

La fin de l'électronucléaire en Allemagne, et après ?

Hartmut Lauer

L'Allemagne a définitivement abandonné l'électronucléaire le 15 avril 2023. En mettant à l'arrêt ses trois dernières centrales soit 4 GWe, le pays fait le pari de décarboner le secteur électrique sans l'atome tout en décarbonant les autres secteurs. Or le nucléaire est un moyen de production pilotable, seul apte à produire à la demande de très grandes quantités d'électricité décarbonée.

Le défi est colossal, car les objectifs de décarbonation du secteur électrique de l'Allemagne à l'horizon 2030 et au-delà sont très ambitieux (cf. tableau 1). A l'horizon 2030 la consommation brute sera en forte augmentation, estimée à 750 TWh contre 550 TWh aujourd'hui, sous l'effet des nouveaux usages de l'électricité. L'Allemagne veut, si possible, abandonner la production fondée sur le charbon en 2030 au plus tard. Par commodité le lignite et la houille-sont regroupés sous le terme « charbon » dans l'article.

Objectifs 2030		
Émissions du secteur d'électricité inférieures à 100 Mt CO ₂ éq	80% : part des énergies renouvelables à la consommation brute d'électricité soit 600 TWh de 750 TWh estimés	215 GW Photovoltaïque 30 GW Éolien en mer 115 GW Éolien terrestre (EEG 2023)
	Abandon de la production d'électricité à partir du charbon (dans l'idéal)	
	6 millions de pompes à chaleur	
	15 millions de véhicules électriques	
	10 GW électrolyseurs	
Objectifs 2035		
Consommation d'électricité quasi climatiquement neutre (Production d'électricité presque 100% renouvelable)	309 GW Photovoltaïque 40 GW Éolien en mer 157 GW Éolien terrestre (EEG 2023)	
Objectifs 2045		
Neutralité carbone (zéro émissions nettes)		

Tableau 1 : Objectifs du secteur électrique et nouveaux usages /1/, /2/, /3/

Les ministres de l'Environnement et de l'Économie se sont voulus rassurants. Dans un communiqué publié le 13 avril 2023 /22/, ils affirment que, malgré l'abandon du nucléaire, la sécurité d'approvisionnement en électricité ne serait pas en danger.

Pourtant, la situation de départ est très difficile. Les prix du kWh sont les plus élevés d'Europe et l'Allemagne, sevrée d'un gaz russe dont elle était fortement dépendante, a dû recourir en 2022 de façon accrue au charbon et au pétrole pour remplacer le gaz naturel, ce qui a entraîné une hausse des émissions dans le secteur de l'énergie, (cf. figure 1) /4/. Environ 90 % des émissions du secteur de l'énergie proviennent du

secteur électrique, soit environ 230 Mt CO₂éq (estimation provisoire), quantité environ dix fois supérieure à celles du secteur électrique français /5/.

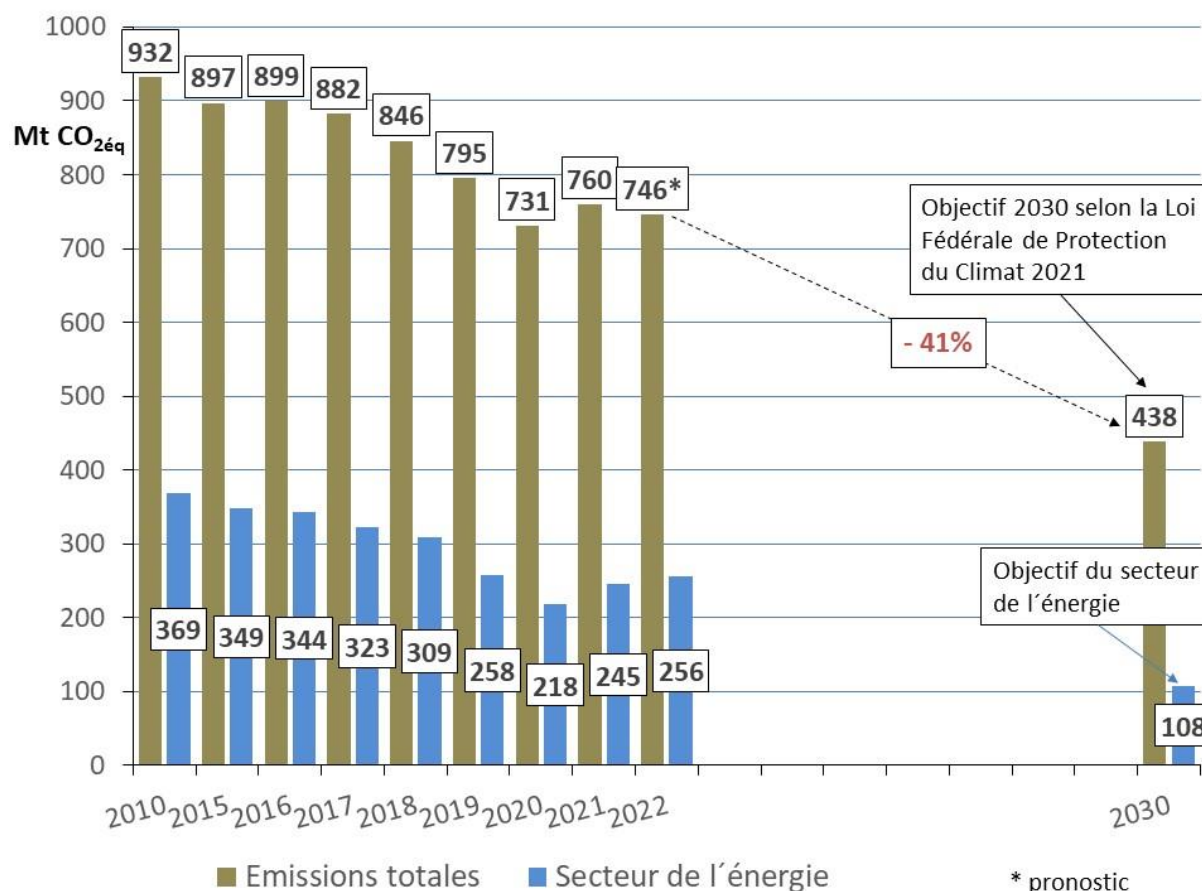


Figure 1 : évolution des émissions allemandes en millions de tonnes de CO₂ éq par an (hors secteur des terres et forêts - UTCATF) et objectif 2030

Pour atteindre l'objectif de la Loi Fédérale sur la Protection du Climat pour le secteur de l'énergie en 2030 /6/, les émissions du secteur électrique devraient être inférieures à 100 Mt CO₂éq. Le pays table sur un presque triplement (360 GW, cf. tableau 1) de la capacité éolienne et photovoltaïque (134 GW en 2022). Toutefois, en l'absence de dispositifs de stockage d'énergie suffisants, des moyens pilotables en support resteront indispensables pour suppléer l'intermittence des productions intermittentes. C'est pourquoi le gouvernement mise sur des centrales au gaz fossile durant la phase de transition, en substitution aux centrales nucléaires et à charbon, dans l'attente d'un remplacement progressif du gaz fossile par un hydrogène vert au-delà de 2030.

La sécurité d'approvisionnement en électricité sera-t-elle garantie en 2030 ?

Le régulateur (Agence Fédérale des Réseaux) a publié en février 2023 un « rapport » monitoring sur la sécurité d'approvisionnement en électricité à l'horizon 2030/31 /7/. Ce rapport évalue le risque vis-à-vis de l'équilibre offre-demande découlant d'une part de l'abandon du nucléaire et du charbon, et d'autre part de la montée en puissance

des énergies renouvelables (principalement intermittentes) portée à 80 % de la consommation brute d'électricité, le tout dans le contexte d'une augmentation significative de la consommation d'électricité sous l'effet des nouveaux usages de l'électricité. Le régulateur conclut à un critère de sécurité d'approvisionnement respecté avec des marges confortables, à condition de disposer de suffisamment de capacités pilotables et intermittentes, et d'un réseau correctement dimensionné. /8/.

Outre un presque triplement de la capacité éolienne et photovoltaïque d'ici 2030 (cf. tableau 1), le régulateur estime qu'une capacité de moyens pilotables d'environ 75 - 81 GW sera nécessaire. Ce parc serait composé des filières de production à base de gaz (cycle combiné et turbines à combustion), de fioul/divers, de bioénergies, de barrages hydro-électriques ainsi que de STEP (stations de transfert d'énergie par pompage essentiellement adaptées aux pointes de courte durée). Pour atteindre la capacité nécessaire, il recommande d'ajouter 17 à 21 GW de nouvelles centrales à gaz prêtes à fonctionner à terme avec de l'hydrogène (« hydrogen ready »).

Le Ministre Fédéral de l'Économie et de la Protection du Climat, Robert Habeck, a depuis annoncé son intention de présenter une stratégie de financement de nouvelles centrales à gaz. Selon les premières réflexions, il est prévu de construire jusqu'à 25 GW de moyens pilotables d'ici 2030, compatibles hydrogène /7/, /24/.

Mais, selon une étude de McKinsey, la pointe annuelle de consommation pourrait atteindre 96 GW en 2025 et jusqu'à 120 GW en 2030 /9/, par suite de l'émergence de nouveaux usages. Cette pointe intervient en hiver, le soir après le coucher du soleil, quand la contribution des énergies renouvelables intermittentes risque d'être insignifiante.

Le régulateur compte pour répondre à ces besoins sur la flexibilité du système, avec une modulation de la consommation à plusieurs niveaux et sur différentes échelles de temps, pour combler le déficit entre la capacité des moyens pilotables disponibles et la pointe de consommation. Un cadre complet de mesures d'effacement ou de déplacement temporaire de consommation (DSM – « Demand Side Management ») mobiliseront :

- Les consommateurs industriels électro-intensifs.
- Les électrolyseurs.
- Les pompes à chaleur.
- La recharge des véhicules électriques.

Le régulateur allemand estime entre 53 et 63 GW le potentiel d'effacement ou de déplacement temporaire de consommation, sans précisions sur les moyens d'assurer la faisabilité de cet objectif. De plus, l'Allemagne devrait faire un pas-de-géant en ce qui concerne la digitalisation des réseaux électriques et la mise en place des compteurs intelligents.

La Figure 2 illustre le scénario pour 2030, sur la base des données du rapport de gestion du réseau, avec une capacité de moyens pilotables d'environ 75 GW et une capacité de modulation de la consommation de 63 GW pour passer la pointe annuelle.

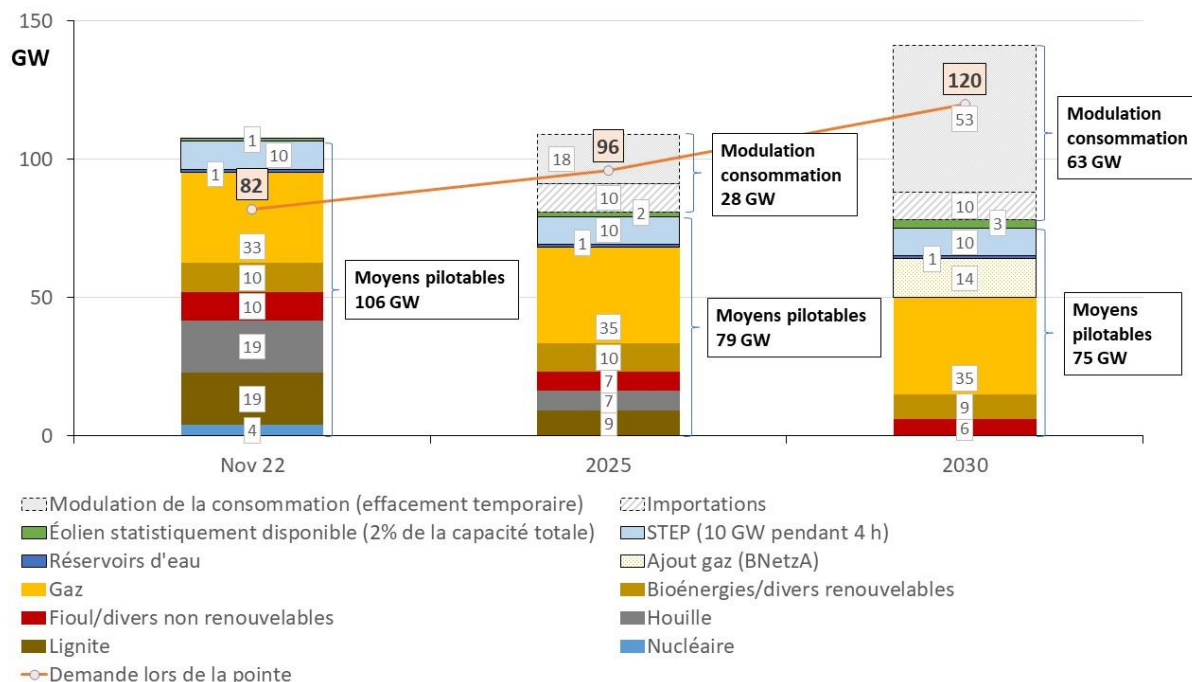


Figure 2 : scénario avec une capacité de moyens pilotables de 75 GW et une pointe annuelle de 120 GW en 2030

Mais lors de la pointe hivernale seuls 3 GW de la capacité totale des 145 GW d'éolien sont statistiquement disponibles (soit 2 % de la puissance installée terrestre et maritime), valeur confirmée par une étude de l'association européenne des producteurs d'électricité et de chaleur (VGB PowerTech e.V.). /23/. Quant aux 215 GW de capacités photovoltaïques, leur productivité hivernale diurne sera faible, très irrégulière, et ils devront temporairement être écrêtés en été pour éviter la congestion du réseau électrique.

Le régulateur part du principe que le marché intérieur européen de l'électricité fonctionne bien et que « l'ouverture des frontières » permettrait de compenser à moindre coût les fluctuations de la production et de la consommation grâce aux échanges transfrontaliers. L'effacement ou le déplacement de la consommation en Allemagne se réduirait ainsi à 53 GW (cf. figure 2) grâce aux importations d'électricité et à des dispositifs de stockage d'énergie apportés par les pays voisins.

Côté réseau, le régulateur recommande des mesures pour garantir les services système (maintien de la tension et de la fréquence, mise à disposition de la puissance réactive, redémarrage du réseau à la suite d'un « black-out »). Ces services système sont fournis jusqu'à présent par les machines tournantes des centrales conventionnelles (nucléaire, charbon) et devront être progressivement pris en charge par les énergies renouvelables, le stockage, la technologie de réseau et, le cas échéant, les centrales à gaz fossile/hydrogène. A ce titre, la localisation géographique

des nouvelles centrales à gaz est également importante pour préserver la stabilité des réseaux.

Le rapport du régulateur, très optimiste sur la sécurité d'approvisionnement, a suscité de nombreuses critiques. Des experts, comme McKinsey ^[9] et l'Association Fédérale de l'Économie Énergétique et des Eaux (BDEW) ^[10], mettent en doute le fait que les conditions soient remplies en temps voulu et dans leur intégralité. Par exemple, les hypothèses de construction de nouvelles centrales à gaz d'ici 2030 ne sont pas réalistes (délais, autorisations, construction) et les conditions actuelles du marché ne leur sont pas favorables car leur facteur de charge sera vraisemblablement très insuffisant pour être économiquement viable. La bascule vers l'hydrogène, du fait de la disponibilité d'un hydrogène à un prix raisonnable, reste très elle-même très incertaine.

McKinsey estime que sans l'ajout substantiel de nouveaux moyens pilotables dans les prochaines années, les centrales à charbon continueront à fonctionner au-delà de 2030 mettant ainsi à mal l'espérance d'une réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Une production d'électricité presque 100% renouvelable en 2035 nécessite une bascule rapide vers l'hydrogène

Le gouvernement allemand compte faire de l'hydrogène un pilier du système énergétique neutre en carbone et un Plan de Déploiement National de l'Hydrogène doté de 9 Mds € a été adopté en 2020 ^[11].

La nouvelle coalition gouvernementale vise au moins 10 GW d'électrolyseurs d'ici 2030 ^[12] produisant jusqu'à environ 28 TWh d'hydrogène « vert ». Près de 2 GW sont déjà en construction ou en cours de planification, avec une année de mise en service spécifiée jusqu'en 2030 ^[13]. La majeure partie de l'électricité requise sera produite dans des parcs éoliens en mer.

Toutefois, la capacité nationale de production d'énergies renouvelables ne suffira pas à couvrir la consommation d'hydrogène estimée à 90 - 130 TWh pour tous les secteurs d'ici 2030 ^[8]. Pour combler l'écart, les importations d'hydrogène seront aussi indispensables que les importations de gaz naturel aujourd'hui. Pour bénéficier d'avantages en matière de coûts, le gouvernement allemand part de l'hypothèse qu'une grande quantité d'hydrogène sera importée à l'horizon de 2030 selon la devise « Shipping the sunshine ». Elle repose sur un développement renforcé de partenariats internationaux, par exemple avec l'Australie et des pays d'Afrique australe et occidentale ^[12], ^[14], le transport par bateaux (sous forme d'ammoniac ou de méthanol) et un remplacement des terminaux méthaniers flottants construits en urgence depuis 2022 par des terminaux fixes.

Le basculement du gaz fossile à l'hydrogène va nécessiter, selon une étude de l'Institut Fraunhofer, des adaptations techniques parfois considérables des terminaux fixes à prendre en compte dès la conception et la construction /15/. La technologie d'une infrastructure de transport de l'hydrogène est cependant déjà maîtrisée en Allemagne, même si c'est dans un espace géographique restreint /13/ et l'association des gestionnaires de réseau de transport de gaz travaille actuellement dans le cadre du plan de développement du réseau gazier 2022-2032 à un réseau national d'hydrogène d'une longueur comprise entre 7 600 et 8 500 km à l'horizon de 2032 /16/. Il est prévu d'utiliser une grande partie du réseau gazier existant pour le futur réseau d'hydrogène, toutefois cette reconversion nécessite des mesures techniques d'adaptation.

Outre le réseau national, plusieurs connexions internationales sont prévues :

- Par suite d'un accord trouvé en 2022 avec la France, l'Allemagne sera connectée au pipeline européen d'hydrogène baptisé « H2Med ». Ce projet, censé être opérationnel en 2030, vise à développer l'emploi de l'hydrogène sur le continent. Le pipeline acheminera chaque année quelque deux millions de tonnes d'hydrogène, via le Portugal, l'Espagne et la France, soit 10% des besoins estimés en hydrogène de l'UE /17/ ;
- Des accords pour la construction de pipelines d'hydrogène entre la Norvège et l'Allemagne /18/ et entre le Danemark et l'Allemagne /19/ ont été signés en 2023.

Selon BDEW /13/ la montée en puissance d'une économie de l'hydrogène, qui n'en est qu'à ses débuts, est loin d'être acquise, malgré quelques projets pilotes. L'infrastructure d'approvisionnement est toujours en cours de planification, les électrolyseurs sont encore chers, leur rendement global est médiocre et leur durée de vie n'est pas encore économiquement viable. La question de savoir à quel prix l'hydrogène « vert » sera négocié à l'avenir est d'une importance fondamentale pour évaluer son rôle dans le futur mix énergétique. Il n'y pas encore de prix de marché pour cet hydrogène « vert », et BDEW estime qu'il serait actuellement au moins deux fois plus cher que l'hydrogène « gris » /13/, et qu'il faudra lui ajouter les coûts de transport à grande distance, inconnus actuellement.

Conclusion

Le tournant énergétique est un projet mammoth - probablement le plus grand programme d'investissement de l'histoire de la République Fédérale d'Allemagne - et les défis sont amplifiés par la crise énergétique, l'abandon du nucléaire, et celui du charbon dans un délai très court, espéré de 8 ans dans l'idéal.

La transition énergétique avance trop lentement selon les conclusions de l'Association Fédérale de l'Économie Énergétique et des Eaux (BDEW) dans son rapport « Fortschrittsmonitor » de février 2023 établi en coopération avec EY /13/. Bien que le gouvernement ait dernièrement mis en place d'importantes mesures d'accélération, le développement des énergies renouvelables est atone et l'évolution d'indicateurs

décisifs tels que l'impact environnemental et la soutenabilité financière est préoccupante (les prix moyens du kWh en Allemagne sont les plus élevés d'Europe).

Pour atteindre les objectifs d'une part de 80% d'énergies renouvelables à la consommation d'électricité d'ici 2030 et un mix électrique renouvelable à presque 100% en 2035, l'ajout annuel de capacités d'énergies renouvelables et de réseaux devrait être considérablement augmenté. Aux incertitudes financières, considérables, s'ajoutent les lenteurs des procédures d'autorisation et de construction et le manque de disponibilité des terrains, par exemple pour le développement des éoliennes terrestres.

Selon BDEW et McKinsey, les hypothèses du régulateur sur la construction de nouvelles centrales à gaz fossile, prêtes à fonctionner avec de l'hydrogène, ne sont pas réalistes, les centrales à charbon continueront donc certainement à fonctionner bien au-delà de 2030, réduisant d'autant l'espérance d'une baisse drastique et rapide des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur électrique. L'Allemagne sera vraisemblablement obligée de recourir davantage aux importations d'électricité en provenance des pays voisins, alors que ces derniers seront souvent dans la même situation.

Réalisme et acceptabilités économique et environnementale de la devise « Shipping the sunshine », insuffisance alarmante de main-d'œuvre qualifiée dans tous les secteurs concernés, accès précaire aux matières premières critiques sont autant d'obstacles. Le défi de l'Energiewende est gigantesque et son échec risquerait de compromettre la stature économique allemande et l'acceptation sociétale de la transition énergétique.

Références

/1/ **BMW** Unsere Energiewende: sicher, sauber, bezahlbar. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. En ligne :

<https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/energiewende.html>.

/2/ **OFATE (2022)** Bilan d'ouverture du ministre fédéral de l'Économie et du climat.

Office franco-allemand pour la transition énergétique. En ligne : <https://energie-fr-de.eu/fr/societe-environnement-economie/actualites/lecteur/bilan-douverture-du-ministre-federal-de-leconomie-et-du-climat.html>

/3/ **BMJ (2023)** EEG 2023 Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG 2023), Bundesministerium für Justiz,

Bundesamt für Justiz, en ligne : https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/BJNR106610014.html

/4/ **UBA (2023)** UBA-Prognose: Treibhausgasemissionen sanken 2022 um 1,9

Prozent. Communiqué de presse N° 11/2023 du 15.03.2023. Umweltbundesamt. En ligne : <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/uba-prognose-treibhausgasemissionen-sanken-2022-um>.

/5/ **RTE (2023)** Bilans électriques 2022. RTE – Réseau de transport d'électricité. En ligne :

<https://analysesetdonnees.rte-france.com/bilan-electrique-synthese>

/6/ Bundesregierung (2021) Loi sur la protection du climat 2021. Pacte intergénérationnel pour le climat. Bundesregierung Deutschland. En ligne : <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/loi-protection-du-climat-2021-1913974>.

/7/ BMWi (2023) Sichere Versorgung mit Strom bis Ende des Jahrzehnts gewährleistet. Communiqué de presse du 01.02.2023. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. En ligne : <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2023/02/20230201-sichere-versorgung-mit-strom-bis-ende-des-jahrzehnts-gewaerleistet.html?view=renderNewsletterHtml>.

/8/ Deutscher Bundestag (2023) Handlungsempfehlungen der Bundesregierung zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit mit Elektrizität. Drucksache 20/5555 vom 3.2.2023. Deutscher Bundestag. En ligne : <https://dserver.bundestag.de/btd/20/055/2005555.pdf>.

/9/ McKinsey (2023) Energiewendeindex von McKinsey: Versorgungssicherheit unter Spannung. McKinsey & Company. En ligne : <https://www.mckinsey.com/de/news/presse/2023-03-06-energiewende-index>.

/10/ BDEW (2023) BDEW zum Monitoringbericht Versorgungssicherheit Strom, Communiqué de presse du 01.02.2023, en ligne : <https://www.bdew.de/presse/presseinformationen/zum-monitoringbericht-versorgungssicherheit-strom/>

/11/ Bundesregierung (2020) Le gouvernement fédéral adopte une stratégie hydrogène. Bundesregierung Deutschland. En ligne : <https://www.bundesregierung.de/breg-fr/actualites/wasserstoffstrategie-kabinett-1758986>.

/12/ BMWi Wasserstoff: Schlüsselement für die Energiewende. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. En ligne : <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/wasserstoff.html>.

/13/ BDEW (2023) BDEW und EY veröffentlichen Fortschrittsmonitor zur Energiewende. Communiqué de presse du 06.02.2023. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.; EY. En ligne : <https://www.bdew.de/service/publikationen/bdew-und-ey-veroeffentlichen-fortschrittsmonitor-zur-energiewende/>.

/14/ BMBF (2022) Nationale Wasserstoffstrategie: Grüner Wasserstoff als Energieträger der Zukunft. Bundesministerium für Bildung und Forschung. En ligne : https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/energiewende-und-nachhaltiges-wirtschaften/nationale-wasserstoffstrategie/nationale-wasserstoffstrategie_node.html.

/15/ Fraunhofer ISI (2022) Haben LNG-Terminals eine klimaneutrale Zukunft? Communiqué de presse du 03.11.2022, en ligne : <https://www.isi.fraunhofer.de/de/presse/2022/presseinfo-25-lng-terminals-wasserstoff-ammoniak.html>

/16/ FNB Gas Wasserstoffnetz. Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas e.V. (FNB Gas). En ligne : <https://fnb-gas.de/wasserstoffnetz/>.

/17/ RWE (2023) „H2MED“: Pipelines sollen Europa mit Wasserstoff versorgen. RWE. En ligne : <https://www.en-former.com/h2med-pipelines-sollen-europa-mit-wasserstoff-versorgen/>.

/18/ Regjeringen Norway (2023) Joint Declaration - German-Norwegian Partnership on Climate, Renewable Energy and Green Industry. Communiqué de Presse du 05.01.2023. Norwegian Ministry of Trade, Industry and Fisheries. En ligne : <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/dep/smk/pressemeldinger/2023/tettere-samarbeid-mellom-norge-og-tyskland-for-a-utvikle-gronn-industri/joint-declaration->

[german-norwegian-partnership-on-climate-renewable-energy-and-green-industry/id2958104/](https://www.german-norwegian-partnership-on-climate-renewable-energy-and-green-industry/id2958104/).

/19/ BMWi (2023) Joint Statement Germany - Denmark on Green Hydrogen. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. En ligne :

<https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/J-L/20230324-joint-declaration-green-hydrogen.html>.

/20/ BCG (2021) Klimapfade 2.0 – Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft. Studie im Auftrag des BDI. Avec la collaboration de Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. (BDI). Bonston Consulting Group. En

ligne : <https://bdi.eu/publikation/news/klimapfade-2-0-ein-wirtschaftsprogramm-fuer-klima-und-zukunft/>.

/21/ OFATE (2023) Mémo actualisé sur le paquet législatif de printemps en Allemagne. Paquet législatif de printemps (Osterpaket) : Les principales nouvelles mesures législatives pour les énergies renouvelables. Office franco-allemand pour la transition énergétique. En ligne : <https://energie-fr-de.eu/fr/systemes-marches/actualites/lecteur/memo-actualise-sur-le-paquet-legislatif-de-printemps-en-allemande.html>.

/22/ BMWK/BMU (2023) Deutschland beendet das Zeitalter der Atomkraft, Communiqué de presse commun du 13.04.2023, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, en ligne :

<https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2023/04/20230413-deutschland-beendet-das-zeitalter-der-atomkraft.html>

/23/ Linnemann, Thomas ; Vallana, Guido (2019) (VGB Power Tech) Wind Energy in Germany and Europe, Status, potentials and challenges for baseload application, Part 1: European Situation in 2017, Atw. International Journal of Nuclear Power; Volume 64 (2019) Issue 2; p. 79 – 88

/24/ Tagesschau (2023) Energiebranche pocht auf neue Gaskraftwerke, Information vom 13.4.2023, en ligne : <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/verbraucher/energiebranche-gas-kraftwerke-101.html>