

Essor et limites des énergies renouvelables en Allemagne : la transition énergétique en question¹

Michel Deshaies

L'Allemagne est l'un des pays qui a développé le plus fortement les énergies renouvelables, grâce à une politique très volontariste de soutien sous forme de tarifs d'achat. L'essor des énergies renouvelables, qui fournissent d'ores et déjà environ 20% de la production d'électricité du pays, doit permettre d'assurer la transition énergétique avec pour objectif proclamé de se passer, à terme, des énergies fossiles comme le nucléaire, dont la sortie est programmée à l'horizon 2020. Pourtant, au fur et à mesure que la part des énergies renouvelables augmente, un certain nombre de problèmes apparaissent et s'amplifient, de telle sorte que l'objectif de la transition énergétique ne semble pas pouvoir être atteint avant longtemps, faute notamment de pouvoir suffisamment compenser l'intermittence des systèmes de production.

Pays précurseur du développement des énergies renouvelables, l'Allemagne a depuis une quinzaine d'années construit une des plus grosses capacités mondiales de production d'électricité à partir des nouvelles énergies que sont l'éolien, le photovoltaïque et l'utilisation de la biomasse. Cet essor, fondé sur une politique très volontariste de soutien financier, a permis d'accroître fortement la part des énergies renouvelables qui fournissent actuellement environ 20% de la production d'électricité. L'objectif à terme est de réaliser la transition énergétique (*Energiewende*) qui est devenue le mot d'ordre principal de la politique énergétique. L'Allemagne a en effet pour ambition, en l'espace de quelques décennies, de substituer les énergies renouvelables aux énergies fossiles encore actuellement largement prédominantes. Cet essor des énergies renouvelables apparaît d'autant plus

impératif que le pays s'est engagé dans la sortie du nucléaire à l'horizon 2020. Si l'Allemagne est d'ores et déjà le pays européen le plus en avance sur ses objectifs de développement des énergies renouvelables, il n'en reste pas moins que de nombreux problèmes assez complexes se posent au fur et à mesure que celles-ci prennent de l'importance. 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.

1. En route vers la transition énergétique

A) L'émergence de la transition énergétique

La transition énergétique est devenue le mot d'ordre de la politique énergétique allemande et l'un des sujets les plus couramment évoqués

1. Cet article s'appuie sur des recherches réalisées dans le cadre du programme ANR COLLENER.

en Allemagne, à tel point que certains ont pu y voir la Réforme du XXI^e siècle [Möller, 2013]. Apparue dans les années 1980 dans le titre d'un livre [Krause *et al.*, 1980], l'expression désigne une politique destinée à réduire la consommation en améliorant l'efficacité énergétique et à substituer les énergies renouvelables aux énergies fossiles, majoritairement utilisées depuis la révolution industrielle. Dans le contexte allemand, la transition énergétique, conçue comme un tournant radical (à l'image du changement politique de 1989 qualifié de « *die Wende* », *Energiewende* ayant plutôt le sens de tournant énergétique), a d'abord été envisagée, dès le début des années 1980, par les opposants au nucléaire comme le moyen de se passer de l'utilisation de l'atome [Bruns *et al.*, 2009]. Aussi a-t-on vu se multiplier, dès cette époque, les mouvements de citoyens organisés autour de ce concept de transition énergétique. De nombreuses initiatives locales se sont ainsi développées tout au long des années 1980 et 1990 afin de recourir davantage aux énergies renouvelables (solaire dans certaines villes, mais aussi éolien en Allemagne du Nord). Se fondant sur ces développements encourageants, 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 !

Toutefois, la mise en œuvre de la transition énergétique n'a commencé à se concrétiser dans la politique énergétique du pays qu'avec l'arrivée au pouvoir de la coalition rouge-verte dirigée par Gerhard Schröder (1998-2005). Faisant suite à 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 entrant en vigueur en 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].

Si la construction d'éoliennes était déjà fortement développée, principalement en Allemagne du Nord, puisqu'en 1998 le pays possédait la première puissance éolienne installée dans le monde avec près de 3 000 MW, c'est la loi de 2000 qui va donner l'impulsion décisive. En quelques années, la capacité éolienne installée est multipliée par 6 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 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. Celle-ci génère une explosion d'investissements dans le photovoltaïque dont la capacité progresse à un rythme effréné, en particulier après 2008. Alors que la capacité photovoltaïque dépasse les 1 100 MW en 2004, elle atteint déjà 6 100 MW en 2008 pour se hisser à plus de 30 000 MW fin 2012, où elle rejoint celle de l'éolien (tableau 1) !

Cette frénésie d'investissements dans le photovoltaïque, encouragée par les tarifs de rachat particulièrement avantageux, 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, notamment sous forme de grands parcs photovoltaïques aménagés sur des friches militaires ou industrielles (photo 1). De son côté, l'éolien a poursuivi une croissance plus « tranquille » à partir de 2006, à raison tout de même d'environ 1 800 MW supplémentaires installés chaque année. Au total, de 1995 à 2012, on a installé en Allemagne pour plus de 67 GW de capacités nouvelles de production électrique à partir d'énergies renouvelables, soit en puissance installée plus que le parc nucléaire français.

Tableau 1

Répartition des puissances photovoltaïques installées par Land de 2007 à 2012

Bundesland	2007 (MW)	2010 (MW)	2011 (MW)	2012 (MW)
Bade-Wurtemberg	590	2 741	3 581	4 286,3
Bavière	1 120	6 323	8 067	9 123,7
Berlin	7	32	46	65
Brandebourg	20	565	1 547	1 723,8
Brême	2	14	25	31,1
Hambourg	4	14	22	30,2
Hesse	149	897	1 207	1 590,7
Mecklembourg-Poméranie occid.	22	249	519	839,1
Basse-Saxe	172	1 511	2 285	2 959,4
Rhénanie du Nord-Westphalie	341	1 961	2 812	3 544,5
Rhénanie-Palatinat	131	867	1 175	1 458
Saarland	24	163	224	301,2
Saxe	51	527	888	1 094,2
Saxe-Anhalt	29	408	856	1 222,7
Schleswig-Holstein	63	674	953	1 225,4
Thuringe	34	298	520	817,6
Total	2 759	17 240	24 726	30 312,9

Alors qu'en 1995, la capacité installée en renouvelables (essentiellement l'hydroélectricité) représentait à peine 5% du parc de production allemand, en 2012 elle atteignait 50% du total.

Cet effort colossal d'accroissement des capacités installées a porté rapidement ses fruits en permettant d'accroître fortement la production d'électricité à partir des énergies

renouvelables. De 1998 à 2012, celle-ci a été multipliée par 5, passant de 26 TWh à 136 TWh (Figure 1). Alors qu'en 1998 les énergies renouvelables n'atteignaient pas 5% de la production d'électricité, leur part s'est élevée à 22% en 2012. L'Allemagne est même devenue le premier producteur européen d'électricité à partir de sources renouvelables et l'un des seuls

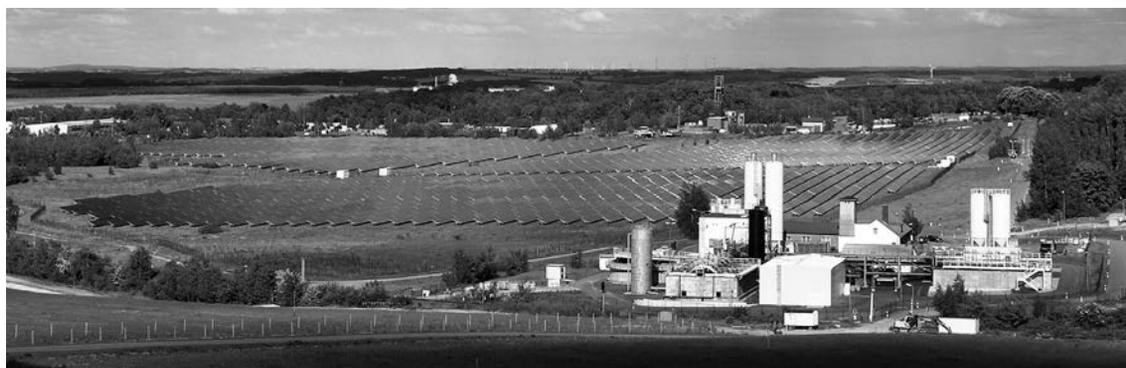


Photo 1. Parc photovoltaïque sur la friche d'une ancienne mine d'uranium à Ronneburg (Deshaies, 2013)

pays européens à avoir respecté les objectifs de part des énergies renouvelables fixés par la directive européenne de 2001.

B) La transition énergétique confirmée et accélérée

Cette politique volontariste, initiée par le gouvernement Schröder, a été poursuivie tout aussi fermement par la chancelière Angela Merkel, même après le changement de coalition de 2009. 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. Qualifiée d'énergie de transition, 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.

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 qui devient le mot d'ordre. 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 [BMW, 2013a, b) :

- D'abaisser la consommation d'énergie primaire de 20% et celle d'électricité de 10% en 2020 grâce à un effort particulier d'accroissement de l'efficacité énergétique.
- L'accélération de la construction des 10 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 affiché est de réaliser 25 GW de parcs

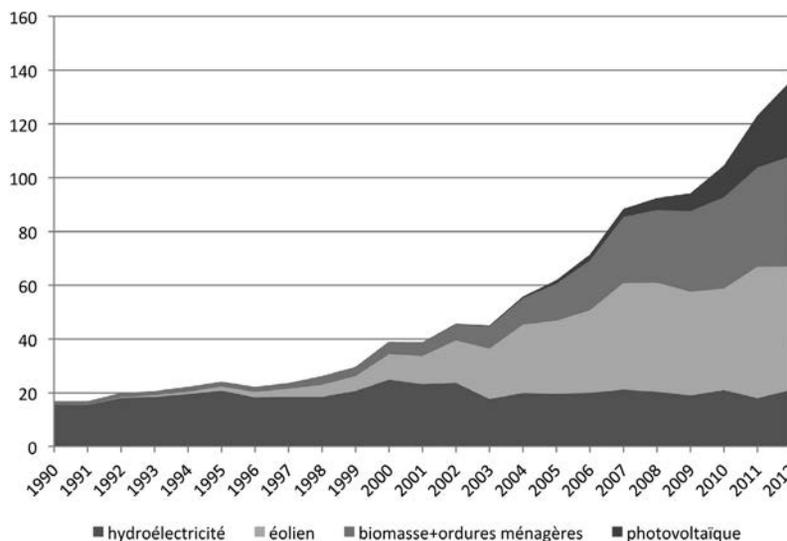


Figure 1. Évolution de la production d'électricité à partir des différentes énergies renouvelables (en TWh)

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. Il s'agit notamment de privilégier 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 productions éoliennes) et le sud du pays (où se trouvent la plupart des réacteurs nucléaires qui seront fermés à l'horizon 2022). Le gouvernement met aussi en place un cadre administratif et législatif (loi NABEG sur l'accélération de la construction du réseau électrique) pour lever rapidement tous les obstacles à la réalisation de ce nouveau réseau, tout en recommandant que l'acceptabilité des nouvelles lignes soit obtenue par une consultation des habitants concernés et avec leur participation à toutes les étapes du processus.

Par contre, s'il est prévu aussi d'accroître beaucoup l'utilisation de la biomasse, le concept énergétique ne fixe aucun objectif pour le photovoltaïque, alors en plein essor, et il est au contraire prévu de réduire fortement ses tarifs de rachat afin de limiter son développement. Dans le concept énergétique de 2010, il est noté que le photovoltaïque, qui fournit environ 9% de la production électrique des renouvelables, absorbe 40% des sommes consacrées au mécanisme de soutien aux renouvelables.

Le gouvernement fédéral étant conscient des limites possibles au développement des énergies renouvelables, notamment à l'horizon 2020, le paquet énergétique prévoit également de créer de nouvelles capacités de stockage, sans qu'il soit d'ailleurs précisé sous quelle forme. Mais l'élément le plus important est l'accélération des chantiers de construction des nouvelles centrales à gaz et à charbon, avec un objectif de créer en plus des centrales déjà programmées, 10 GW de centrales de réserve pour

compenser les fluctuations de la production des renouvelables.

Ainsi, si le gouvernement allemand s'est fixé pour objectif d'accélérer le rythme de la transition énergétique, il s'agit d'abord de 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), il est prévu de remplacer progressivement aussi les autres énergies fossiles par les énergies renouvelables, pour lesquelles l'*Energiekonzept* de 2010 prévoit 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.

2. Les formes locales de développement des énergies renouvelables

La mise en place d'un nouveau système de production à partir des sources d'énergie renouvelable devant se substituer à celui fondé sur l'utilisation des énergies fossiles est envisagée sous des formes très différentes. Il s'agit de remplacer un système constitué de centrales de production de grande puissance par un système beaucoup plus décentralisé et, qui plus est, à production intermittente. Les promoteurs les plus enthousiastes des énergies renouvelables voient d'ailleurs dans la transition énergétique l'instrument d'une sorte de révolution économique et sociale, où l'on pourrait passer d'un système très capitalistique, dominé par de grandes sociétés à une multitude de petits producteurs pouvant assurer leur propre approvisionnement 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.

A) Les régions à 100% d'énergies renouvelables

C'est dans cet esprit que de très nombreuses initiatives locales se sont développées, encouragées par la loi EEG de 2000 mettant en place les tarifs d'achat pour l'électricité produite à partir de sources renouvelables. En dehors de la possibilité de financement des panneaux photovoltaïques sur toitures, largement utilisés dans les *Länder* du sud (Bavière, Bade-Wurtemberg), la loi EEG a aussi favorisé le développement d'initiatives collectives ayant pour ambition d'atteindre, au moins en théorie, une autonomie énergétique reposant sur l'utilisation des énergies renouvelables disponibles localement. Dans différentes régions d'Allemagne, on a vu au cours des années 1980 et surtout 1990 se constituer des associations se donnant pour objectif de mettre en pratique la transition énergétique. 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 Lüb-kow-Krassow en Mecklembourg-Poméranie occidentale [Bruns *et al.*, 2009].

Tirant partie de ces multiples initiatives, le ministère de l'Environnement (BMU) a lancé en 2007 un programme de recherche visant à identifier les facteurs locaux de réussite de la transition énergétique et à diffuser ces résultats dans les régions. C'est l'origine du projet des Régions à 100% d'énergie renouvelable (100ee : <http://www.100-ee.de/>). Les régions en question, de taille très variable allant de la commune rurale isolée à un *Landkreis* ou à un ensemble de *Kreise* voire même une région urbaine comme le Rhin-Neckar (Mannheim-Heidelberg), se donnent pour objectif d'assurer, à plus ou moins long terme, l'ensemble de leur approvisionnement énergétique (électricité, chaleur et transport) à partir de sources renouvelables. Il s'agit d'un bilan quantitatif sur l'ensemble de l'année, dans la mesure où, en raison de l'in-

termittence des sources renouvelables, il reste nécessaire de recourir aux énergies fossiles à certains moments de la journée et de l'année.

Mais l'objectif n'est pas seulement quantitatif : il s'agit aussi de développer localement des comportements peu consommateurs d'énergie, afin d'améliorer l'efficacité énergétique et de tisser des réseaux d'acteurs publics et privés réunis autour de la mise en œuvre de la transition énergétique. L'idée est de créer une émulation entre les régions participant à ce projet dont le nombre augmente chaque année et qui échangent leurs expériences, notamment à l'occasion du congrès annuel se déroulant à Kassel, siège de l'institution pilote, l'IdE (Institut des technologies énergétiques décentralisées). En janvier 2013, elles étaient au nombre de 136, couvrant une superficie de 106 000 km², pour environ 21 millions d'habitants, le quart de la population allemande (Figure 2).

Si certaines régions partenaires du projet produisent déjà plus d'électricité à partir de sources renouvelables que leur consommation, la plupart d'entre elles sont encore loin de produire ne serait-ce que la moitié de leur consommation énergétique (tableau 2). Il est vrai que les défis à relever sont très inégaux entre les communes et régions à dominante rurale ayant beaucoup développé l'éolien, comme le littoral de la mer du Nord (*Nordfriesland*) ou les campagnes du Brandebourg (*Oberspreewald*) et les régions urbaines à forte densité des pays rhénans (*Speyer, Wetter an der Ruhr*). Aussi, quelle que soit la catégorie de région partenaire du projet, leur engagement et leurs progrès sont mesurés à la fois à l'aune de la part d'énergies renouvelables dans la consommation énergétique et à travers la qualité des réseaux d'acteurs constitués pour atteindre leurs objectifs.

Les seules régions qui parviennent à produire autant, ou même beaucoup plus, d'électricité qu'elles n'en consomment sont des régions rurales où le potentiel éolien important est fortement exploité, grâce à l'implantation de plusieurs dizaines d'aérogénérateurs. Il s'agit donc presque exclusivement de régions du littoral de la mer du Nord ou de régions de la plaine dans les nouveaux *Länder*, où de nombreuses éoliennes ont été implantées. Très récemment, quelques régions de plateaux ou

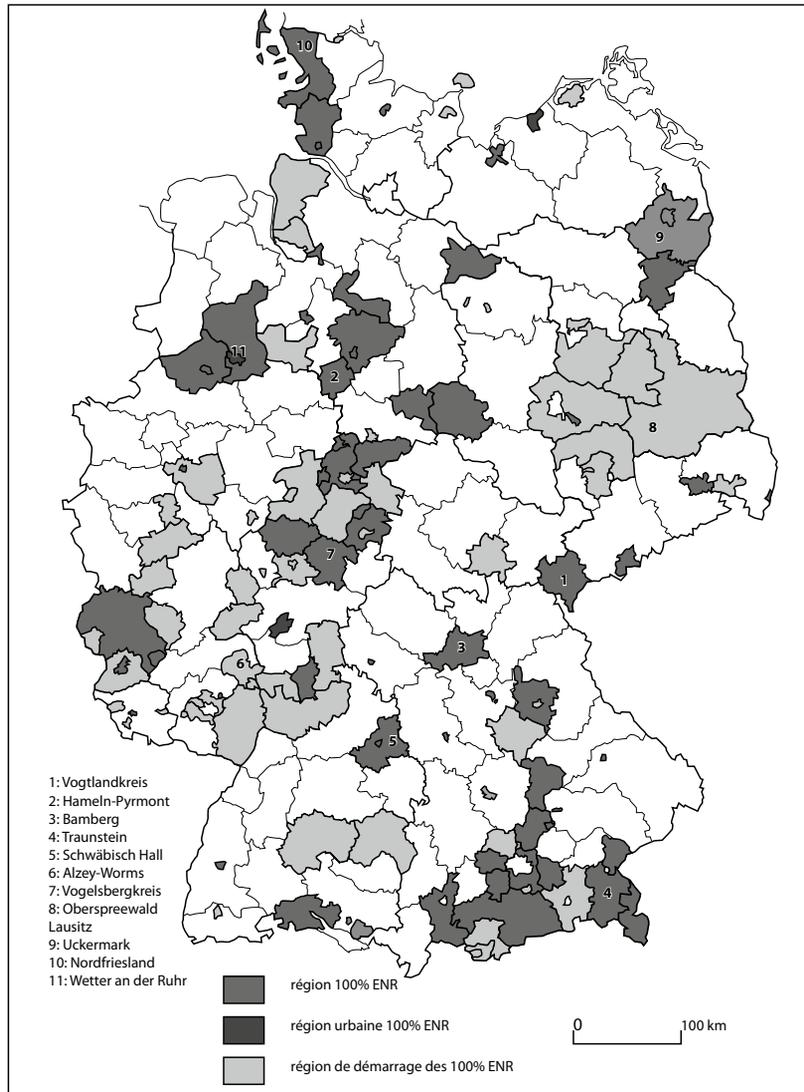


Figure 2. Les régions à 100% d'énergies renouvelables

(source : <http://www.100-ee.de/>)

de massifs montagneux du *Mittelgebirge* ont vu aussi un fort développement de l'éolien, ce qui devrait leur permettre à brève échéance de produire également plus d'électricité qu'elles n'en consomment. C'est le cas notamment dans le Vogelsberg et sur les plateaux du Hunsrück et de la Hesse Rhénane (région de Alzey-Worms) en Rhénanie-Palatinat qui ont vu se multiplier les éoliennes de grande puissance.

B) Des situations locales très contrastées

En fonction du mix d'énergies renouvelables utilisé et des modes de développement prédo-

minants, on peut distinguer différents profils régionaux que l'on peut identifier sur la carte de la Figure 3. La Haute Bavière est la région où le solaire photovoltaïque s'est le plus développé et vient s'ajouter aux importantes capacités hydroélectriques, ainsi qu'à la biomasse, alors que l'éolien y est presque inexistant. Dans plusieurs *Kreis* (Rottal-Inn, Straubing, Dingolfingen), le solaire de toiture et sous forme de parcs sur surfaces agricoles est tellement important qu'il produit une part essentielle de l'électricité renouvelable et, avec l'appoint de l'hydroélectricité et de la biomasse, parvient à

Tableau 2

Exemples de régions à 100% d'énergies renouvelables

(sources : <http://www.energymap.info/map.html> et <http://www.100-ee.de/index.php?id=100eemap>)

Région	Superficie (km ²)	Population (hab.) et consommation 2012 (MWh)	Objectifs	Situation 2012 (part de l'électricité avec ENR et parts des différentes sources)
Vogtlandkreis (Saxe)	1 412	265 820 (1 967 097)	Autarcie énergétique du <i>Vogtland</i> occidental en 2020, région modèle en Saxe pour les <i>Energy awards</i> européens	7% ENR dont 45% biogaz, 32% solaire, 18% éolien
Hameln-Pyrmont (Basse-Saxe)	796	161 063 (1 191 866)	100% de la consommation d'électricité du <i>Landkreis</i> avec ENR en 2012, plan climat	26% ENR dont 65% biogaz, 21% éolien, 10% solaire, 4% hydro
Bamberg (Bavière)	1 064	144 940 (1 072 600)	Alliance climatique de la ville et du <i>Landkreis</i> . 100% de la consommation d'électricité et de chaleur avec ENR en 2035	29% ENR dont 42% biogaz, 35% solaire, 14% éolien, 9% hydro
Traunstein (Bavière)	1 447	170 820 (1 264 000)	100% de la consommation d'électricité du <i>Landkreis</i> avec ENR en 2020	37% ENR dont 24% hydro, 42% biogaz, 32% solaire, 2% éolien
Schwäbisch Hall (Bade-Wurtemberg)	1 482	189 590 (1 402 966)	Engagement fort de nombreux citoyens pour atteindre 100% de la consommation d'électricité et de chaleur avec ENR	40% ENR dont 47% biogaz, 40% solaire, 9% éolien
Alzey-Worms (Rhénanie-Palatinat)	593	126 500 (936 000)	100% de la consommation d'électricité du <i>Landkreis</i> avec ENR en 2020	42% ENR dont 85% éolien, 14% solaire
Vogelsbergkreis (Hesse)	1 461	109 450 (809 940)	100% de la consommation d'électricité avec ENR en 2020, développement du biogaz	59% EEG dont 66% éolien, 20% biogaz, 13% solaire
Oberspreewald-Lausitz (Brandebourg)	1 219	129 850 (960 890)	Expérimenter différentes solutions d'approvisionnement énergétique décentralisées	83% ENR dont 58% éolien, 28% solaire, 13% biogaz
Uckermark (Mecklembourg-Poméranie)	3 057	132 602 (981 254)	Réalisation d'une centrale hybride pour fabriquer de l'hydrogène avec l'énergie éolienne en excès	193% ENR dont 89% éolien, 8% biogaz, 3% solaire
Nordfriesland (Schleswig-Holstein)	2 052	167 280 (1 237 864)	Husum, capitale mondiale de l'éolien ; développement économique basé sur l'éolien	246% ENR dont 77% éolien, 15% biogaz, 8% solaire
Wetter an der Ruhr (Rhénanie du Nord-Westphalie)	31	29 220 (216 235)	Atteindre 100 % ENR + plan climatique en cours de conception	1% ENR dont 56% solaire et 44% éolien
Speyer (Rhénanie-Palatinat)	43	50 420 (373 167)	100% de la consommation d'électricité de la ville avec ENR en 2030 et 100% du chauffage en 2040	2% ENR avec solaire

fournir plus de la moitié de la consommation d'électricité locale.

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 de la moitié aux 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

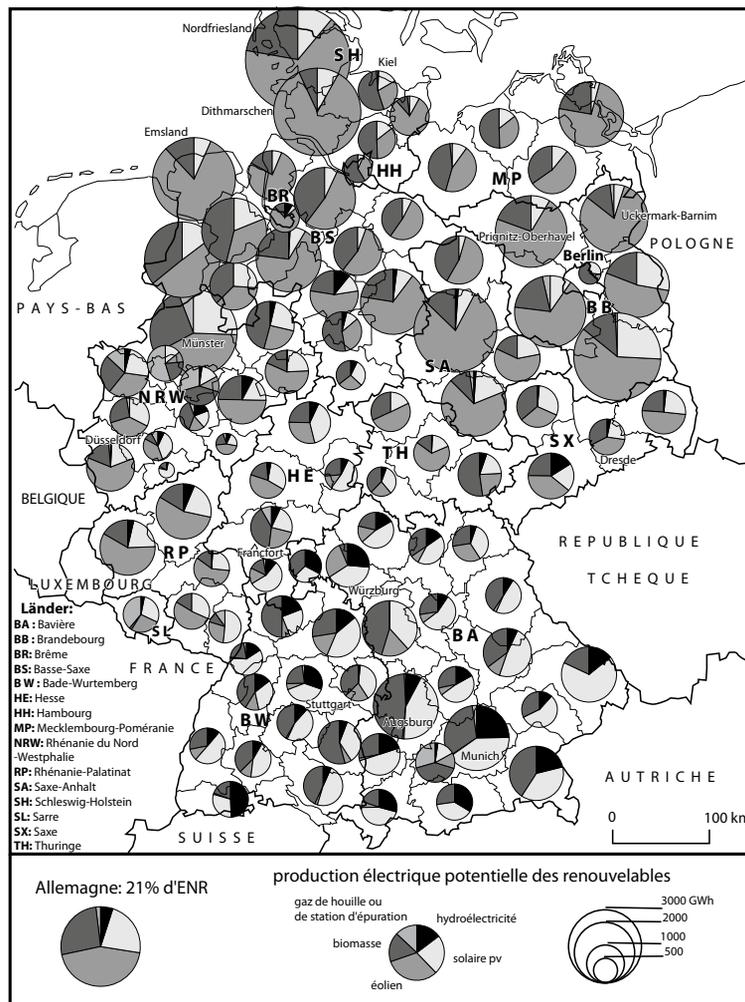


Figure 3. Capacités de production en électricité par les différentes sources d'énergie renouvelable dans les régions d'aménagement du territoire en 2010

(source des données : <http://www.energymap.info/>)

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.

Schwäbisch Hall, Würzburg, Kitzingen et du Main-Spessart.

La plus grande partie des *Länder* de Rhénanie-Palatinat, de Hesse, de Rhénanie-du-Nord-Westphalie, ainsi que de Thuringe et de Saxe présentent un profil relativement similaire, avec une capacité installée en renouvelables où prédomine largement l'éolien (au moins les deux-tiers du total), le reste étant constitué surtout par le solaire photovoltaïque avec un peu de biomasse. L'hydroélectricité ne joue un rôle que le long de la vallée de la Moselle. La plupart des *Kreis*, notamment les plus urbanisés (régions urbaines de Francfort-Mayence et du Rhin inférieur) n'utilisent qu'une faible part d'énergies renouvelables pour leur consommation d'électricité. 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 : 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 biomasse et de photovoltaïque : Waldeck-Frankenberg (36%), Borken (42%).

L'ensemble de l'Allemagne du Nord, du Schleswig-Holstein et de la Basse-Saxe au Brandebourg et à la Saxe-Anhalt rassemble la plus forte capacité de production d'électricité à partir de renouvelables. Plusieurs *Kreis* du Brandebourg et du Schleswig-Holstein produisent d'ailleurs plus que leur propre consommation d'électricité et, pour certains (Nordfriesland, Dithmarschen, Prignitz, Uckermark), c'est même 2 à 3 fois plus. Cela est dû d'abord à l'importance de l'éolien qui, dans la plupart des régions, représente plus des trois-quarts de la puissance installée. L'électricité produite à partir de biogaz occupe aussi une place importante en Basse Saxe et au Schleswig-Holstein. L'évolution récente a été marquée par la forte progression du photovoltaïque à la faveur de la frénésie d'investissements réalisés depuis 2008.

Le Brandebourg est ainsi devenu, devant la Bavière, le *Land* ayant la plus forte capacité photovoltaïque installée par habitant. Mais, contrairement à ce que l'on observe en Bavière

ou au Schleswig-Holstein, le photovoltaïque individuel sur toiture y est très peu développé. En Brandebourg, comme d'ailleurs dans les autres nouveaux *Länder* (Mecklembourg-Poméranie 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 (voir photo 1). Plusieurs anciens aérodromes ou camps d'entraînement militaires de l'Armée Rouge ainsi que des surfaces réhabilitées dans d'anciennes exploitations de lignite ont accueilli les plus grands parcs photovoltaïques d'Europe. Grâce à ses importantes capacités de production éolienne et photovoltaïque, le Brandebourg a même dépassé le Schleswig-Holstein pour la part de la production d'électricité issue des renouvelables. Elle atteint actuellement environ 70% de la consommation contre 50% dans le *Land* du nord de l'Allemagne.

Mais, du point de vue du mode de développement des énergies renouvelables, le contraste est particulièrement grand entre d'une part le Brandebourg et plus largement les nouveaux *Länder* et d'autre part le Schleswig-Holstein. Alors que, dans les nouveaux *Länder*, les parcs éoliens comme les parcs photovoltaïques ont été principalement réalisés par des sociétés privées souvent issues d'Allemagne de l'Ouest, le Schleswig-Holstein est par excellence la terre d'élection des parcs éoliens citoyens (*Bürgerwindparks*). Ces *Bürgerwindparks*, et plus récemment certains parcs solaires (*Bürgersolarparks*), ont été financés par des collectifs d'habitants qui se sont constitués en sociétés tirant ainsi les bénéfices des tarifs d'achat du courant issu des énergies renouvelables.

Ce tour d'horizon de l'état du développement des énergies renouvelables à l'échelle locale fait apparaître une grande diversité de situations. Celle-ci vient à la fois des sources d'énergie privilégiées, des formes de développement et des acteurs impliqués. Il est clair que 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. Si le solaire photovoltaïque joue, dans certaines régions d'Allemagne du Sud, un rôle prédominant, ailleurs c'est l'éolien qui domine et 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 : trouver des espaces disponibles suffisamment étendus pour collecter l'énergie nécessaire.

Aussi, la production décentralisée 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. Dans ces conditions, la centrale à gaz de Rhénanie du Nord-Westphalie, mise en marche pour compenser les fluctuations des renouvelables, relève davantage de la production décentralisée. À cela, il faut ajouter qu'avec la construction des grands parcs éoliens en mer du Nord, ce sont de véritables centrales de production centralisées, et particulièrement éloignées des consommateurs, qui vont être réalisées.

3. Les limites de la transition énergétique

A) Les limites des progrès quantitatifs

Les progrès accomplis par les énergies renouvelables en Allemagne sont pour le moins spectaculaires, à tel point qu'ils semblent laisser augurer de la possibilité d'accomplir la transition énergétique en quelques décennies.

Pourtant, ces progrès si visibles dans les paysages où les éoliennes comme les parcs photovoltaïques sont devenus particulièrement familiers dissimulent une réalité plus nuancée, voire même décevante. D'une part, il faut souligner que c'est seulement dans le secteur de la production d'électricité que des progrès importants 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].

Mais, même concernant la production d'électricité, il apparaît d'ores et déjà un certain nombre de limites. Si l'on observe la progression des capacités installées et de la part des énergies renouvelables dans la production d'électricité, on peut vite conclure à l'avènement rapide de la transition énergétique. Si l'on s'attache par contre à comparer l'évolution de la quantité d'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelable avec celle issue de sources d'énergie fossile, il apparaît que la transition énergétique est à peine amorcée et les sources traditionnelles restent très largement prédominantes (Figure 4).

Si l'on considère qu'il y a transition énergétique à partir du moment où les sources d'énergie renouvelable se substituent aux

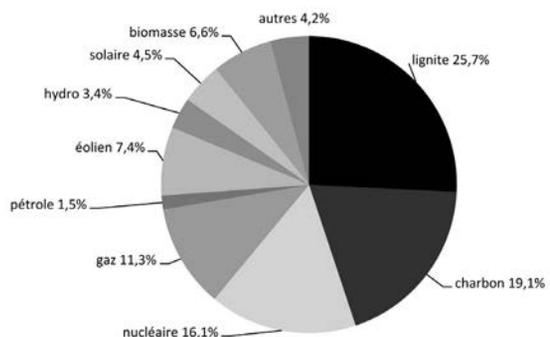


Figure 4. Part des différentes sources de production d'électricité en 2012. Production totale : 618 TWh (milliards de kWh)

énergies fossiles, alors il faut attendre 2011 pour voir apparaître cette évolution. 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 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). Par contre, de 2010 à 2012, on observe une baisse notable de la consommation d'électricité (-16 TWh), alors que les énergies renouvelables ont connu une forte augmentation, avec plus de 33 TWh supplémentaires produits, principalement grâce à la progression de la production des parcs photovoltaïques. En conséquence, de 2010 à 2012, la quantité d'électricité fournie par les énergies fossiles a diminué de 10%, soit environ 49 TWh, principalement du fait de l'arrêt de sept réacteurs nucléaires à la suite de la catastrophe de Fukushima. Reste à savoir si cette évolution favorable, due notamment à la baisse de la consommation, est une tendance de fond durable. On peut d'autant plus légitimement se poser la question 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 les véhicules électriques.

Dans ces conditions, 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 offshore [Bundesregierung, 2010 ; BMWI, 2013a, b]. 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*, déjà très avancé sur les côtes de la mer du Nord et qui commence tout juste pour les parcs à l'intérieur des terres, offre 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

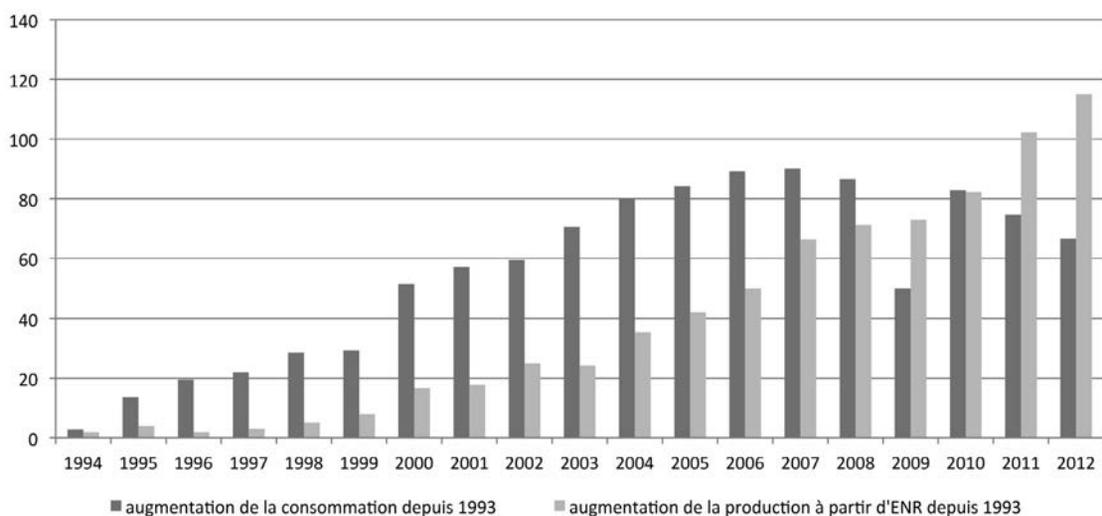


Figure 5. Augmentation de la consommation d'électricité totale et de la production à partir de sources renouvelables de 1993 à 2012 (en TWh)

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 en Basse Lusace (Brandebourg), atteint même le record de 7 MW.

B) Une contestation locale des effets de la course à la puissance éolienne

La rançon 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 mètres à la nacelle, on installe actuellement des machines qui dépassent 100 mètres, voire même 130 mètres de hauteur pour une envergure des pales de 90 à 100 mètres ! De telles géantes ont un impact paysager sans précédent comme on peut le constater avec les nouvelles éoliennes de la région de Wörrstadt (photo 2) ou de la forêt du Soonwald (photo 3) en Rhénanie-Palatinat. La construction de cette nouvelle génération d'éoliennes a déclenché localement des mouvements d'opposition dénonçant les effets catastrophiques pour les paysages. C'est le cas par exemple pour les éoliennes implantées durant l'hiver 2012 dans la forêt du Soonwald. Une initiative citoyenne s'est constituée contre le projet et a 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 5 la production d'électricité éolienne d'ici à 2020, elles ont recommandé de concentrer les éoliennes dans certains espaces, afin d'éviter qu'il n'y ait plus aucun paysage sans éolienne. Elles ont aussi 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 (Na-

tura 2000) ainsi que les réserves de biosphère et les zones centrales des parcs naturels soient considérées comme des zones d'exclusion de l'éolien.

D'autres mouvements d'opposition à l'éolien se sont formés dans des parcs naturels où il est déjà très présent. C'est le cas par exemple dans le Naturpark du Vogelsberg. Ce parc naturel a pourtant été le berceau de l'éolien continental en Allemagne et, dans les années 1990 et 2000, les éoliennes s'y sont multipliées sans rencontrer de résistance particulière. Mais ce qui est mis en cause par l'initiative citoyenne qui s'est constituée (<http://www.gegenwind-vogelsberg.de>) pour s'opposer aux nouveaux projets éoliens, c'est la dimension des machines et leur localisation dans la partie centrale du parc naturel. L'argumentation souligne aussi que les éoliennes sont déjà très nombreuses et mal partagées à l'intérieur de l'arrondissement de Gießen et plus largement dans le *Land* de Hesse. Les opposants ont le sentiment d'une concentration toujours plus grande de machines dans les mêmes endroits et il en résulte une saturation.

C) Les problèmes liés à l'intermittence de la production des renouvelables

Cependant, 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 qui complique beaucoup leur insertion dans le système électrique. Il existe en effet un déséquilibre important 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 plus importante, à la fois par la concentration du peuplement et la localisation de l'essentiel des industries. Les capacités de production photovoltaïque installées en Bade Wurtemberg et en Bavière sont loin de compenser ce déséquilibre qui devrait s'accroître beaucoup d'ici à 2020 avec la réalisation des parcs éoliens offshore. 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



Photo 2. Nouveau parc éolien en construction, près de Wörrstadt en Rhénanie-Palatinat
(Deshaies, 2013)



Photo 3. Nouvelles éoliennes dans la forêt du Soonwald, près de Ellern, en Rhénanie-Palatinat
(Deshaies, 2013)

moins partiellement compenser en assurant le transfert du courant produit en Allemagne du Nord par de nouvelles lignes à haute tension à construire. Suivant l'étude de l'agence de l'énergie allemande [IDENA, 2010], ce sont plus de 3500 km de lignes à haute tension qu'il faut créer ou renforcer d'ici à 2020 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.

Cela ne résoudra pas les problèmes résultant de l'intermittence de la production et surtout de son caractère relativement imprévisible. En effet, la nécessité de compenser les fluctuations de la production électrique des renouvelables et d'adapter ainsi la production aux variations de la consommation impose de disposer d'un parc de centrales thermiques au charbon ou à

gaz qui puissent être mises en service le moment voulu. Mais, au fur et à mesure que les capacités installées en renouvelables augmentent, les durées d'utilisation de ces centrales thermiques de réserve risquent de devenir de plus en plus faibles, si bien qu'elles ne sont plus rentables bien que toujours indispensables. Se pose alors la question du financement de ces centrales. Bien que les centrales à gaz semblent les plus adaptées à jouer ce rôle de compensation, on constate que les producteurs d'électricité hésitent désormais à se lancer dans ce type d'investissement et plusieurs centrales récemment construites risquent même d'être fermées.

Un autre problème lié au précédent et qui dérive de l'importance croissante des renouvelables est que, sur des périodes de plus en plus fréquentes, les parcs éoliens et photovoltaïques produisent trop de courant électrique par rapport à la consommation. Pour les gestionnaires de réseau qui, par la loi EEG de 2000, ont l'obligation d'acheter le courant issu des énergies renouvelables, se pose alors la question d'adapter la production à la consommation, soit en arrêtant des centrales thermiques (ce qui occasionne un coût), soit en payant une compensation aux producteurs de renouvelables dont on ne peut pas prendre le courant. Dans les deux cas de figure, cela représente un coût supplémentaire qui, d'une manière ou d'une autre, est répercuté sur le consommateur alors que le prix du courant électrique en Allemagne est déjà le plus cher d'Europe après le Danemark. Or, avec une capacité installée en renouvelables qui pourrait, dès 2020, dépasser 120 GW (soit l'équivalent de l'ensemble des capacités de production actuelles en fossiles et renouvelables), ces situations risquent de se multiplier [Frondel *et al.*, 2011].

En raison de l'importance de la production électrique allemande 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 ren-

dement. 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. Ces fluctuations dans les volumes des échanges d'électricité entre pays européens conduisent à certains moments à des prix négatifs du courant sur la bourse européenne EPEX ; ce qui signifie que les gestionnaires de réseau sont amenés à devoir trouver et à payer les consommateurs capables, à ce moment-là, d'absorber le courant produit [Frondel, 2011].

4. Conclusion

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. Par ailleurs, 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 à compenser les fluctuations de la production des renouvelables.

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. 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. Il conviendrait de coordonner mieux 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, pour des sociétés dont certaines sont en grandes difficultés économiques. ■

Bibliographie

- BBSR (2010) *Genügend Raum für den Ausbau erneuerbarer Energien? BBSR Berichte Kompakt* http://www.bbsr.bund.de/cln_016/nm_22710/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BerichteKompakt/2010/DL_13_2010.templateId=raw.property=publicationFile.pdf/DL_13_2010.pdf
- BMU (2013) *Das Energiekonzept der Bundesregierung 2010 und die Energiewende 2011*: http://www.netzentwicklungsplan.de/system/files/documents/Bundesregierung_Energiekonzept_Auszug.pdf
- BMW (2013a) *Energie in Deutschland. Trends und Hintergründe zur Energieversorgung*: http://www.bmw.de/Dateien/Energieportal/PDF/energie-in-deutschland.property=pdf,ber_eich=bmw2012.sprache=de.rwb=true.pdf
- BMW (2013b) *Energiewende in Deutschland auf Erfolgskurs. Maßnahmen für eine sichere, bezahlbare und umweltschonende Energieversorgung*: <http://www.bmw.de/DE/Mediathek/publikationen.did=573670.html>
- Bundesregierung (2010) *Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung*: <http://www.bundesregierung.de/Content/DE/Anlagen/2012/02/energiekonzept-final.pdf?blob=publicationFile&v=5>
- Brücher W. (2009) *Energiegeographie*, Gebrüder Borntraeger Verlagsbuchhandlung, Berlin, Stuttgart.
- Bruns E., Ohlhorst D., Wenzel B., (2010) *20 Jahre Förderung von Strom aus erneuerbaren Energien in Deutschland- eine Erfolgsgeschichte, Renew's Spezial*, Ausgabe 41: http://www.unendlich-viel-energie.de/uploads/media/41_Renews_Spezial_20_Jahre_EE-Strom-Foerderung.pdf
- Bruns E., Ohlhorst D., Wenzel B., Köppel J. (2009) *Erneuerbare Energien in Deutschland. Eine Biographie des Innovationsgeschehens*, Technische Universität Berlin: http://opus.kobv.de/tuberlin/volltexte/2010/2557/pdf/Erneuerbare_Energien_in_Deutschland_2009.pdf
- BWE (2012) *Repowering von Windenergieanlagen*: http://www.wind-energie.de/sites/default/files/download/publication/repowering-von-windenergieanlagen/repoweringbroschuere_2012_web.pdf
- DENA (2010) *Dena-Netzstudie II – Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015 – 2020 mit Ausblick 2025*: http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/Erneuerbare/Dokumente/Ergebniszusammenfassung_dena-Netzstudie.pdf
- Deshaias M. (2013) *Atlas de l'Allemagne*, 2^e édition, Autrement, Paris.
- Deshaias M. et Baudelle G. (2013) *Ressources naturelles et peuplement*, Ellipses, Paris.
- Frondel M., Ritter N., Schmidt C. (2011) *Teure Grünstrom-Euphorie: Die Kosten der Energiewende*: http://et-energie-online.de/Portals/0/PDF/zukunftsfragen_2011_12_komplett.pdf
- IEA -International Energy Agency- (2013) *Energiepolitik der IEA Länder, Deutschland Prüfung 2013*: <http://www.iea.org/media/executivesummaries/GermanyExecSumDEUTSCH.pdf>
- Krause, Bossel, Müller-Reißmann (1980) *Energiewende – Wachstum und Wohlstand ohne Erdöl und Uran*, S. Fischer Verlag.
- Mautz R., Byzio A., Rosenbaum W. (2008) *Auf dem Weg zur Energiewende : Die Entwicklung der Stromproduktion aus erneuerbaren Energien in Deutschland*, Universitätsverlag Göttingen: www.oapen.org/download?type=document&docid=353968
- Möller A. (2013) *Das Grüne Gewissen. Wenn die Natur zur Ersatzreligion wird*, Hanser Verlag, München.
- Scheer H. (1999) *Solare Weltwirtschaft, Strategie für die ökologische Moderne*, Kunstmann, München.
- Scheer H. (2005) *Energieautonomie, eine neue Politik für erneuerbare Energien*, Kunstmann, München.
- Sinn H.-W. (2008) *Das grüne Paradoxon*, Econ Verlag, Berlin.
- Smil V. (2010) *Energy transitions*, Praeger.

Sites internet consultés

- AGEB, groupe de travail sur les bilans énergétiques en Allemagne : <http://ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=1>
- BBSR, Institut fédéral de recherche sur la ville et l'aménagement de l'espace : http://www.bbsr.bund.de/nm_23470/BBSR/DE/Raumentwicklung/EnergieKlimaschutzpolitik/ErneuerbareEnergien/Projekte/EnergyMap/EnergyMap.html
- Ministère de l'Environnement : <http://www.bmu.de/>
- Ministère de l'Économie : <http://www.bmw.de/>
- Base de données sur les énergies renouvelables en Allemagne : <http://www.energymap.info/>
- Société allemande de l'énergie solaire : <http://www.dgs.de/>
- Portail internet de l'énergie solaire : <http://www.solarserver.de/service-tools/statistik-und-marktforschung/photovoltaik.html>
- Syndicat allemand de l'énergie éolienne : www.wind-energie.de
- Projet des régions à 100% d'énergies renouvelables : <http://www.100-ee.de/>
- Nabu Hunsrück : <http://www.nabu-rhein-hunsrueck.de/windkraftanlagen/>
- Initiative pour la défense des paysages du Vogelsberg contre l'éolien : <http://www.gegenwind-vogelsberg.de>