoltaïques aménagés sur des friches militaires ou industrielles (Deshaies, 2013). Seule la réduction drastique du tarif d'achat a permis de faire chuter de 55 % les nouvelles installations photovoltaïques en 2013 par rapport à 2012. De son côté, l'éolien a lui aussi continué sa progression pour atteindre 33 730 MW fin 2013. Au total, de 1995 à 2013, on a installé en Allemagne pour environ 78 GW de capacités nouvelles de production électrique à partir d'énergies renouvelables, à comparer avec les 63 GW du parc nucléaire français. Alors qu'en 1995, la capacité installée en renouvelables (essentiellement l'hydroélectricité) représentait à peine 5 % du parc de production allemand, en 2013 elle atteignait 44 % du total.
- 7 Grâce à cet effort d'accroissement des capacités installées, la production d'électricité à partir des énergies renouvelables a fortement augmenté, puisqu'elle a été multipliée par six, passant de 26 TWh en 1998 à 152 TWh en 2013 (figure 2). Alors qu'en 1998 les énergies renouvelables n'atteignaient pas 5 % de la production d'électricité, leur part s'est élevée à 25 % en 2013. L'Allemagne est même devenue le premier producteur européen d'électricité à partir de sources renouvelables et elle est l'un des seuls pays européens à pouvoir respecter les objectifs de part des énergies renouvelables fixés par la directive européenne de 2001.

Figure 2. Évolution de la production d'électricité à partir des différentes énergies renouvelables (en TWh : milliards de kWh).



- 8 La politique volontariste, initiée par le gouvernement Schröder, n'a pas été remise en cause par les différentes coalitions dirigées par la chancelière Angela Merkel. L'idée selon laquelle les énergies renouvelables doivent à terme, fournir l'essentiel de l'énergie consommée dans le pays et dans un premier temps, la majeure partie de l'électricité est restée au cœur de la politique énergétique allemande. Tout au plus a-t-on pu sentir une volonté d'inflexion du rythme de la transition énergétique et notamment de la sortie du nucléaire, avec la publication du concept énergétique (*Energiekonzept*) en septembre 2010 (Bundesregierung, 2010) qui dessine les grandes lignes et les objectifs de la politique énergétique allemande à l'horizon 2050. La nécessité de prolonger la durée d'activité des centrales nucléaires d'environ une douzaine d'années supplémentaires par rapport au terme prévu dans la loi de 2002 est alors affirmée.
- 9 Mais la catastrophe survenue le 11 mars 2011 sur les réacteurs de la centrale nucléaire de Fukushima au Japon, à la suite d'un tsunami, amène le gouvernement allemand à revenir en arrière pour confirmer la sortie du nucléaire en 2022. Dans l'immédiat, les sept réacteurs nucléaires les plus anciens sont fermés et le gouvernement modifie son *Energiekonzept* pour tenir compte de la nécessité d'accélérer la transition énergétique. La politique énergétique est révisée en conséquence par le « paquet énergétique » (*Energiepaket*) du 6 juin 2011 (BMU, 2013). L'une des conséquences de cette accélération de la transition énergétique est une élévation des objectifs à atteindre à l'horizon 2020 par les énergies renouvelables. La part de la production d'électricité fixée passe de 30 % en 2030 dans le document initial, à 35 % en 2020 selon le paquet énergétique de juin 2011. Ces objectifs très ambitieux doivent être atteints à travers un programme qui prévoit (BMWI, 2013a, 2013 b) :
- d'abaisser la consommation d'énergie primaire de 20 % et celle d'électricité de 10 % en 2020 grâce à l'augmentation de l'efficacité énergétique.
 - la construction des dix premiers parcs éoliens offshore, soutenue par des financements à hauteur de 5 milliards d'euros débloqués par le crédit pour la reconstruction (KfW).

L'objectif est de réaliser 25 GW de parcs éoliens offshore, principalement en mer du Nord.

- des modifications du code de l'urbanisme et une collaboration active entre l'État et les Länder afin de déterminer les nouvelles surfaces disponibles pour implanter des éoliennes terrestres en privilégiant le *Repowering*; c'est-à-dire le remplacement des éoliennes anciennes par de nouvelles plus puissantes.
- le réaménagement du réseau de transport d'électricité et la construction de nouvelles lignes haute tension, notamment entre le nord où vont se créer de grandes capacités de production éolienne et le sud du pays où se trouvent la plupart des réacteurs nucléaires qui seront fermés à l'horizon 2022.

10 Le gouvernement fédéral étant cependant conscient des limites possibles au développement des énergies renouvelables, notamment à l'horizon 2020, le paquet énergétique prévoit également de construire de nouvelles centrales à gaz et à charbon, avec l'objectif de créer, en plus des centrales déjà programmées, 10 GW de centrales de réserve pour compenser les fluctuations de la production des renouvelables. La construction de nouvelles capacités de stockage est prévue, mais sans aucune précision sur la forme qu'elles pourraient prendre.

11 L'accélération du rythme de la transition énergétique décidée par le gouvernement allemand, consiste d'abord à trouver le moyen de se passer du nucléaire, sans accroître la dépendance énergétique du pays et sans risquer d'interruption de l'alimentation du réseau. À plus long terme (c'est-à-dire après 2020), les autres énergies fossiles devraient à leur tour être progressivement remplacées par les énergies renouvelables. L'*Energiekonzept* de 2010 prévoit que les énergies renouvelables fournissent une part de 60 % de la consommation d'énergie primaire et de 80 % de la consommation d'électricité à l'horizon 2050. Cela suppose qu'entretiens ait été réalisée une réorganisation complète du système énergétique dont on perçoit pour le moment encore difficilement la forme qu'il pourrait prendre.

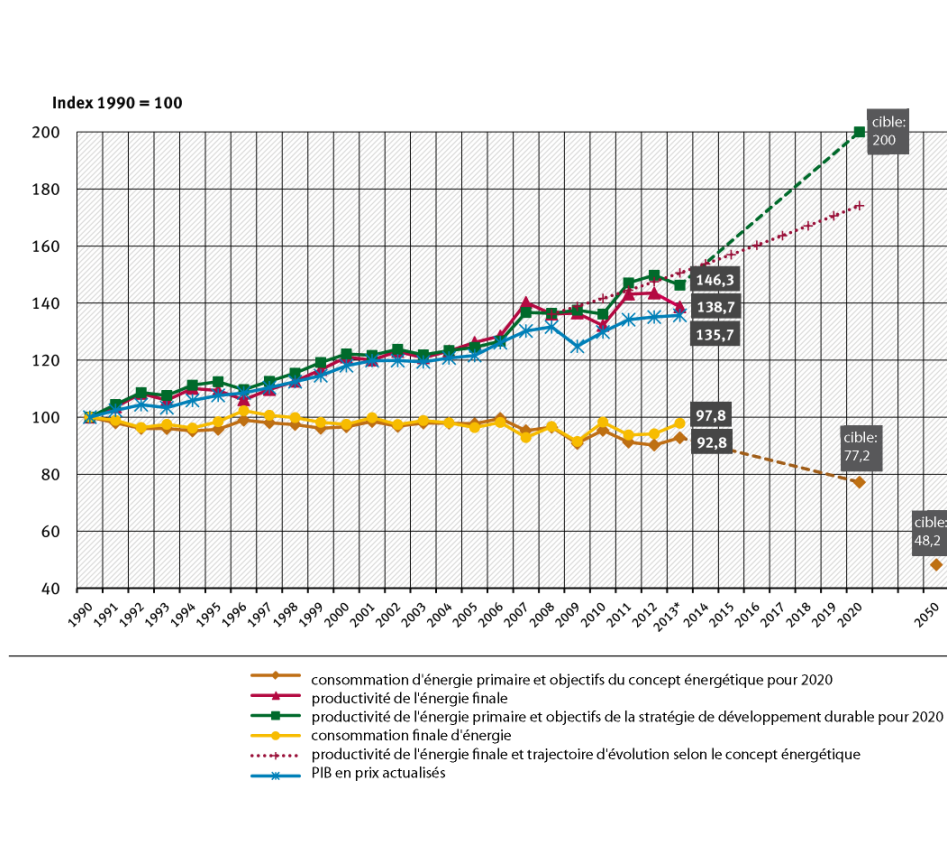
Limites et déséquilibres géographiques du développement des énergies renouvelables

12 Les progrès des énergies renouvelables en Allemagne semblent laisser augurer de la possibilité d'accomplir la transition énergétique en quelques décennies. Cependant, ces progrès si visibles dans les paysages, où les éoliennes comme les parcs photovoltaïques sont devenus particulièrement communs, dissimulent une réalité plus décevante. D'une part, c'est seulement dans le secteur de la production d'électricité que des progrès significatifs ont été accomplis. En ce qui concerne la production de chaleur ou les carburants utilisés dans les transports (qui ensemble représentent les deux tiers de la consommation d'énergie primaire), la part des énergies renouvelables est encore très faible, de l'ordre de 5 % pour les biocarburants, avec de toute évidence de grandes difficultés à exploiter suffisamment de surfaces agricoles pour pouvoir augmenter beaucoup cette production (Deshaies et Baudelle, 2013; Smil, 2010).

13 Ces progrès limités de la production d'énergie renouvelable rendent improbable la réalisation rapide d'une véritable transition énergétique, car dans le même temps, la consommation d'énergie primaire n'a que très peu diminué. En fait, malgré quelques fluctuations, elle est restée pratiquement constante de 1990 à 2006, avant de diminuer fortement lors de la crise économique de 2008/2009. Depuis lors, elle est repartie à la hausse; si bien qu'au total la consommation d'énergie primaire n'a baissé que de 7 % entre 1990 et 2013 (figure 3). Cette évolution conduit à relativiser les discours conduisant à espérer une forte baisse de la consommation d'énergie grâce à l'augmentation de l'efficacité énergétique. En effet, l'Allemagne a fait d'énormes progrès en termes d'efficacité énergétique, puisque la productivité de l'énergie primaire (autrement dit la valeur ajoutée que l'on peut produire avec une même quantité d'énergie) a augmenté de 46 % entre 1990 et 2013 (figure 3). Mais comme dans le même temps le P.I.B. a aussi progressé de presque 36 %, cette forte croissance de l'efficacité énergétique n'a eu que peu d'effets sur l'évolution de la consommation d'énergie. Cette évolution plutôt modeste sur une période de 23 ans est en tout cas en décalage considérable avec les ambitions affichées dans le concept énergétique de 2010 prévoyant d'abaisser la consommation d'énergie primaire à 77 % de son niveau de 1990 (figure 3). La

consommation d'énergie d'une économie dynamique apparaît ainsi très difficile à maîtriser. En Allemagne, si la consommation d'énergie des foyers a diminué de près de 6 % entre 2005 et 2013, ces gains ont été en partie compensés par une augmentation de 2 % de la consommation de l'industrie.

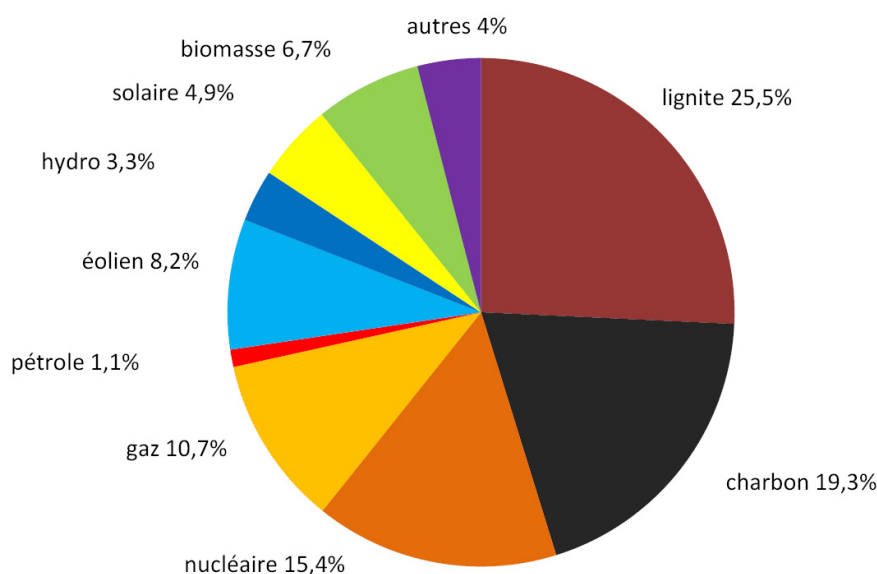
Figure 3. Évolution de la consommation d'énergie, du PIB, de la productivité de l'énergie en Allemagne de 1990 à 2013 et objectifs pour 2020.



Source : Schneider et al., 2014.

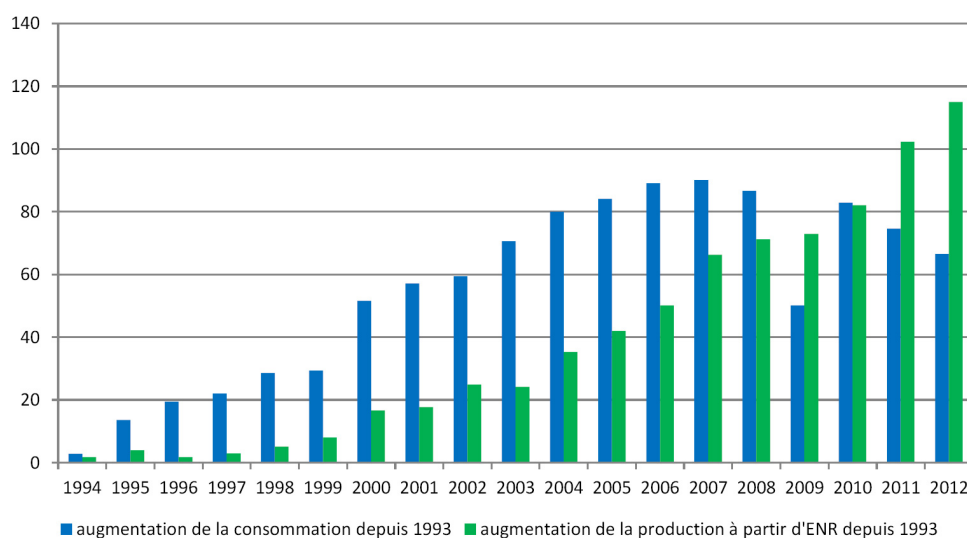
- 14 Même en ce qui concerne la production d'électricité, il apparaît d'ores et déjà un certain nombre de limites. Malgré la progression continue et rapide de la part des énergies renouvelables dans la production d'électricité, celles-ci n'ont pas détrôné les sources d'énergies fossiles traditionnelles qui restent très largement prédominantes (figure 4). Cette situation est due au faible facteur de charge des nouvelles énergies renouvelables, conséquence de l'intermittence du fonctionnement de ces systèmes énergétiques. Alors que les centrales nucléaires ou thermiques utilisées pour fournir le courant de charge de base peuvent fonctionner quasiment toute l'année (sauf période d'entretien), soit 8760 heures, il en va tout autrement avec les éoliennes dont la durée de fonctionnement à pleine puissance varie de 1500 à un peu plus de 2200 h suivant les sites; soit un facteur de charge de 17 à 25 %. Pour le photovoltaïque, la durée annuelle de fonctionnement varie de 900 à 1300 h, soit un facteur de charge de 10 à 15 %. Aussi, pour substituer au parc de centrales thermiques et nucléaires existant, les nouvelles énergies renouvelables, il faudrait, suivant les filières, construire au moins cinq à dix fois l'équivalent de leur capacité de production.

Figure 4. Part des différentes sources de production d'électricité en 2013 (production totale : 632 TWh (milliards de kWh)).



- 15 De plus, si la production d'électricité à partir des renouvelables a bien fortement augmenté de près de 82 TWh entre 1993 et 2010, dans le même temps, la consommation d'électricité a elle aussi progressé de plus de 15 %, soit 83 TWh. C'est pourquoi, en 2010, il a fallu produire avec des énergies fossiles la même quantité d'électricité qu'en 1993 (figure 5). Ce n'est qu'à partir de 2011 que l'on observe une progression des énergies renouvelables plus rapide que celle de la consommation qui a d'ailleurs baissé de 16 TWh de 2010 à 2012. Reste à savoir si cette évolution favorable est une tendance de fond durable; d'autant plus qu'une poursuite de la baisse de la consommation telle qu'elle est envisagée dans l'*Energiekonzept* de 2010 (d'environ 10 %) semble en contradiction avec l'idée avancée par ailleurs de développer à grande échelle les véhicules électriques.

Figure 5. Augmentation de la consommation d'électricité totale et de la production à partir de sources renouvelables de 1993 à 2012 (en TWh).



- 16 Il existe par ailleurs une dissymétrie marquée à l'intérieur de l'Allemagne, entre la répartition de la population et la localisation des principales capacités de production d'électricité à partir de sources d'énergies renouvelables. Alors que la moitié de la population allemande est concentrée dans les pays rhénans, l'essentiel de la capacité de production d'électricité à partir de renouvelables se trouve en Allemagne du Nord et de l'Est, du Schleswig-Holstein et de la

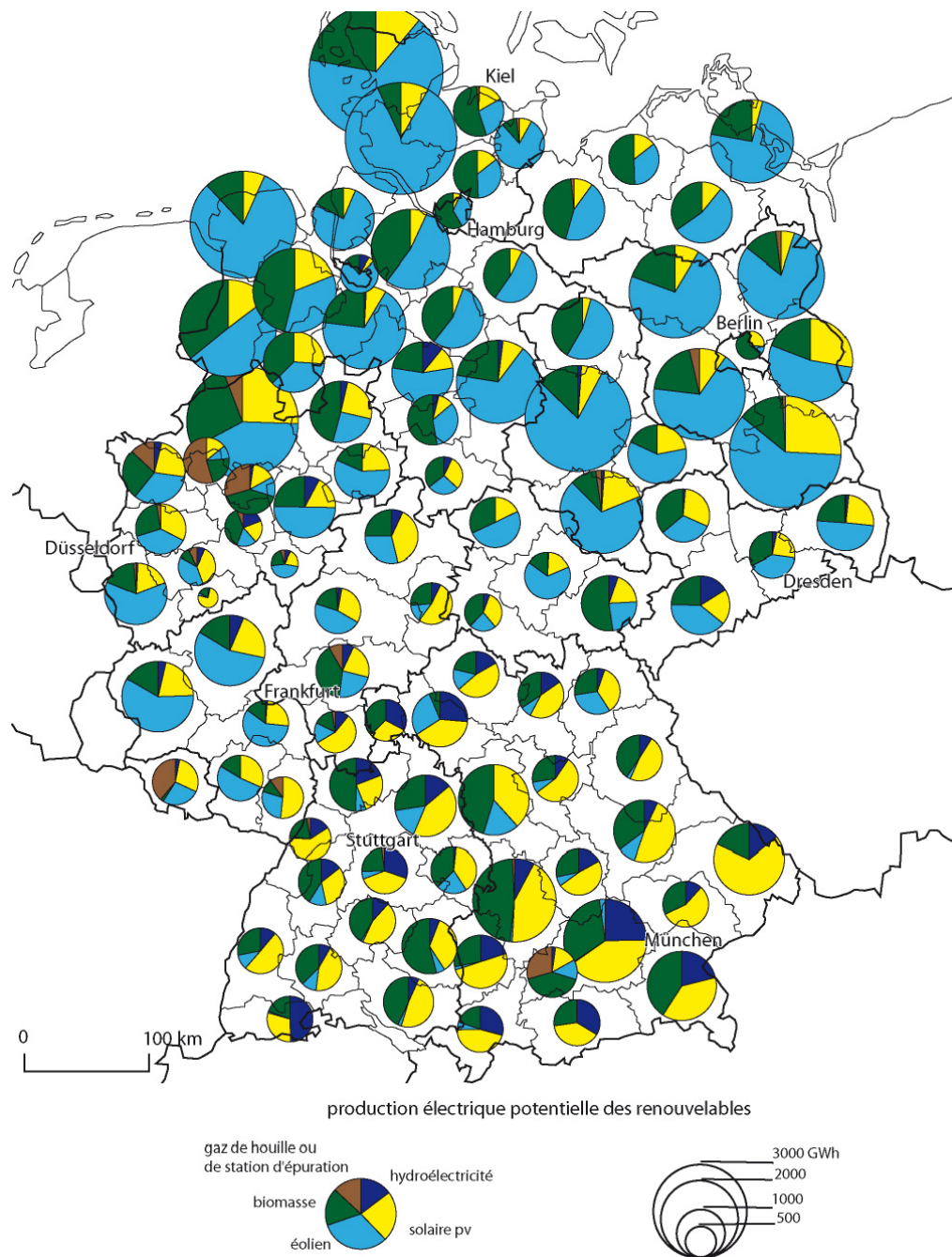
Basse-Saxe au Brandebourg et à la Saxe-Anhalt; c'est-à-dire à l'autre extrémité du pays. Dans les Länder de Mecklembourg-Poméranie antérieure, du Brandebourg, du Schleswig-Holstein et de Saxe-Anhalt, la part des énergies renouvelables dépasse 50 % de la consommation. Mais il s'agit aussi des Länder les moins densément peuplés, alors que dans les Länder urbains à fortes densités comme la Rhénanie-du-Nord-Westphalie, le Saarland, le Bade-Wurtemberg ou même la Saxe, les énergies renouvelables couvrent moins de 20 % de la consommation.

17 Cette situation est en fait le résultat d'un double déséquilibre : celui créé par l'évolution historique du peuplement allemand et celui provenant du potentiel de ressources renouvelables exploitables. Avec la révolution industrielle, les mouvements migratoires internes à l'Allemagne ont amené à une concentration croissante du peuplement sur les bassins miniers, principalement charbonniers, alors source d'énergie principale, ainsi que le long des axes de transports fluviaux qui, comme le Rhin et ses affluents, pouvaient permettre l'acheminement du charbon. Après la Seconde Guerre mondiale, les mouvements migratoires déclenchés par l'expulsion des minorités germaniques et la fuite des citoyens de la RDA ont encore renforcé cette concentration du peuplement dans le bassin du Rhin, ainsi que dans les régions voisines d'Allemagne du Sud (figure 7). Or, du fait de leurs caractéristiques physiques, ces régions d'Allemagne rhénane et méridionale ont un potentiel de production limité en ce qui concerne l'éolien. Par contre, les deux Länder du Sud (Bavière et Bade-Wurtemberg) l'emportent pour les potentiels hydraulique et photovoltaïque. Mais ceux-ci sont aussi plus limités et produisent en tout cas beaucoup moins que l'éolien qui à l'échelle nationale a fourni en 2013 plus d'électricité que l'ensemble de la production du photovoltaïque et de l'hydroélectricité.

18 Les plus gros potentiels locaux de production électrique à partir de renouvelables se situent au Schleswig-Holstein et en Brandebourg où plusieurs Kreis produisent plus que leur propre consommation d'électricité et pour certains (Nordfriesland, Dithmarschen, Prignitz, Uckermark) c'est même deux à trois fois plus. Dans ces Kreis, comme d'ailleurs dans toutes les régions d'Allemagne du Nord, l'éolien est largement prédominant avec plus des deux tiers et souvent même plus des trois quarts de la puissance installée (figure 6). À cela s'ajoute l'électricité produite à partir de biogaz qui occupe une place importante en Basse-Saxe et au Schleswig-Holstein. L'évolution depuis 2008 a été marquée par la forte progression du photovoltaïque, en particulier dans certaines régions des nouveaux Länder.

19 Le Brandebourg est ainsi devenu, devant la Bavière, le Land ayant la plus forte capacité photovoltaïque installée par habitant. Mais, il ne s'agit pas comme en Allemagne de l'Ouest, de photovoltaïque individuel sur toiture qui y est très peu développé. En Brandebourg, comme dans les autres nouveaux Länder (Mecklembourg-Poméranie antérieure et Saxe-Anhalt en particulier), l'accroissement du solaire au cours des dernières années est dû surtout à des investissements de développeurs privés dans de vastes parcs de cellules photovoltaïques implantés sur des friches militaires ou minières. Plusieurs anciens aérodromes ou camps d'entraînement de l'Armée Rouge, ainsi que des surfaces réhabilitées dans d'anciennes exploitations de lignite ont accueilli les plus grands parcs photovoltaïques d'Europe.

Figure 6. Capacités de production en électricité par les différentes sources d'énergie renouvelable dans les régions d'aménagement du territoire en 2010.



Source des données : <http://www.energymap.info/>

Note : en fonction des différences de capacité de charge des sources d'énergie, l'évaluation est basée sur les références suivantes : par kW de puissance installée, 950 kWh/an pour le photovoltaïque, 1700 kWh/an pour l'éolien, 3900 kWh/an pour l'hydroélectricité, 5700 kWh/an pour la biomasse, 3600 kWh/an pour le gaz de station d'épuration.

Figure 7. Régions urbaines et rurales en Allemagne.

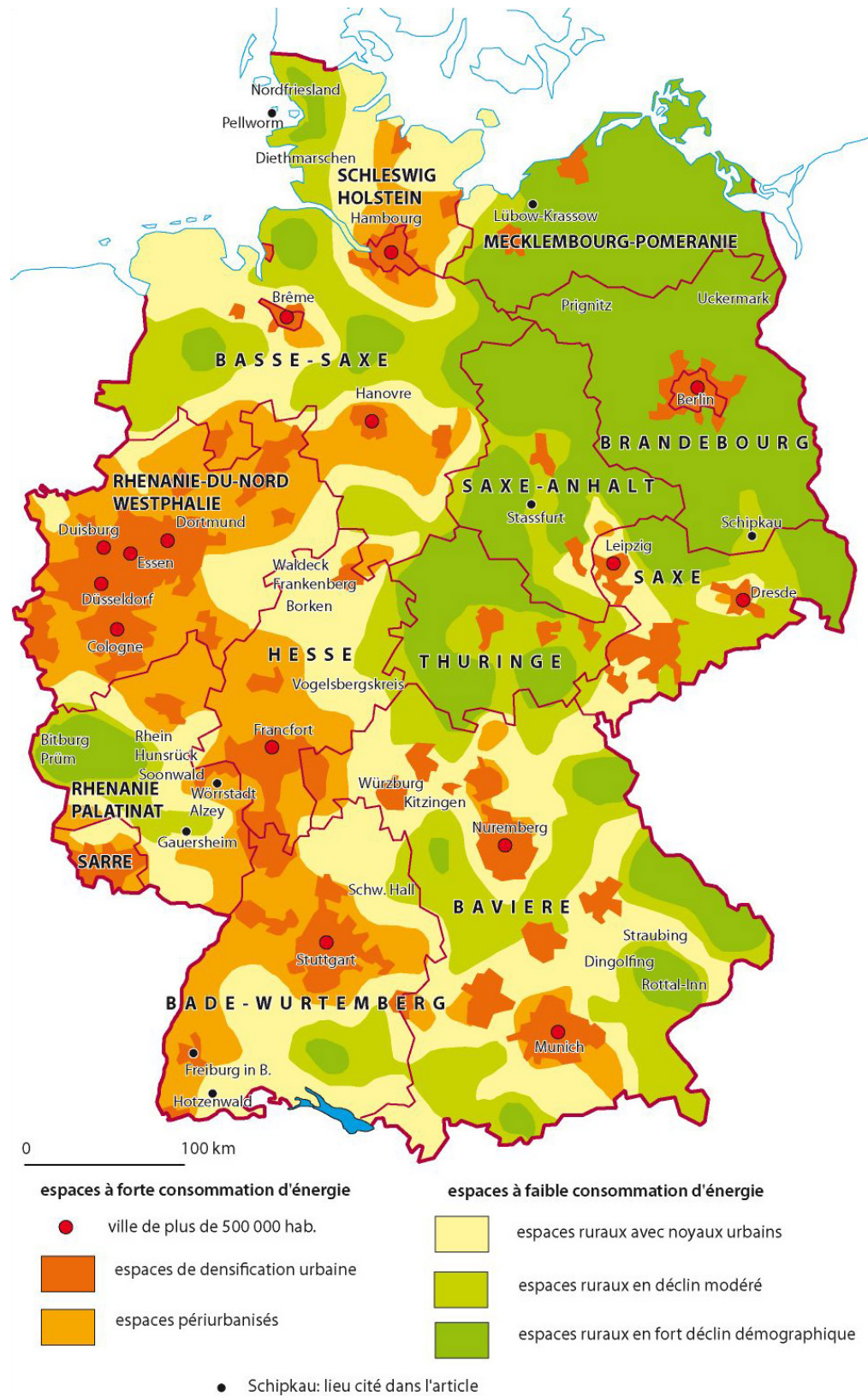


Figure 8. Parc solaire photovoltaïque de Straßkirchen, près de Straubing en Bavière.

Photo : Deshaies, 2014.

Note : Ce parc d'une puissance de 54 MWp couvrant une surface de 140 ha, a été installé en 2009 sur d'anciens champs cultivés.

- 20 À ce système de l'Allemagne du Nord s'oppose celui de l'Allemagne du Sud (Bavière et Bade-Wurtemberg) dominé en proportion variables suivant les régions, par la combinaison photovoltaïque-biomasse et hydroélectricité, alors que l'éolien ne représente qu'une très faible part (figure 6). La haute Bavière, sur le piémont des Alpes, est la région où le solaire photovoltaïque s'est le plus développé. Dans plusieurs Kreis (Rottal-Inn, Straubing, Dingolfing), le solaire de toiture et sous forme de parcs sur surfaces agricoles (figure 8) est tellement important qu'il produit une part essentielle de l'électricité renouvelable et avec l'appoint de l'hydroélectricité et de la biomasse, fournit plus de la moitié de la consommation d'électricité locale.
- 21 Le Bade-Wurtemberg et le nord de la Bavière se caractérisent par des capacités en renouvelables moins importantes qu'en haute Bavière, en raison notamment de l'absence d'hydroélectricité, sauf localement le long des cours du Rhin (en amont de Bâle et de Karlsruhe) et du Main (près de Würzburg). De ce fait, le solaire, principalement de toiture, représente entre la moitié et les deux tiers des capacités installées en renouvelables, le reste se partageant entre la biomasse et l'éolien, plus important qu'en haute Bavière. Dans la plupart des Kreis, la part d'électricité issue des renouvelables reste faible, largement inférieure à 20 %, mais certains Kreis avec à la fois de l'éolien, du photovoltaïque, de la biomasse et de l'hydroélectricité parviennent à atteindre un niveau beaucoup plus important, dépassant 40 % de la consommation locale de courant. C'est le cas par exemple des Kreis de Schwäbisch Hall, Würzburg, Kitzingen et du Main-Spessart (figure 6 et 7).
- 22 L'Allemagne moyenne, de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie à la Saxe, en passant par la Hesse et la Thuringe présente un profil relativement similaire, avec une capacité installée en renouvelables relativement faible par rapport à leur consommation. Dans toutes les régions, l'éolien prédomine largement (au moins les deux tiers du total), le reste étant constitué surtout par le solaire photovoltaïque avec un peu de biomasse (figure 6). L'hydroélectricité ne joue un rôle que le long de la vallée de la Moselle, ainsi que dans les montagnes de Thuringe et de Saxe. Néanmoins, un certain nombre de Kreis ruraux dépassent une part de 40 % d'énergies renouvelables. C'est le cas en particulier des Kreis ayant une forte capacité éolienne

(figure 6 et 7) : Alzey-Worms (42 % d'énergies renouvelables), Vogelsbergkreis (59 %), Rhein-Hunsrück (74 %), Bitburg-Prüm (102 %). Certains Kreis à moindre capacité éolienne atteignent également une part importante de renouvelables grâce à l'apport complémentaire de la biomasse et du photovoltaïque : Waldeck-Frankenberg (36 %), Borken (42 %). Mais dans les grandes régions urbaines de Francfort-Mayence et du Rhin inférieur, les énergies renouvelables ne représentent toujours qu'une faible part de la consommation électrique (moins de 10 %), malgré un fort développement du photovoltaïque de toiture.

23 Ce tour d'horizon de l'état du développement des énergies renouvelables à l'échelle locale fait apparaître une grande diversité de situations qui vient à la fois des sources d'énergie privilégiées, des formes de développement et des acteurs impliqués. Si de plus en plus de Kreis produisent une part majoritaire de leur consommation d'électricité avec des renouvelables, il s'agit toujours de régions rurales, assez peu densément peuplées comme les campagnes du Brandebourg, ou les polders de la Frise du Nord. Le solaire photovoltaïque ne joue un rôle prédominant que dans certaines régions d'Allemagne du Sud. Dans les autres régions, c'est l'éolien qui domine et qui fournit suffisamment d'électricité pour permettre d'atteindre, au moins en théorie, les objectifs de la transition énergétique. Par contre, dans les grandes régions urbaines, les énergies renouvelables ne représentent toujours qu'une faible part de la consommation électrique (moins de 10 %), malgré un fort développement du photovoltaïque de toiture. C'est en effet pour alimenter les grandes agglomérations que se pose l'un des défis principaux de la transition énergétique, celui de trouver des espaces disponibles suffisamment étendus pour collecter l'énergie nécessaire.

24 Aussi, la production décentralisée qui est associée aux énergies renouvelables dans l'imaginaire collectif (en Allemagne tout particulièrement), par opposition à la production centralisée que représente le système basé sur les énergies fossiles relève-t-elle largement du mythe. En réalité, les grands parcs éoliens ou photovoltaïques du Brandebourg, comme les vastes surfaces de cellules solaires des fermes de Bavière ou du Schleswig-Holstein servent à alimenter le réseau pour une consommation de courant électrique dans les villes situées à des centaines de kilomètres de distance et même dans les pays voisins de l'Allemagne. Dans ces conditions, la centrale à charbon ou à gaz de Rhénanie du Nord-Westphalie qui est mise en marche pour compenser les fluctuations des renouvelables, relève davantage de la production décentralisée. Or, avec la transition énergétique et la sortie du nucléaire à l'horizon 2022, ces déséquilibres entre la localisation des capacités de production et la consommation vont fortement s'accroître, nécessitant une profonde restructuration du réseau de transport d'électricité.

Les répercussions de la transition énergétique sur le fonctionnement du système de production électrique

25 L'objectif de sortie du nucléaire à l'horizon 2022 contraindra à remplacer les 100 TWh produits par les réacteurs encore en service en 2012; ce qui représente l'équivalent de toute l'augmentation de la production d'électricité à partir de sources renouvelables depuis 2000. La substitution intégrale des énergies renouvelables au nucléaire nécessiterait donc que l'on installe d'ici à 2022, une capacité de production nouvelle équivalente à celle qui a été construite en éolien, photovoltaïque et biomasse de 2000 à 2012, soit 60 GW. Selon le concept énergétique de 2010, il est prévu de créer près de la moitié (25 GW) de cette capacité nouvelle grâce à la construction de parcs éoliens off-shore (Bundesregierung, 2010; BMWI, 2013a, 2013 b).

26 Le reste devra être trouvé principalement par le *repowering* (le remplacement d'éoliennes anciennes par des éoliennes plus puissantes) des parcs éoliens terrestres et par la progression des capacités photovoltaïques et de production à partir de la biomasse. Le *repowering* qui est déjà très avancé sur les côtes de la mer du Nord et commence tout juste pour les parcs à l'intérieur des terres offre en effet un fort potentiel de développement, sans qu'il soit nécessaire de trouver de nouvelles surfaces pour installer des éoliennes. Selon le syndicat de l'énergie éolienne (BWE, 2012), il est possible de doubler la capacité éolienne installée terrestre, sans augmenter le nombre de machines. La nouvelle génération d'éoliennes dépasse couramment

les 2,5 à 3 MW, contre 1 à 1,5 MW au début des années 2000. La plus puissante éolienne terrestre, construite à Schipkau (figure 7) en Basse Lusace (Brandebourg), atteint même le record de 7 MW.

27 Une des conséquences de cette course à la puissance est que les nouvelles éoliennes atteignent aussi des dimensions particulièrement importantes, notamment à l'intérieur des terres où il faut construire en hauteur pour accéder à un potentiel suffisant. Alors que les éoliennes du début des années 2000 ne dépassaient pas une hauteur de 70 m à la nacelle, on installe actuellement des machines qui dépassent 100 m, voire même 130 m de hauteur pour une envergure des pales de 90 à 100 m. Ces nouvelles éoliennes ont un impact paysager sans précédent, comme on peut le constater dans la région de Wörrstadt (figure 9) ou dans la forêt du Soonwald (figure 10) en Rhénanie-Palatinat (figure 7). Il en résulte des mouvements d'opposition dénonçant l'impact paysager. Une initiative citoyenne constituée contre la construction d'éoliennes dans la forêt du Soonwald a ainsi reçu l'appui des associations de protection de la nature comme BUND et NABU. À l'occasion d'une conférence de presse commune intitulée « catastrophe pour le paysage » (http://www.naturpark-statt-windpark.de/PM_Katastrophe_fuer_die_Landschaft.pdf), organisée en septembre 2012, elles ont dénoncé l'absence de planification de l'éolien dans le Land de Rhénanie-Palatinat. Sans remettre en cause les objectifs du gouvernement du Land de multiplier par cinq la production d'électricité éolienne d'ici à 2020, elles ont demandé à ce que l'on tienne compte plus strictement de la protection des oiseaux et des chauves-souris et que les zones de protection de la nature (NATURA 2000), ainsi que les réserves de biosphère et les zones centrales des parcs naturels soient considérées comme des zones d'exclusion de l'éolien.

28 D'autres mouvements d'opposition à l'éolien se sont formés dans des parcs naturels où il est pourtant présent depuis longtemps comme par exemple le Vogelsberg dans le Land de Hesse. Bien que ce parc naturel ait été le berceau de l'éolien continental en Allemagne dans les années 1990, les nouveaux projets sont mis en cause par une initiative citoyenne (<http://www.gegenwind-vogelsberg.de>) en raison de la dimension des machines et de leur localisation dans la partie centrale du parc naturel. En fait, l'accélération de la transition énergétique depuis 2011 conduit de plus en plus certains Länder dirigés par des coalitions rouge-vertes à donner la priorité au développement de l'éolien, même dans des espaces considérés jusqu'à présent comme devant être préservés. C'est le cas par exemple en Rhénanie-Palatinat où le gouvernement a supprimé les mesures compensatoires prévues pour l'installation de nouveaux parcs éoliens dans des forêts. C'est aussi le cas en Bade-Wurtemberg où le gouvernement Vert arrivé au pouvoir en avril 2011 est décidé à développer fortement l'éolien avec un objectif de 10 % de la consommation d'électricité en 2020; ce qui implique l'installation de plus de 1100 nouvelles éoliennes d'ici à 2020. Le gouvernement du Land a ainsi supprimé les zones d'exclusion de l'éolien qui avaient été mises en place par le précédent gouvernement et couvraient l'essentiel de la superficie du Land. Le ministre de l'Environnement, Franz Untersteller, a annoncé dans une interview donnée à la Wirtschaftswoche en juillet 2012 qu'ils avaient l'intention de faire construire « des éoliennes dans les forêts » qui occupent le plus souvent les points hauts les plus venteux et depuis lors de nombreux projets sont en cours. Ce nouvel éolien surdimensionné et sans considération pour certaines zones naturelles protégées a généré de nombreux mouvements d'opposition dont l'initiative fédérale qui s'intitule *Vernunftkraft* (littéralement, « la force de la raison ») donne un aperçu sur son site internet très documenté : <http://www.vernunftkraft.de/>.

Figure 9. Parc éolien au-dessus de Gauersheim, près de Kirchheimbolanden en Rhénanie-Palatinat.



Photo : Deshaies, 2014.

Figure 10. Nouvelles éoliennes dans la forêt du Soonwald, près de Ellern en Rhénanie-Palatinat.



Photo : Deshaies, 2013.

- 29 Le développement du *repowering* et la construction des grands parcs éoliens en mer du Nord, vont en tout cas contribuer à amplifier le déséquilibre important qui existe déjà entre l'Allemagne du Nord où se trouve l'essentiel des capacités de production éolienne et l'Allemagne rhénane et du Sud où la consommation d'électricité est la plus importante. Or,

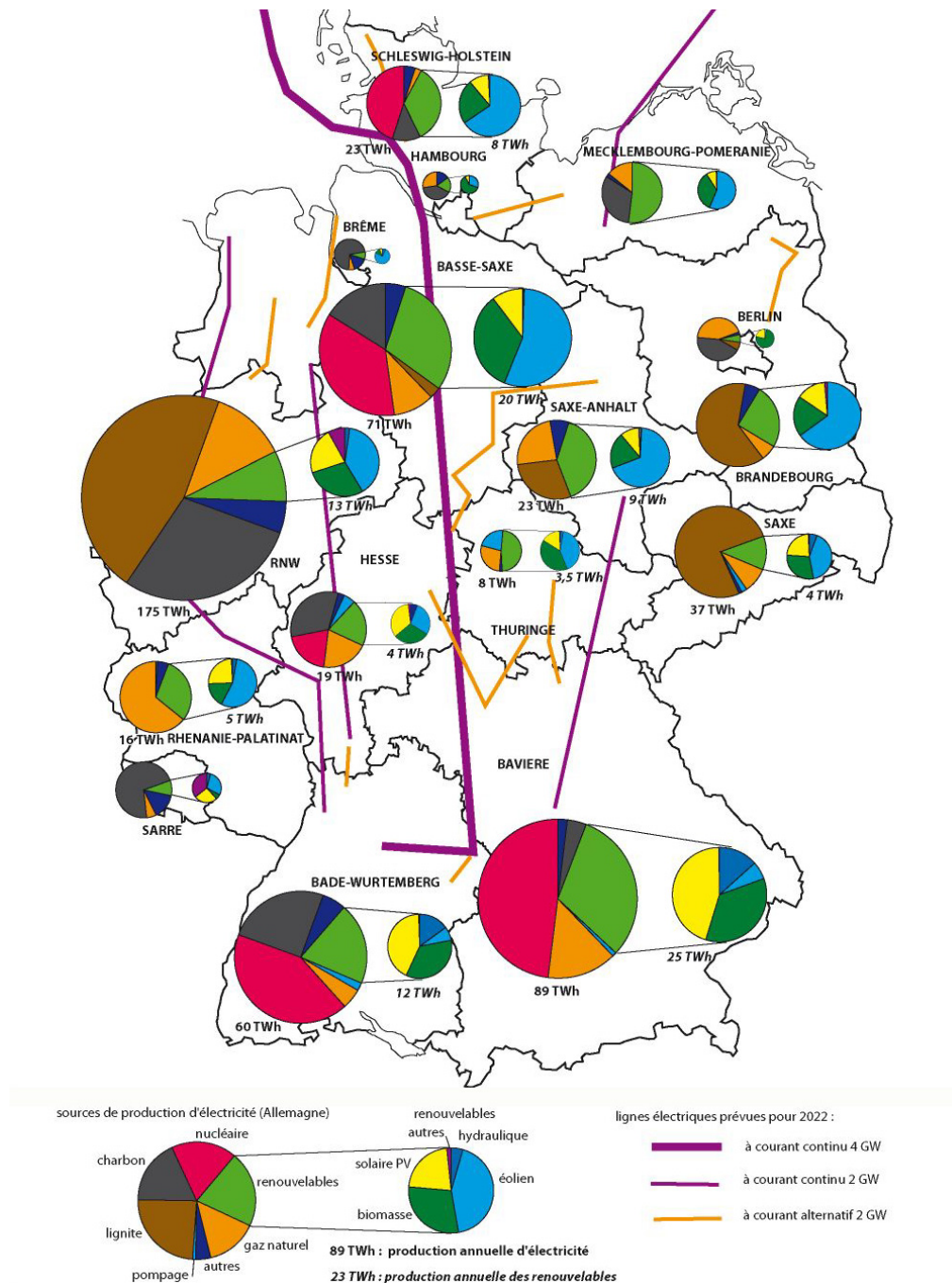
la fermeture des réacteurs nucléaires encore en fonctionnement va priver l'Allemagne du Sud d'une grande partie de sa production électrique qu'il faudra au moins partiellement compenser en assurant le transfert du courant produit en Allemagne du Nord par de nouvelles lignes à haute tension (figure 11). Suivant l'étude de l'agence de l'énergie allemande (DENA, 2010), ce sont plus de 3800 km de lignes à haute tension qu'il faut créer ou renforcer d'ici à 2022 afin de pouvoir intégrer les nouvelles capacités de production renouvelables dans le réseau et acheminer le courant vers les régions consommatrices, en l'occurrence les grands centres urbains du sud et des régions rhénanes. Outre les coûts de construction très élevés de ces nouvelles infrastructures, estimés à 32 milliards d'euros par les gestionnaires de réseaux, elles risquent aussi de générer des oppositions de la part des communes et des citoyens directement affectés par les tracés de ces lignes. Les premières procédures de consultation des populations menées au Schleswig-Holstein ont déjà fait apparaître de nombreuses contestations.

30 La construction de ces nouvelles lignes à haute tension ne résoudra cependant pas les problèmes résultant de l'intermittence de la production et surtout de son caractère relativement imprévisible. L'accroissement considérable des capacités a en effet pour conséquence d'amplifier les effets liés aux variations de production de ces sources d'énergie intermittentes. À partir du moment où leurs capacités ont dépassé celles d'une des trois principales sources de production fossiles (nucléaire, charbon et gaz naturel), cela signifie que sous certaines conditions météorologiques, elles peuvent par moment injecter sur le réseau autant, sinon plus de courant que l'une de ces sources. Mais en même temps, cette production et surtout ses variations à moyen comme à très court terme sont difficilement prévisibles, surtout pour l'éolien.

31 Ce sont moins les variations saisonnières entre l'hiver et l'été que les changements rapides d'une journée à l'autre et surtout au cours d'une même journée qui nécessitent une adaptation par le biais de la mise en marche, ou de la déconnection de capacités de réserve fossiles. Dans le cas du parc éolien allemand en 2012, la puissance moyenne a varié entre 21 919 MW pour la journée la plus venteuse de l'année (le 5 janvier) et seulement 287 MW pour le jour le plus calme (le 24 octobre). Par ailleurs, au cours d'une même journée, on a pu enregistrer des variations de puissance considérables en l'espace d'un quart d'heure, par exemple le 19 juillet, où entre 10 h 15 et 10 h 30, elle a augmenté de plus de 1100 MW. Ce jour-là, en quatre heures de temps, la puissance de production éolienne a même doublé, passant de 5000 à 10 000 MW (Fraunhofer, 2013). Or, ces variations de puissance sont exceptionnellement en phase avec les variations journalières de la consommation qui en hiver par exemple connaît une pointe en soirée vers 19 h; ce qui nécessite généralement la mise en marche de capacités hydrauliques ou thermiques de réserve.

32 Comme les variations considérables de la production des sources d'énergie intermittentes sont presque toujours en décalage avec celles de la consommation, il est nécessaire pour les gestionnaires de réseau d'effectuer en permanence des ajustements à partir de la production des centrales thermiques ou hydroélectriques. Étant donné l'importance que représentent d'ores et déjà les capacités éoliennes et photovoltaïques de l'Allemagne (un tiers du total de l'UE), les variations journalières de leur production ont des effets très sensibles, non seulement sur le système électrique du pays, mais aussi sur celui des pays voisins.

Figure 11. Les sources de production d'électricité par Land en 2011 et les nouvelles lignes de transport d'électricité en projet.



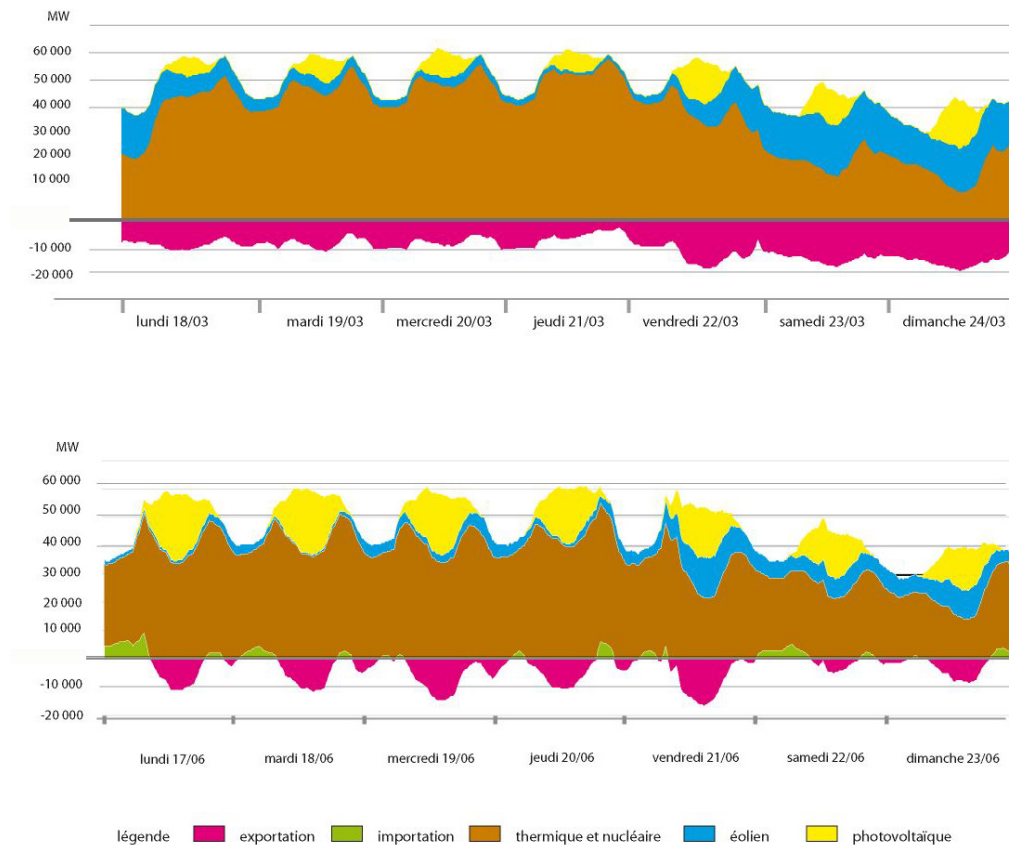
Source : modifiée d'après Bosch, 2013.

33

L'évolution de la production d'électricité au cours de deux semaines de l'année 2013 illustre la variabilité des différentes sources de production intermittentes pour l'alimentation du réseau (figure 12). La semaine du 18 au 24 mars qui est marquée par le prolongement d'une sévère vague de froid et donc par une des plus importantes consommations d'électricité de l'année se décompose en deux parties. Durant les jours d'activité du lundi au vendredi, les apports de l'éolien et du photovoltaïque sont relativement limités. La plupart des centrales d'appoint à charbon sont en fonctionnement, ainsi qu'une partie des centrales à gaz pour couvrir la consommation du pays et même fournir un volume continu d'exportation vers les pays voisins. À partir de la soirée du vendredi et durant tout le week-end, l'arrivée d'un temps venteux entraîne une montée en puissance rapide de la production éolienne, alors que la consommation est nettement plus faible. Malgré l'arrêt de la quasi-totalité des centrales à charbon, la production est largement excédentaire par rapport à la consommation intérieure

du pays et des volumes considérables (plus d'un tiers de la production) doivent être exportés vers les pays voisins. La demande d'électricité étant alors réduite en raison du week-end, le courant électrique est exporté à des prix très faibles, qui deviennent même « négatifs » durant la journée de dimanche; ce qui signifie que les gestionnaires de réseau doivent payer les clients étrangers pour que ceux-ci leur prennent le courant produit.

Figure 12. Évolution de la production des sources fossiles et renouvelables en Allemagne durant deux semaines de 2013.



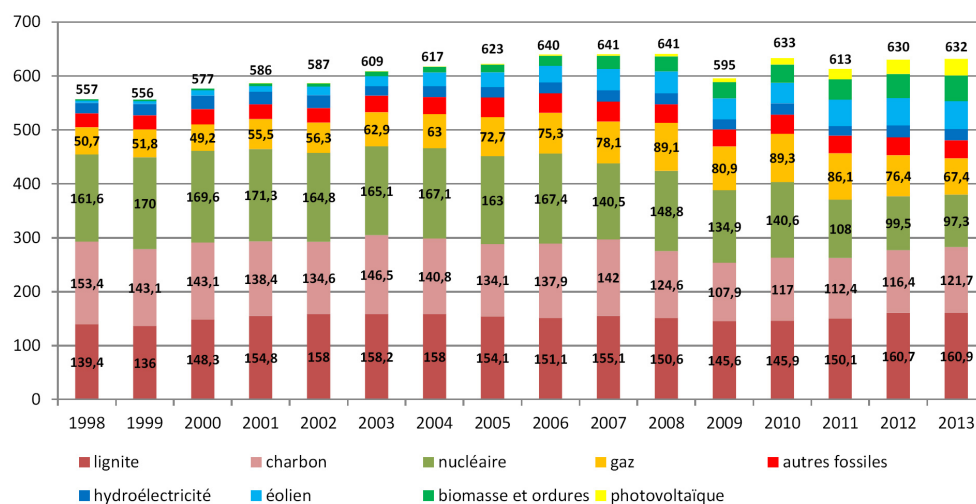
Source : Burger, 2014.

- 34 La semaine du 17 au 23 juin illustre une configuration classique de l'été, avec une importance particulière du photovoltaïque et relativement peu d'éolien. Du lundi au vendredi, les variations diurnes de la consommation sont couvertes par le photovoltaïque et l'ajustement de la production des centrales à charbon. La montée en puissance du photovoltaïque au milieu de la journée dégage un volume significatif d'exportation de courant vers les pays voisins, alors que durant la nuit, du courant est importé principalement de France et d'Autriche. Ce régime diurne d'alternance entre importation et exportation se prolonge durant le week-end. Mais, avec la forte diminution de la consommation, presque toutes les centrales à charbon et à gaz sont arrêtées et même une partie des centrales à lignite, tandis que durant la journée, le photovoltaïque et l'éolien, fournissent plus de la moitié de la production électrique et alimentent un courant d'exportation.
- 35 Ainsi, avec le puissant développement de l'éolien et du photovoltaïque au cours des dernières années en Allemagne, c'est le fonctionnement de l'ensemble du système de production d'électricité qui a été modifié. L'intermittence et les variations considérables de quantités d'électricité fournies par les nouvelles énergies renouvelables conduisent les compagnies électriques possédant les centrales thermiques à les connecter ou à les déconnecter beaucoup plus souvent que ce n'était le cas au début des années 2000. Il en résulte aussi des échanges accrus entre l'Allemagne et les pays voisins en fonction de la disponibilité des énergies renouvelables qui sont toujours prioritaires.
- 36 De ce fait, l'Allemagne qui était encore au début des années 2000 un importateur net d'électricité est devenue depuis 2003 un exportateur net, avec un solde en croissance presque

continue. Celui-ci a atteint un niveau record de 33 TWh en 2013. Cette situation s'explique par le fait que, sur des périodes de plus en plus fréquentes, les parcs éoliens et photovoltaïques produisent trop de courant électrique par rapport à la consommation intérieure. En raison de l'importance de cette production et de la situation géographique du pays, cette évolution a des répercussions sur les systèmes électriques des pays voisins, avec des échanges de volumes croissants d'électricité. La Bavière par exemple exporte à certains moments beaucoup de courant électrique vers l'Autriche et secondairement vers la République tchèque, lorsque les conditions météorologiques permettent à ses nombreux parcs photovoltaïques de produire à plein rendement. Cela diminue en conséquence les périodes pendant lesquelles l'Autriche peut faire fonctionner ses nombreuses centrales hydroélectriques (notamment celles à réservoir) qui restent néanmoins indispensables pour alimenter la Bavière en période de forte consommation et de faible ensoleillement. Ainsi, contrairement à l'idée répandue selon laquelle le développement de nouvelles énergies renouvelables favorise la production locale et décentralisée, des quantités croissantes de courant doivent être transportées à longue distance (Mignon, 2014).

37 Un autre effet de cet afflux des renouvelables sur le marché européen est qu'en dehors de l'effondrement des prix du courant à certains moments de surabondance de l'offre, il tend à réduire les durées d'utilisation des centrales thermiques de réserve. Ces centrales fonctionnant au charbon ou au gaz naturel risquent alors de ne plus être rentables, bien que toujours indispensables pour pallier aux fluctuations de la production des renouvelables. Se pose alors la question du financement de ces centrales qui apparaît déjà pour les centrales à gaz. Bien qu'étant les plus adaptées à jouer ce rôle de compensation, on constate depuis deux ans que les producteurs d'électricité renoncent désormais à se lancer dans ce type d'investissement et plusieurs centrales récemment construites ont même été mises en sommeil. Il est vrai qu'elles sont d'abord victimes de la concurrence des centrales à charbon favorisées par le bas prix de ce combustible importé des États-Unis. Mais le développement des renouvelables tend à accroître le problème. L'une des conséquences paradoxales de la transition énergétique est que depuis 2009 la production des centrales à lignite et à charbon est en progression constante, alors que celle des centrales à gaz a chuté (figure 13). En 2013, la production des centrales à lignite a même atteint un record, retrouvant un niveau jamais vu depuis 1992. En conséquence, les émissions de dioxyde de carbone dues à la production d'électricité ont-elles recommencé à progresser pour la première fois depuis la Réunification (Schneider et al., 2014).

Figure 13. Évolution des sources de production d'électricité en Allemagne en TWh (milliards de kWh).



Source : BDEW, 2014.

38 Aussi, pour réduire les problèmes liés à l'intermittence des productions éoliennes et photovoltaïques, il faudrait pouvoir utiliser leur production en période excédentaire pour remplir des réservoirs hydrauliques de station de pompage-turbinage ou d'autres systèmes de stockage indirect de l'énergie comme la production d'hydrogène. Avec la poursuite du

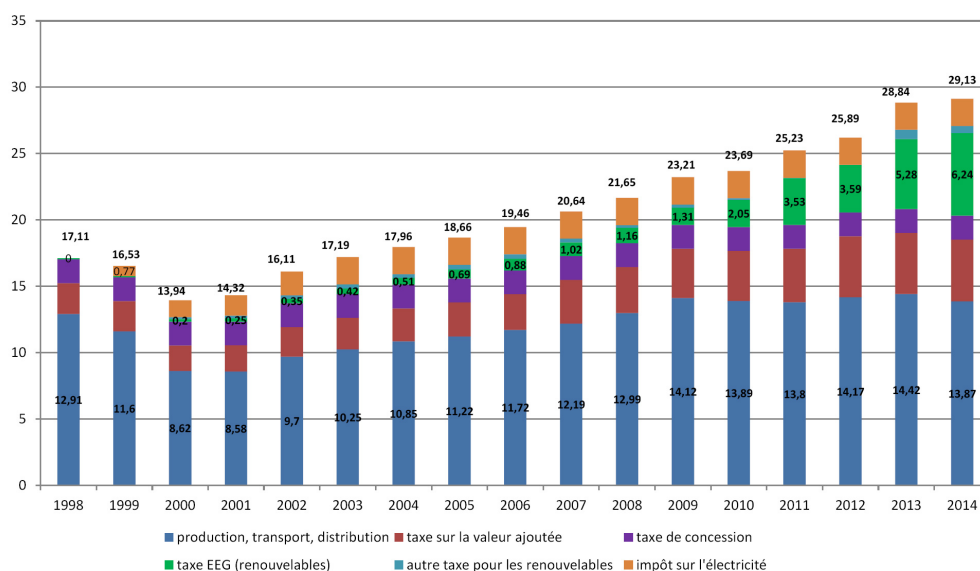
développement de ces énergies, ces dispositifs de stockage vont même devenir de plus en plus indispensables. Aussi, certains pays comme le Portugal ont-ils prévu de doubler leur capacité hydroélectrique en construisant de nouveaux réservoirs de stockage afin de poursuivre l'accroissement de leur parc éolien devenu l'un des plus importants d'Europe.

L'Allemagne qui ne dispose que de très faibles capacités de stockage hydroélectriques cherche à construire de nouveaux réservoirs dans ses montagnes à l'image de celui de Goldisthal dans la Forêt de Thuringe inauguré en 2003. Mais les nouveaux projets comme celui du Hotzenwald en Forêt-Noire sont controversés pour des raisons environnementales. Une autre solution en cours d'expérimentation est d'utiliser des cavités souterraines pour stocker de l'air comprimé en utilisant l'électricité produite par les énergies renouvelables. C'est le cas du système ADELE en voie de construction par un consortium d'entreprises (RWE, General Electric, Züblin ainsi que le DLR, l'agence spatiale allemande) dans le bassin salifère de Staßfurt en Saxe-Anhalt. L'air comprimé dans des cavités résultant de l'exploitation du sel doit être utilisé en période de forte consommation pour faire fonctionner des alternateurs et produire de l'électricité. Mais ces solutions expérimentales demanderont encore beaucoup d'années pour être au point et il ne semble pas possible de pouvoir trouver de grandes capacités de stockage.

Aussi est-il question d'utiliser les plus grosses capacités de stockage hydrauliques d'Europe qui sont situées en Norvège. En effet, avec les volumes de ses gigantesques réservoirs, la Norvège possède une capacité de production de 84 TWh, soit l'équivalent de l'ensemble de la production éolienne et photovoltaïque allemande en 2013. Mais pour cela, il faut construire une ligne électrique sous-marine entre la Norvège et l'Allemagne. Cette ligne de 1400 MW appelée Nord Link et qui sera construite d'ici à 2018 devrait permettre de transférer vers les centrales de pompage norvégiennes une partie du courant produit par les parcs éoliens off-shore de la mer du Nord. À l'inverse, lors des périodes de faible production éolienne, cette même ligne servira à transmettre vers le continent la production hydroélectrique des centrales norvégiennes.

De manière assez paradoxale, on voit que l'un des principaux problèmes créés par la politique de développement des énergies renouvelables en Allemagne est la gestion d'une surabondance de plus en plus fréquente de la production d'électricité. Mais comme cette surabondance est imprévisible et épisodique, elle nécessite de continuer à entretenir, à côté des systèmes de production des énergies renouvelables, un autre système de production d'électricité à partir de sources fossiles. Enfin, il faut créer un nouveau réseau de transport et un système de stockage de l'électricité dont le coût risque d'être considérable, si tant est qu'on puisse d'ailleurs le réaliser en ce qui concerne le stockage.

Figure 14. Évolution et composition du prix du kWh d'électricité pour un foyer de trois personnes en centimes d'Euros, consommant 3500 kWh par an.



Source : BDEW, 2014.

- 42 Le financement de ces systèmes paraît d'autant plus difficile à assurer que la création de gigantesques capacités de production d'énergie renouvelable a été très coûteuse et va l'être de plus en plus, puisque la loi EEG accorde aux producteurs un tarif d'achat garanti du courant pendant une durée de vingt ans. L'une des conséquences de ce financement des énergies renouvelables est l'envolée de la facture d'électricité pour les ménages allemands, puisqu'elle a doublé entre 2001 et 2013. Or, l'évolution des différentes composantes du prix de l'électricité montre que l'augmentation depuis 2009, est due pour l'essentiel aux taxes destinées à financer les énergies renouvelables, alors que durant cette même période le prix de revient à la production de l'électricité est resté stable. La presse (par exemple le Spiegel en octobre 2013) n'a d'ailleurs pas manqué de dénoncer cette évolution en faisant ressortir que le total des versements effectués par les consommateurs, en faveur des producteurs d'énergie renouvelable au titre de la loi EEG, était passé de 5 milliards d'euros en 2009 à plus de 25 milliards d'euros en 2013 (BDEW, 2014). Comme la grande industrie est exemptée de ces taxes et que tous les foyers, même les plus modestes doivent payer l'électricité au prix fort, de nombreuses voix ont souligné qu'il s'agissait d'une redistribution sociale du bas vers le haut, puisque les propriétaires de systèmes de production d'énergie renouvelable appartenaient généralement aux classes les plus favorisées (Wendt, 2014).
- 43 C'est pour répondre à cette critique concernant l'augmentation des prix du courant électrique que le nouveau gouvernement issu des élections de septembre 2013 et constitué par la grande coalition CDU/SPD a décidé de mettre en chantier une nouvelle réforme de la loi EEG. Cette réforme dont le projet a été déposé par le gouvernement en avril 2014, a été adopté par le Bundestag le 27 juin 2014 et est entré en vigueur le 1er août 2014, après avoir reçu le feu vert de la Commission européenne.
- 44 Dès le préambule, les auteurs de la réforme réaffirment la nécessité de l'*Energiewende* (le tournant énergétique) et confirment l'objectif d'atteindre à l'horizon 2050 une part d'au moins 80 % d'énergie renouvelable dans le mix de production de l'électricité. Des objectifs intermédiaires de 40 à 45 % en 2025 et de 55 à 60 % en 2035 sont également annoncés. Mais en même temps, le but de la réforme est de réduire, voire même de supprimer les inconvénients nés du développement accéléré des énergies renouvelables, à savoir la croissance non maîtrisée des capacités nouvelles installées et l'augmentation incontrôlée des versements en faveur des producteurs d'électricité utilisant ces sources d'énergie. En dehors d'un abaissement des tarifs d'achat, la loi prévoit d'encadrer strictement les nouvelles capacités à installer en photovoltaïque et en éolien. La loi met en place un « corridor » qui fixe à entre 2400 et 2600 MW/an les capacités maximales à installer d'une part en photovoltaïque et d'autre part en éolien. Les parcs photovoltaïques sont soumis à partir de 2015 à un système d'appel d'offres et ne peuvent plus bénéficier du tarif d'achat au-dessus d'une capacité de 10 MW. Malgré ces efforts pour essayer de maîtriser le développement futur des énergies renouvelables, il est à craindre que cela ne suffise pas à résoudre les nombreux problèmes créés par l'essor incontrôlé des dernières années.

Conclusion

- 45 Une politique très volontariste de soutien aux énergies renouvelables a permis à l'Allemagne d'augmenter rapidement leur part dans la production d'électricité qui dépasse désormais 20 %. Le pays semble ainsi en marche sur la voie de la transition énergétique que la sortie programmée du nucléaire en 2022 rend d'autant plus nécessaire. Pourtant, cet essor de la production des renouvelables n'a fait pratiquement que compenser l'augmentation de la consommation observée de 1993 à 2010. Mais surtout, une politique trop exclusivement orientée vers la création de nouvelles capacités de production renouvelables a laissé en suspens les problèmes liés au caractère intermittent et relativement imprévisible des énergies renouvelables avec des situations parfois paradoxales comme une offre excessive par rapport à la consommation à certains moments de l'année. La multiplication de ces situations fait peser une menace sur la rentabilité des centrales thermiques de réserve, pourtant nécessaires pour compenser les fluctuations de la production des renouvelables. En provoquant un développement forcé des énergies renouvelables par un système de tarifs démesurément

généreux, la loi EEG a à la fois provoqué une envolée des prix de l'électricité pour le consommateur et déséquilibré le marché; de telle sorte que le financement des très coûteuses infrastructures de production, de transport et de stockage nécessaires n'est pas assuré.

46 En fait, accroître sans cesse les capacités de production de renouvelables sans disposer de capacités de stockage indirect par le biais de réservoirs hydrauliques, ou d'autres systèmes à développer comme la production d'hydrogène ne peut conduire qu'à amplifier les problèmes déjà apparents, que même la reconfiguration du réseau électrique ne permettra pas de résoudre. À terme, se posera aussi la question de la concurrence entre les différentes énergies renouvelables et de la priorité à accorder ou non à l'éolien, au photovoltaïque ou à la biomasse. La réforme de la loi EEG en 2014 tente d'apporter une solution partielle à ce problème en encadrant plus strictement les nouvelles capacités d'énergies renouvelables à installer chaque année. Mais elle ne résout pas les problèmes liés à l'afflux de trop grandes quantités de courant issu des énergies renouvelables intermittentes.

47 Il est clair que ces problèmes ne peuvent être résolus à l'échelle de la seule Allemagne qui par exemple ne dispose pas de capacités de stockage hydraulique importantes et ne pourra pas en construire. L'utilisation des réservoirs hydrauliques norvégiens peut offrir une solution transitoire. Mais avec l'accroissement des capacités éoliennes suite au développement des parcs offshore en mer du Nord, le problème risque de beaucoup s'amplifier; d'autant plus que l'Allemagne n'est pas la seule à installer des parcs offshore. Le Royaume-Uni est également en train de construire de gigantesques parcs éoliens en mer du Nord et pour ce pays peu montagneux, le problème du stockage se posera dans les mêmes termes que pour l'Allemagne.

48 Il conviendrait donc de mieux coordonner à l'échelle européenne les politiques de développement des énergies renouvelables et de réfléchir aux infrastructures et aux réseaux à construire pour compenser les fluctuations des renouvelables, sans compromettre la sûreté de l'approvisionnement des consommateurs européens à des prix acceptables. Il faudra surtout développer des innovations pour trouver le moyen de stocker d'une manière ou d'une autre l'énergie, lorsque la production des sources renouvelables intermittentes est en excès par rapport à la consommation. Sans ces solutions innovantes, la transition énergétique ne pourra véritablement se faire.

Bibliographie

Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBSR), 2010, Genügend Raum für den Ausbau erneuerbarer Energien? *BBSR Berichte Kompakt*, [en ligne] URL: http://www.bbsr.bund.de/cln_016/nn_22710/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BerichteKompakt/2010/DL_13_2010.templateId=raw.property=publicationFile.pdf/DL_13_2010.pdf

Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW), 2014, Erneuerbare Energien und das EEG: Zahlen, Fakten, Grafiken (2014), 95 p. [en ligne] URL: [https://www.bdew.de/internet.nsf/id/83C963F43062D3B9C1257C89003153BF/\\$file/Energie-Info_Erneuerbare%20Energien%20und%20das%20EEG%20\(2014\)_24.02.2014_final_Journalisten.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/id/83C963F43062D3B9C1257C89003153BF/$file/Energie-Info_Erneuerbare%20Energien%20und%20das%20EEG%20(2014)_24.02.2014_final_Journalisten.pdf)

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), 2013, *Das Energiekonzept der Bundesregierung 2010 und die Energiewende 2011*, 5 p., [en ligne] URL : http://www.netzentwicklungsplan.de/system/files/documents/Bundesregierung_Energiekonzept_Auszug.pdf

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2013a, *Energie in Deutschland. Trends und Hintergründe zur Energieversorgung*, 67 p., [en ligne] : <http://www.bmwi.de/Dateien/Energieportal/PDF/energie-in-deutschland.property=pdf.bereich=bmwi2012,sprache=de.rwb=true.pdf>

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2013 b, *Energiewende in Deutschland auf Erfolgskurs. Maßnahmen für eine sichere, bezahlbare und umweltschonende Energieversorgung*, 28p., [en ligne] URL: <http://www.bmwi.de/DE/Mediathek/publikationen,did=573670.html>

Bosch S, 2013, Erneuerbare Energie für Deutschland, *Geographische Rundschau*, n° 1, p. 4-11.

Bundesregierung, 2010, *Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung*, 40 p., [en ligne]: http://www.bundesregierung.de/Content/DE/_Anlagen/2012/02/energiekonzept-final.pdf

- Brücher W., 2009, *Energiegeographie*, Gebrüder Bortraeger Verlagsbuchhandlung, Berlin, Stuttgart, 280 p.
- Bruns E., D. Ohlhorst, B. Wenzel, 2010, 60 p., 20 Jahre Förderung von Strom aus erneuerbaren Energien in Deutschland- eine Erfolgsgeschichte, *Renews Spezial*, Ausgabe 41, [en ligne]: http://www.unendlich-viel-energie.de/uploads/media/41_Renews_SpezialJahre_EE-Strom-Foerderung.pdf
- Bruns E., D. Ohlhorst, B. Wenzel, J. Köppel, 2009, Erneuerbare Energien in Deutschland. Eine Biographie des Innovationsgeschehens, Technische Universität Berlin, 554 p, [en ligne]: http://opus.kobv.de/tuberlin/volltexte/2010/2557/pdf/Erneuerbare_Energien_in_Deutschland_2009.pdf
- Bundesverbandes WindEnergie (BWE), 2012, Repowering von Windenergieanlagen, 20 p., [en ligne]: http://www.wind-energie.de/sites/default/files/download/publication/repowering-von-windenergieanlagen/repoweringbroschuere_2012_web.pdf
- Deutsche Energie-Agentur (DENA), 2010, *dena-Netzstudie II – Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015 – 2020 mit Ausblick 2025*, 20 p., [en ligne]: http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/Erneuerbare/Dokumente/Ergebniszusammenfassung_dena-Netzstudie.pdf
- Deshaies M., 2013, *Atlas de l'Allemagne*, 2è édition, Autrement, Paris, 96 p.
- Deshaies M. et G. Baudelle, 2013, *Ressources naturelles et peuplement*, Ellipses, Paris, 358 p.
- Frondel M., N. Ritter et C. Schmidt, 2011, Teure Grünstrom-Euphorie : Die Kosten der Energiewende, 18 p. [en ligne] : http://et-energie-online.de/Portals/0/PDF/zukunftsfragen_2011_12_komplett.pdf
- International Energy Agency (IEA), 2013, *Energiepolitik der IEA Länder, Deutschland Prüfung 2013*, [en ligne]: <http://www.iea.org/media/executivesummaries/GermanyExecSumDEUTSCH.pdf>
- Krause, Bossel et Müller-Reißmann, 1980, *Energiewende – Wachstum und Wohlstand ohne Erdöl und Uran*, S. Fischer Verlag.
- Mautz R. Byzio A. et W. Rosenbaum, 2008, *Auf dem Weg zur Energiewende : Die Entwicklung der Stromproduktion aus erneuerbaren Energien in Deutschland*, Universitätsverlag Göttingen, 174 p., [en ligne]: www.oapen.org/download?type=document&docid=353968
- Möller A., 2013, *Das Grüne Gewissen. Wenn die Natur zur Ersatzreligion wird*, Hanser Verlag, München, 261 p.
- Scheer H., 1999, *Solare Weltwirtschaft, Strategie für die ökologische Moderne*, Kunstmann, München, 340 p.
- Scheer H., 2005, *Energieautonomie, eine neue Politik für erneuerbare Energien*, Kunstmann, München, 315 p.
- Sinn H.-W., 2008, *Das grüne Paradoxon*, Econ Verlag, Berlin, 477 p.
- Smil V., 2010, *Energy transitions*, Praeger, 178 p.
- Schneider, J., J. Pabst, P. Icha, D. Drosihn, G. Kuhs, M. Dreher, M. Behrens, P. Gniffke, L. Köder, B. Bünger et D. Osiek, 2014, *Daten und Fakten zu Braun- und Steinkohlen, Status quo und Perspektiven*, Umwelt bundesamt, 40 p. [en ligne] : <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/daten-fakten-zu-braun-steinkohlen>
- Wendt A., 2014, *Der grüne Blackout*, edition blueprint, 167 p.

Pour citer cet article

Référence électronique

Michel Deshaies, « Ambiguïtés et limites de la transition énergétique en Allemagne », *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], Volume 14 Numéro 3 | Décembre 2014, mis en ligne le 28 décembre 2014, consulté le 12 mai 2015. URL : <http://vertigo.revues.org/15515> ; DOI : 10.4000/vertigo.15515

À propos de l'auteur

Michel Deshaies

Université de Lorraine, 23, boulevard Albert 1er, 54 015 Nancy Cédex, France, courriel : michel.deshaies@univ-lorraine.fr

Droits d'auteur

© Tous droits réservés

Résumés

La transition énergétique qui est la base de la politique énergétique allemande désigne une politique de réduction de la consommation et de substitution des énergies renouvelables aux énergies fossiles. L'Allemagne est un des pays ayant le plus fortement développé les énergies renouvelables qui fournissent 25 % de la production totale d'électricité. Toutefois, au fur et à mesure que la part des énergies renouvelables augmente, de nombreux problèmes apparaissent et s'amplifient. Le développement massif de l'éolien fait apparaître localement des problèmes liés à l'acceptabilité d'éoliennes de plus en plus grandes. Mais les principales limites au développement des énergies renouvelables viennent d'une part de la localisation des aires de production par rapport aux lieux principaux de consommation et d'autre part de leur caractère intermittent et imprévisible qui complique beaucoup leur insertion dans le système électrique. Il existe un déséquilibre important entre l'Allemagne du Nord où se trouvent les plus grandes capacités de production éolienne et l'Allemagne rhénane et du Sud où la consommation d'électricité est plus importante en raison de la concentration du peuplement et des industries. La nécessité de compenser les fluctuations de la production électrique des renouvelables impose de disposer longtemps encore d'un parc de centrales thermiques fortement émettrices de dioxyde de carbone. Accroître sans cesse les capacités de production des renouvelables intermittentes, sans disposer de capacités de stockage indirect par le biais de réservoirs hydrauliques, ne peut conduire qu'à amplifier ces problèmes qui ne peuvent être résolus qu'à l'échelle européenne.

Ambiguities and limits to the energy transition in Germany

The energy transition is the basis of the German energy policy means a policy of reducing consumption and substitution of renewable energy to fossil fuels. Germany is one of the countries with the most highly developed renewable energy providing 25% of the total electricity production. However, as and when the share of renewables increases, many problems appear and amplify. Problems with the acceptability of increasingly large wind turbines have emerged with the massive development of wind energy. But the main limitations to the development of renewable energy come from a part of the location of production areas to the main consumption areas and secondly from their intermittent and unpredictable production which greatly complicates their integration into the electrical system. There is a significant imbalance between northern Germany where the largest wind generation capacity is located and Rhenish and South Germany, where electricity consumption is higher due to the concentration of population and industries. The need to compensate for fluctuations in power generation of renewables imposes a long time to have a fleet of power plants with a high-emitting of carbon dioxide. To increase continuously the production capacity of renewables, without having storage capacity through pump storage hydropower, can only lead to amplify these problems and can be solved only at european level.

Zusammenfassung: Unklarheiten und Grenzen der Energiewende in Deutschland

Die Energiewende ist die Grundlage der deutschen Energiepolitik und bedeutet eine Politik der Reduzierung des Verbrauchs und der Substitution von erneuerbaren Energien zu fossilen Brennstoffen. Deutschland ist eines der Länder mit der am weitesten entwickelten erneuerbare Energien mit 25% der gesamten Stromproduktion. Doch wie und wann der Anteil erneuerbarer Energien steigt, erscheinen viele Probleme die sich verstärken. Der massive Ausbau der Windenergie lässt vor Ort immer größere Probleme mit der Akzeptanz von Windenergieanlagen erscheinen. Aber die wichtigsten Einschränkungen für die Entwicklung der erneuerbaren Energien stammen einerseits aus dem Standort der

Produktionsbereiche zu den wichtigsten Absatzgebieten und zweitens aus ihrer periodisch und unvorhersehbarer Produktion, die ihre Einbindung in das elektrische System erschwert. Es besteht ein erhebliches Ungleichgewicht zwischen Nord-Deutschland, wo die größte Winderzeugungskapazität konzentriert ist und rheinische und Süd-Deutschland, wo der Stromverbrauch höher ist aufgrund der Konzentration von Bevölkerung und Industrie. Die Notwendigkeit, um Schwankungen in der Stromerzeugung erneuerbarer Energien zu kompensieren auferlegt lange Zeit eine Flotte von thermischen Kraftwerken mit Hoch- Emissionen von Kohlendioxid. Die Produktionskapazität von erneuerbaren Energien kontinuierlich zu erhöhen, ohne Speicherkapazität, führt zu der Verstärkung dieser Probleme und kann lediglich auf europäischer Ebene gelöst werden.

Entrées d'index

Mots-clés : transition énergétique, énergie renouvelable, capacités installées, intermittence, capacités de stockage

Keywords : energy transition, renewable energy, installed capacity, intermittence, storage capacity

Schlagwortindex : Energiewende, erneuerbare Energie, installierte Leistung, Schwankungen der Produktion, Speicherkapazität